

# Max Planck FORSCHUNG

Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft **2.2016**



## Symmetrie

**FORSCHUNGSPOLITIK**  
Die digitale  
Zeitenwende

**ORNITHOLOGIE**  
Der  
Meistersinger

**INFORMATIK**  
Computer schneiden  
Grimassen

**SOZIOLOGIE**  
Der Preis  
der Unsicherheit



**SIEMENS**

Ingenuity for life

# Pictures of the Future

Das Magazin für Forschung und Innovation

## Dossier – Autonome Systeme

Über eine der revolutionärsten Veränderungen,  
die die Industrie je erlebt hat.

[siemens.de/pof-autonome-systeme](http://siemens.de/pof-autonome-systeme)

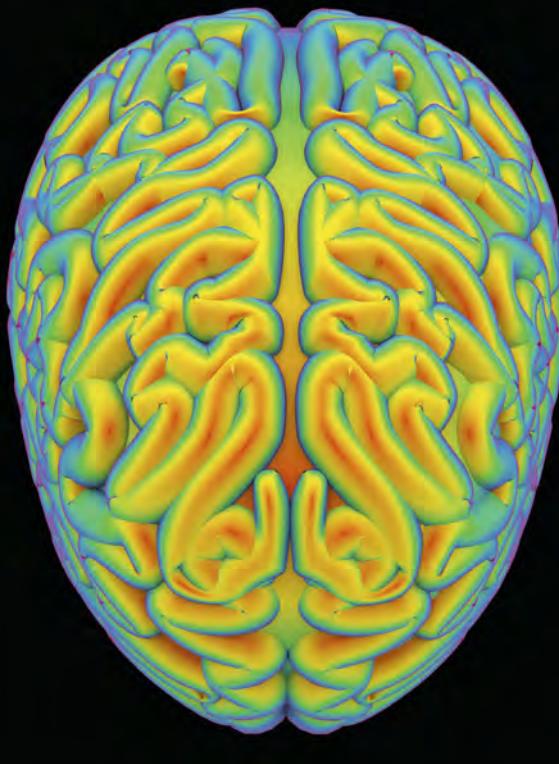


## Geschmackssache

Wenn es um Musik geht, sind die Geschmäcker bekanntlich verschieden. Doch warum machen und hören Menschen eigentlich Musik? Warum gehen sie immer noch ins Konzert, obwohl es alles längst auf Tonträgern oder digital gibt? Worin besteht ein Musikerlebnis? Der richtige Ort, um nach Antworten auf diese Fragen zu suchen, ist das ArtLab des Max-Planck-Instituts für empirische Ästhetik in Frankfurt. Dank seiner besonderen technischen Ausstattung ist der multifunktionale Veranstaltungsraum Konzertsaal und Labor in einem. Klänge, Mimik, Gestik, Bewertungen sowie verschiedene physiologische Daten der Künstler wie vor allem auch der bis zu 46 Zuhörer lassen sich dort synchron erfassen und auswerten.

Im Mai 2016 war das Vokalensemble Cut Circle am Institut zu Gast. Drei Tage lang standen das amerikanische Oktett und sein Dirigent Jesse Rodin den Forschern im ArtLab zur Verfügung. Während die Sängerinnen und Sänger unterschiedlichste Stücke aus ihrem großen Repertoire Alter Musik vortrugen, wurden umfangreiche Daten wie EEG, EKG, Atemfrequenz und Bewegungsmuster der Künstler aufgezeichnet.

Beim abschließenden Konzert war dagegen das Publikum Gegenstand der Forschung. Klebe-Elektroden an den Fingern maßen den Hautleitwert, ein Armband den Puls der Konzertbesucher, während diese der Aufführung lauschten. Gleichzeitig wurden über Tabletcomputer Selbstauskünfte zur Rezeption und Bewertung der Aufführung erhoben. Das Programm des Abends bezog sich übrigens unter dem Titel „My Fair Lady“ auf die außergewöhnliche Verehrung der Jungfrau Maria im 15. und 16. Jahrhundert, die sich auch in der Musik dieser Epoche niederschlägt.



## 18 SYMMETRIE

### 18 Ein Wurm sucht seine Mitte

Spiegelbildliche Körperhälften sind ein fundamentales Konstruktionsprinzip höherer Lebewesen. Jochen Rink vom Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik untersucht am Beispiel von Plattwürmern, wie der symmetrische Aufbau des Körpers zustande kommt.

### 26 Materie im Vampirtest

Alles, was im Universum existiert, verdankt sein Dasein einer winzigen Ungleichheit zwischen Materie und Antimaterie. Wie sie entsteht, ist eine fundamentale Frage der Physik. Forschergruppen an Max-Planck-Instituten in Heidelberg, München und Garching suchen mit unterschiedlichen Ansätzen nach einer Antwort.

### 34 Das schafft unser Gehirn mit links

Unser Körper wirkt auf den ersten Blick symmetrisch, ist es aber in Wirklichkeit nicht. So scheint etwa die Asymmetrie des Gehirns wichtig zu sein, damit Denken, Sprechen und Motorik funktionieren. Forscher am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik untersuchen die Hintergründe dieses Phänomens.

**ZUM TITEL** Sie findet sich in den elementaren Materiebausteinen ebenso wie in den Weiten des Universums, an Blumen, Schmetterlingen und im eigenen Körper: Die Symmetrie ist tief in der Natur verankert. Perfekte Symmetrie ist allerdings selten, und oft liegt gerade in den kleinen Unterschieden der entscheidende Vorteil für unsere Existenz.

# Inhalt



**10** Im Computermodus: Die Bereitstellung von Informationen hat sich in jüngster Zeit rasant gewandelt.

## PERSPEKTIVEN

- 06** Im Zeichen der Informatik
- 06** Preiswürdiges Spezialflugzeug
- 07** „Damit kehrt man der Aufklärung den Rücken“
- 08** Teamwork für die Energie von morgen
- 08** Neuer Ansatz zur Behandlung von Schizophrenie
- 09** Offene Türen am Campus Tübingen
- 09** Ins Netz gegangen

## ZUR SACHE

- 10** **Die digitale Zeitenwende**  
Große Datens Mengen lassen sich immer einfacher speichern, übertragen und auswerten. In der Wissenschaft kann das eine neue Dynamik entfachen.

## FOKUS

- 18** Ein Wurm sucht seine Mitte
- 26** Materie im Vampirtest
- 34** Das schafft unser Gehirn mit links



**48** Im Gesangsmodus: Mit lauter Stimme zeigt ein Buchfinkmännchen, wer Herr im Revier ist.



**62** Im Expeditionsmodus: Die Meeresbiologin Antje Boetius hat die Ausrüstung für die nächste Ausfahrt gepackt.



**70** Im Krisenmodus: Die Schere zwischen Arm und Reich öffnet sich in Europa immer weiter.

## SPEKTRUM

- 42** Eine Formel gegen Stromausfall
- 42** Neue alte Medikamente gegen Viren
- 43** Zum Nutzen der Nachzügler
- 43** Spannung in der Kinoluft
- 43** Legierungen werden fest und formbar
- 44** Das versteckte Innenleben des Orionnebels
- 44** Das Glück der Anderen
- 45** Vom Feind zum Freund
- 45** Seit Jahrtausenden beeinflusst der Mensch das Ökosystem
- 45** Die Effekte bakterieller Eiskeime
- 46** Muttis Lieblinge
- 46** Schwarzes Loch in einer einsamen Galaxie
- 47** Gravitationswellen, die Zweite
- 47** Klatsch und Tratsch im Kindergarten
- 47** Bartagamen im Tiefschlaf

## BIOLOGIE & MEDIZIN

- 48** **Der Meistersänger**  
Vogelgezwitscher ist vielen Menschen Musik in den Ohren. Doch es gibt einen Vogel, der harmonischer singt als alle anderen. Forscher haben sein Geheimnis gelüftet.

## MATERIAL & TECHNIK

- 54** **Computer schneiden Grimassen**  
Figuren in Filmen und Computerspielen zu animieren ist aufwendig und teuer. Mit einer einfacheren Methode eröffnen Forscher neue, ungeahnte Möglichkeiten.

## UMWELT & KLIMA

- 62** **Der Tiefsee auf den Grund gehen**  
Zur Person: Antje Boetius

## KULTUR & GESELLSCHAFT

- 70** **Der Preis der Unsicherheit**  
Die Spielregeln des freien Marktes durchdringen die Gesellschaft immer mehr. Auch außerhalb der Wirtschaft wird die Lage instabil. Wie gehen die Menschen damit um?

## RUBRIKEN

- 03** **Orte der Forschung**
- 16** **Post vom Amazonas, Brasilien**  
Auf leisen Sohlen durch den Regenwald
- 76** **Rückblende**  
Liaison im Reagenzglas
- 78** **Neu erschienen**
- 78** Reiner Klingholz, Wolfgang Lutz, Wer überlebt?
- 79** Michael Madeja, Joachim Müller-Jung, Hirnforschung – was kann sie wirklich?
- 80** Gerhard Ertl, Jens Soentgen, N
- 81** Christian J. Meier, Eine kurze Geschichte des Quantencomputers
- 82** Klaus Liebers, Das Wunder Vakuum
- 83** **Standorte**
- 83** **Impressum**

# Im Zeichen der Informatik

Max-Planck-Gesellschaft trifft sich zur Jahresversammlung in Saarbrücken



Saarbrücken als Exzellenzstandort der Informatik prägte das zentrale Thema der Festversammlung, die traditionell die Jahresversammlung der Max-Planck-Gesellschaft abschließt. Präsident Martin Stratmann thematisierte in seiner Rede die Zeitenwende durch die Digitalisierung (siehe Seite 10 ff.). Im Anschluss stand das Thema „Das Internet der Dinge“ im Mit-

Zeitenwende: Mit einer Rede zur Tragweite der Digitalisierung eröffnete Max-Planck-Präsident Martin Stratmann die Festversammlung, die im Industriedenkmal Alte Schmelz bei Saarbrücken stattfand.

telpunkt, also die zunehmende Vernetzung von Alltagsgegenständen mit dem Internet und untereinander. Der Kryptologie-Experte und Preisträger des Turing Award Adi Shamir vom Weizmann-Institut in Israel widmete sich als Keynote Speaker den Herausforderungen dieser Entwicklung, insbesondere bei der Datensicherheit.

Im Anschluss diskutierte Shamir seine Thesen auf dem Podium mit Dietmar Harhoff vom Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb, Ulrich Sieber vom Max-Planck-Institut für ausländisches und internationales Strafrecht sowie Joachim Buhmann, Direktor des Instituts für Maschinelles Lernen an der ETH Zürich. Zuvor waren auf der zweitägigen Jahresversammlung die Direktorinnen und Direktoren der Max-Planck-Institute sowie die zentralen Entscheidungsgremien der Forschungsorganisation zusammengekommen.



Filme von der Festversammlung: [www.mpg.de/jv2016](http://www.mpg.de/jv2016)

## Preiswürdiges Spezialflugzeug

Max-Planck-Gesellschaft sponsert „Jugend forscht“-Preisträger

Deutschlands beste „Jugend forscht“-Teilnehmer sind im Mai in Paderborn ausgezeichnet worden. Den Preis in der Kategorie Physik stiftet seit geraumer Zeit die Max-Planck-Gesellschaft. Dieses Jahr überreichte Karsten Danzmann, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, die Auszeichnung an Ivo Zell aus Hessen. Der 17-Jährige hat das Modell eines sogenannten Nurflüglers gebaut: Im Vergleich zu konventionellen Fliegern zeichnet sich dieser Typ durch eine optimierte Aerodynamik und einen deutlich geringeren Treibstoffverbrauch aus. Doch die speziellen Flugzeuge haben auch Nachteile:

Sie kommen leicht ins Trudeln und sind nur schwer zu steuern.

Aufbauend auf einem Konzept aus den 1930er-Jahren, konstruierte Ivo Zell einen Nurflügler mit stabilem Flugverhalten. Dessen Eigenschaften untersuchte er theoretisch und experimentell mit selbst entworfenen Messinstrumenten. Während sich der junge Forscher über die Ehrung freute, wurden bei dem Max-Planck-Direktor Erinnerungen wach: Karsten Danzmann war Ende der 1960er-Jahre selbst Preisträger bei „Schüler experimentieren“, dem Forscherwettbewerb für Mädchen und Buben unter 15 Jahren.

Überflieger: Preisträger Ivo Zell erhielt seine Urkunde von Max-Planck-Direktor Karsten Danzmann.



# „Damit kehrt man der Aufklärung den Rücken“

Ralph Hertwig, Direktor am Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, kritisiert den Versuch, Bürger mit psychologischen Tricks zu gewünschtem Verhalten zu bewegen.

Der Mensch ist unvollkommen. Er handelt oft bequem statt rational, genussorientiert statt gesundheitsbewusst. Manche Politiker würden das gern ändern, vor allem, wenn das Verhalten öffentliche Gelder kostet, die Gesundheit oder die Umwelt schädigt. Psychologen und Verhaltensökonomen aus den USA haben neue Möglichkeiten aufgezeigt, das Verhalten der Bürger in gewünschte Richtungen zu steuern. „Nudging“ heißt die Methode, übersetzt in etwa „stupsen“. Auch in Deutschland wird darüber diskutiert. Ralph Hertwig vom Max-Planck-Institut für Bildungsforschung über den Sinn und Unsinn von Nudging.

*Herr Hertwig, mit welchen Mitteln werden Leute dazu bewegt, ihr Verhalten zu ändern?*

**Ralph Hertwig:** Die Idee ist, das Ziel zu erreichen, ohne finanzielle Anreize zu schaffen oder etwas zu verbieten. Stattdessen nutzt man typisch menschliche Schwächen, Fehler oder Defizite aus, die den Menschen in der Regel nicht bewusst sind. Die meisten werden es also gar nicht merken, wenn sie genudgt werden.

*Haben Sie ein Anwendungsbeispiel?*

Ein großes Thema in diesem Kontext ist die Organspende. Bei uns in Deutschland sieht das Transplantationsgesetz vor, dass Leute aufgefordert werden, aktiv zu prüfen und zu entscheiden, ob sie Organe nach ihrem Tod spenden wollen – sie müssen jedoch keine Entscheidung treffen. Der Nudging-Ansatz ist, die Wahl umzukehren, sodass jeder zum Organspender wird, der nicht ausdrücklich widerspricht. Da so ein Widerspruch aufwendiger ist, als nichts zu tun, kann man davon ausgehen, dass nur wenige Leute widersprechen würden.

*Wäre es nicht wünschenswert, wenn es mehr Spenderorgane gäbe?*

Doch, ganz sicher. Ich sehe allerdings den Weg kritisch, den man mit so einer Vorgabe einschlägt. Denn damit unterstellt man, dass die meisten Bürger Organspender werden möchten und nur aus Trägheit keinen Organspendeausweis ausfüllen. Grundsätzlich argumentieren die Befürworter, dass Nudging die Menschen zu Entscheidungen

bringt, die sie selbst gutheißen. Aber das verkennt die Vielfalt der menschlichen Präferenzen. So gibt es durchaus nachvollziehbare Gründe gegen Organspende. Aus meiner Sicht ist die Entscheidung dafür oder dagegen so persönlich und so bedeutsam, dass sie jeder bewusst treffen sollte.

*Sie sehen die Methode also kritisch?*

Was mich stört, ist das Menschenbild dahinter: Der Mensch wird als defizitär angesehen, als zu träge, selbst zu denken. Die Nudger haben es aufgegeben, Menschen kompetenter zu machen und sie dazu zu bewegen, sich ihres eigenen Verstandes zu bedienen. Damit kehren sie in gewisser Weise der Aufklärung den Rücken.

*Werden wir nicht alle schon längst subtil beeinflusst, beispielsweise durch Werbung?*

Tatsächlich ist Nudging nichts Neues. Im Supermarkt werden die billigen Produkte schon lange unten im Regal platziert, die teuren dagegen in Augenhöhe, weil sie sich dann besser verkaufen. Neu ist, Nudging für staatliche Ziele einzusetzen und die Bürger mithilfe solcher Tricks zu beeinflussen. Das setzt allerdings voraus, dass der Staat es grundsätzlich gut meint – eine vermutlich sehr naive Annahme. Dazu kommt, dass die Nudger anscheinend für sich in Anspruch nehmen, frei von den Defiziten zu sein, die sie anderen unterstellen.

*Lehnen Sie Nudging grundsätzlich ab?*

Ich möchte das nicht in ein Schwarz-Weiß-Schema einordnen. Es gibt Situationen, in denen gewisse Formen von Nudging sinnvoll sein können. Ich halte es zum Beispiel durchaus für legitim, in der Schulcafeteria, Obst und Gemüse gut erreichbar aufzustellen und süße Sachen eher am Rand, damit Kinder sich gesünder ernähren. Man muss aber genau abwägen, wann die Methode angemessen und nicht einfach bevormundend ist und welchen Effekt sie erzielt.

*Aber wirkungsvoll ist das Vorgehen doch, oder?* Ja, aber oft mit begrenzter Reichweite. Im Beispiel mit der Schulcafeteria endet die Wirkung des Nudgings am Schulausgang. Wenn die Kinder rausgehen, sind sie genau



Ralph Hertwig

den Versuchungen ausgesetzt, die man vorher so sorgfältig vermieden hat: in der Eisdiele, beim Bäcker, im Supermarkt. Und natürlich spielt das Essen in der Familie eine große Rolle, aber bis dahin reicht der Einfluss erst recht nicht.

*Was wäre denn die Alternative?*

Wir müssen die Leute darin unterstützen, gute Entscheidungen zu treffen. Das Konzept nennen wir „Boosting“, also die Menschen stärken. Um gesunde Ernährung zu fördern, sollte man aus unserer Sicht Kindern von klein auf beibringen, welches Essen gut für sie ist und warum. Und man könnte Eltern Tipps geben, wie sie sinnvolles Essverhalten mit ihren Kindern üben. Boosting nutzt wie Nudging wissenschaftliche Erkenntnisse, setzt sie aber konstruktiv ein. Da gibt es ein schönes Beispiel: Viele Kinder haben Angst vor Zahlen und tun sich deswegen schwer in Mathematik. Eine Studie aus den USA hat gezeigt: Wenn Kinder ein paarmal in der Woche anstelle der üblichen Gutenachtgeschichte eine Geschichte mit Zahlen vorgelesen bekommen und dabei spielerisch Mitzählen und Rechnen üben, steigen ihre Schulleistungen in Mathematik deutlich. Das ist genau der Ansatz von Boosting. Im Nudging würde man eher versuchen, die Angst vor Mathematik auszunutzen. Darin liegt für mich der entscheidende Unterschied.

Interview: Mechthild Zimmermann

# Teamwork für die Energie von morgen

MAXNET Energy vereint Kompetenz von zehn Partnern



Eine wesentliche Voraussetzung für die Energiewende ist, den durch Windräder oder Solaranlagen gewonnenen Strom in großem Maßstab zu speichern. Viel Potenzial haben „Power to Gas“-Anla-

gen, die den Strom aus erneuerbaren Quellen zur Erzeugung von Wasserstoff nutzen und auf diese Weise lagerbar machen. Allerdings ist die Elektrolyse von Wasser – also die Erzeugung von Wasser-

Gemeinschaftsprojekt: Teresa Sullivan, Präsidentin der University of Virginia, und Max-Planck-Präsident Martin Stratmann unterzeichneten das Abkommen für MAXNET Energy.

stoff durch die Spaltung von Wasser mit Strom – noch nicht ausgereift. Die dafür verwendeten Katalysatoren sind entweder haltbar, aber teuer; oder sie kosten wenig, aber verschleißt leicht.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma sucht das neu ins Leben gerufene Projekt MAXNET Energy. Beteiligt sind Wissenschaftler unterschiedlichster Disziplinen aus den Max-Planck-Instituten für chemische Energiekonversion, Eisenforschung, Kohlenforschung, Polymerforschung, Kolloid- und Grenzflächenforschung, Chemische Physik fester Stoffe, Dynamik komplexer technischer Systeme und dem Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft. Dazu kommen Partner vom britischen Cardiff Catalysis Institute und der University of Virginia, USA. Im April wurde ein entsprechendes Kooperationsabkommen unterzeichnet.

## Neuer Ansatz zur Behandlung von Schizophrenie

Lead Discovery Center kooperiert mit Boehringer Ingelheim

Am Lead Discovery Center (LDC) wird derzeit eine neue Wirksubstanz zur Behandlung von Schizophrenie entwickelt. Der Ansatz basiert auf der Forschung von Moritz Rossner und seinem Team am Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin in Göttingen. Die Wissenschaftler untersuchen, welche Rolle Risikogene in Kombination mit umweltbedingtem Stress bei der Entstehung der Krankheit spielen, und sie erforschen die zugrunde liegenden molekularen Mechanismen.

Ziel der Zusammenarbeit mit dem LDC ist, darauf aufbauend eine neue, therapeutisch wirksame Substanz gegen Schizophrenie zu finden. Sie soll zu einem potenziellen

Arzneistoff weiterentwickelt werden, der dann von der Industrie in die präklinische und klinische Entwicklung überführt werden kann. Daran beteiligt ist nun auch das Pharmaunternehmen Boehringer Ingelheim. Im Mai schloss die Firma einen entsprechenden Vertrag. Im Gegenzug erhält Boehringer Ingelheim die Option, den neuen Wirkstoff exklusiv zu lizenziieren.

Das LDC wurde 2008 als Tochter von Max-Planck-Innovation, dem Technologie-transfer-Unternehmen der Max-Planck-Gesellschaft, gegründet. Das LDC soll die Lücke zwischen Grundlagenforschung und Anwendung bei der Entwicklung neuer Medikamente schließen.



Potenzial: Moritz Rossner vom Max-Planck-Institut für experimentelle Medizin hat vielversprechende Ergebnisse gewonnen.

# Offene Türen am Campus Tübingen

Max-Planck-Institute laden Öffentlichkeit ein, auch um sie über Tierversuche zu informieren

Bei einem gemeinsamen Tag der offenen Tür haben sich die drei Max-Planck-Institute auf dem Campus in Tübingen im Juni den Bürgern vorgestellt. Fast 1000 Besucher kamen, um sich über Themen wie DNA-Sequenzierung, Bewegungssimulatoren und Roboterentwicklung zu informieren, aber auch über Tierversuche – insbesondere am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik. Seit der Veröffentlichung von Filmaufnahmen im September 2014 steht das Institut im Fokus von Tierschutzaktivisten.

Den Wissenschaftlern war es ein zentrales Anliegen, die Notwendigkeit von Tierversuchen in der Grundlagen-

forschung zu erläutern und live Einblicke in die Tierhaltung zu geben. Dazu wurde eigens ein Informationsraum eingerichtet, in dem Mitarbeiter für Fragen bereitstanden. Zwei ausführliche Vorträge lockten insgesamt mehr als 100 Zuhörer. „Natürlich waren auch Besucher da, die Tierversuche grundsätzlich ablehnen“, sagt Christina Bornschein, Pressebeauftragte am Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik. „Aber insgesamt gab es einen angeregten Austausch, und es kam bei den Besuchern sehr gut an, dass wir unsere Forschung offen dargestellt und auch kritische Fragen ausführlich beantwortet haben.“

Transparenz: Der Max-Planck-Gesellschaft ist es wichtig, die Forschung an Tieren offen darzustellen. Eine Broschüre erklärt, warum Tierversuche notwendig sind.



## Ins Netz gegangen



### Ethnologen bloggen

Ob über Flüchtlingspolitik, die Brexit-Entscheidung der Briten oder TTIP – der Blog des Max-Planck-Instituts für ethnologische Forschung in Halle ist eine Fundgrube für alle politisch und wirtschaftlich Interessierten. Die persönlichen Beiträge von Chris Hann, Matthijs Krul, Sylvia Terpe, Lale Yalçın-Heckmann und einigen ihrer jüngeren Kollegen stimmen nachdenklich und entführen die Leser nach China, Russland und in die Türkei sowie in Regionen der Welt, die vielen unbekannt sein dürften.

[www.eth.mpg.de/3557160/blog](http://www.eth.mpg.de/3557160/blog)

### #ThatsMyScience

Der Campus Tübingen stellt junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf einer neuen Webseite vor: Sie beantworten Fragen zu ihrer Forschung, ihrer Motivation und was ihnen an Tübingen gefällt. Videos und Bilder sowie Posts auf Twitter und Facebook machen neugierig und locken vielleicht Studierende in die Stadt zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb. An der Aktion beteiligt sind unter anderem die Max-Planck-Institute für biologische Kybernetik, für Entwicklungsbiologie und für Intelligente Systeme sowie das Friedrich-Miescher-Laboratorium.

<http://tuebingenresearchcampus.com/research-in-tuebingen/thats-my-science>

### Forschungsort Meer

Eintauchen in die Meeresforschung: Im Wissenschaftsjahr 2016\*17 mit dem Motto „Meere und Ozeane“ rückt das gleichnamige Dossier maritime Themen aus Max-Planck-Instituten in den Fokus. Wird die Arktis bald eisfrei sein? Welche Rolle spielen Mikroorganismen in der Nahrungskette der Meere und für unser Klima? Wie wichtig sind Häfen für Kultur- und Handelsräume? Bis zum September 2017 laden darüber hinaus zahlreiche Veranstaltungen, Ausstellungen und Projekte zum Dialog und zum Mitmachen ein.

[www.mpg.de/dossier/meere-und-ozeane](http://www.mpg.de/dossier/meere-und-ozeane)

# Die digitale Zeitenwende

Die enormen Entwicklungen im Bereich von Speicherung, Übertragung und Auswertung gewaltiger Datenmengen, der sogenannten Big Data, führen nicht nur zu einer rasanten Veränderung unseres Alltags, es entsteht auch eine neue Dynamik in der Wissenschaft: Forschungsfelder werden neu definiert, traditionelle Abgrenzungen etablierter Fachbereiche verlieren ihre Bedeutung.

TEXT MARTIN STRATMANN

Wer bei Google „Chancen und Risiken der Digitalisierung“ eingibt in Verbund mit dem Stichwort „Rede“, der erhält fast 3000 Treffer – wer das Ganze auf Englisch eintippt, der erhält bescheidene sieben Suchergebnisse. Offenbar herrscht in Deutschland mehr Diskussionsbedarf beim Thema Digitale Gesellschaft, als dies anderswo der Fall zu sein scheint. Die Frage ist: Reden wir mehr, als wir tun? Nicht nur in der Forschung, nicht nur bei

---

Rechner werden bereits in zehn Jahren 60-mal schneller sein als heute

uns, auch gesamtgesellschaftlich muss Deutschland die Zeichen der Zeit erkennen und handeln. Deswegen: Ja, wir müssen reden! Nicht nur über Digitalisierung, sondern auch über die damit verbundene Transformation, die alle gesellschaftlichen Bereiche erfasst hat.

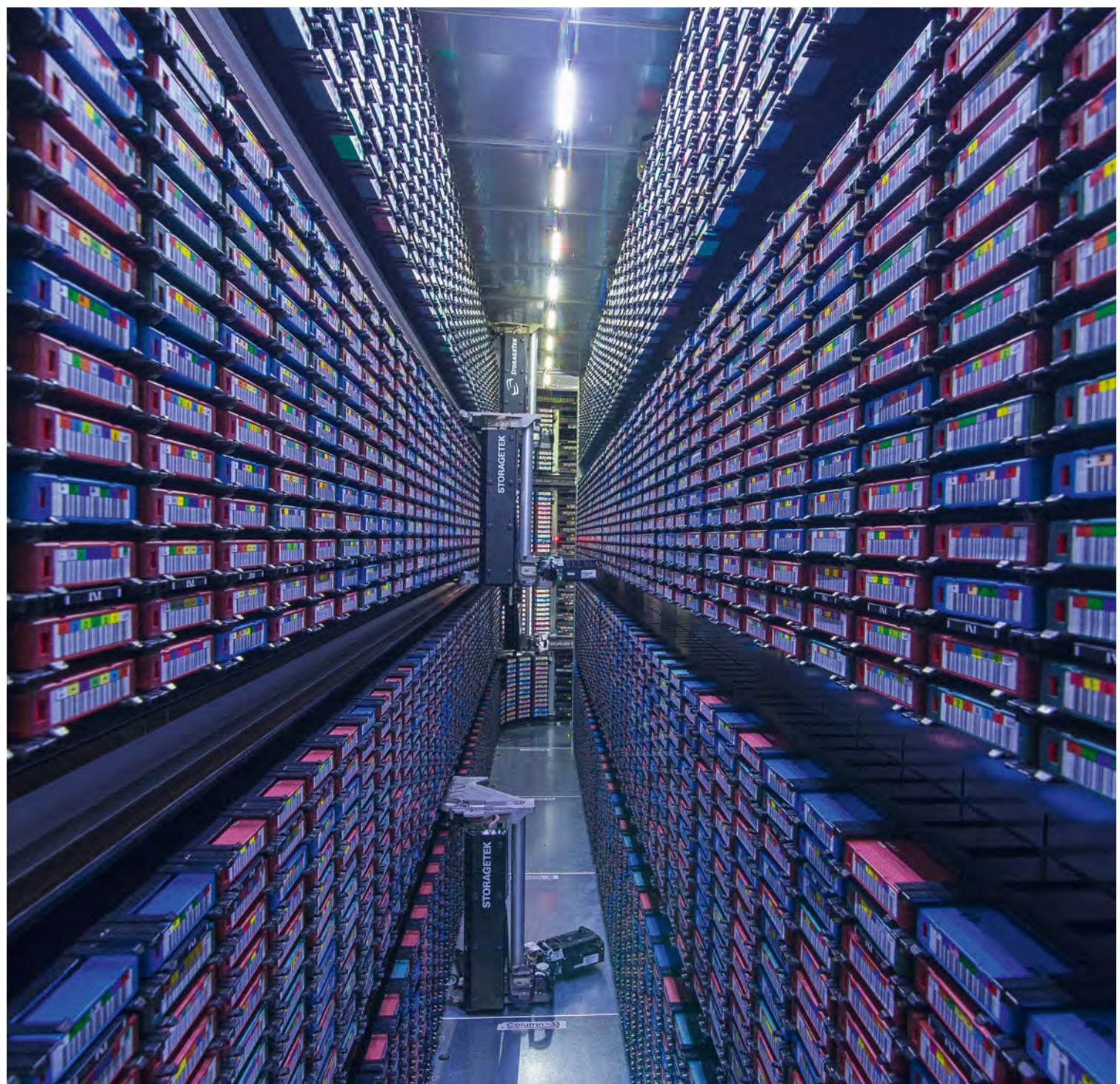
Wir stehen am Beginn einer Zeitenwende. Nun hat die Welt immer wieder Zeitenwenden erlebt, die durch technische Innovationen und – damit einher-

gehend – durch drastische Preisverfälle eingeleitet wurden. Der Buchdruck im 15. und die industrielle Revolution im 19. Jahrhundert sind zwei Beispiele dafür. Was kostete es zu Beginn des 15. Jahrhunderts, ein Buch in einem Kloster von Hand abzuschreiben? Und was kostete es, wenige Jahrzehnte später, die Lutherbibel zu verbreiten?

Wie dramatisch war der Preisverfall hochwertiger Werkstoffe im 19. Jahrhundert, die sich, befördert durch den Einsatz von Maschinen, schneller und einfacher herstellen ließen? Und was löste dieser Preisverfall für eine technische Revolution aus? Und heute? Wir beobachten fast wöchentlich einen dramatischen Preisverfall bei Rechenleistung, Datenspeicherung, Datenübertragung.

Das ist verbunden mit einer dramatischen Leistungssteigerung: Experten erwarten, dass Computer bereits in zehn Jahren 60-mal schneller sein werden als heute. Derzeit verdoppelt sich die Geschwindigkeit von Prozessorchips alle 18 Monate, die Übertragungsgeschwindigkeit optischer Glasfaserkabel dank der Entwicklungen in der Photonik sogar alle neun Monate. Das Resultat: Speicherung, Übertragung

Im Herz der virtuellen Welt: Schon heute existieren leistungsfähige Computernetzwerke von bis vor Kurzem ungeahnter Größe. Im Jahr 2025 wird die Mehrheit der Weltbevölkerung Zugang zum Internet haben.



und Auswertung gewaltiger Datenmengen sind mittlerweile möglich, leistungsfähige Computernetzwerke von bis vor Kurzem ungeahnter Größe entstehen.

In der Folge verändert sich unser Alltag in faszinierender Geschwindigkeit: So ist etwa die Zahl der Menschen, die mit dem Internet verbunden sind, im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrtausends von 350 Millionen auf inzwischen mehr als zwei Milliarden gestiegen. Die Zahl der Mobiltelefone hat sich von 750 Millionen auf jetzt mehr als sechs Milliarden erhöht. Schon im Jahr 2025 wird die Mehrheit der Weltbevölkerung über Mobile Devices Zugang zum Internet haben. Und in einem Jahr haben sich mehr Menschen für einen Massive Open Online Course

versucht – alles auf der Basis veröffentlichter Fachliteratur. Die Wissenschaftlerin und den Wissenschaftler wird dies nicht ersetzen können, seien die Zukunftsversprechen noch so spektakulär. Aber durch datengetriebene Hypothesengenerierung kann der Computer im Erkenntnisprozess künftig vielleicht viel schneller die richtigen Fragen stellen.

Das sind bahnbrechende, ja revolutionäre Prozesse. Ich glaube, eine ähnlich gravierende Veränderung in so kurzer Zeit hat es in der Geschichte der Menschheit noch nicht gegeben. Wie jede Zeitenwende hat auch diese einen technischen Ursprung, aber gesellschaftliche Konsequenzen, die weit darüber hinausgehen. Der Austausch von Information, die Interaktion von Menschen waren nie so leicht und preiswert wie heute. Dies führt wiederum zu einer ganz neuen Qualität dessen, was diese Interaktionen auszulösen vermögen.

Der Einzelne ist nicht länger nur Konsument, er wird Akteur – und das mit teilweise unvorhersehbaren Folgen. Beispiele? Wir kennen sie alle: Revolutionen werden von Facebook und Twitter getragen, Meinungen nicht länger von Redakteuren und Journalisten gemacht, sondern in geschlossenen und von außen kaum zu durchdringenden Meinungsblasen erzeugt. Und natürlich macht auch die Kriminalität nicht halt vor dem Internet. So werden etwa private Rechner über Botnetze gekapert und für kriminelle Zwecke manipuliert.

Viele – auch elementare – Lebenserfahrungen sind heute von unserem digitalen Umfeld geprägt. Und es liegt auf der Hand: Wo so viel Neues in kurzer Zeit entsteht, da blüht auch die damit verbundene Wirtschaft auf. Wie steht Deutschland nun in dieser Zeitenwende da? Nach dem Platzen der Spekulationsblase der New Economy hat uns in Deutschland offenbar der „Gründermut“ verlassen. Vielleicht haben wir zu wenig verstanden, dass eine Zeitenwende immer mit Übertreibungen verbunden ist, Rückschläge also in Kauf genommen werden müssen, der darunterliegende Trend aber ungebrochen ist.

Hinter dem Aufstieg von Google und Facebook, von Amazon und Apple steckt mehr als der übliche Strukturwandel. Der Aufstieg der Softwareindustrie ist keine Blase, sondern ein fundamentaler ökonomischer Paradigmenwechsel. Diese Erkenntnis setzt sich in

## Wissen und Erkenntnisse werden so leicht und umfänglich wie nie zu haben sein

(MOOC) bei Harvard angemeldet, als Studenten in den ganzen 380 Jahren seit der Gründung dieser Universität eingeschrieben waren.

Die Bereitstellung von Informationen in der Wissenschaft hat sich rasant gewandelt: Die Bibliotheken, Kathedralen des Wissens, sind mittlerweile in den Cyberspace abgewandert – und somit für fast jeden zugänglich. Das heißt, Informationsbeschaffung erfolgt heute in Chile oder Indien mit nahezu der gleichen Leichtigkeit wie in München oder Boston. Wenn Open Access als Goldstandard künftiger Publikationen Realität wird, dann entsteht das, was ich das „Google der Wissenschaft“ nennen möchte. Wissen und Erkenntnisse werden so leicht und umfänglich wie nie zu haben sein. Und es ist offensichtlich: Nicht das Speichern von Wissen, sondern die Analyse davon wird zum limitierenden Faktor.

Ein Wissenschaftler liest im Schnitt um die 250 Artikel im Jahr – ein winziger Ausschnitt des verfügbaren Wissens. Spektakulär muten vor diesem Hintergrund Pilotstudien an, bei denen sich IBMs Computersystem Watson an automatisierter Auslese, an Faktenextraktion und gar Hypothesengenerierung



Deutschland noch zu langsam durch. Vielleicht sind wir auch ein wenig zu selbstsicher geworden durch den bisherigen großen ökonomischen Erfolg unserer Wirtschaft. Dabei wissen wir aus unserer eigenen Nachkriegsgeschichte: Große Branchen können in kurzer Zeit verschwinden und Brachen hinterlassen, die nicht so schnell neu aufblühen.

Die für uns entscheidenden Fragen lauten: Welche Bedeutung hat die digitale Zeitenwende für die Wissenschaft? Wie geht die Max-Planck-Gesellschaft damit um? Und was muss geschehen, damit Deutschland seine industrielle Spitzenposition halten kann?

Die Frage nach der Bedeutung der Digitalisierung für die Wissenschaft kann ich kurz und knapp beantworten: Sie ist allumfassend. Sei es in der Physik, der Astrophysik, der Materialforschung, der Bioinformatik, den Digital Humanities – immer mehr spielen das Sammeln, Speichern und Auswerten gewaltiger Datenmengen eine ausschlaggebende Rolle. Und damit wird eine Frage zunehmend wichtiger: Wie können wir die unglaublich vielseitigen Informationen durchdringen, zusammenfassen und eingängig darstellen?

Das Aufspüren von Regelmäßigkeiten und Zusammenhängen, das Aufblitzen von Textur im Datenknäuel – das ist ein Kernelement der künstlichen Intelligenz, der in den vergangenen Jahren entscheidend zum Durchbruch verholfen wurde. Nicht etwa, weil wir eine Art Superalgorithmus entwickelt hätten – die Konzepte des sogenannten maschinellen Lernens sind tatsächlich einige Jahrzehnte alt. Aber was auf dem Papier schon lange existierte, die Funktionslogik mehrschichtiger neuronaler Netzwerke, das kann eben erst jetzt zur Entfaltung gebracht werden, und zwar einerseits durch enorm gesteigerte Rechenleistungen und andererseits durch die vernetzungsbedingt zunehmende Verfügbarkeit von Daten. Ohne Big Data kein maschinelles Lernen.

Wenn ich mir einen Vergleich erlauben darf: Die künstliche Intelligenz ist unsere neue Nachtsichtbrille. Sie gestattet durch die intelligente, automatisierte Analyse von Big Data einen Blick auf die Welt, wie wir ihn uns mittels unserer herkömmlichen, traditionellen Methoden nie würden erschließen können. Maschinelles Lernen entwickelt sich als Basis und Querschnittstechnologie für den Umgang mit großen Datenmengen – in der Wissenschaft und anderswo.

Wie stellt sich die Max-Planck-Gesellschaft auf diese digitale Zeitenwende ein? Ich kann sagen, wir investieren kräftig in das Gebiet Computer Science als die neue Basiswissenschaft. Jetzt und in Zukunft und über alle Sektionen hinweg. Da das nicht immer durch Wachstum geht, geben wir auch etablierte Wissenschaft auf – nicht gern, wenn ich ehrlich bin. Aber wir

---

## Gute Wissenschaft ist dort zu Hause, wo sie die steilsten Erkenntnisgradienten identifiziert

sollten uns vergegenwärtigen, dass Wissenschaft darauf abzielt, das vorhandene Wissen zu erweitern. Gute Wissenschaft ist somit dort zu Hause, wo sie die steilsten Erkenntnisgradienten identifiziert. Für uns heißt das: Forschungsfelder nicht nur neu aufzugreifen, sondern ganz neu zu definieren – unabhängig von Disziplinen und Fachbereichen.

Grundlagen und Anwendungen gehen dabei ineinander über, sie werden ununterscheidbar, traditionelle Abgrenzungen verlieren ihre Bedeutung. Lassen sich die Digital Humanities wirklich von der Informatik, vom maschinellen Lernen abgrenzen? Und wie ist das mit Social Computing: eine Domäne der Informatik ohne Kenntnis der Sozialwissenschaften? Die Wissenschaft verändert sich und damit auch die inneren Strukturen der Max-Planck-Gesellschaft – Institute entstehen sektionsübergreifend, Arbeitsgebiete wachsen zusammen.

Hierzu ein Beispiel: In unserem neuen Institut für Intelligente Systeme an den zwei Standorten Tübingen und Stuttgart überwinden wir die Grenzen zwischen Ingenieurwissenschaften, Computer Science und Neurowissenschaft. Wir verbinden hier zwei Elemente mit besonders steilem Erkenntnisgradienten – kognitive Robotik und maschinelles Lernen.

Denn die bisherigen Pionierleistungen der künstlichen Intelligenz sind für Systeme mit wenigen Freiheitsgraden entwickelt worden und reichen noch nicht aus, um etwa bei Manipulationsrobotern mit ihrer hohen Zahl an Freiheitsgraden wirklich kompe-



tentes Verhalten zu ermöglichen. Wirklich autonomes Verhalten ist dort weit von der Realisierung entfernt. In Zukunft wird die Hardware – also die intelligente Robotik – ein elementarer Bestandteil der Rückkopplungsschleife aus Wahrnehmen, Handeln und Lernen sein. In unserem Institut wollen wir Hard- und Software daher unter einem Dach entwickeln und kombinieren.

Das ist übrigens ein Ansatz, der hierzulande besonders vielversprechend ist. Wir haben zwar in Deutschland keine globalen Internetplattformen geschaffen, aber bei der Verbindung lernender Computersysteme mit Hardware, die bauartbedingt physische Intelligenz besitzt, da haben wir etwas zu bieten.

Wo sich die Max-Planck-Gesellschaft strukturell neu aufstellt, sieht sie sich auch als Motor für eine überregionale Entwicklung. In der digitalen Zeitenwende sind wir uns dieser Verantwortung besonders bewusst. Um unser Institut für Intelligente Systeme in Stuttgart/Tübingen entwickelt sich ein spannendes Umfeld. Wir haben es Cyber Valley genannt. Es soll einmal das Max-Planck-Institut mit den Nachbaruniversitäten, führenden Unternehmen, einer hohen Dichte von Nachwuchsgruppen und einer starken Ausgründerszene verbinden. Eben ein Cluster von internationaler Sichtbarkeit und hoher Attraktivität – ein Zuhause für Wissenschaftler und Nerds.

Viele weitere Projekte werden derzeit in unseren Sektionen diskutiert. Von kleinen Aktivitäten bis hin zur möglichen Institutsneugründung. So interessieren wir uns intensiv für das Gebiet der Kryptografie: Wie kann man Kommunikation heute sicher gestalten? Die Antwort auf diese Frage könnte in einer Zusammenführung von Mathematik, Quantenphysik, Optik und Informatik liegen.

Die Neuroprothetik ist ganz offensichtlich ein weiteres potenziell extrem ergiebiges Forschungsfeld. Ziel ist es, mit kleinsten technischen Systemen dazu beizutragen, verloren gegangene Funktionen im menschlichen Nervensystem zumindest teilweise zu ersetzen. Kann man dieses Ziel erfolgreich ansteuern ohne maschinelles Lernen und intelligente Robotik?

Aber auch Themenfelder wie Bildung und Erziehung, das Recht auf Vergessen im Zeitalter des Internets oder Privatheit als öffentliches Gut: All das sind Fragen, die beispielsweise unsere Geistes-, Sozial-

und Humanwissenschaftliche Sektion bewegen. Und schließlich Digital Humanities: Was verbirgt sich dahinter, wie setzen wir das um?

Eine Aufgabe bleibt dabei unverändert: Die Max-Planck-Gesellschaft wird auch künftig ihre Institute um herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bauen. Wir wollen auf allen uns interessierenden Gebieten Anziehungspunkt für Forscher aus aller Welt sein. Dabei dürfen wir uns aber nicht nur auf

---

## Wir brauchen herausragende Berufungen auf Gebieten wie der Computer Science

etablierte Felder konzentrieren, wo uns das leicht gelingt. Wir müssen es gerade auch dort wagen, wo Deutschland und Europa noch nicht über eine prägnante Sichtbarkeit verfügen. Von den bisher 64 Preisträgern des Turing Awards etwa – das ist der Nobelpreis der Informatik – kamen 47 aus den USA, sechs aus England und elf aus sechs weiteren Ländern. Und – kein einziger aus Deutschland!

Das darf die kommenden 20 Jahre nicht so bleiben. Was muss Deutschland tun? Wir müssen zunächst einmal aufpassen: Wer in Deutschland als Informatiker Herausragendes leistet, der wird leicht abgeworben – nicht nur von Google, Apple und Facebook, sondern auch von den kleinen Start-ups im Silicon Valley, die mit kreativer Entfaltung und flachen Hierarchien locken. Dabei klafft in Deutschland ohnehin schon eine viel zu große MINT-Lücke.

Wir müssen unsere Ausbildungskapazitäten steigern, attraktive Wissenschaftsstandorte schaffen und schließlich mehr denn je herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nach Deutschland holen – und gleichzeitig Abwanderung verhindern. Das heißt: Wir müssen wesentlich mehr investieren, und das sehr schnell!

Ein Blick in unsere Geschichte zeigt: Die industrielle Revolution wurde nicht nur von Kohle und Erz befeuert, sondern auch durch hochqualifizierte Arbeitskräfte. Justus von Liebig veränderte in der

zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts das Studium der Chemie maßgeblich. Es entstand eine ganze Generation junger Chemiker, die in den aufstrebenden Farbenfabriken forschten, unter anderem bei der heutigen BASF, nach wie vor ein Schwergewicht der chemischen Industrie.

Damals hat man kräftig investiert. Die Universitäten wurden zu internationalen Leistungszentren ausgebaut, mit den technischen Hochschulen wurde ein neuer Universitätstypus geschaffen. Die Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft wurde Hort der wissenschaftlichen Leistungselite. Vom Tatendrang der damaligen Zeit profitiert Deutschland immer noch: Es ist die starke Wirtschaft, die selbst katastrophale Kriege überlebt hat und uns bis heute Wohlstand sichert.

Derzeit werden die Karten neu gemischt, das ist das Kennzeichen einer Zeitenwende. Bildung und Forschung werden wichtiger denn je. Wir müssen heute die gleichen Kraftanstrengungen unternehmen wie vor mehr als 100 Jahren und die Bildungs- und Forschungseinrichtungen schaffen, die uns für die kommenden Jahrzehnte Wohlstand bescheren. Wir müssen den gleichen Mut haben.

Die Max-Planck-Gesellschaft kann hier aufgrund ihrer Reputation und ihrer extrem flexiblen Struktur viel leisten. Aber eines ist auch klar: Der Umstrukturierung von Instituten sind Grenzen gesetzt. So schnell, wie sich das Gebiet der Computer Science entwickelt, wollen und können wir etablierte Gebiete nicht aufgeben, zumal auch diese sehr erfolgreich an der Front des Erkenntnisfortschrittes arbeiten. Wir müssen daher bereit sein, auch in Zukunft weiter steigend in Wissenschaft zu investieren.

Vielleicht ist dazu aber auch eine Initiative leistungsfähiger europäischer Länder notwendig. EMBL, das European Molecular Biology Laboratory, hat es gezeigt: Auf dem Gebiet der Biomedizin wurde durch eine gemeinsame Kraftanstrengung Beachtliches in und für Europa erreicht. Das EMBL spielt in derselben Liga wie Cold Spring Harbour, das MIT oder das Salk Institute in den USA. Ein solches Engagement brauchen wir auch in den Computerwissenschaften! ▶

Der Beitrag war Grundlage für die Rede, die Martin Stratmann im Juni 2016 auf der Hauptversammlung der Max-Planck-Gesellschaft in Saarbrücken gehalten hat.



## DER AUTOR

**Martin Stratmann**, Jahrgang 1954, studierte Chemie an der Ruhr-Universität Bochum. Seine Promotion schloss er 1982 am Max-Planck-Institut für Eisenforschung ab. Nach einer Postdoc-Station in den USA wurde er Gruppenleiter am Max-Planck-Institut für Eisenforschung. Er habilitierte sich an der Universität Düsseldorf und lehrte anschließend von 1994 bis 1999 an der Universität Erlangen-Nürnberg. Im Jahr 2000 nahm er den Ruf zum Wissenschaftlichen Mitglied und Direktor am Max-Planck-Institut für Eisenforschung an. Er erhielt zahlreiche Preise, darunter 2005 den U. R. Evans Award des britischen Institute of Corrosion. Seit Juni 2014 ist Martin Stratmann Präsident der Max-Planck-Gesellschaft.



# Auf leisen Sohlen durch den Regenwald

Max-Planck-Wissenschaftler kooperieren mit Partnern in rund 120 Ländern dieser Erde. Hier schreiben sie über persönliche Erlebnisse und Eindrücke.

Die Verhaltensbiologin Amanda Monte arbeitet derzeit am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen an ihrer Promotion. Im brasilianischen Regenwald forscht sie über die Kommunikation von Kolibris.

---

Regnerisch und nicht-ganz-so-regnerisch – das sind die zwei Jahreszeiten im Regenwald. Für Naturwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sind jedoch alle Jahreszeiten in diesem facettenreichen Ökosystem extrem faszinierend, Regen hin oder her. Ich arbeite mit Kolibris, nehme ihre Stimmen auf und versuche herauszufinden, wie sie ihre Laute erlernen – so wie auch Singvögel und Papageien.

Anders als bei anderen Tieren sind ihre Laute nicht instinktives, sondern erlerntes Verhalten – und zwar ein sehr vielseitiges. Denn verschiedene Kolibrigattungen haben unterschiedliche Kommunikationsstrategien: Es gibt sowohl nonverbale Gattungen, die Flügel- oder Schweifgeräusche einsetzen, als auch solche, bei denen die Männchen die Weibchen mit den ausgereiftesten Liedern innerhalb eines regelrechten Gesangswettbewerbs bezirzen.

Während meiner Feldarbeit verbringe ich viele Stunden damit, durch den dichten Nebel zu wandern, meinen Assistenten an der Seite, ausgestattet mit meinem Aufnahmegerät, nur mit der nötigsten Ausstattung – einem Messer. Wenn wir Glück haben und einen Kolibri erspähen, beobachten wir die seltene Schönheit, während wir Laute und Lieder aufnehmen. Ein mitunter ganz schön gefährliches Unterfangen! Einmal habe ich mir eine Leiter selbst gebaut und wäre fast heruntergefallen.

Doch dies ist bei Weitem nicht der gefährlichste Aspekt von Feldarbeit in Südamerika. Und ich habe auch keine Angst vor Schlangen oder Jaguaren. Am meisten fürchte ich mich vor



Amanda Monte, 29, hat Biologie und Umweltverhaltensforschung studiert und erhielt ihren Master im Jahr 2012 an der Staatlichen Universität von Pará, wo sie sich auf Biostatistik sowie Verhaltenstheorie und -forschung spezialisierte. Seit 2013 arbeitet sie an ihrer Promotion bei Direktor Manfred Gahr am Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen. Gerade bereitet sie ihre erste wissenschaftliche Veröffentlichung vor.

Menschen – den Wilderern oder den Bauern. Vor allem die Armut bringt sie in die Regenwälder, wo sie Bäume fällen, um Platz für Häuser zu schaffen und dort zu leben.

Obwohl mir keine Vorfälle von Gewalt gegenüber Feldforschenden bekannt sind, will ich mir lieber nicht vorstellen, was passieren würde, wenn sie uns treffen würden. Immerhin sind wir nur in kleinen Gruppen unterwegs, zu zweit oder zu dritt, und praktisch unbewaffnet. Messer sowie ein Luftdruckgewehr zur Abwehr wilder Tiere ist alles, was wir haben. Und Menschen auf der Suche nach schnellem Profit sind weitaus gefährlicher als Tiere – hier im Norden des Amazonas im Gunma Ecological Park, 40 Kilometer von Belém entfernt, wo ich während meiner Promotion zweimal zu Besuch war, um Kolibris zu erforschen.

Glücklicherweise ist mein zweites Forschungsgebiet viel sicherer: das Freiluftmuseum von Professor Mello Leitão im Süden, in der Nähe des atlantischen Regenwaldes, wo Kolibris frei herumfliegen können. Alles in allem habe ich zwölf verschiedene Gattungen von Kolibris aufgenommen und hoffe, dadurch besser zu verstehen, wie deren Laute produziert werden und mit welchen Strategien.

Ich mag meine Feldarbeit sehr. Aber ich bin auch immer wieder froh, nach Seewiesen zurückzukehren, hauptsächlich wegen der schönen Umgebung und des kulturellen Austauschs am Campus. Es ist ja bekannt, dass Brasilianer eher isoliert in Südamerika sind, weil sie Portugiesisch sprechen. Lustig, dass ich in Deutschland viel mehr über Südamerika gelernt habe – im Vergleich zu der Zeit, als ich noch in Brasilien lebte.



# Ein Wurm sucht seine Mitte

Symmetrie in der Natur hat Künstler und Architekten zu allen Zeiten inspiriert. Kein Wunder, gilt sie doch als Inbegriff für Schönheit. Das Erfolgsmodell schlechthin ist dabei die Spiegel-symmetrie. **Jochen Rink** will am **Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik** in Dresden deshalb herausfinden, wie Organismen die Spiegelebene festlegen und damit die Voraussetzung für symmetrisch aufgebaute Lebewesen schaffen. Er erforscht dafür urtümliche Plattwürmer und ihre erstaunliche Fähigkeit zur Neubildung fehlender Körperteile.



Planarien sind kaum totzukriegen –  
jedenfalls nicht durch Zerstückeln.  
Selbst aus kleinen Teilen kann wieder  
ein vollständiger Wurm entstehen.  
Voraussetzung dafür ist, dass sich  
eine neue Körperachse bildet.

TEXT CATARINA PIETSCHMANN

**W**ährend die meisten Würmer entspannt am Boden liegen, ziehen einige wenige lässig eine Bahn durch den Pool. Mit kaum wahrnehmbaren Bewegungen gleiten sie elegant auf Tausenden von mikroskopisch kleinen Flimmerhärtchen über den Boden ihrer Tupperschale. Ein majestätischer Anblick, wären da nicht ihre drolligen, reglosen Punktaugen. Planarien schielen und schauen nicht nach vorn, sondern starr nach oben.

Mehr als 60 Arten der tatsächlich sehr platten Plattwürmer tummeln sich hier in Dresden in einem speziell für sie reservierten Zuchtraum. Gesammelt wurden sie in aller Welt, darunter seltene weiße Exemplare aus Höhlen und solche, die eine Borte aus Augenpunkten an der Körperkante tragen. Plattwürmer sind normalerweise zwischen 0,8 Millimetern und 2,5 Zentimetern lang, aber es gibt unter ihnen auch regelrechte Riesen mit einem Meter Körperlänge. Meist sind sie bräunlich und farblich unscheinbar, manche aber auch apart getupft. Sie sind pflegeleicht und stürzen sich in ihren Plastikboxen auf Kalbsleberhäppchen und Mehlwürmer.

Bei ihrem skurrilen Äußeren könnte man fast meinen, dass die Tiere vor Jahrtausenden einen Deal abgeschlossen haben: Sollen andere ruhig schön ausschauen und beispielsweise schicke rote Deckflügel mit schwarzen Punkten

bekommen wie die Marienkäfer. Darauf können wir verzichten. Aber wir wollen etwas im Gegenzug: ewige Jugend!

Dafür verzichten Plattwürmer zur Not auch auf Sex und vermehren sich ungeschlechtlich. Nicht alle Arten tun das – aber die, die sich asexuell fortpflanzen, sind quasi unsterblich. Jede zehnte Zelle des Wurmkörpers ist nämlich eine Stammzelle, die sämtliche Zelltypen hervorbringen kann. Aus diesem Grund erneuern sich Planarien pausenlos. Für jede sich teilende Stammzelle stirbt eine spezialisierte Zelle, sodass sich die Würmer in Form und Größe nicht mehr verändern.

## AUS EINS MACH ZWEI

Zur Fortpflanzung reicht es ihnen, sich mit der Schwanzspitze irgendwo festzuhalten und mit dem Kopfende weiterzumarschieren. „Nach einigen Stunden reißt der Körper auseinander, und aus beiden Teilen bildet sich innerhalb von zwei Wochen jeweils wieder ein vollständiger Wurm“, erzählt Jochen Rink vom Dresdner Max-Planck-Institut. Dafür gehören Planarien zu den gefragtesten Untersuchungsobjekten der Stammzellforschung. Ihre außergewöhnliche Regenerationsfähigkeit verheiße ewige Jugend und die Heilung vieler Leiden.

Doch Rink fasziniert an Plattwürmern etwas anderes: Ihnen gelingt es nicht nur, aus jedem beliebigen Körperschnipsel wieder einen kompletten Organismus aufzubauen. Sie legen die-

sen auch perfekt symmetrisch an! Und zwar egal, ob das Ursprungstier in zwei oder in 20 Stückchen zerschnitten wurde. Aus der Seite geschnittene Gewebestreifen zum Beispiel schnurren zunächst wie eine Korkenzieherspirale zusammen und entwickeln sich binnen Tagen zu einem kompletten eigenständigen Organismus. Dies unterscheidet Plattwürmer von anderen Regenerationsspezialisten wie dem Axolotl. Diese salamanderartigen Tiere können zwar fehlende Körperteile, Organe und sogar Teile ihres Gehirns regenerieren. Aber aus einem abgetrennten Stück wächst kein neuer Lurch heran, sondern es geht zugrunde.

Beiden Tieren gemeinsam ist ihre Symmetrie. Schon in der Embryonalphase muss sichergestellt werden, dass ein symmetrisch aufgebauter Organismus entsteht. Auch die Regeneration der Plattwürmer muss so verlaufen, dass der neue Körper wieder symmetrisch ist oder sich die neuen Teile in die Symmetrie des Körpers einpassen. „Die sogenannte bilaterale Symmetrie – zwei spiegelbildliche Körperhälften – ist ein fundamentales Konstruktionsprinzip höherer Lebewesen“, sagt Rink.

Dazu ist zunächst einmal eine Symmetriearchse nötig. Aber wie definiert ein Organismus überhaupt eine Linie? Klar ist: nicht bei allen Lebewesen auf die gleiche Art, denn die Evolution hat dafür verschiedene Wege gefunden. Während der frühen Embryonalentwicklung von Wirbeltieren zum Bei-



**Linke Seite** Planarien sind pflegeleicht: Abgesehen von Füttern und gelegentlichem Wasserwechseln muss sich Jochen Rink (links oben) nicht viel um sie kümmern. Im Labor des Dresdner Max-Planck-Instituts leben sie in haushaltsüblichen Plastikdosen (rechts oben). Darin können sie sich in kürzester Zeit stark vermehren (unten).

**Diese Seite** Planarien brauchen den Hedgehog-Signalweg für die Regeneration von verlorenem Gewebe. Normalerweise (links) bildet ein Mittelstück einen Kopf mit Gehirn (blau) und den Schwanz mit zwei Darmsträngen (grün). Ist zu wenig Hedgehog vorhanden (Mitte), wächst ein normaler Kopf, aber kein Schwanz. Mit zu viel Hedgehog (rechts) wird anstelle des Kopfes ein kompletter Schwanz gebildet.



spiel wandern sich teilende Zellen vorwärts und stülpen sich allmählich wie eine Mütze über die Dotterkugel. Ein anderer Zelltyp macht am Umkehrpunkt – dem sogenannten Organizer – kehrt und läuft zwischen der äußeren Zellschicht des Embryos und dem Ei- dotter wieder zurück. Eine Halbkugel entsteht – wie ein eingestülpter Fußball, aus dem die Luft entwichen ist.

## STARTPUNKT FÜR DIE MITTELLINIE

„Der Umkehrpunkt wird später zur Mittellinie des Körpers, an deren Enden Kopf und Schwanz entstehen.“ Signalnetzwerke in den Zellen kontrollieren diesen Prozess, indem sie rechtzeitig bestimmte Gene an- oder abschalten. Zusammengefasst geht die Natur also so vor: Man lege einen Punkt fest, von dem ausgehend die Zellen in entgegengesetzter Richtung wegwandern. Fertig ist die Linie!

Die Fruchtfliege *Drosophila* macht es anders. Der Fliegenembryo ist nicht kugel-, sondern zigarrenförmig. Signalstoffe in den Zellen definieren „oben“ und

„unten“, also Bauch und Rücken. Bauch- und Rückensignale unterdrücken sich gegenseitig, weil aber die Bauchsignale sinnbildlich überwiegen, bleibt am Ende nur noch eine scharf abgegrenzte Rückenlinie übrig. Sie wird zur Mittellinie des entstehenden Fliegenkörpers.

Und die Planarien? Rink und seine Kollegen haben zunächst nach Genen gesucht, die nur an der Mittellinie aktiv sind. Dabei sind sie unter anderem auf die Gene *bambi* und *slit* gestoßen. Beide sind nur in Zellen aktiv, die exakt auf der Mittellinie sitzen: *bambi* nur in einem schmalen Streifen entlang des Rückens, *slit* markiert dagegen auf der Bauchseite zusätzlich einen breiteren, V-förmigen Streifen vom Kopf bis zur Schwanzspitze. Die Mittellinie wird also nicht durch eine einzelne, sondern durch mehrere unterschiedliche Gruppen von Zellen festgelegt. Auch in diesem Fall nutzt die Natur wohl die gleichen molekularen Mechanismen quer durch das Tierreich, denn *slit* ist auch bei Fliege und Mensch an der Mittellinie aktiv.

Anfang der 1960er-Jahre entdeckten Biologen durch Zufall, welch dramatische Konsequenzen es hat, wenn die

Symmetriebildung im Organismus nicht funktioniert. In Kalifornien wurden auf einigen Wiesen missgebildete Lämmer geboren, die nur ein Auge hatten. Es saß mittig am Kopf, wie bei den Zyklopen in der griechischen Mythologie. Wie sich herausstellte, hatten die Mutterschafe Kornlilien gefressen. Diese Pflanzen enthalten ein Toxin, das die Erkennung des Signalproteins Hedgehog in den embryonalen Zellen hemmt. Erstaunlicherweise war der Defekt auf den Kopf beschränkt. Die Lämmer, die bald nach der Geburt starben, hatten vier völlig normal ausgebildete Beine.

„Wenn wir den Hedgehog-Signalweg bei Planarien stören, passiert Ähnliches“, erzählt Rink. Seine Kollegen und er variierten die Menge von Hedgehog im Wurmkörper, schnitten Kopf und Schwanz ab und beobachteten, was passiert: Hatte der Torso deutlich zu wenig Hedgehog-Signal, entwickelte sich zwar ein perfekter neuer Kopf, aber nur ein kurzer Stummelschwanz. War das Signal im Überfluss vorhanden, gelang die Schwanzregeneration exakt, doch statt des Kopfes wuchs ebenfalls ein Schwanz. Und wurde das Hedge-



hog-Signal nur geringfügig erhöht, entstanden Würmer mit verkümmerten und augenlosen Köpfen oder eben zyklische Würmer – genau andersherum als bei den Schafen: Einäugige Lämmer besaßen zu wenig Hedgehog-Signal.

### NERVENBAHNEN VERBINDELN SICH ZUR SCHLEIFE

Gespannt sahen sich die Forscher nun die Gene an, die die Mittellinie markieren. Bei den Tieren mit verkümmertem Kopf war das Mittellinien-Gen *bambi* bis zur Schwanzspitze durchgehend aktiv, aber nicht mehr in der Kopfregion. Auch die Nervenbahnen fehlten hier – sie verbanden sich unterhalb der Kopfregion zur Schleife. „Das Tier hat kein Gehirn mehr, sondern nur noch ein peripheres Nervensystem.“ Da dem neuen Kopfgewebe jegliche Information über seine eigene Mitte fehlt, ist es nicht spiegel-, sondern radiärsymmetrisch – wie eine Kugel oder ein Kreis also. Beim einäugigen Wurm wiederum ist *bambi* von Kopf bis Schwanzende sichtbar, aber die Nervenbahnen der beiden Körperhälften sind viel dichter zusammengerückt.

Rinks Fazit: „Die Mittellinie steuert die Endpunkte Kopf und Schwanz an. Sind diese Teile voll ausgebildet, finden wir auch eine komplettte Mittellinie. Ist

die Kopfneubildung weniger ausgeprägt, bekommt auch die Mittellinie Probleme, und es entstehen Tiere mit nur einem Auge.“ Das Signalsystem für die Mittellinienbildung ist offenbar so fein austariert, dass es keinerlei Störung verträgt.

Um verfolgen zu können, wie sich eine „neue Mitte“ herausbildet, haben die Forscher Würmern einen schmalen Seitenstreifen abgeschnitten und in diesem dann die Aktivität des *slit*-Gens mithilfe eines grünen Farbstoffs sichtbar gemacht.

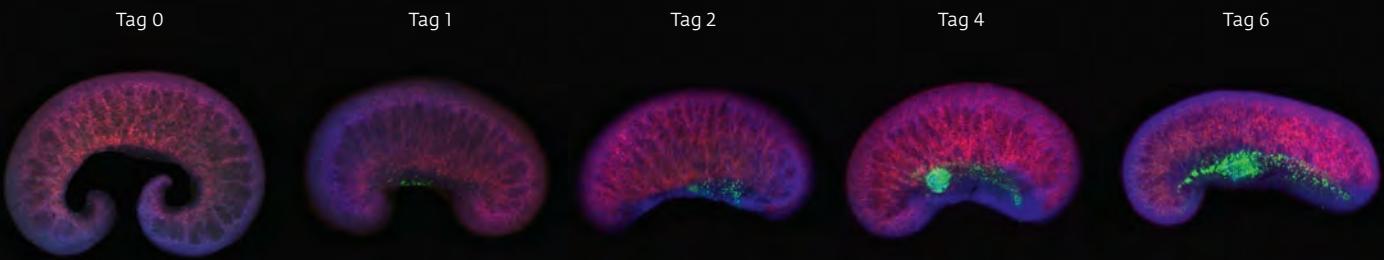
Direkt nach der Abtrennung hat der Streifen zunächst offenbar keine Information über eine Mittellinie. Doch bereits nach einem Tag leuchten unter dem Mikroskop erste Zellen grün. „Allerdings nicht in der Mitte, sondern an der Wundkante“, erzählt Jochen Rink.

Am zweiten Tag bilden sich bereits zwei unterschiedliche grüne Zellpopulationen heraus – eine zentrale und eine andere weiter vorn, die sich später wahrscheinlich zur Kopflinie auswachsen wird. Und es sind auch bereits erste Zellen zu erkennen, die sich jenseits der „neuen Mitte“ – der ehemaligen Wundkante – ansiedeln. „Woher diese Zellen kommen, das wissen wir noch nicht.“ Nach sechs Tagen hat sich das Augenpaar gebildet. Der zentrale grüne Zellhaufen ist stetig größer

und zum Schlund geworden, der in der Bauchmitte liegt und zugleich als After dient. Erst wenn der Verdauungs- trakt fertiggestellt ist, verlängert sich die Mittellinie bis hin zur Schwanzspitze. Die Zellen gehen dabei so wie ein Arbeitstrupp vor, der zunächst eine Baustelle abarbeitet und anschließend zur nächsten weiterzieht.

### POSITIONSBESTIMMUNG MIT SIGNALSTOFFEN

Doch woher weiß der Streifen eigentlich, dass er ursprünglich auf der rechten Körperseite lag und ihm jetzt die linke Seite fehlt? Und was sagt ihm, wann seine Regeneration abgeschlossen ist und er aufhören muss zu wachsen? „Wir wissen noch nicht genau, wie diese Prozesse funktionieren; die Konzentration von Signalstoffen im Körper könnte beispielsweise diese Abläufe kontrollieren.“ Nimmt ein Botenstoff beispielsweise von vorn nach hinten kontinuierlich ab, so kann eine Zelle ihre Position anhand der Konzentration erkennen. Wird die Zelle vom restlichen Körper getrennt, so wächst an der Stelle des Streifens, an der beispielsweise vorher der Kopf war, wieder ein Kopf, niemals ein Schwanz – und umgekehrt.



**Oben:** Ein schmaler seitlicher Gewebestreifen beinhaltet zunächst keine Mittellinien-Zellen. Bereits nach einem Tag bilden sich die ersten Mittellinien-Zellen (grün), jedoch nicht in der Mitte des Gewebestücks, sondern am Wundrand. Während der folgenden Tage bildet sich an der Grenze zwischen altem (violett) und neuem Gewebe (blau) eine Linie aus. Durch die Integration von neuen Zellen außerhalb dieser Linie (blaue Bereiche) rückt diese immer mehr in die Mitte, bis sie schließlich zur Mittellinie wird.

**Linke Seite:** Regeneration der Mittellinie: Wird ein schmaler Streifen von der Seite eines kompletten Tieres abgeschnitten (grau in der Grafik), rollt sich der Streifen zunächst korkenzieherförmig zusammen. Zwei Tage später hat sich sein Gewebe wieder entspannt, und der Schnitt ist verheilt. Nach sechs Tagen hat sich schon viel neues Gewebe an der ehemaligen Schnittkante des Streifens gebildet (hellbraun). Am zehnten Tag hat der Streifen die fehlenden Teile beinahe vollständig nachgebildet. Nach 14 Tagen ist aus ihm wieder ein spiegelsymmetrischer Wurm geworden.

Auch der Körper- beziehungsweise Wundkante kommt eine wichtige Rolle bei der Regeneration zu, da hier Zellen von Bauch- und Rückenseite aufeinandertreffen. Das Gewebe kann dies erkennen. Außerdem müssen manche Signale quer durch den Körper reichen, denn pikst man den Wurm mit einer Nadel, läuft ein Alarm durch den Körper, und alle Stammzellen beginnen sich schneller zu teilen.

Das System ist so gut kontrolliert, dass es sogar die Schwere der Verletzung einschätzen kann. „Das ist wichtig“, sagt Jochen Rink, „denn nicht bei jedem kleinen Riss im Gewebe darf dort ja gleich ein neuer Kopf wachsen.“

Rinks Team hat nebenbei die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den Plattwürmern aus der institutseigenen Sammlung untersucht sowie ihre Regenerationsfähigkeit. Die Wissenschaftler haben nachgewiesen, dass die Arten, die sich nicht mehr regenerieren können, diese Fähigkeit einst besaßen, sie aber im Laufe der Evolution verloren haben. „Ein einziger Signalweg hat sich bei ihnen verändert. Interessanterweise geschah dies mehrfach und an unterschiedlichen Stellen.“ Rink will nun herausfinden, warum das so ist.

Und ein weiterer Zusammenhang ist auffällig: Arten, die nicht mehr rege-

nerationsfähig sind, vermehren sich sexuell. „Wir vermuten daher inzwischen, dass die außergewöhnliche Regenerationsfähigkeit von Planarien gar nicht der Wundheilung dient, sondern der Fortpflanzung.“ In einer Wasserpflütze, die schnell austrocknet, ist es eben von Vorteil, sich einfach teilen zu können, statt mühsam nach einem Partner suchen zu müssen.

## EIN INDIVIDUUM, VIELE STAMMZELLEN

Anders als bei Fruchtfliege oder Zebrafisch sind Genveränderungen bei Plattwürmern bislang nicht möglich. Es würde die Forschung sehr erleichtern, könnte man in das Erbgut der Würmer das Gen für ein fluoreszierendes Protein einschleusen und der Mittellinie einfach beim Wachsen zusehen.

Dass dies bisher fehlschlug, liegt vermutlich an den vielen Stammzellen. „Wenn sich in einem Tier, das nicht altern, Stammzellen ständig teilen und jede Teilung das Risiko einer Mutation trägt, müsste es eigentlich in dem Tier viele Stammzelllinien geben, die unabhängig voneinander mutieren. Der Wurm ist somit vielleicht gar kein Individuum, sondern viele“, spinnt Rink den Faden weiter. Ein Kollektiv quasi.

Zusammen mit Kollegen vom Dresdner Max-Planck-Institut hat Rinks Arbeitsgruppe kürzlich das Erbgut der Planarien entschlüsselt. Damit lässt sich nun die Kollektivtheorie testen.

Plattwürmer sind frühe Nachkommen des letzten gemeinsamen Vorfahren aller heute lebenden Tiere, einschließlich des Menschen. „Dieser Urahn muss bereits einen Kopf gehabt haben und bilateral symmetrisch gewesen sein.“ Diese Form der Spiegelsymmetrie gab es demnach schon, bevor die ersten Tiere eine starre Wirbelsäule erfanden und Flossen, Beine oder Flügel entwickelten. Heute haben die meisten Lebewesen einen spiegelsymmetrischen Körperbau.

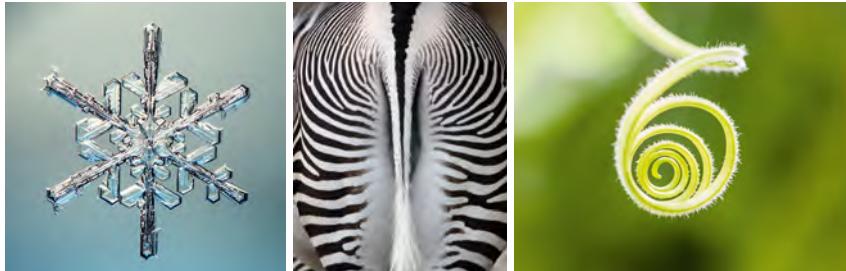
„Symmetrie steckt ganz tief in der Biologie. Das molekulare Programm dafür war schon vor 500 Millionen Jahren im Kambrium angelegt“, sagt Rink. Alles, was danach kam, waren lediglich Variationen.

Doch eine bilaterale Symmetrie ist mehr als ein Konstruktionsmerkmal. Sie ist Voraussetzung für die Definition von „vorn“ und „hinten“, „links“ oder „rechts“. Mit der Kopf-Schwanz-Achse ist somit auch die Bewegungsrichtung vorgegeben. „Vielleicht wurde ein bilateraler Körperbau unerlässlich, als Organismen begannen, sich mit seitlichen Fortsätzen zu bewegen“,

## SYMMETRIE IN DER NATUR

Symmetrie gibt es in der belebten wie in der unbelebten Natur. So können Zucker- oder Aminosäuremoleküle eine Spiegelebene besitzen oder sich wie Bild und Spiegelbild verhalten – ein Phänomen, das auch als Chiralität bezeichnet wird. Obwohl ansonsten chemisch identisch, kann eine unterschiedliche räumliche Anordnung die Eigenschaften eines Moleküls maßgeblich verändern: bei spiegelbildlichen Duftmolekülen etwa von krautigem zu „Citrus“-Geruch, bei Arzneistoffen wie dem Thalidomid (Contergan®) gar von wirksam zu schädlich. Auch die meisten Minerallien ordnen ihre Atome in symmetrisch aufgebauten Kristallgittern an wie die Doppelpyramiden im Diamant oder die Würfel im Kochsalz. Selbst Schneeflocken besitzen stets eine sechszählige Drehachse.

Eine spezielle Symmetrie zeigt die Natur beim Aufbau von Spiralen. Sie schrauben sich durch alle Größenordnungen – von der DNA-Doppelhelix über die Anordnung von Sonnenblumenkernen, Tierhörnern bis zu Galaxien. Da Spi-



ralen keine Spiegelebene enthalten, sind sie an sich asymmetrisch. Sie können sich aber wie Bild und Spiegelbild zueinander verhalten – genau wie die rechte zur linken Hand. Organismen bevorzugen meist eine Drehrichtung: Bei den Gehäusen der Weinbergschnecken liegt das Rechts/links-Verhältnis bei 20 000 zu 1. Ackerwinden dagegen schlängeln sich ausschließlich links herum.

Während im Tierreich die Spiegelebene meist das einzige Symmetrieelement ist, besitzen Pflanzen häufig eine Kombination aus Spiegelebenen, mehrzähligen Drehachsen oder Drehsymmetriachsen.

meint Rink. „Wenn die rechte Flosse größer ist als die linke, kann man nur im Kreis schwimmen.“ Sind Flügel oder Beine rechts und links ungleich verteilt, ist das auch eher hinderlich. Andererseits haben aber auch die meisten Pflanzenblätter eine Spiegelachse, obwohl sie sich niemals bewegen. Vielleicht liegt der tiefen Grund für Symmetrie deshalb in Transport- oder Wachstumsprozessen.

Die Symmetrie muss also einen Zweck erfüllen. Sie ist jedoch nie perfekt – sie muss nur gut genug für diese Aufgabe sein. „Der rechte Arm wird also nie exakt die gleiche Anzahl von Zellen besitzen wie der linke.“

War Symmetrie somit eine Grundlage für Komplexität? Vermutlich ja. Eine Ausnahme gibt es jedoch. Ein einziges mehrzelliges Lebewesen ist bekannt, das keine Symmetrie aufweist: *Trichoplax adhaerens*, was etwa bedeutet „Haarige anhaftende Platte“. Es sieht aus wie ein missglückter Pfannkuchen. Dank Muskelzellen und einem fransigen Teppich aus Wimpernhärtchen auf der Bauchseite kann sich das nur drei Millimeter große Wesen dennoch amoebartig fortbewegen. „Ein spannender

Fall, denn Symmetrie ist folglich für vielzelliges Leben keine zwingende Voraussetzung.“ Vielleicht hat *Trichoplax*

aber auch früher einmal Symmetrie besessen und sie durch eine Laune der Natur wieder verloren. ▶

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Gene *bambi* und *slit* sind bei den Plattwürmern – und möglicherweise auch bei anderen Organismen – an der Festlegung der Körpermitte beteiligt.
- Konzentrationsgefälle von Signalstoffen verraten Zellen, wo sie sich befinden. So können sie sich auch nach Trennung vom übrigen Organismus an ihre Lage und Orientierung im Körper „erinnern“. Fehlende Teile werden dann an korrekter Stelle neu gebildet.
- Die Fähigkeit von Planarien, ganze Körperteile neu zu bilden, dient möglicherweise gar nicht dem Zweck der Wundheilung, sondern könnte eine extreme Form der asexuellen Fortpflanzung sein.

## GLOSSAR

**Bilateralsymmetrie:** Vorherrschende Symmetrieform im Tierreich: Mehr als 95 Prozent der Tierarten zählen zu den Bilateria, darunter auch der Mensch. Die Körpermitte stellt die Symmetriechse dar, an der jeder Punkt rechts und links davon gespiegelt und mit seinem Gegenüber zur Deckung gebracht werden kann. Manche Gruppen wie die Seeigel und die Seesterne sind als Larven bilateral, später aber radiärsymmetrisch.

**Hedgehog:** Signalprotein, das die Embryonalentwicklung der meisten Tiere steuert. Das Protein ist Teil eines Signalweges aus verschiedenen Enzymen und Rezeptoren innerhalb von Zellen. Der Signalweg muss schon sehr früh in der Evolution entstanden sein, denn er kommt bei fast allen Tiergruppen vor. Bei Insekten kontrolliert er die korrekte Bildung der Körperteile und Flügel. Bei Wirbeltieren ist der Hedgehog-Signalweg für die bilaterale Symmetrie und die Anlage der Gliedmaßen verantwortlich. Schäden führen zu massiven Fehlbildungen und können Krebs verursachen.

# 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)

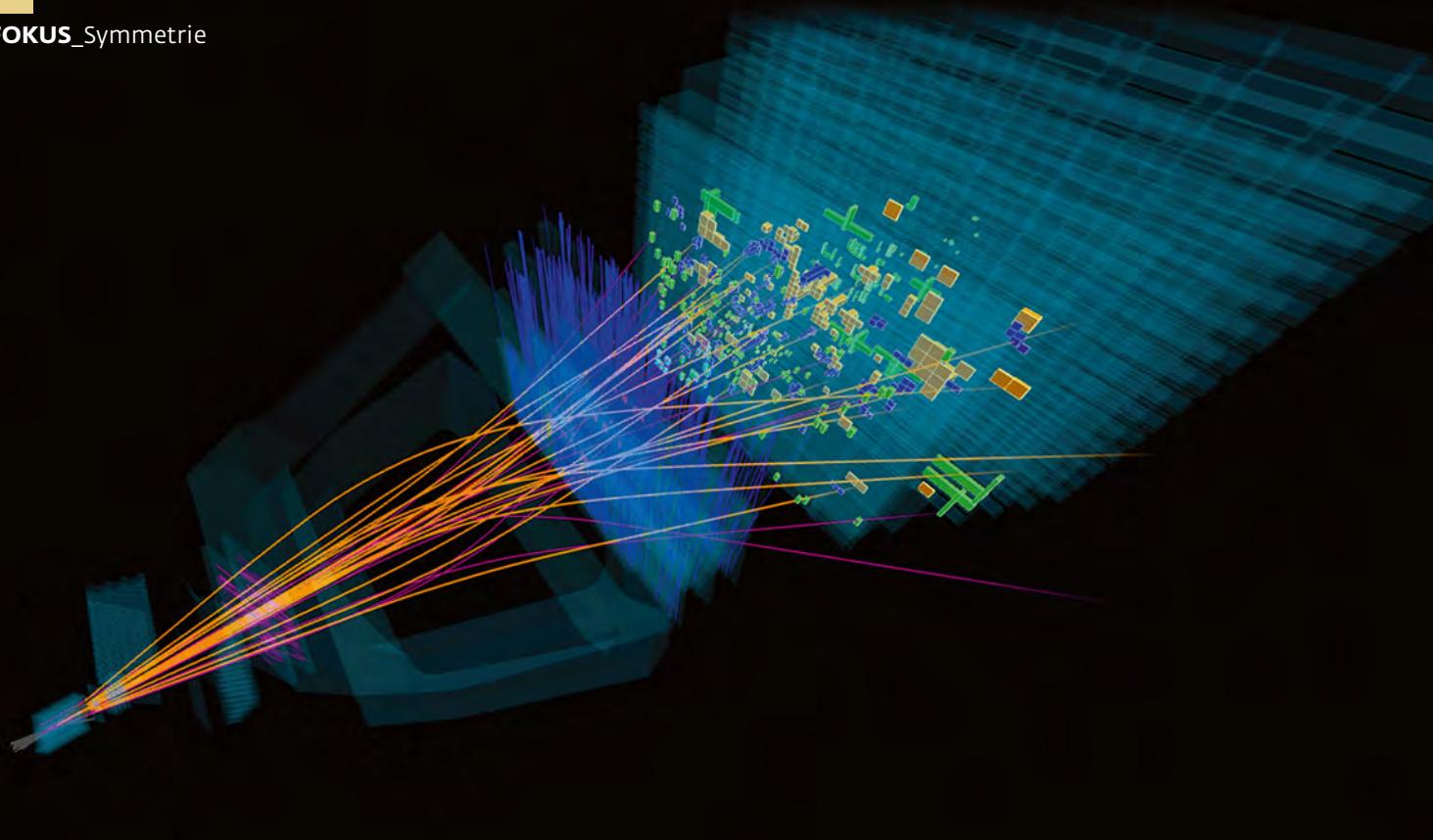
Kostenlos  
downloaden!



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



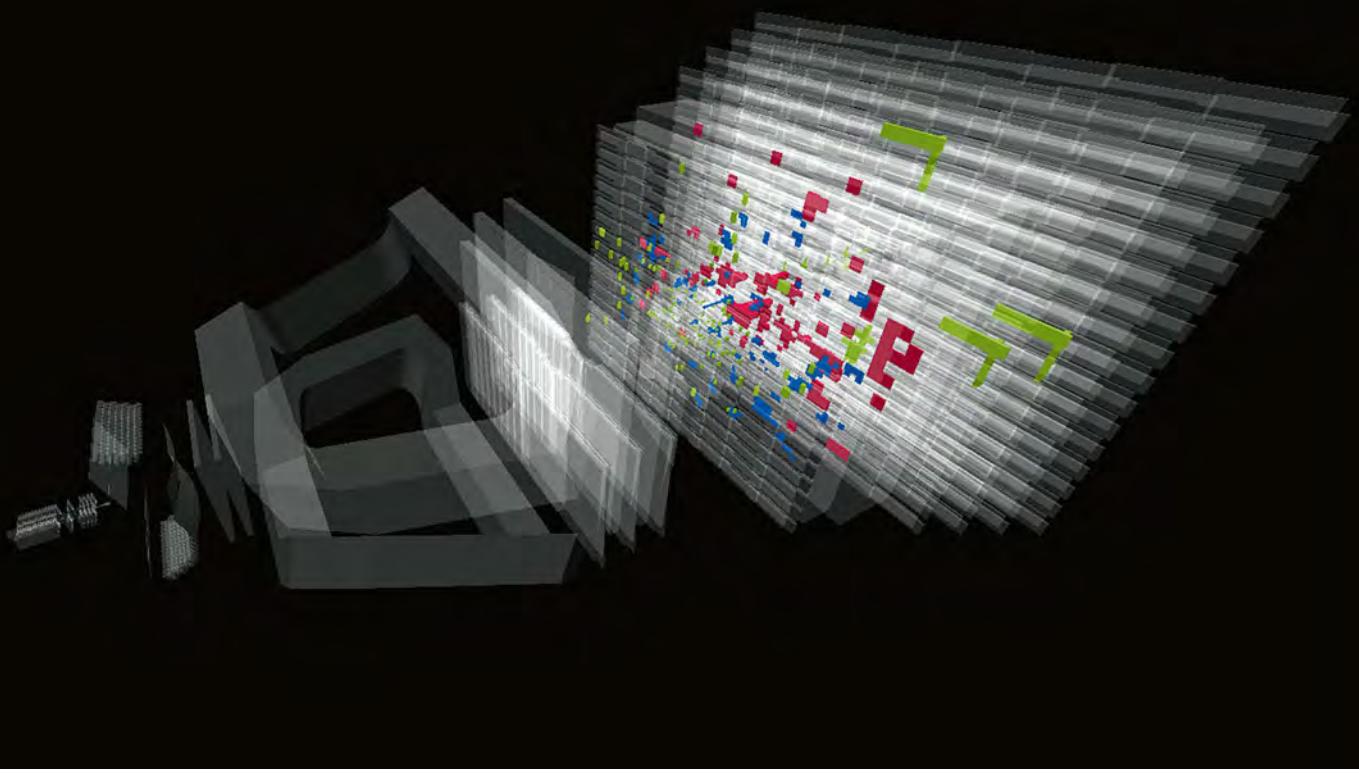
MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



# Materie im Vampirtest

Es ist nicht mehr als eine winzige Asymmetrie zwischen der Materie und ihrem Spiegelbild, der Antimaterie, die zu einem Materieüberschuss im Universum führte. Ihr verdanken wir unsere Existenz. Forschergruppen an **Max-Planck-Instituten** in **Heidelberg**, **München** und **Garching** wollen auf unterschiedlichen Wegen herausfinden, warum der Materie – ähnlich wie Vampiren – ihr Spiegelbild abhandengekommen ist.

TEXT THOMAS BÜHRKE



Philosophen treibt das Problem, warum es im Universum Materie gibt, schon seit Jahrhunderten um. Gottfried Wilhelm Leibniz brachte es auf den Punkt: „Warum gibt es überhaupt etwas und nicht vielmehr nichts?“ Das Problem ist aber nicht nur ein philosophisches, sondern auch ein physikalisches. So suchen Physiker seit Jahrzehnten nach einer Lösung für Rätsel. Symmetrien spielen hierbei – wie in vielen Bereichen der Physik – eine entscheidende Rolle.

Die Mathematikerin Emmy Noether stieß schon vor 100 Jahren auf fundamentale Zusammenhänge zwischen geometrischen Symmetrien in Raum und Zeit und den physikalischen Erhaltungssätzen. So lässt sich aus solchen Symmetrien der Energieerhaltungssatz herleiten: In einem abgeschlossenen System kann Energie weder verloren gehen noch erzeugt werden. Daraus ergibt sich, dass ein Perpetuum mobile unmöglich ist. Ebenso lässt sich die Erhaltung des Gesamtimpulses, etwa wenn zwei Kugeln aufeinanderstoßen, aus Vorgaben der Symmetrie begründen.

Im Lauf der vergangenen Jahrzehnte mussten Physiker aber erfahren, dass

es nicht nur auf Symmetrien ankommt: „Diese kennen wir bereits, das große Rätsel sind die Asymmetrien“, sagt Michael Schmelling vom Max-Planck-Institut für Kernphysik, der an einem der großen Experimente am Teilchenbeschleuniger LHC des Cern in Genf beteiligt ist. In der Tat, wenn der Baukasten der Elementarteilchen vollständig symmetrisch aufgebaut wäre, gäbe es im Universum keine Materie, mithin weder die Erde noch uns Menschen.

### EIN ANTITEILCHEN ZU JEDEM ELEMENTARTEILCHEN

Der Grund, warum eine vollkommene Symmetrie die Existenz der Materie unmöglich gemacht hätte, liegt in den Vorgängen beim Urknall. Denn nach der heutigen Vorstellung war das Universum in den ersten milliardstel Sekunden erfüllt von Strahlung und Materie mit unvorstellbar hoher Temperatur und Dichte. Es herrschte ein brodelndes Gemisch aus Teilchen, die sich in Strahlung und wieder zurück in Materie verwandelten.

Nun wissen Physiker aber, dass in einem solchen Tohuwabohu aus Teilchen und Strahlung auch Antiteilchen ent-

Auf der Suche nach einer Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie: Am LHC analysieren Physiker die Zerfallsprodukte von Teilchen, die in den verschiedenen Ebenen des Detektors Signale hinterlassen, die als rechteckige Farbfelder dargestellt sind.

stehen. Auch diese Erkenntnis ist schon jahrzehntaalt: Zu jeder Art von Elementarteilchen gibt es das entsprechende Antiteilchen, das sich nur im Vorzeichen seiner elektrischen Ladung unterscheidet, sonst aber exakt identische Eigenschaften besitzt. Das Antiproton etwa sieht wie ein positiv geladenes Proton aus, ist aber negativ geladen.

Obwohl es an der Entstehung von Antiteilchen bei der Geburt der Welt keinen Zweifel gibt, kommen sie im Universum so gut wie nicht vor. Denn die beiden ungleichen Partner haben die fatale Eigenschaft, sich bei einer Begegnung gegenseitig in einem Strahlungsblitz zu zerstören. Schlussfolgerung für den Urknall: Hätte damals vollständige Symmetrie geherrscht, wären in dem Strahlungsmeer genauso viele Teilchen wie Antiteilchen entstanden – und die hätten sich alle gegenseitig vernichtet. Das All würde dann nur Strahlung beinhalten. Woher also kommt die Materie? >



Überwachte Kollisionen: Dmitry Popov (vorn), Michael Schmelling und Burkhard Schmidt (von links) verfolgen das Prozessieren der Rohdaten im Kontrollraum des LHCb-Experiments.

Damit nach dem Urknall Materie übrig bleiben konnte, muss ein winziges Ungleichgewicht geherrscht haben: Beim Zerstrahlen von jeweils etwa einer Milliarde Materie-Antimaterie-Paaren blieben wenige Teilchen übrig. Diese Differenz erscheint sehr gering, doch ihr verdanken wir unsere Existenz. Davon, wie diese Asymmetrie zustande gekommen ist, haben die Physiker nur eine vage Idee: „Man kann sich das vielleicht wie einen Phasenübergang vorstellen, ähnlich wie beim Gefrieren von Wasser zu Eis“, erklärt Schmelling. „Dabei wurde die Asymmetrie gewissermaßen eingefroren und die Übermacht der Materie im Universum zementiert.“

Diese Theorie geht auf den russischen Physiker und Friedensnobelpreisträger Andrei Sacharow zurück. Als er sie 1967 veröffentlichte, stützte er sich auf ein Experiment, das Physiker drei Jahre zuvor in ihrem Glauben an die Natursymmetrien zutiefst erschüttert hatten. James Cronin und Val Fitch hatten in einem Beschleuniger des Brookhaven National Laboratory den Zerfall von sogenannten K-Mesonen untersucht. Diese Teilchen bestehen aus zwei

Quarks, die zu den Elementarteilchen gehören, und sind instabil. In Bruchteilen einer Sekunde nach ihrer Erzeugung zerfallen sie in andere Teilchen.

### DAS STANDARDMODELL IST IN GEWISSE WEISE DEHNBAR

Cronin und Fitch untersuchten die Zerfälle von K-Mesonen und verglichen diese mit denen von Anti-K-Mesonen. Als sie im Promillebereich einen winzigen Unterschied in den beiden Zerfallsarten fanden, war das damals geradezu ein Schock für die Fachgemeinde. Die vollständige Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie war in diesem Fall gebrochen, wie die Physiker sagen.

Den Überschuss der Materie im Urknall konnten sie so aber nicht erklären, dafür ist die gemessene Asymmetrie viel zu klein, sie müsste eine Milliarde Mal größer sein. Die Theoretiker Toshihide Masukawa und Makoto Kobayashi bauten diese Asymmetrie ins Standardmodell der Elementarteilchen ein, wofür sie 2008 den Physiknobelpreis erhielten. Cronin und Fitch waren mit dieser Auszeichnung bereits 1980 geehrt worden.

Das Standardmodell ist wie ein Baukasten, der alle bekannten Elementarteilchen und die zwischen ihnen wirkenden Kräfte enthält. Dieses Modell funktioniert ausgezeichnet, ist aber in gewisser Weise dehnbar. So legt es zwar die Anzahl und Art der Teilchen fest, kann aber bestimmte physikalische Größen nicht vorhersagen, sie müssen der Natur entnommen werden. Dazu zählen zum Beispiel die Massen, die dann in das Modell eingebaut werden.

Auch eine Asymmetrie wie die der Mesonen lässt sich dort noch unterbringen, ohne dass das Gebäude einstürzt. Allerdings nur innerhalb eines bestimmten Rahmens, und den gilt es experimentell und theoretisch auszuloten. Richtig spannend wird es dabei erst, wenn Forscher Asymmetrien entdecken, welche die Grenzen des Standardmodells sprengen. Denn nur solche Unstimmigkeiten können die Existenz der Materie erklären, sie würden die Physikergemeinde allerdings zwingen, anstelle des alten Modells ein vollkommen neues Theoriegebäude zu errichten und damit eine gewissermaßen neue Physik zu schaffen.

Deshalb suchen die Forscher weiter nach solchen Abweichungen von der vollkommenen Symmetrie. In letzter Zeit haben sie sich dabei auf eine andere Art von Mesonen konzentriert: die B-Mesonen, die in verschiedenen Varianten vorkommen. Das derzeit ideale Instrument hierfür ist der LHC, in dem Protonen gegensinnig umlaufen und mit höchster Energie kollidieren. In den hierbei entstehenden Feuerbällen formieren sich unter vielen anderen Teilchen auch B-Mesonen und deren Antipartner, deren Zerfallsteilchen mit dem LHCb-Detektor analysiert werden.

Schmellings Gruppe war maßgeblich beteiligt an der Entwicklung und dem Bau eines Siliciumdetektors für dieses Gerät, das die Ausmaße eines dreistöckigen Wohnhauses hat. Allein der Siliciumdetektor belegt eine Fläche von ungefähr elf Quadratmetern und kann den Durchgang eines geladenen

Teilchens mit einer Genauigkeit von 0,05 Millimetern, also etwa der Dicke eines menschlichen Haares, ermitteln.

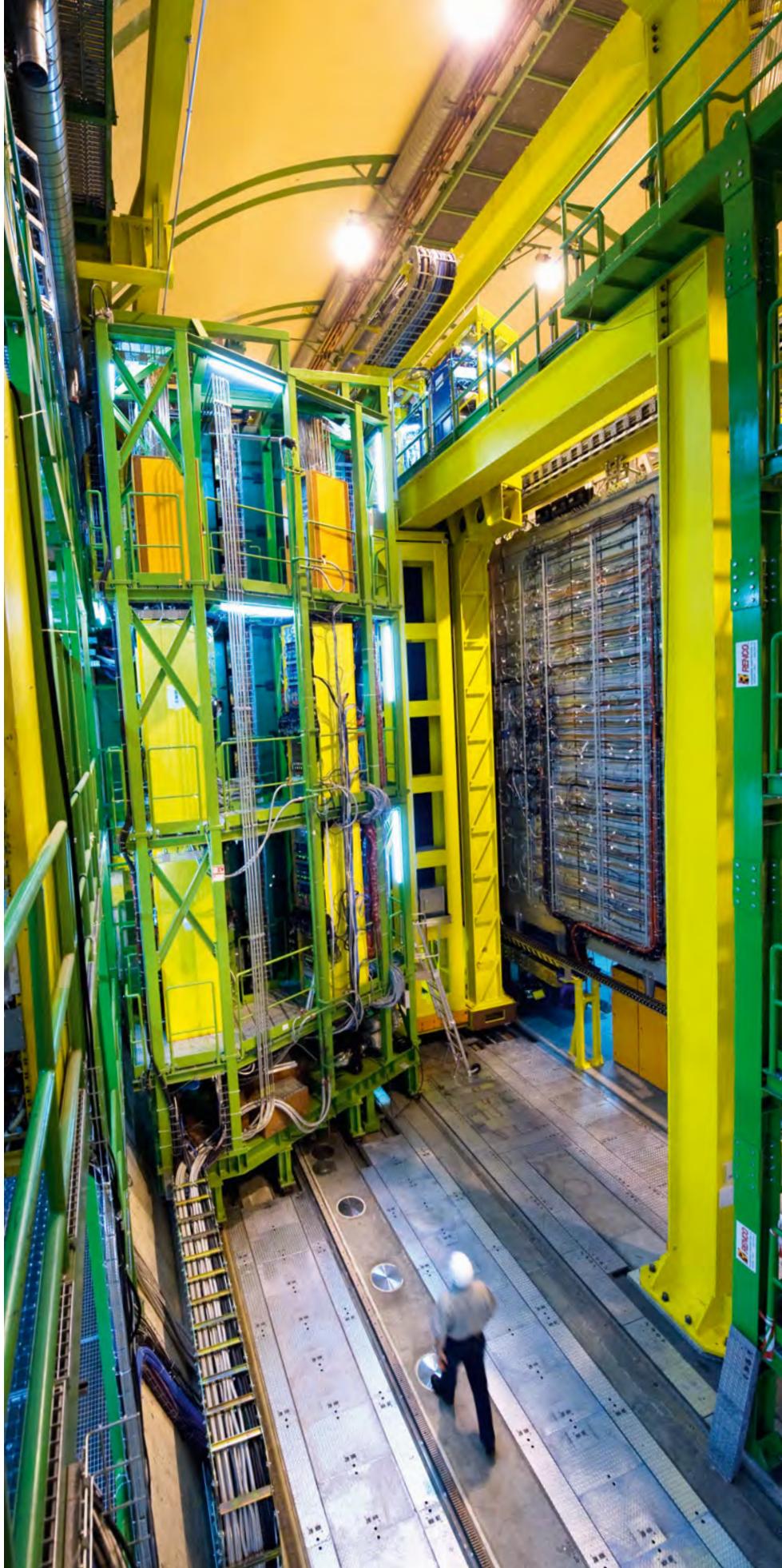
Nachdem Physiker in den USA und Japan bei  $B^0$ -Mesonen bereits eine Asymmetrie von acht Prozent entdeckt hatten, konzentrierte sich die LHCb-Kollaboration auf das Brudermeson  $B_s^0$ , das sich in großer Zahl im LHC erzeugen lässt. Vor drei Jahren dann die Überraschung: Die Forscher hatten bei dem Vergleich der Zerfälle von  $B_s^0$ -Mesonen und deren Antimesonen eine Asymmetrie von nie gesehener Größe – nämlich von 27 Prozent – gefunden. War das endlich die heiße Spur, die zur Ursache der geheimnisvollen Bevorzugung der Materie im Urknall führt?

Leider nein – auch diese sehr starke Asymmetrie lässt sich vermutlich noch im Rahmen des Standardmodells erklären, wie die Theoretiker rasch vermeldeten. Nur ein Wert, der dort nicht hineinpasst, könnte ein Hinweis auf die Physik jenseits des Standardmodells sein, die den Materieüberschuss begreiflich machen könnte. Nach ihr suchen Wissenschaftler mit dem LHC derzeit akribisch – bisher erfolglos.

Der Datenstrom des LHC ist jedoch noch lange nicht vollständig ausgewertet, und die Suche nach einer Symmetrieverletzung wird in den Zerfällen anderer Mesonentypen fortgesetzt. Doch Michael Schmelling will noch nach einem anderen Effekt suchen, welcher die Grundfesten der heutigen Physik erschüttern würde: dass die Charakteristika eines Mesonen-Zerfalls, so etwa die Lebensdauer der Teilchen, von der Richtung im Raum abhängt – also davon, wie die Anordnung des Experiments hinsichtlich der Fixsterne orientiert ist.

Eine Fülle von Experimenten bestätigte bis heute, dass der Raum isotrop ist, also keine irgendwie ausgezeichnete

Haushohes Experiment: Während des Aufbaus des 21 Meter langen, 10 Meter hohen und 5600 Tonnen schweren LHCb-Detektors konnten die Physiker durch diesen hindurchgehen.





Christian Kiesling (rechts) und seine Kollegen begutachten die Fortschritte beim Aufbau des Belle-II-Detektors am SuperKekB. Kiesling deutet auf die Öffnung, die den Vertexdetektor aufnimmt, mit dem der genaue Ort des Zerfalls bestimmt wird. Den Kern dieses Instruments bildet der zweiläufige Pixeldetektor (links oben), in dessen Innerem die Zerfälle stattfinden. Er setzt sich aus Modulen zusammen, deren Bildsensoren jeweils 200 000 Pixel umfassen (links unten).

Vorzugsrichtung besitzt. Es ist physikalisch ohne Belang, in welche Richtung man im freien Raum einen Lichtstrahl schickt, er wird sich immer in gleicher Weise und gleicher Geschwindigkeit bewegen. Die genauesten Experimente bestätigen dies bis auf 15 Stellen hinter dem Komma genau. Wie aber steht es mit den Zerfallseigenschaften von Teilchen und Antiteilchen?

Um sich dieser Frage zu nähern, muss man über die zwischen Teilchen wirkenden Kräfte nachdenken, die der Baukasten Standardmodell enthält. Beim Licht spielt ausschließlich die elektromagnetische Kraft eine Rolle. Wenn Teilchen zerfallen, kommt aber die sogenannte schwache Kraft ins Spiel, die nur im Atomkern wirkt. Es ist theoretisch denkbar, dass diese schwache Kraft mit einem unbekannten, hypothetischen Energiefeld wechselwirkt, das den Raum durchzieht. Die Idee kommt nicht von ungefähr. Kosmologen haben 1998 entdeckt, dass es im Universum ein solches Energiefeld gibt: die Dunkle Energie. Sie wirkt wie ein Druck im Dampfkessel, treibt das Universum auseinander und lässt es beschleunigt expandieren.

Man könnte sich also ein richtungsabhängiges Hintergrundfeld vorstellen, das die schwache Kraft spürt, die elek-

tromagnetische aber nicht. Dann wäre es möglich, dass die Merkmale eines Teilchenzerfalls davon abhängen, in welcher Richtung man sich relativ zu diesem Hintergrundfeld bewegt – so, wie auch die Geschwindigkeit eines Schiffes davon abhängt, ob es sich mit der oder gegen die Strömung bewegt. Das sei alles hypothetisch, so Schmeling: „Aber wir wollen es nachprüfen.“

### GESUCHT SIND VARIATIONEN IM LAUFE EINES TAGES

Die Aufgabe besteht nun darin, die Zerfälle und andere Eigenschaften von Teilchen und Antiteilchen relativ zum hypothetischen Energiefeld, also abhängig von der Orientierung des experimentellen Aufbaus zu den Fixsternen, zu vergleichen. „Wenn es eine Richtungsabhängigkeit gibt, müssen wir Variationen mit der Periode eines Tages sehen, weil die Orientierung zu den Fixsternen in der Nacht anders ist als tagsüber“, so Schmeling. Die Daten liegen schon vor, und der LHC wird in der Zukunft weitere liefern.

Das Experiment am LHC, das der Asymmetrie zwischen Materie und antimaterie nachspürt, soll zudem durch ein weiteres Beschleunigerexperiment ergänzt werden. Wenn alles gut geht, wird

es in zwei Jahren starten. Denn nach achtjähriger Umbauphase soll am Forschungszentrum im japanischen Tsukuba der Beschleuniger SuperKekB auf vollen Touren laufen. In zwei getrennten Ringen mit je drei Kilometer Umfang laufen Elektronen und Antielektronen (Positronen) in gegensinniger Richtung um und kollidieren an einer Stelle.

SuperKekB ist zwar kleiner als der LHC und beschleunigt die Teilchen längst nicht auf eine so hohe Energie, aber Letztere ist genau so eingestellt, dass bei den Kollisionen viel mehr Paare von B-Mesonen und deren Antiteilchen entstehen als am LHC – und gleich wieder zerfallen. Physiker sprechen daher gern von der B-Fabrik. In dieser Anlage gibt es also einen deutlich schwächeren Untergrund von anderen Teilchen, sodass die Datenanalyse einfacher ist als am LHC. Zudem lassen sich mit dieser Anlage Zerfallsarten der B-Mesonen studieren, die dem LHC grundsätzlich verborgen bleiben.

Von Ende 2018 an soll die Superfabrik bis zu 40-mal mehr B-Mesonen pro Zeiteinheit produzieren als ihr Vorgänger – und der hielt schon bis zu seiner Stilllegung im Jahr 2010 den Weltrekord. Um die Zerfallsprodukte der Teilchen exakt analysieren zu können, musste der alte Detektor namens Belle,

der die beim Mesonen-Zerfall entstehenden Teilchen nachweist, technisch erheblich verbessert werden.

Zentrales Element von Belle II ist ein Vertexdetektor, mit dem sich die Flugrichtung und der Entstehungsort, Vertex genannt, eines Teilchens bis auf einen hundertstel Millimeter genau bestimmen lassen. Den Kern dieses Instruments bildet ein Pixelvertexdetektor, der seinerseits aus 40 Bildsensoren besteht. Einer dieser Sensoren umfasst 200 000 Einzelpixel.

Trifft ein Teilchen auf ein solches Pixel, so erzeugt es darin ein sehr kleines Signal, welches in dem Pixel selbst verstärkt wird. „Mit ihren 50 mal 60 Mikrometern sind die Pixel kleine Wunderwerke für sich“, sagt der Sprecher der internationalen Detektorkollaboration Christian Kiesling, der am Max-Planck-Institut für Physik in München forscht. Dort und am Münchner Halbleiterlabor der Max-Planck-Gesellschaft wurde der Pixelvertexdetektor konzipiert und gebaut. „Die Entwicklung dieses weltweit einzigartigen Detektors hat uns viel Schweiß gekostet“, sagt der Wissenschaftler.

Mit Belle II wollen die Forscher am SuperKekB vor allem auch jene Zerfallsarten der B-Mesonen studieren, die extrem selten sind. Denn für diese machen Theoretiker sehr genaue Vorhersagen, sprich: Hier ist das Standardmodell nicht so dehnbar und lässt sich am besten experimentell überprüfen. Zudem auf dem Programm steht auch die Untersuchung anderer instabiler Teilchen – immer in der Hoffnung, irgendwo eine Asymmetrie zwischen Teilchen und entsprechendem Antiteilchen zu finden, die den Materieüberschuss in der Welt erklären kann.

Ob am LHC oder am SuperKekB – die Zerfallsexperimente spielen sich bei enorm hohen Energien ab. Die Suche nach der Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie kann aber auch andere Wege verfolgen. Die Alternative besteht schlicht darin, Eigenschaften von Elementarteilchen und deren Antiteil-

chen mit möglichst großer Genauigkeit zu vergleichen. Diese sollten, abgesehen vom Vorzeichen, identisch sein. Jeder noch so kleine weitere Unterschied widerspricht der heutigen Physik. Hier lässt auch das elastische Standardmodell keinerlei Spielraum.

### EINE MÖGLICHE ASYMMETRIE IM MAGNETISCHEN MOMENT

So untersucht eine Gruppe von Klaus Blaum, Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik, die Eigenschaften von Protonen, den Kernen von Wasserstoffatomen, und Antiprotonen. Am genauesten haben die Forscher für die beiden Teilchen bisher das Verhältnis von Ladung zu Masse verglichen. Diese Kombination ist experimentell leichter messbar als die Einzelgrößen.

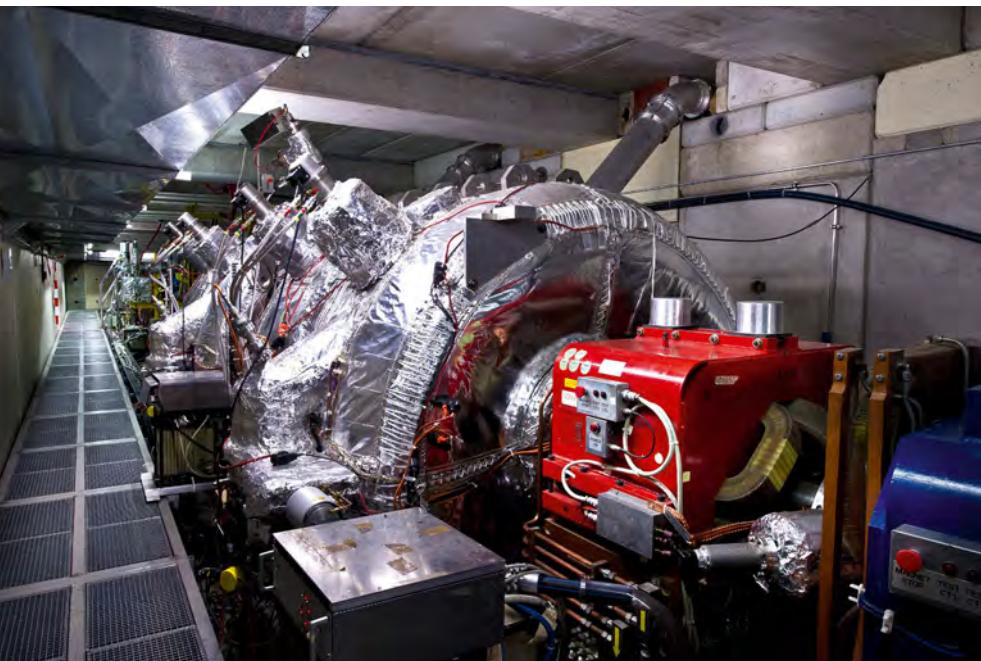
Hierfür wird zunächst ein Proton oder ein Antiproton in einen Vakuumbehälter transferiert, wo ein elektrisches und ein magnetisches Feld es einfangen und speichern. Das Teilchen vollführt dann eine Kreisbewegung um die Achse des Magnetfelds, die sich genau messen lässt und woraus sich die gesuchte Messgröße ergibt (MAXPLANCK-FORSCHUNG 3/2010, Seite 46 ff.). „Dieses Experiment ist sehr heikel und erfor-

dert viel Erfahrung, weil wir nur mit einem einzigen Proton oder Antiproton arbeiten“, sagt Klaus Blaum. Mitte 2015 veröffentlichte die Base-Kollaboration unter der Leitung von Blaums ehemaligem Mitarbeiter Stefan Ulmer das bisher weltweit genaueste Ergebnis im Fachmagazin NATURE. Demnach stimmt das Ladung-zu-Masse-Verhältnis bei beiden Teilchen bis auf weniger als ein Milliardstel überein.

Diese experimentelle Erfahrung nutzen die Forscher nun, um eine weitere charakteristische Größe von Proton und Antiproton zu vergleichen: das magnetische Moment. Dies kann man sich entfernt als Stärke des Magnetfelds vorstellen, die ein einzelnes Proton erzeugt. Die ist extrem klein und schwerer messbar als das Verhältnis Ladung zu Masse. Es könnte aber nach theoretischen Vorhersagen ein heißer Kandidat für eine Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie sein. Im vorletzten Jahr gelang es einer internationalen Kollaboration, an der neben der Heidelberger Gruppe unter anderen auch die Universität Mainz, die GSI in Darmstadt und das Forschungsinstitut Riken in Japan beteiligt sind, das magnetische Moment des Protons bis auf drei Milliardstel genau zu bestimmen. Weltrekord! >

Mit einer Penning-Falle fangen Forscher um Klaus Blaum geladene Teilchen wie Protonen und Antiprotonen. Ringförmige Elektroden erzeugen die elektrischen Felder, um die Ionen festzuhalten.





Ein Speicher für Antimaterie: Ein Entschleuniger am Cern bremst Antiprotonen, mit denen anschließend weitere Experimente gemacht werden.

Als Nächstes wollen die Forscher die entsprechende Messung am Antiproton machen. Dafür müssen die Physiker ihre Apparatur allerdings zum Cern bringen, wo ein kleiner Beschleuniger, der Antiproton Decelerator, die kalten Antiprotonen liefert. „Dort wollen wir das magnetische Moment eines einzelnen Antiprotons messen und bis Ende 2018 die Genauigkeit um das Zehn- oder Hundertfache steigern“, erklärt Blaum. Das ist ein Wettlauf mit der Zeit, denn im September 2018 wird der LHC für eine längere Wartungspause abgeschaltet, und dann kommt auch die Antiprotonen-Produktion zum Stillstand.

Noch anspruchsvoller ist das Experimentieren mit Antiwasserstoff, also Atomen, die aus einem Antiproton und einem Antielektron (Positron) bestehen. Auch diese Experimente sind derzeit weltweit ausschließlich am Cern möglich. Das erste knifflige Problem besteht darin, Antiprotonen und Positronen zusammenzubringen und so weit abzukühlen, dass sie sich zu Antiatomen vereinigen. Das zweite Problem tritt genau in diesem Moment auf: Anders als ihre beiden Bausteine sind die Antiatome elektrisch neutral und lassen sich nicht so einfach einfangen und speichern.

Warum aber dieser Aufwand mit Atomen, wenn Untersuchungen an Elementarteilchen wie Protonen und de-

ren Pendants aus der Antiwelt einfacher sind? Ein Grund ist wieder die Präzision, die bei Messungen an Atomen möglich sind. Denn kaum ein quantenphysikalischer Wert ist so genau vermessen wie ein bestimmter Übergang des Elektrons im Wasserstoffatom. Unter einem Übergang verstehen Physiker das Anheben eines Elektrons in einen höheren beziehungsweise Herunterholen in einen niedrigeren Energiezustand.

### ÜBERSPITZT GEFRAGT: FÄLLT DER ANTIAPFEL NACH OBEN?

Die Energie, die bei dem Übergang ausgetauscht wird, lässt sich so genau messen, weil Theodor W. Hänsch, Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching, den sogenannten Frequenzkamm entwickelte, für den er 2005 mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet wurde. Diese Technik ermöglicht es, die Frequenz des Wasserstoffübergangs mit einem Spektrometer bis auf 14 Stellen nach dem Komma genau zu messen. Wenn man also minimale Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie finden will, ist diese Technik am genauesten. An diesem Kunststück arbeitet seit 2008 die Gruppe von Masaki Hori am Garchinger Max-Planck-Institut im Rahmen der internationalen Atrap-Kollaboration.

Am Antiwasserstoff lässt sich aber noch eine zweite Eigenschaft messen, die einen Unterschied zwischen Materie und Antimaterie offenbaren könnte: der freie Fall einzig und allein unter dem Einfluss der Schwerkraft, der sich nur an elektrisch neutralen Teilchen zeigen lässt. An solchen Experimenten arbeiten Alban Kellerbauer und seine Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Kernphysik.

Dahinter steht die überspitzte Frage: Fällt der Antiapfel nach oben? So krass muss es gar nicht sein. Jeder kleinste Unterschied zwischen Materie und Antimaterie im freien Fall wäre ein Angriff auf die Grundfesten der Physik, insbesondere auf Einsteins allgemeine Relativitätstheorie. Sie setzt voraus, dass alle Körper unabhängig von ihrer Zusammensetzung, Form oder Masse im Schwerkeld gleich schnell fallen.

Seit 2010 entwickelt Kellerbauers Team mit Kollegen der internationalen Aegis-Kollaboration eine Apparatur am Cern, um den freien Fall von Antiwasserstoff zu untersuchen. Zunächst müssen sie dessen Atome wie ihre Kollegen der Atrap-Kollaboration aus einem Antiproton und einem Positron, die jeweils getrennt erzeugt werden, herstellen. Die ganzen Atome fliegen nun durch eine etwa einen Meter lange horizontale Röhre, bevor sie auf einen Detektor treffen.

Verhalten sich die Antiatome wie normale Atome, werden sie aufgrund der Schwerkraft auf einer Strecke von einem Meter um etwa zehn Mikrometer (millionstel Meter) absinken. Um das zu überprüfen, benötigen die Physiker einen Detektor mit sehr hoher Ortsauflösung. „Auch wenn es sich altmodisch anhört – mit einer Fotoemulsion haben wir die besten Erfahrungen gemacht“, sagt Alban Kellerbauer: „Damit können wir den Einschlagsort bis auf 60 Nanometer genau bestimmen.“

Mit Antiteilchen zu experimentieren ist sehr heikel, weil sich diese mit ihren Materiepartnern am liebsten in einem Lichtblitz vereinigen möchten und solche Partner in dieser Welt überall um sie herum zu finden sind. Die Aegis-Gruppe will diese selbstzerstörende Partnerwahl natürlich verhindern. Obwohl das experimentell nicht einfach ist, setzen die Forscher alles da-

ran, ihre ersten Messungen vor dem Abschalten des LHC im Herbst 2018 abzuschließen. „Bis dahin hoffen wir, eine Genauigkeit von 30 Prozent zu erzielen“, so Kellerbauer.

Im Prinzip kann man damit zunächst nur die Frage klären, ob Antimaterie nach oben fällt oder nicht. Wenn sie im Schwerefeld tatsächlich den entgegengesetzten Weg der Materie nehmen sollte, wäre das unglaublich. Es würde die heutige Physik auf den Kopf stellen und eine fundamentale Ungleichheit zwischen Materie und Antimaterie manifestieren, an die zurzeit nur die verwegstenen Forscher glauben mögen. Wahrscheinlicher ist aber, dass der Unterschied zwischen Materie und Antimaterie deutlich subtiler ist. Und allem Anschein nach brauchen die Forscher unabhängig davon, welcher Spur sie auf der Suche nach ihm folgen, noch etwas Geduld. ▶

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Im Urknall ist Materie und Antimaterie entstanden. Aufgrund einer Asymmetrie zwischen ihnen blieb eine geringe Menge an Materie übrig, jedoch keine Antimaterie. Der Überschuss lässt sich im Rahmen des Standardmodells der Teilchenphysik nicht erklären.
- Physiker suchen auf verschiedenen Wegen nach der Asymmetrie. So analysieren sie an den Teilchenbeschleunigern LHC und SuperKekB etwa die Zerfälle von kurzlebigen B-Mesonen, die aus einem Quark und einem Antiquark bestehen. Zudem vergleichen sie physikalische Eigenschaften von Teilchen und Antiteilchen wie etwa deren Verhalten im Schwerefeld.
- Die bei Zerfällen von Mesonen bisher beobachteten Asymmetrien lassen sich noch mit dem Standardmodell vereinbaren und können den Materieüberschuss daher nicht erklären.

### GLOSSAR

**Mesonen** sind selbst keine Elementarteilchen, weil sie aus einem Quark und einem Antiquark bestehen. Bisher sind mehr als 100 Mesonen bekannt, die sich darin unterscheiden, welche Quarks in ihnen verpaart sind.

**Standardmodell der Teilchenphysik:** Diese Theorie beschreibt alle Elementarteilchen und die Wechselwirkung zwischen ihnen außer der Gravitation. Der Überschuss der Materie im Universum lässt sich mit dem Standardmodell nicht erklären, weil er auf einer Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie beruht, die sich damit nicht vereinbaren lässt.



**RWTH Forschungsmanager/in**  
Expert Zertifikatsprogramm



**RWTH**  
**Forschungsmanager/in**  
Connecting Excellence.

Berufsbegleitendes Weiterbildungsprogramm  
der RWTH Aachen für Fach- und Führungskräfte  
an der Schnittstelle von Forschung und  
Management.

[weiterbildung.rwth-aachen.de/rwth-forschungsmanager](http://weiterbildung.rwth-aachen.de/rwth-forschungsmanager)



# Das schafft unser Gehirn **mit links**

Unser Körper, unser Verhalten, aber auch unser Gehirn sind alles andere als symmetrisch. Und das scheint wichtig zu sein, damit Denken, Sprechen und Motorik reibungslos funktionieren. Forscher am **Max-Planck-Institut für Psycholinguistik** in Nijmegen fahnden nach genetischen Spuren für dieses Phänomen. So wollen sie die grundlegenden molekularbiologischen Mechanismen entschlüsseln, die zur Asymmetrie im Gehirn beitragen, und mögliche Ursachen für neurologische Störungen aufdecken.

TEXT STEFANIE REINBERGER

Auf den ersten Blick sieht der menschliche Körper vollkommen symmetrisch aus: zwei Arme, zwei Beine, zwei Augen, zwei Ohren, und auch Merkmale wie Nase und Mund erscheinen bei den meisten Menschen in beiden Gesichtshälften ebenmäßig angelegt. Doch bei näherem Hinsehen zeigt sich, dass etwa ein Fuß länger ist als der andere, eine Hand ist kräftiger ausgebildet, oder das linke Ohr sitzt tiefer als das rechte. Noch deutlicher wird es beim Blick ins Innere: Das Herz schlägt links, Leber und Gallenblase befinden sich dagegen in der rechten Körperhälfte. Die rechte Niere sitzt meistens etwas tiefer als die linke, die in der Regel etwas größer und schwerer ist.

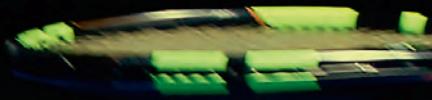
Auch beim Gehirn gaukelt der äußere Schein einen recht symmetrischen Aufbau vor. Das Denkorgan ist aufgeteilt in zwei Hälften, die in etwa gleich groß sind, und auch die Furchen und Wölbungen folgen einem ähnlichen

Muster. Doch die funktionellen Zentren sind höchst ungleichmäßig verteilt. Rechte und linke Hemisphäre sind auf unterschiedliche kognitive Funktionen spezialisiert. Sie teilen sich die Arbeit quasi – möglicherweise, um das Aufgabenspektrum insgesamt zu erweitern.

„Ganz deutlich ist die Lateralisierung bei der Sprache“, erläutert Clyde Francks, Arbeitsgruppenleiter in der Abteilung Sprache und Genetik am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nijmegen in den Niederlanden. „Bei den meisten Menschen wird Sprache vorwiegend in der linken Gehirnhälfte verarbeitet.“ Bei gerade mal einem Prozent der Bevölkerung liegen die Hauptzentren der Sprachverarbeitung rechts – ein Phänomen, das fast ausschließlich bei Linkshändern auftritt.

„Lateralisierung – sowohl beim Körperbau als auch im Gehirn und im Verhalten – ist ein biologisches Grundprinzip“, erklärt Francks und betont: „Im Gehirn scheint sie sich jedoch weitgehend

Starke Linke: Rafael Nadal, lange Jahre Weltranglistenerster im Tennis, ist zwar Rechtshänder, hält den Schläger jedoch überwiegend mit links. Forscher untersuchen, welche Unterschiede im Gehirn von Rechts- und Linkshändern zu finden sind.







» Die Lateralisierung ist individuell verschieden ausgeprägt – nicht nur bei den wenigen Menschen, deren Gehirn spiegelverkehrt spezialisiert ist.

unabhängig vom Körper zu entwickeln.“ Für die Anatomie zeichnet vor allem der asymmetrische Aufbau der Aminosäuren verantwortlich, der darüber bestimmt, wie sich Proteine zusammenfügen. Bereits in der frühesten Embryonalentwicklung gibt die asymmetrische Struktur der Moleküle vor, wie sich die einzelnen Bestandteile des neu entstehenden Organismus anordnen.

Die Ursache und die Mechanismen, die zur Asymmetrie im Gehirn und in dessen Funktion führen, sind dagegen noch weitestgehend unklar. Sehr wahrscheinlich spielt hier die Genetik eine tragende Rolle. Dafür spricht, dass sich die Unterschiede zwischen den Gehirnhälften bereits sehr früh in der Entwicklung zeigen. So etwa bei der Händigkeit – ein Effekt, der ebenfalls im Zusammenhang mit der Lateralisierung des Denkorgans steht und gleichzeitig das auffälligste asymmetrische Verhaltensprinzip

darstellt. Bereits bei zehn Wochen alten menschlichen Fötten lässt sich im Ultraschall beobachten, dass 85 Prozent der heranwachsenden Babys den rechten Arm häufiger bewegen als den linken. Sind die Fötten dann 15 Wochen alt, lässt sich anhand des Daumens, an dem sie bevorzugt nuckeln, mit sehr hoher Trefferquote vorhersagen, welche Hand sie auch noch als Erwachsene bevorzugen werden.

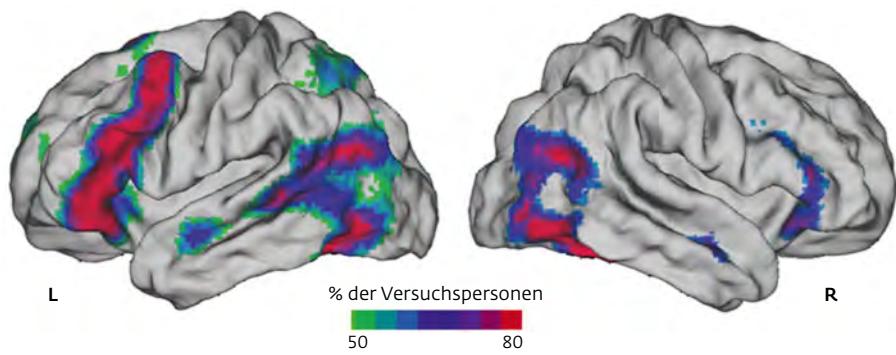
#### ENTDECKUNG EINES ERSTEN LINKSHÄNDER-GENS

Clyde Francks ist schon seit vielen Jahren fasziniert von der Lateralisierung des Gehirns. Bereits seit 2002 suchte der Zoologe – zunächst als Doktorand und später als wissenschaftlicher Mitarbeiter – am Wellcome Trust Centre for Human Genetics in Oxford, Großbritannien, nach Genen, die der Händigkeit zugrunde liegen. 2007 veröffentlichte er die Entdeckung eines Gens namens LRRTM1 (Leucine-rich repeat transmembrane neuronal 1), das möglicherweise mit der Tendenz zur Linkshändigkeit in Zusammenhang steht und über die väterliche Linie vererbt wird.

In Oxford arbeitete Francks eine Zeit lang mit Simon E. Fisher zusammen, dem heutigen Direktor am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik. Für Fisher standen jedoch andere Themen im Vordergrund. Er hatte 2001 das weithin bekannte Gen FOXP2 entdeckt, das eine zentrale Rolle für Sprache und Sprechen spielt. Als Fisher 2010 ans Max-Planck-Institut für Psycholinguistik kam, um dort die Abteilung Sprache und Genetik neu aufzubauen, warb er seinen ehemaligen Kollegen an. Und so zog mit Clyde Francks auch das Thema „Asymmetrie in Gehirn und Verhalten“ ins Max-Planck-Institut in Nijmegen ein.

**Links** Tulya Kavaklıoglu ist Mitarbeiterin der Arbeitsgruppe von Clyde Francks. Für ihre Doktorarbeit sucht sie nach Genen, die Linkshändigkeit beeinflussen. Interessant für die Forscher sind Zusammenhänge zwischen Händigkeit und den verschiedenen Funktionalitäten der beiden Gehirnhälften.

**Rechts** Untersuchungen mithilfe von Magnetresonanztomografen zeigen, dass mehr als 90 Prozent der Rechts-händer Sprache stärker in der linken als in der rechten Gehirnhälfte verarbeiten. Das trifft ebenso für rund 80 Prozent der Linkshänder zu. Das seltene Phänomen, dass Sprache stärker in der rechten Gehirnhälfte verarbeitet wird, findet sich fast ausschließlich bei Linkshändern.



Dass die wichtigen funktionellen Zentren für Sprache und Sprechen asymmetrisch über das Gehirn verteilt sind, hatte der französische Arzt Paul Broca bereits Anfang der 1860er-Jahre entdeckt. Er war auf ein seltsames Phänomen gestoßen: Wenn ein bestimmter Bereich in der linken Gehirnhälfte zerstört war, verstanden die Betroffenen zwar noch, was man ihnen sagte. Sie waren aber nicht mehr in der Lage, sich verbal auszudrücken. Patienten, bei denen sich die Verletzungen auf der gegenüberliegenden Seite befanden und daher die rechte Hemisphäre betrafen, zeigten diese Einbußen nicht.

Der Franzose hatte eines der Hauptzentren für Sprache entdeckt, das nach ihm benannte Broca-Areal, dem heute eine maßgebliche Funktion für die Sprachproduktion zugeschrieben wird, aber auch für die Verarbeitung von Satzstruktur und Grammatik. Ein weiteres wichtiges Sprachzentrum, das Wernicke-Areal, entdeckte wenige Jahre später, 1874, der deutsche Neurologe Carl Wernicke (1848–1905). Dieser Hirnregion kommt eine maßgebliche Rolle beim Sprachverstehen zu. Und ge-

nau wie das Broca-Areal ist auch die Wernicke-Region bei den meisten Menschen links verortet.

### UNTERSCHIEDE ZWISCHEN MÄNNERN UND FRAUEN

Neuere wissenschaftliche Untersuchungen auf Basis funktioneller Bildgebung, mit der sich anhand der Durchblutung oder des Zuckerstoffwechsels die aktiven Hirnregionen darstellen lassen, haben ergeben: Die relevanten Areale für Sprache und Sprachverarbeitung sind über das Gehirn verteilt, liegen oft sogar in weit voneinander entfernten Regionen. So verzeichnen Forscher auch in der rechten Hemisphäre Aktivität, wenn es um Sprache und Sprechen geht – wenn auch weniger als links.

Dazu kommt: Die Lateralisierung ist individuell verschieden ausgeprägt – und das nicht nur bei den wenigen Menschen, deren Gehirn spiegelverkehrt zu dem der Mehrheit spezialisiert ist. Auch die Denkorgane von Personen, deren Sprachverarbeitung prinzipiell links gelagert ist, unterscheiden sich darin, wie deutlich die Asymmetrie aus-

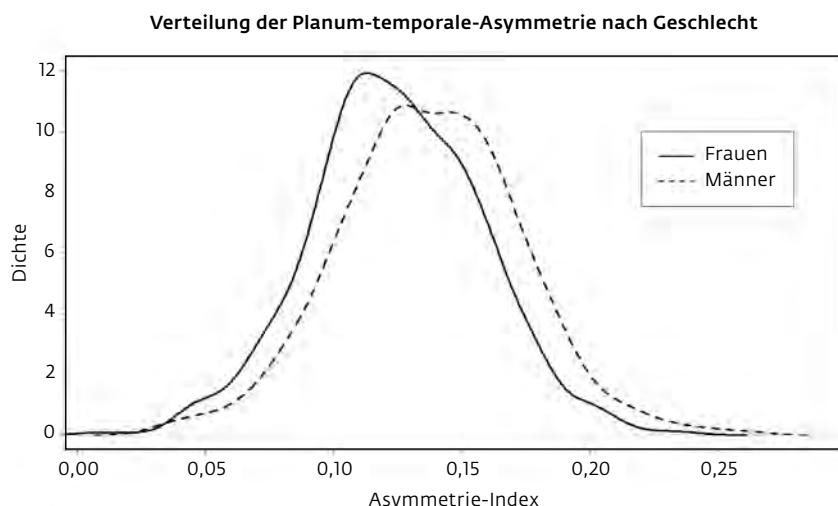
geprägt ist. Das kann sogar nur einzelne Hirnareale betreffen. Doch wie wirkt sich das auf die kognitiven Leistungen des Einzelnen aus? Und wie verhält es sich mit den Unterschieden zwischen Männern und Frauen?

Frühere Forschungsergebnisse liefern recht unterschiedliche Antworten auf die Geschlechterfrage. 2008 führte etwa ein Forscherteam des University Medical Center Utrecht in den Niederlanden eine Metaanalyse durch. Die Wissenschaftler werteten Daten aus 13 Studien zu Händigkeit und Lateralisierung bestimmter Hirnregionen und -funktionen aus und kamen zu dem Schluss: Zwar sind Männer häufiger Linkshänder als Frauen. Doch in den Regionen und Funktionen des Gehirns, welche die Niederländer in ihre Untersuchung einbezogen hatten, erkannten sie keinerlei Unterschiede zwischen den Geschlechtern.

Francks war nicht überzeugt. Er vermutete nach wie vor, dass es feine Unterschiede zwischen den Geschlechtern gebe. Gemeinsam mit dem Doktoranden Tulio Guadalupe entschied er sich daher, selbst nochmals nachzu-

**Unten** In der Asymmetrie des Planum temporale, eines Areals, das sich in beiden Gehirnhälften findet, gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede: Bei Frauen ist die Linksasymmetrie im Schnitt weniger stark als bei Männern. Männer mit schwach ausgeprägter Linksasymmetrie leiden oft unter Leseschwäche.

**Rechts** Das molekulargenetische Labor am Max-Planck-Institut für Psycholinguistik bietet den Forschern die Möglichkeit, auf zellulärer Ebene den Einfluss bestimmter Gene auf die Entwicklung des Gehirns zu untersuchen.



forschen. Die beiden Wissenschaftler analysierten Bilder von Hirnscans von mehr als 2300 gesunden Männern und Frauen. Dabei konnten die Wissenschaftler auf Daten zurückgreifen, die Forschergruppen verschiedener Einrichtungen in den Niederlanden im Rahmen der *Brain Imaging Genetics*-Studie seit 2007 gesammelt hatten, sowie auf Daten einer deutschen Langzeitstudie zur Gesundheit. Nur durch solche Forschungskooperationen ist es überhaupt möglich, eine derartig große Probandengruppe zu generieren und auf diese Weise zu einer Datenmenge zu kommen, deren Auswertung am Ende statistisch wirklich Aussagekraft besitzt.

Francks und Guadalupe konzentrierten sich bei ihrer Untersuchung auf das Planum temporale – eine Hirnregion, die bereits ihre Kollegen aus Utrecht bei ihrer Metaanalyse im Visier hatten. Das Planum temporale sitzt auf beiden Seiten des Gehirns im Schläfenlappen und wird mit der Verarbeitung von Sprache und Musik, aber auch mit

dem absoluten Gehör in Verbindung gebracht. Bei rund 90 Prozent der Bevölkerung ist es links stärker ausgeprägt und kann dort bis zu fünfmal größer sein als sein rechtes Gegenstück. Außerdem sehen Forscher einen Zusammenhang zwischen mangelnder Linksasymmetrie des Planum temporale und Dyslexie. Betroffene haben Schwierigkeiten beim Lesen, aber auch beim Verstehen von Wörtern – obwohl ihre Intelligenz, ihr Seh- und Hörvermögen normal ausgebildet sind.

## ÜBERRASCHENDE VERBINDUNG ZU GESCHLECHTHORMONEN

Francks und sein Mitarbeiter vermaßen das Planum temporale mithilfe sehr exakter Methoden zur Volumenbestimmung von Hirnarealen. Als die Forscher schließlich die zur Verfügung stehenden Daten ausgewertet hatten, war klar: Es gibt sehr wohl einen Unterschied zwischen Männern und Frauen – zumindest im Planum temporale. Francks' Untersuchungen haben gezeigt, dass diese

Region im weiblichen Gehirn weniger stark lateralisiert ist als bei Männern. Nun darf man aus diesem Ergebnis nicht schließen, Frauen seien deshalb die schwächeren Leserinnen. „Dem ist nicht so“, betont Francks. „Aber Männer, bei denen die Linksasymmetrie des Planum temporale schwächer ausgeprägt ist, neigen eher zur Dyslexie.“

Mit der reinen Bestandsaufnahme war Francks noch nicht zufrieden – schließlich geht es ihm bei seiner Arbeit vorrangig darum, die Mechanismen der Lateralisierung zu entschlüsseln. Daher werteten er und Guadalupe im nächsten Schritt die genetischen Daten aus, die ihm zu seinen Probanden zur Verfügung standen. Die Forscher konzentrierten sich auf die Suche nach sogenannten Single Nucleotide Polymorphisms, kurz SNPs. Dabei handelt es sich nicht um Mutationen, sondern um Genvariationen, die in der Bevölkerung mit einer gewissen Häufigkeit auftreten und bei denen lediglich ein einzelnes Basenpaar im DNA-Strang verändert ist.





» Wir können sehr sicher sein, dass es nicht eine einzelne Genvariation ist, die über die Händigkeit oder die Asymmetrie des Gehirns entscheidet.

Das interessante Ergebnis: Die Forscher fanden im Zusammenhang mit der Ausprägung der Linksasymmetrie im Planum temporale besonders viele SNPs in Genen, die am Steroidhormon-Stoffwechsel beteiligt sind, also unter anderem bei der Synthese männlicher und weiblicher Geschlechtshormone. Und tatsächlich scheint sich die Funktion der Steroidhormone sowohl bei Männern als auch bei Frauen auf die Lateralisierung des Planum temporale auszuwirken. Welche Rolle Steroidhormone letztlich für die Lese- und Sprachfähigkeit spielen, ist aber bislang ungeklärt. Dieses Rätsel will Francks in künftigen Forschungsprojekten knacken.

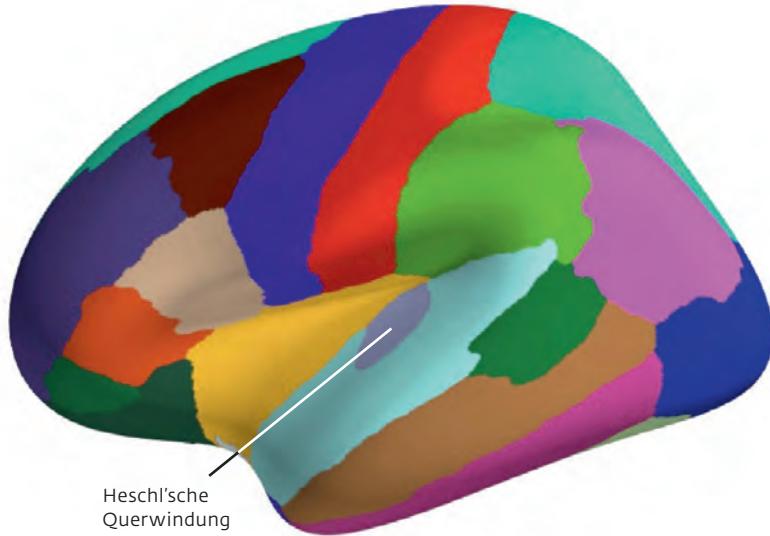
Vieles, was Clyde Francks mit seinem Team in Nijmegen macht, scheint auf den ersten Blick fast simpel: Man pickt sich eine prominente, asymmetrisch ausgeprägte Region im Gehirn

heraus und prüft dann, ob es Genvariationen gibt, die diese erklären können. Doch ganz so einfach ist die Sache nicht. Vielmehr gleicht die Fahndung nach den genetischen Ursachen für die Lateralisierung der berühmten Suche nach der Nadel im Heuhaufen. Das zeigte sich etwa, als die Forscher die sogenannte Heschl'sche Querwindung unter die Lupe nahmen. Diese Hirnregion befindet sich in beiden Gehirnhälften im Schläfenlappen, sie beherbergt das primäre Hörzentrum und ist wichtig für das Sprachverständnis. Die Heschl'sche Querwindung ist nicht nur bei den meisten Menschen in der linken Hirnhälfte stärker ausgeprägt. Ihre Form variiert auch stark zwischen einzelnen Individuen – anatomische Besonderheiten, die in gewissem Maße vererbt sein müssen. Trotzdem konnten die Max-Planck-Forscher keine

Genvariationen ausmachen, die eindeutig im Zusammenhang mit der Ausprägung der Heschl'schen Querwindung stehen – und das, obwohl sie Daten von mehr als 3000 Probanden untersuchten.

#### **GENETISCHE EINFLÜSSE SIND KOMPLEX UND VIELFÄLTIG**

Ähnlich ernüchternd verläuft derzeit die Suche nach weiteren Genen für die Händigkeit. Erst im vergangenen Jahr hatten die Nijmegener Forscher das Genmaterial von 17 Mitgliedern einer Familie aus Pakistan analysiert, in der sich auffallend viele Linkshänder finden. „Das sind eigentlich die besten Voraussetzungen, um genetische Ursachen für das Phänomen auszumachen“, sagt Tulya Kavaklıoglu, die Doktorandin, die in Francks' Team mit diesem



**Links** Das Gehirn ist für die Wissenschaft weit mehr als graue Masse. Die Windungen und Einkerbungen der Gehirnrinde bilden ein spezifisches Muster. Einzelnen Teilen lassen sich konkrete Funktionen zuordnen: So befindet sich das primäre Hörzentrum in der Heschl'schen Querwindung.

**Rechts** Händigkeit prägt sich sehr früh aus. Anhand des bevorzugten Daumens lässt sich nicht nur bei Babys, sondern schon bei 15 Wochen alten Embryos ziemlich sicher feststellen, welche Hand sie bevorzugen.

Thema betraut ist. „Trotzdem haben wir rein gar nichts gefunden.“

Was für die Doktorandin wohl frustrierend ist, das bedeutet eine wichtige Erkenntnis für das Forschungsfeld. Der scheinbare Misserfolg unterstreicht nämlich, wie komplex und vielfältig die genetischen Einflüsse sein müssen, die schließlich dazu führen, dass eine bestimmte Gehirnregion bei manchen Menschen stärker lateralisiert ist als bei anderen oder dass einzelne Individuen die linke Hand der rechten vorziehen.

„Wir können sehr sicher sein, dass es nicht eine einzelne Genvariation ist, die über die Händigkeit oder die Asymmetrie des Gehirns entscheidet“, betont Clyde Francks. Vielmehr scheint eine Vielzahl von Variationen im Genom letztlich zu der anatomischen Ausprägung zu führen, die Forscher in ihren Hirnscans sehen oder schlicht in Form der bevorzugten Hand ihrer Probanden. Das ist ähnlich wie bei der Körpergröße, der Augenfarbe oder dem individuellen Gewicht: Auch hier beeinflussen unzählige SNPs und andere Formen von Veränderungen im Genom den Phänotyp, also das Erscheinungs-

bild. Zusätzlich werden zumindest Größe und Gewicht auch von Umwelteinflüssen geprägt – ein Phänomen, das auch bei der Lateralisierung des Gehirns mitwirken könnte.

### GESTÖRTE ASYMMETRIE KÖNNTE KRANKHEITEN VERURSACHEN

Dazu kommen sogenannte epigenetische Mechanismen, Modifikationen der DNA, die beeinflussen, ob und wie stark ein bestimmtes Gen oder eine bestimmte Variation überhaupt zum Tragen kommt. Einen solchen Effekt machte Francks' Team 2014 im LRRTM1-Gen aus, dem Gen, das Francks zu seiner Zeit in Oxford mit dem Hang Links-händigkeit in Verbindung brachte – zumindest dann, wenn LRRTM1 hypomethyliert ist, also verglichen mit dem „gesunden“ Zustand zu wenige Methylgruppen trägt. Dabei handelt es sich um kleine chemische Anhängsel an der DNA, welche die Aktivität eines Gens beeinflussen, also wie häufig es abgelesen wird.

Das alles macht auch deutlich: Wer nach genetischen Ursachen für die Asymmetrie in Gehirn und Verhalten

fahndet, braucht nicht nur einen langen Atem, sondern vor allem eine hohe Zahl an Testpersonen. Denn nur so lassen sich auch feine Effekte ausmachen. Zu diesem Zweck haben sich in den letzten Jahren große Forschungsverbünde gegründet, so etwa das internationale Konsortium ENIGMA (Enhancing Neuro Imaging Genetics through Meta-Analysis), das sich zum Ziel gesetzt hat, Daten aus bildgebenden Verfahren und genetischen Untersuchungen zu bündeln, um so mit sehr großen Probandengruppen zu einem besseren Verständnis des Gehirns und seiner Funktion zu gelangen. Clyde Francks leitet in diesem Zusammenschluss den Bereich Lateralisierung.

Man mag sich an dieser Stelle vielleicht fragen, warum die Nijmegener Forscher überhaupt diesen ganzen Aufwand betreiben, nur um ein paar feine genetische Spuren auszumachen, die winzige Beiträge zur individuellen Gehirnanatomie leisten. Ist es wichtig zu wissen, warum die Heschl'sche Querwindung bei einem Menschen so und beim anderen ein wenig anders ausgeprägt ist? Und welchen Nutzen brächte das Wissen um Gene, die darüber

mitbestimmen, ob wir für bestimmte Tätigkeiten die rechte oder die linke Hand bevorzugen?

„Uns geht es darum, die grundlegenden genetischen und molekulärbiologischen Prinzipien zu verstehen, die zur Lateralisierung des Gehirns führen“, sagt Francks. Denn auch Krankheiten wie die Schizophrenie scheinen im Zusammenhang mit unzureichender Gehirnlateralisierung zu stehen. Und Abweichungen in der Asymmetrie bestimmter Strukturen tief im Inneren des Großhirns spielen offensichtlich eine Rolle für die Hyperaktivität bei Kindern. „Wenn wir die Mechanismen verstehen, wie die Asymmetrie entsteht, dann können wir im nächsten Schritt untersuchen, an welcher Stelle etwas schiefläuft, wenn die Lateralisierung gestört ist“, sagt Francks. Und das wäre ein erster wichtiger Schritt, um betroffenen Menschen eines Tages besser helfen zu können. ▲

## AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die beiden Hälften des menschlichen Gehirns übernehmen verschiedene Aufgaben, doch ist die Asymmetrie individuell unterschiedlich ausgeprägt.
- Es gibt keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Rechts- oder Linkshändigkeit und der Verteilung anderer Funktionen im menschlichen Gehirn. So ist das Gehirn von Linkshändern im Bereich der Sprachverarbeitung meist ähnlich strukturiert wie das von Rechtshändern.
- Bestimmte Gehirnasymmetrien sind bei Männern und Frauen unterschiedlich ausgeprägt.
- Die Suche nach den genetischen Ursachen für Rechts- und Linkshändigkeit sowie für Abweichungen in der Gehirnasymmetrie erweist sich als schwierig.

## GLOSSAR

**Lateralisierung:** Biologisches Grundprinzip, wonach der menschliche Körper trotz seiner symmetrischen Erscheinung deutliche anatomische und funktionale Unterschiede zwischen rechter und linker Hälfte aufweist. Die Lateralisierung des Gehirns zeigt sich am deutlichsten bei der Sprachverarbeitung.

**Single Nucleotide Polymorphisms (SNPs):** Variation eines einzelnen Basenpaares in einem DNA-Strang. SNPs sind geerbte und vererbare genetische Varianten – im Gegensatz zu Mutationen, die in der Regel eine neu aufgetretene Veränderung bezeichnen.



Europäisches Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

Robert Bosch Stiftung

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

nature

**AcademiaNet** ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

**AcademiaNet**, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- :: Über 2100 Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von über 48 renommierten Partnerorganisationen aus 18 Ländern
- :: Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- :: Aktuelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«



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

# Eine Formel gegen Stromausfall

Die Suche nach Schwachpunkten im Netz wird einfacher

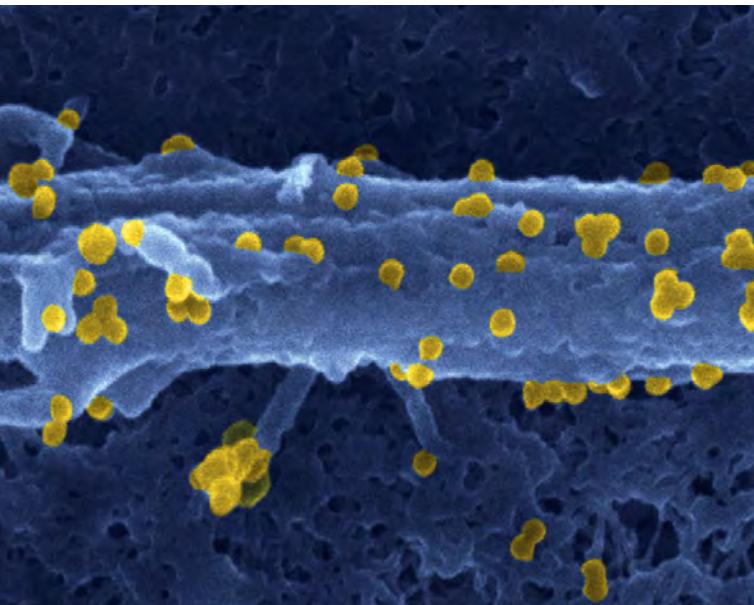
Das Risiko für einen Stromausfall lässt sich künftig leichter abschätzen als bislang. Denn Forscher um Marc Timme haben am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation eine einfache Formel entwickelt, um Stromleitungen zu identifizieren, deren Ausfall in einer ganzen Region oder in einer Stadt die Lichter ausgehen lassen kann. Dabei berücksichtigen sie nicht nur, wie viel Strom eine Trasse transportiert, sondern auch, ob das umgebende Stromnetz einen Ausfall der stark belasteten Leitung kompensieren kann. Um das zu ermitteln, waren bislang mehrere Tausend aufwendige Simulationen nötig. ([www.mpg.de/10429748](http://www.mpg.de/10429748))

Ob der Strom in einer Region ausfällt, wenn eine Leitung unterbrochen wird, lässt sich mit einer einfachen Formel vorhersagen.



# Neue alte Medikamente gegen Viren

Bereits zugelassene Arzneien könnten künftig gegen Chikungunya-Infektionen eingesetzt werden



Chikungunya-Viren (gelb) werden von Stechmücken übertragen. Nach überstandener Infektion ist der Körper lebenslang gegen das Virus immun.

Seit 2013 breitet sich das von Mücken übertragene Chikungunya-Virus in Südamerika und der Karibik aus und bedroht inzwischen auch Südeuropa und die südlichen Staaten der USA. Es löst grippeähnliche Symptome mit Fieber und Gelenkschmerzen aus, die teilweise mehrere Monate andauern und in Einzelfällen zum Tod führen können. Da die Entwicklung neuer Medikamente teuer ist und lange dauert, haben Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin eine neue Strategie erarbeitet, die die Entwicklung einer Therapie effektiver machen soll. Bislang hatten Forscher bei der Bekämpfung von Infektionen vor allem Proteine des Krankheitserregers im Blick. Das Ziel der Berliner Forscher sind dagegen menschliche Proteine, die das Virus braucht, damit es einen Menschen infizieren kann. Mit Substanzen, die gegen genau diese Proteine wirken, wollen sie dann die Vermehrung des Erregers verhindern. Die Forscher haben zwei Substanzen identifiziert – darunter überraschenderweise ein gängiges Antipsychotikum –, die in Mäusen die Chikungunya-Viren hemmen und keine Nebenwirkungen auslösen. Den Wissenschaftlern zufolge besitzen menschliche Wirtszellen mehrere Proteine, die nicht nur vom Chikungunya-Virus, sondern auch von anderen Viren benötigt werden. Diese könnten als Angriffspunkte für Anti-Virenmedikamente mit breitem Einsatzspektrum dienen. ([www.mpg.de/10499095](http://www.mpg.de/10499095))

## Zum Nutzen der Nachzügler

Eine Studie von Mikko Myrskylä, Direktor am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock, und Kieron Barclay von der London School of Economics belegt: Biologische Risiken, die mit einer späten Schwangerschaft einhergehen, werden von den positiven gesellschaftlichen Entwicklungen in dem entsprechenden Zeitraum mehr als kompensiert. Gesundheit und Bildungschancen der Menschen in den Industrieländern verbessern sich von Jahr zu Jahr. In ihrer Studie analysierten die Wissenschaftler Daten von mehr als 1,5 Millionen Frauen und Männern aus Schweden, die zwischen 1960 und 1991 geboren wurden. Die Forscher fanden heraus, dass später geborene Kinder bessere Schulleistungen erzielten und mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eine Universität besuchten als früher geborene. Selbst bei Kinder aus ein und derselben Familie fanden sich deutliche Unterschiede: Nachzügler besuchten im

Schnitt etwa ein Jahr länger eine Schule oder Universität als ihre rund 20 Jahre älteren Geschwister. „Ob eine Frau mit 20 Jahren oder mit 40 Jahren ein Kind bekommen hat, macht also einen enormen Unterschied für das Kind“, sagt Myrskylä. ([www.mpg.de/10411760](http://www.mpg.de/10411760))



Gnade der späten Geburt: Heute Geborene haben bessere Chancen.

## Legierungen werden fest und formbar

Für die Stahlindustrie zeichnet sich ein Ausweg aus einem Dilemma ab, das besteht, solange Menschen Metall verarbeiten. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Eisenforschung in Düsseldorf präsentieren einen neuartigen metallischen Werkstoff, der gleichzeitig sehr fest und trotzdem gut formbar ist. Bislang ließ sich die eine Materialeigenschaft nur auf Kosten der anderen verbessern. Das ändern die Düsseldorfer Forscher, indem sie die Vorteile von Stählen und sogenannten Hochentropie-Legierungen kombinieren. Hochentropie-Legierungen enthalten fünf oder mehr Metalle in ähnlichen Mengen. Sie können besonders fest sein, sind aber, anders als Stähle, spröde. Stähle bestehen hingegen hauptsächlich aus Eisen und lassen sich besonders gut verformen, wenn die kleinen Kristalle, aus denen sie aufgebaut sind, ihre Struktur ändern können. Einen solchen Strukturwandel ermöglichen die Düsseldorfer Forscher nun auch in Hochentropie-Legierungen, obwohl er darin bislang als ungünstig galt. So tragen sie dazu bei, dass sich Bauteile aus Metall künftig dünnwandiger konstruieren und dadurch Ressourcen schonen lassen. ([www.mpg.de/10520535](http://www.mpg.de/10520535))

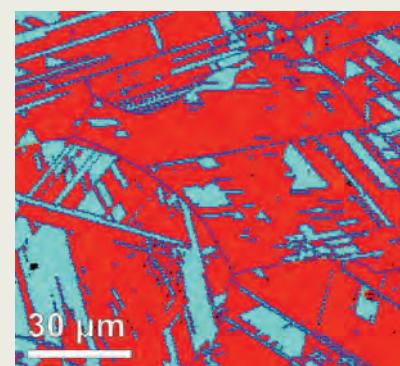
## Spannung in der Kinoluft

Kinobesucher verraten anhand ihres Atems, welche Filmszene gerade läuft

Bei manchen Filmen liegt die Spannung förmlich in der Luft – und das nicht nur im übertragenen Sinn. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts

für Chemie und der Johannes Gutenberg-Universität Mainz haben während verschiedener Filmvorführungen die Luft in Kinosälen analysiert und festgestellt: Jeder Film hinterlässt ein charakteristisches Muster in der Atemluft. So steigen an besonders spannenden Stellen die Konzentrationen an Kohlendioxid und Isopren, wahrscheinlich weil sich die Zuschauer bei solchen Szenen anspannen und schneller atmen. Die Forscher wollen mit solchen Untersuchungen herausfinden, ob Menschen wesentlich zum Gehalt der Atmosphäre an Spurengasen beitragen. Trotz der messbaren Spuren im Kinosaal ist das den bisherigen Ergebnissen zufolge jedoch nicht der Fall. ([www.mpg.de/10502003](http://www.mpg.de/10502003))

Wenn die Spannung im Film steigt, ändert sich der Atem – die Konzentrationen an Kohlendioxid und Isopren nehmen zu. Forscher untersuchen dieses Phänomen bei Kinobesuchern.

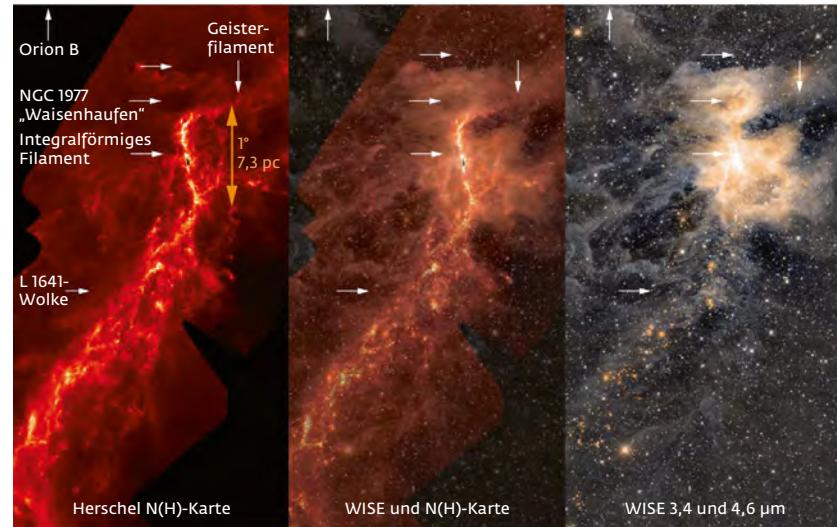


Eine Legierung aus Eisen, Mangan, Cobalt und Chrom wird gut formbar, weil in ihr zwei Kristallstrukturen nebeneinander vorliegen können und die eine sich in die andere umwandeln kann. Die beiden Kristallstrukturen sind in diesem Querschnitt des Werkstoffs, der mithilfe der Elektronenrückstreuung aufgenommen wurde, an den beiden Farben zu erkennen.

## Das versteckte Innenleben des Orionnebels

Im Wechselspiel von Magnetfeldern und Gravitation werden in der Gaswolke neue Sterne geboren

Im All kommen ständig Sonnen oder gleich ganze Sternhaufen auf einmal zur Welt. Dies geschieht nach den konventionellen Modellen innerhalb von Gaswolken, die unter der eigenen Schwerkraft kollabieren. Amelia Stutz und Andrew Gould vom Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg schlagen nun einen weiteren Mechanismus vor. Darauf stießen die Forscher, als sie ein integralförmiges Gas-Staub-Filament untersuchten, zu dem auch der Orionnebel gehört. In ihrem Szenario ist das Filament ein flexibles, hin und her schwingendes Gebilde. Das Wechselspiel von Magnetfeldern und Schwerkraft sollte in dem Filament Instabilitäten ermöglichen, die man zum Teil aus der Plasmaphysik kennt und die einen Sternhaufen nach dem anderen entstehen lassen könnten. Dabei würden sich Protosterne (Vorläufersterne) nur entlang des dichten Rückgrats des Filaments finden, junge Sterne dagegen vor allem außerhalb des Filaments – was tatsächlich so beobachtet wird. ([www.mpg.de/10503461](http://www.mpg.de/10503461))



Kreißsaal der Sonnen: Auf diesen Aufnahmen des Sternentstehungsgebiets Orion A sind das integralförmige Filament, die zwei Sternhaufen oberhalb des Filaments und im Süden die Wolke L1641 zu sehen. Das linke Teilbild zeigt eine Dichtekarte aus Daten des Weltraumteleskops Herschel, das rechte eine Infrarotaufnahme des Satelliten-observatoriums WISE. Das mittlere Foto ist eine Kombination der beiden Bilder.

## Das Glück der Anderen

Ungleichheit verringert oft die Zufriedenheit von Bessergestellten

$$\text{Glück}(t) = w_0 + w_1 \sum_{j=1}^t \gamma^{t-j} \mathbf{CR}_j + w_2 \sum_{j=1}^t \gamma^{t-j} \mathbf{EV}_j + w_3 \sum_{j=1}^t \gamma^{t-j} \mathbf{RPE}_j + w_4 \sum_{j=1}^t \gamma^{t-j} \max(\mathbf{R}_j - \mathbf{O}_j, 0) + w_5 \sum_{j=1}^t \gamma^{t-j} \max(\mathbf{O}_j - \mathbf{R}_j, 0)$$

Ungleich verteiltes Glück verringert das Wohlbefinden – auch bei denen, die davon selbst begünstigt sind. Wissenschaftler vom Max Planck UCL Centre for Computational Psychiatry and Ageing Research in London ließen Personen für eine Studie an Glücksspielen teilnehmen. Dabei bekamen die Probanden mit, ob andere die gleichen Spiele gewonnen oder verloren. Während des Experiments wurden sie in regelmäßigen Abständen gefragt, wie glücklich sie sich fühlen. Dabei stellte sich heraus, dass die Gewinner im Schnitt glücklicher waren, wenn auch ihre Mitspieler gewannen. Das könnte auf Schuldgefühle zurückzuführen sein. Allerdings waren einige Verlierer glück-

licher, wenn andere auch verloren hatten – was wiederum auf Neid schließen lässt. In einem weiteren Test wurden die gleichen Teilnehmer aufgefordert, anonym einen kleinen Geldbetrag mit einer anderen Person zu teilen. Im Ergebnis gaben Menschen, deren Glück besonders davon beeinträchtigt war, mehr als andere zu bekommen, durchschnittlich 30 Prozent ihres Geldes ab. Diejenigen, die stärker unter ihrer Benachteiligung litten, gaben nur zehn Prozent. Damit konnte zum ersten Mal ein Zusammenhang hergestellt werden zwischen der Großzügigkeit von Menschen und dem Maß, in dem Ungleichheit ihr Glück beeinträchtigt. ([www.mpg.de/10626245](http://www.mpg.de/10626245))

# Vom Feind zum Freund

Wenige Veränderungen im Erbgut machen aus einem schädlichen Pilz einen potenziellen Nützling

Manchmal braucht es nicht viel, damit aus Feinden Freunde werden. Forscher des Max-Planck-Instituts für Pflanzenzüchtungsforschung in Köln haben herausgefunden, dass Veränderungen an 13 Prozent der Gene aus einem für die Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana* schädlichen Bodenpilz einen Nützling machen. Die Wissenschaftler haben dazu sein Erbgut mit dem einer nahe verwandten schädlichen Art verglichen. Die Analyse zeigt, dass der nützliche Pilz viele Gene verloren hat, mit denen sein schädlicher Verwandter das Ab-

wehrsystem der Pflanze unterläuft. Gleichzeitig werden die wenigen krank machenden Gene, die er noch besitzt, zum Teil gar nicht mehr abgelesen. Ob die Pflanze ihm aber tatsächlich Zugang zu ihren Wurzeln gewährt, entscheidet sie mithilfe ihres Immunsystems: Während *Arabidopsis* auf phosphatarmen Böden ihre Immunantwort verringert, damit der nützliche Pilz sie mit lebensnotwendigem Phosphat versorgen kann, bremst die pflanzliche Abwehr den Pilz auf phosphatreichen Böden aus. ([www.mpg.de/10433706](http://www.mpg.de/10433706))

## Seit Jahrtausenden beeinflusst der Mensch das Ökosystem

Der Mensch prägt die Landschaften der Erde bereits seit Jahrtausenden. Wie sehr, das offenbart nun eine Zusammenfassung archäologischer Daten, die in den vergangenen 30 Jahren gesammelt wurden. Die Studie unter Leitung von Nicole Boivin, Direktorin am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte und Wissenschaftlerin an der Universität Oxford, identifiziert lange vor der Industrialisierung vier Hauptphasen, in denen Menschen die Ökosysteme tiefgreifend veränderten. So belegen Fossilienfunde aus der Zeit zwischen 50 000 und 10 000 Jahren vor unserer Zeit, dass mit der Ausbreitung des modernen Menschen rund zwei Drittel der damals lebenden 150 Großtierarten ausstarben. Das Aufkommen von Landwirtschaft und Viehzucht erzeugte dann neuen evolutionären Druck auf Pflanzen und Tiere und führte dazu, dass die Zahl wild

lebender Wirbeltiere im Vergleich zur Menge domestizierter Tiere verschwindend klein wurde. Mit der Besiedlung von Inseln durch den Menschen war außerdem eine so weitreichende Umwandlung von Arten verbunden, dass die Archäologen von transportierten Landschaften sprechen. Und die Entstehung früher städtischer Gesellschaften und weitreichender Handelsbeziehungen führte wiederum zu einer Periode intensiver Landwirtschaft. ([www.mpg.de/10554791](http://www.mpg.de/10554791))



Frühe Eingriffe: Schon die alten Ägypter veränderten die Natur durch Jagd, Ackerbau und Viehzucht.

## Die Effekte bakterieller Eiskeime

Mikroben fördern die Bildung von Kristallen, indem sie die Ordnung und Dynamik von Wassermolekülen an ihrer Oberfläche verändern



Eiskristalle: Max-Planck-Forscher haben herausgefunden, dass bestimmte Bakterien den Ordnungszustand von Wassermolekülen in Tröpfchen beeinflussen.

Der Gefrierpunkt von Wasser ist alles andere als eine eindeutige Sache. Kleine Tröpfchen aus reinstem Wasser etwa erstarren erst bei minus 37 Grad Celsius zu Eis. Damit sich knapp unter null Grad Celsius bereits Eiskristalle bilden, sind Kristallisationskeime wie etwa Bakterien nötig, die auf ihrer Oberfläche Eis bildende Proteine aufweisen. Den molekularen Mechanismus, über den die Proteine Wassermoleküle erstarren lassen, haben nun Forscher der Max-Planck-Institute für Chemie und für Polymerforschung aufgeklärt. Demnach erzeugen die Proteine geordnete Strukturen im Wasser und leiten Wärme ab. Die Erkenntnisse helfen nicht nur, die Bedingungen besser zu verstehen, unter denen Frostschäden an Pflanzen entstehen. Da die Bakterien auch in der Atmosphäre vorkommen, wo sie ebenfalls die Bildung von Eiskristallen fördern, spielen sie auch eine Rolle bei der Entstehung von Wolken und Niederschlag – einem großen Unsicherheitsfaktor in Wetter- und Klimavorhersagen. ([www.mpg.de/10469841](http://www.mpg.de/10469841))

# Muttis Lieblinge

Rhesusaffen-Weibchen besitzen zu Töchtern engere Bindung als zu Söhnen

Viele Säugetiere entwickeln starke Bindungen zu manchen Artgenossen. Ob Männchen oder Weibchen dabei stärker zusammenhalten, hängt vermutlich davon ab, welches Geschlecht bei Erreichen der Geschlechtsreife die Geburtsgruppe verlässt und in einer neuen Gruppe frische Beziehungen aufbaut. Dies legen auch Beobachtungen von Wissenschaftlern des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig an Rhesusaffen nahe. Bei diesen Tieren verlassen die Männchen ihre Geburtsgruppe im Alter von vier Jahren. Weibliche Tiere bleiben dagegen in ihrer Geburtsgruppe und sind auf starke Bindungen zu anderen Gruppenmitgliedern angewiesen. Offenbar verhindert aggressives Verhalten der Affenmütter gegenüber ihrem männlichen Nachwuchs im ersten Lebensjahr, dass diese enge Bindungen zu ihrem Verband aufbauen. Zwar kümmern sich die Mütter gleichermaßen um beide Geschlechter, gegenüber weiblichen Jungtieren sind sie jedoch deutlich weniger aggressiv und lassen mehr Nähe zu. ([www.mpg.de/10514392](http://www.mpg.de/10514392))

Rhesusaffen-Mütter sind zu ihren Söhnen in deren erstem Lebensjahr aggressiver als zu ihren Töchtern.



# Schwarzes Loch in einer einsamen Galaxie

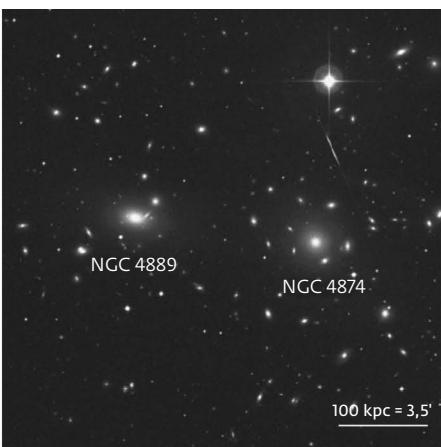
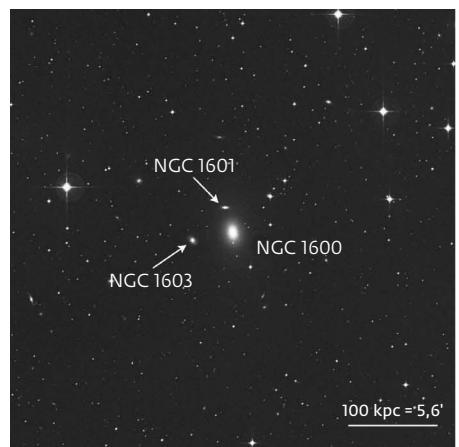
Astronomen finden Milchstraßensystem mit ungewöhnlichen Eigenschaften

Massereiche schwarze Löcher können nicht nur in großen Galaxienhaufen wachsen. Ein internationales Team von Forschern des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik, aus

den USA und Kanada haben im Innern der elliptischen Galaxie NGC 1600 ein schwarzes Loch mit der Masse von rund 17 Milliarden Sonnen gefunden – eine der massivsten Schwerkraftfäl-

len, die bislang aufgespürt wurden. NGC 1600 steht relativ einsam im Raum. „Andere Galaxien mit sehr massereichen schwarzen Löchern befinden sich in der Regel in Regionen des Universums mit einer hohen Massendichte, also in Haufen mit vielen anderen Galaxien“, sagt der Garching Astronom Jens Thomas. Ebenfalls bemerkenswert: Der Zentralbereich von NGC 1600 erscheint ungewöhnlich diffus – so, als ob Milliarden von Sternen fehlen. Möglicherweise wurden sie bei einer früheren Kollision mit einer oder mehreren anderen Galaxien hinausgeschleudert. ([www.mpg.de/10430946](http://www.mpg.de/10430946))

Die elliptische Galaxie NGC 1600 beherbergt ein sehr massereiches schwarzes Loch mit 17-milliardenfacher Sonnenmasse. Der Kern ist recht diffus, viele Sterne fehlen – wahrscheinlich als Folge einer früheren Galaxienverschmelzung.

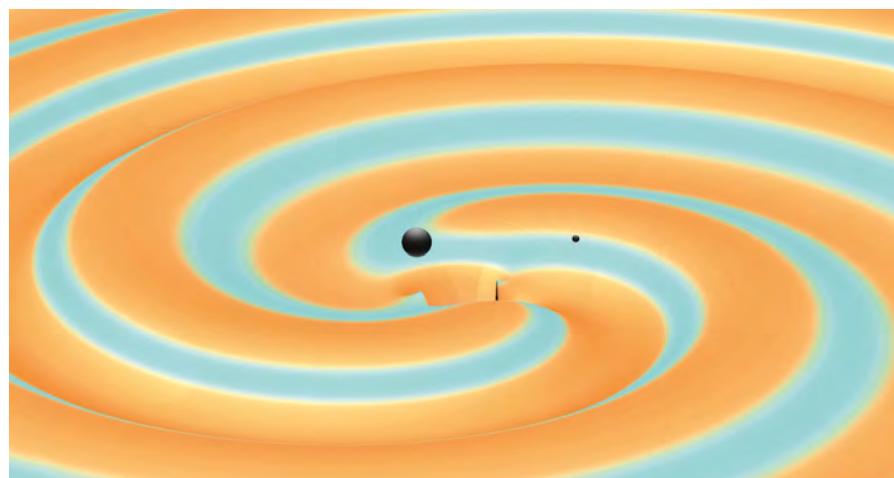


# Gravitationswellen, die Zweite

Forscher beobachten erneut ein Signal von zwei schwarzen Löchern

Den Wissenschaftlern an den beiden amerikanischen LIGO-Detektoren sind wieder Gravitationswellen ins Netz gegangen. Das Signal war bereits am 26. Dezember 2015 aufgezeichnet und GW151226 genannt worden. Es stammt von zwei schwarzen Löchern, die rund 14 und 8 Sonnenmassen besitzen. Die beiden Schwerkraftfallen verschmolzen in einer Entfernung von rund 1,4 Milliarden Lichtjahren miteinander. Die Forscher fanden außerdem heraus, dass sich mindestens eines der beiden schwarzen Löcher zuvor um die eigene Achse gedreht hatte. Die Verschmelzung strahlte dann das Äquivalent von einer Sonnen-

masse in Gravitationswellen-Energie ab und hinterließ ein einziges rotierendes schwarzes Loch mit 21 Sonnenmassen. Das Ereignis war deutlich schwächer als das erste vom September 2015 und gleichsam im Rauschen verborgen. „Mit dieser zweiten Beobachtung sind wir wirklich auf dem Weg zur echten Gravitationswellen-Astronomie“, sagt Karsten Danzmann, Direktor am Hannoveraner Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik. Dessen Forscher haben unter anderem mit hochgenauen Wellenmodellen sowie fortschrittlicher Detektortechnologie einen großen Anteil an der Entdeckung. ([www.mpg.de/10598226](http://www.mpg.de/10598226))



Kosmischer Todestanz: Die Simulation zeigt, wie zwei schwarze Löcher von 14 und 8 Sonnenmassen einander umkreisen. Die Forscher haben 27 Umläufe gemessen, bevor die schwarzen Löcher zu einem verschmolzen. Die Farben spiegeln unterschiedliche Gravitationsfelder wider, wobei Cyan schwache und Orange starke Felder bedeuten.

## Bartagamen im Tiefschlaf

Die Schlafphasen des Gehirns entwickelten sich schon früh in der Evolution der Wirbeltiere

Schlaf ist im Tierreich weit verbreitet: Insekten, Würmer bis hin zu Säugetieren und Menschen – sie alle nehmen sich regelmäßig eine Auszeit. Messungen von Forschern am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt zeigen jetzt sogar, dass schon so urtümliche Wirbeltiere wie Reptilien Schlafphasen aufweisen, die denen der Säugetiere in vielen Punkten ähneln. So haben die Neurowissenschaftler im Gehirn schlafender Bartagamen während einer Phase regelmäßige Wellen mit niedriger Frequenz und hoher Amplitude beobachtet. In zwei anderen Phasen werden die Nervenzellen in starken Pulsen (Deltaphase) ähnlich aktiv wie im Wachzustand, dann begleitet von schnellen Augenbewegungen (REM-Schlaf). Die Forscher entdeckten aber auch Unterschiede: Der Schlafrhythmus der Echsen ist zum Beispiel extrem schnell und dauert nur etwa 80 Sekunden, beim Menschen dagegen 60 bis 90 Minuten. Die großen Ähnlichkeiten lassen vermuten, dass die REM- und Deltaschlafphasen des Gehirns mindestens so alt sind wie der gemeinsame Vorfahr von Reptilien, Vögeln und Säugetieren, der vor ungefähr 320 Millionen Jahren lebte. ([www.mpg.de/10478259](http://www.mpg.de/10478259))

# Klatsch und Tratsch im Kindergarten

Fünfjährige bewerten das Verhalten anderer und beeinflussen damit deren Ruf

„Spiel lieber mit Anna, Daisy schummelt immer!“ Das für Erwachsene so typische und oft kritisierte Tratschen beginnt in der Entwicklung von Kindern relativ früh: Schon Fünfjährige bewerten das Verhalten ihrer Mitmenschen und helfen damit anderen Kindern bei der Auswahl eines geeigneten Spielgefährten. Das ist das Ergebnis einer Verhaltensstudie von Forschern des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. In der Studie sollten drei- und fünfjährige

ge Kinder Spielsteine sammeln und eine vereinbarte Menge davon mit einem Spielgefährten teilen. Die Wissenschaftler beobachteten, dass Fünfjährige andere vor geizigen Mitspielern warnten. Dreijährige halfen zwar ebenfalls mit Informationen, bewerteten aber das Verhalten eines Mitspielers nicht. Mit Klatsch und Tratsch können also schon Vorschulkinder Informationen über andere austauschen und so kooperative Partner ausfindig machen. ([www.mpg.de/10484308](http://www.mpg.de/10484308))



# Der Meistersänger

Vom tropischen Regenwald bis zum Dschungel der Großstadt – Vögel haben viele Lebensräume auf dieser Erde erobert. Und fast überall singen sie. Wie sie dabei miteinander kommunizieren, erforscht **Henrik Brumm** am **Max-Planck-Institut für Ornithologie** in Seewiesen. Ein außergewöhnlich begabter Sänger hat es ihm dabei besonders angetan.

TEXT CLAUDIA STEINERT

Immer wenn ihm die Katze einen toten Vogel vor seine Türe legt, schwankt Henrik Brumm zwischen Mitleid und wissenschaftlicher Neugier. Meistens obsiegt dann der Forscherdrang, und Brumm untersucht das Gesangsorgan des Vogels, die sogenannte Syrinx. So leistet das Tier zumindest noch einen Beitrag für die Wissenschaft. Denn Henrik Brumm ist Verhaltensbiologe. Er will wissen, wie Tiere miteinander kommunizieren. Wie sie umeinander werben, sich von den besten Futterplätzen erzählen, ihr Revier verteidigen. Seit seiner Doktorarbeit erforscht Brumm deshalb die wohl komplexeste Form der Kommunikation im Tierreich: Vogelgesang.

Von den mehr als 10000 bekannten Vogelarten gehören rund 4000 zu den Singvögeln. Jeder Vogel kann zwar Läute ausstoßen, aber nicht jeder kann singen. Der Kuckuck zum Beispiel bringt nicht viel mehr als seinen namensgebenden Ruf zustande. Papageien imitieren Geräusche und sogar menschliche Sprache. Das macht sie jedoch noch nicht zu Singvögeln. Nur wessen Stimmapparat – die bereits erwähnte Syrinx – besonders komplexe Strukturen aufweist, fällt in diese Kategorie.

Für seine Doktorarbeit hat Henrik Brumm in Berlin untersucht, wie der Stadtlärm die Kommunikation von Nachtigallen beeinträchtigt. Wie sich die Vögel verständigen, wenn um sie herum Autos hupen, Sirenen heulen und Flugzeuge dröhnen. Die deutsche Hauptstadt war für sein Projekt wie geschaffen: In keiner anderen deutschen Großstadt leben so viele Nachtigallen. Sie bauen ihre Nester am liebsten am Boden zwischen krautigen Hecken, die über Rasenkanten und Bordsteine wuchern und nicht immer so schnell gestutzt werden wie in anderen Städten.

## AUF PIRSCH IM MORGENGRAUEN

Brumm entschied sich nicht ganz ohne Hintergedanken für das Projekt mit den Nachtigallen: Es passte zu seinem Biorythmus. Anders als die meisten Singvögel trällert die Nachtigall nicht nur bei Sonnenaufgang, sondern auch nachts. Brumm sah sich vor oder nach der Kneipentour losziehen, ausgerüstet mit Nachtsichtgerät, Laserentfernungsmaßnahmen und Schallpegelmessgerät. Doch daraus wurde nichts. „Da bin ich ziemlich reingelegt worden“, sagt er mit einem Augenzwinkern. >

In einem Wald in der Nähe von Starnberg nimmt Henrik Brumm den Gesang von Vögeln auf. Das Bild auf dieser Seite zeigt einen Buchfink.





**Links** König der Sänger: Die meisten der 80 Arten aus der Familie der Zaunkönige besitzen laute und komplexe Gesänge. Mit dem Flageolett-zaunkönig aber kann kein anderer Vogel mithalten – sein melodischer Gesang ist einzigartig im Tierreich.

**Rechts** Der Flageolettzaunkönig singt in Intervallen, die auch Komponisten häufig einsetzen: Gesangsfrequenz über die Zeit (1), Übersetzung des Gesangs in Musiknoten (2), Eröffnungsmelodie des zweiten Satzes von Haydns Symphonie Nr. 103 (3) und Eröffnung der Bach-Fuge Nr. 20 in a-Moll, BWV 889 (4).

Die Uni musste sparen. Anstelle von Nachtsichtgerät und Laserentfernungs-messer erhielt er von seinem Betreuer ein Fernglas und ein Maßband. Arbeiten im Dunkeln war damit unmöglich. Also quälte er sich fortan immer morgens um halb vier aus dem Bett und stieg auf sein Fahrrad. Er radelte zur Stadtautobahn, stromerte durch Parks und stand stundenlang an viel befahrenen Kreuzungen. Sobald er eine Nachtigall sah, hielt er Schallpegelmesser und Aufnahmegerät in die Höhe.

Nachdem er den Gesang aufgenommen hatte, rollte er sein Maßband aus und maß die Entfernung zwischen sich und dem Vogel. Aus Entfernung und Schallpegel berechnete er dann die absolute Lautstärke des Gesangs. Das Fazit: Nachtigallen singen lauter, je mehr Lärm sie umgibt. Sie zeigen den sogenannten Lombard-Effekt.

Lombard war ein französischer Arzt, dem schon vor gut 100 Jahren auffiel, dass wir unsere Lautstärke unwillkürlich der Umgebung anpassen, damit uns ein Gesprächspartner besser versteht. Und genau diesen Trick benutzen auch die Vögel, um sich in der Stadt Gehör zu verschaffen. „Nachtigallen singen unter der Woche lauter als am Wochenende, weil es werktags auf den Straßen lauter ist“, erklärt Brumm.

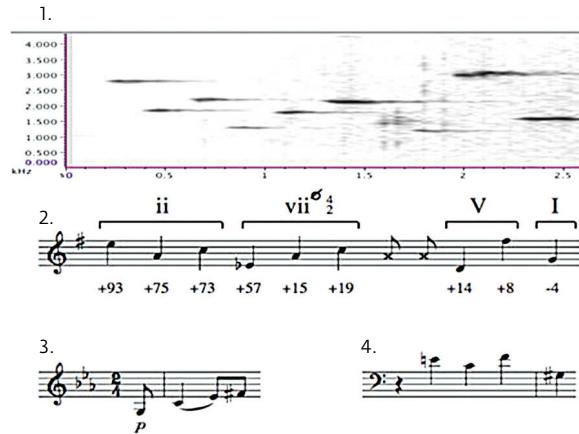
Vogelgesang ist so charakteristisch, dass Vogelkundler eine Art daran erken-

nen können. Dazu gehört aber Übung – außer bei einem Vertreter: „Den Flageolettzaunkönig können selbst Laien identifizieren“, sagt Brumm. Der im Amazonas lebende Vogel ist mit seinen zwölf Zentimetern kleiner als ein Spatz und ähnlich unauffällig gefärbt. Optisch macht er also nicht viel her, doch wenn er seinen Schnabel öffnet und anfängt zu singen, dann klingt es, als wehe Musik durch den Urwald.

### VIRTUOSE IM REGENWALD

Der Flageolettzaunkönig hat es in seiner Heimat zu einiger Berühmtheit gebracht. Aufgrund seines außergewöhnlichen Gesangs ist er in der Kultur der indigenen Völker so bedeutsam wie bei uns die Nachtigall. Die Einheimischen verehren den kleinen Vogel, den sie „Uirapuru“ nennen. Zahlreiche Legenden ranken sich um ihn. Wer ihn singen hört, hat Glück bei der Jagd, in der Liebe oder gleich in seinem ganzen Leben. Manche Restaurantbetreiber oder Ladeninhaber vergraben sogar einen toten Uirapuru vor ihrer Tür und erhoffen sich dadurch bessere Geschäfte. Wenn der Uirapuru singt, so die Erzählungen, verstummen alle anderen Tiere im Wald und versammeln sich um ihn, um seinen Liedern zuzuhören.

Dabei hat der Gesang des Uirapuru einen ganz praktischen Zweck. Wie alle



Singvögel lockt er mit seinen Melodien während der Paarungszeit Weibchen an. Am Gesang lesen die Weibchen ab, wie überlebenstüchtig ein Männchen ist. So werten sie ihn als ein Zeichen dafür, dass der Sänger offensichtlich ein futterreiches Revier erobern konnte – wie hätte er sonst so viel Zeit zum Singen! Im Amazonas ist Kommunikation mittels Gesang auch noch aus einem anderen Grund wichtig. Denn im Dickicht des tropischen Regenwalds mit einer Sichtweite von oftmals weniger als drei Metern können Tiere ihre potenziellen Partner nur schwer sehen. Rufe und Gesänge hingegen durchdringen die dichte Vegetation.

2003 stand Brumm zum ersten Mal selbst im Dickicht des Amazonas-Regenwalds. Um ihn herum war alles grün, Bäume und Büsche versperrten den Blick. Plötzlich hörte er diesen Gesang, und er wusste sofort: Das ist er – der musikalische Vogel, den er bisher lediglich von Tonbandaufnahmen kannte. Henrik Brumm wollte wissen, warum der Flageolettzaunkönig so singt. Warum klingt sein Gesang für uns Menschen wie das Spiel eines Konzertmusikers, während andere Vögel sich anhören wie Kinder beim Blockflötenunterricht? Niemand wusste es.

An der University of St Andrews in Schottland traf er die Musikwissenschaftlerin Emily Doolittle. Doolittle

suchte nach Biologen, die Tierstimmen erforschen. Brumm suchte jemanden, der mehr von Musik verstand als er. Gemeinsam begannen die beiden, ein Experiment zu entwickeln, das die Frage beantworten sollte, die Brumm schon lange umtrieb: Warum klingt der Gesang des Flageolettaunkönigs wie Musik? Das Ergebnis sollte quantifizierbar sein. Sie wollten Zahlen und Fakten, keine subjektiven Meinungen.

Natürlich wäre Brumm am liebsten selbst durch den Amazonas gereist und hätte Vogelstimmen gesammelt, aber das hätte ihm keiner bezahlt. Also nutzten Brumm und Doolittle die Datenbank Xeno-canto. In die kann jeder – ob Wissenschaftler oder Laie – Aufnahmen von Vogelgesängen hochladen. Dadurch steht Forschern eine unglaubliche Vielfalt an Vogelstimmen aus der ganzen Welt zu Verfügung.

Zuerst spielten sie den Gesang vieler verschiedener Flageolettaunkönige mit dem Synthesizer nach. Denn die Versuchshörer sollten gar nicht wissen, dass es sich bei den Melodien um Vogelgesang handelte. Als Nächstes würfelten sie die einzelnen Töne jedes Lieds durcheinander. Tonhöhe und Tondauer veränderten sie nicht, lediglich die Reihenfolge. Das Original sowie die durchgeschüttelte Version spielten sie Probanden vor: Konzertpianisten, Garagenband-Gründern und Musikbanaußen. Die sollten entscheiden, welche der beiden Varianten musikalischer klingt. Der eindeutige Sieger war die Originalmelodie. „Selbst diejenigen, die keine Ahnung von Musik hatten, empfanden so“, sagt Brumm.

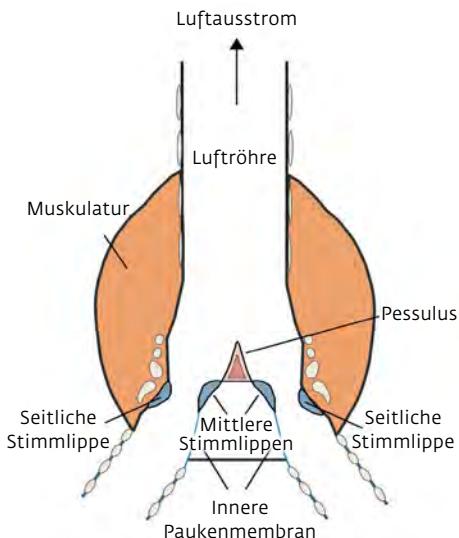
Da die Forscher weder die Töne selbst noch deren Dauer verändert hatten, blieb nur ein Faktor übrig. Es mussten die Tonintervalle sein, die Abstände zwischen den aufeinanderfolgenden Tönen. „Wir wissen natürlich nicht, ob der Vogel irgendeine Wahrnehmung von Intervallen oder Tonarten hat“, meint Brumm. Aber darum ging es ihm auch gar nicht. Brumm wollte nicht herausfinden, ob der Flageolettaunkönig musikalisch ist. Er wollte auch nicht wissen, ob der Vogel gar die von einigen beschworene Urmusik in sich trägt, die alle menschengemachte Musik inspiriert haben soll. Er wollte nur wissen,



Die Gesänge seiner gefiederten Probanden analysiert Henrik Brumm am Computer – mit moderner Software bis ins Detail.



**Unten** Anders als die Säugetiere, die mit dem Kehlkopf Laute produzieren, benutzen Singvögel dazu die sogenannte Syrinx. Sie sitzt an der Basis der Luftröhre, wo diese sich in die zwei Hauptbronchien spaltet. Bei Singvögeln befindet sich in jeder der beiden Bronchien ein Laute produzierender Teil der Syrinx, der von eigenen Muskeln gesteuert wird. Die Muskeln kontrollieren Spannung und Position der Stimmlippen und der Paukenmembran und regulieren so zusammen mit weiteren Faktoren die Höhe des Gesangs. Da unterschiedliche Nervenzellen im Vogelhirn die Muskulatur steuern, arbeiten die beiden Syrinx-Teile unabhängig voneinander. Singvögel können deshalb zwei Laute gleichzeitig singen oder sehr schnell von einem zum nächsten wechseln.



warum der Gesang des kleinen Vogels so wohltuend und schön klingt.

Bei genauerer Analyse der Melodien stellte sich heraus, dass der Flageolettaunkönig tatsächlich besonders oft in sogenannten vollkommenen Konsonanzen singt. Er trällert Quarten, Quinten oder Oktaven. So bezeichnen Musiktheoretiker jeweils einen Abstand von vier, fünf oder acht Tonstufen. Diese Intervalle klingen für unsere Ohren besonders harmonisch, sie kommen auch in vielen Volks- und Kinderliedern vor. Imperfekte Konsonanzen sind im Gesang des Flageolettaunkönigs viel seltener. Dissonanzen, die häufig im Jazz vorkommen und für Reibung sorgen, vermeiden die Vögel.

## EVOLUTION ALS KOMPONIST

Dass wir vollkommene Konsonanzen als harmonisch und schön empfinden, ist nicht nur ein Konstrukt westlicher Kultur. Es hat auch etwas mit unserem ordnungsliebenden Gehirn und der Physik von Schallwellen zu tun. Bei jedem Ton schwingen die Schallwellen mit einer bestimmten Frequenz. Je schneller, desto höher. Wenn die Frequenzen zweier Töne in einem mathematisch einfachen Verhältnis zueinander stehen, also zum Beispiel eine Frequenz doppelt so groß ist wie die an-

dere, dann klingt dieses Intervall für uns ruhig und harmonisch. Eine Oktave hat das Frequenzverhältnis zwei zu eins, eine Quinte zwei zu drei und eine Quarte drei zu vier.

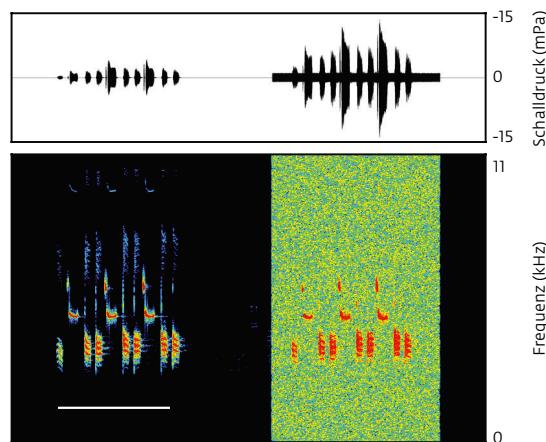
„Spannend ist, warum diese eine Vogelart sich auf konsonante Intervalle spezialisiert hat“, meint Brumm. Wahrscheinlich verschafft diese Art von Gesang den Vögeln einen evolutionären Vorteil. Treibende Kraft könnten die Weibchen sein. Wenn sie harmonischen Gesang bevorzugen und sich häufiger mit solchen Männchen fortpflanzen, würde sich diese Eigenschaft durchsetzen. Jede Generation wäre dann etwas musikalischer als die vorherige. Nach wie vor ungeklärt ist, warum sich diese Vorlieben für Konsonanzen gerade bei den Flageolettaunkönigen und nicht auch bei anderen Vögeln entwickelt haben. Bisher wurde keine andere Art gefunden, die vollkommene Konsonanzen bevorzugt. Viele Vogelarten singen geradezu unmusikalisch für unsere Ohren.

Singvögel lernen ihren Gesang wie wir Menschen das Sprechen. Die Küken ahmen nach, was die Erwachsenen ihnen vorsingen. Zur Lauterzeugung nutzen Vögel jedoch nicht den Kehlkopf, sondern die Syrinx. Das Gesangsorgan befindet sich am Ende der Luftröhre und verzweigt sich in die zwei Äste der Bronchien. Dadurch können Vögel zwei

**Linke Seite** Im schalldichten Labor testet der Forscher, was Vogelweibchen am liebsten hören. Per Knopfdruck können sich die Tiere den Gesang selbst vorspielen. Vom Gesang eines Männchens der eigenen Art können die Weibchen gar nicht genug bekommen: Sie hören ihn sich bis zu mehrere Hundert Mal pro Tag an.

**Rechts oben** Bei Lärm singt der Vogel doppelt so laut (rechts) wie in leiser Umgebung (links).

**Rechts unten** Frequenzspektrum des Gesangs unter denselben Bedingungen wie oben.



Töne gleichzeitig produzieren und mit sich selbst im Duett singen.

Brumm und seine Kollegen haben herausgefunden, dass Vögel und Menschen trotz ihrer unterschiedlichen Anatomie den gleichen Mechanismus zur Schallerzeugung benutzen. Ein System, das besonders gut Fehler verzeiht. Wenn Menschen sprechen, dann öffnen und schließen sich die elastischen Stimmbänder. Die Kombination von Luftdruck und Muskelspannung der Stimmbänder erzeugt einen bestimmten Klang. Kinder, die gerade sprechen lernen, müssen sehr lange ausprobieren, welche Kombination welchen Laut entstehen lässt.

Gäbe es für jeden Laut nur eine richtige Stellung der Stimmbänder, dann wäre es unglaublich schwierig, Laute korrekt zu imitieren. Doch weil die elastischen Stimmbänder sich nicht nur öffnen und schließen, sondern dabei eine wellenförmige Bewegung ausführen, gibt es mehrere richtige Stellungen, die alle denselben Klang erzeugen. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert die Syrinx der Vögel. Somit wird es für Kinder und Küken viel einfacher, sprechen beziehungsweise singen zu lernen. Brumm und seine Kollegen haben nicht nur dieses Prinzip bei Vögeln entdeckt, sondern auch gezeigt, dass alle Vögel – von Spatz bis Strauß – diesen Mechanismus besitzen. „Das Prinzip scheint sich bewährt zu haben.“

In Großstädten wird es für Vögel jedoch zusehends schwerer, sich zu verständigen. Grund ist der Lärm, der jede Metropole einhüllt wie eine Käseglocke. Die Weltgesundheitsorganisation schätzt, dass jedes Jahr in der Europäi-

schen Union 200 000 Menschen an Herz-Kreislauf-Krankheiten sterben, die durch konstanten Lärm ausgelöst werden. Brumm untersucht nun, ob Lärm auch bei Vögeln zu Schlafstörungen führt und chronischen Stress auslöst, ihre Zellen schneller altern lässt oder das Immunsystem bei der Arbeit stört. „Die Vögel könnten ein Modell sein, um diese Prozesse beim Menschen besser zu verstehen.“

Seit Längerem untersucht Brumm Vogelpopulationen am Flughafen Ber-

lin-Tegel. Ursprünglich wollte er testen, wie sie sich verhalten, wenn eines Tages die Terminals schließen und über den Nistplätzen im Norden der Hauptstadt Ruhe einkehrt. Doch das hat bislang nicht geklappt: „Da haben mir die Betreiber des neuen Hauptstadtflughafens einen Strich durch die Rechnung gemacht.“ Die Feldversuche müssen dort also noch ein paar Jahre warten. In der Zwischenzeit spielt Brumm am Max-Planck-Institut in Seewiesen den Vögeln Münchener Verkehrslärm vor. ▲

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Laute Umgebung macht es Vögeln schwerer, sich zu verständigen. Sie passen deswegen ihren Gesang an und singen ebenfalls lauter – ein Phänomen, das man als Lombard-Effekt bezeichnet.
- Der Gesang des Flageolettaunkönigs klingt für menschliche Ohren wie Musik, denn der Vogel singt in vollkommenen Konsonanzen. Die Tonfolge besteht aus Quarten, Quinten oder Oktaven. Wie die Vögel selbst ihren Gesang wahrnehmen und ob sie ein Konzept von Konsonanz, Tonart oder Motiv haben, ist unbekannt.
- Vögel und Menschen erzeugen Töne auf dieselbe Weise: Die Stimmbänder von Säugetieren und die Stimmlippen der Syrinx bei Vögeln schwingen in denselben Mustern aus sich überlagernden Wellen.

### GLOSSAR

**Flageolettaunkönig:** Der zur Familie der Zaunkönige gehörende Vogel lebt im Amazonas und hat dort ein großes Verbreitungsgebiet. Aufgrund ihres außergewöhnlichen Gesangs spielt die Art eine herausragende Rolle in der Mythologie und Folklore Südamerikas, auch der englische Name (*musician wren*) deutet auf eine besondere Musikalität des Vogels hin. Die nächsten Verwandten des Flageolettaunkönigs (der Braunbrust- und der Brillenzaunkönig) haben deutlich einfachere Gesänge. Nur der Flageolettaunkönig benutzt bevorzugt vollkommene Konsonanzen in seinem Gesang.

**Lombard-Effekt:** Nach dem französischen Arzt Étienne Lombard benanntes Phänomen, bei dem Menschen (und auch manche Tiere) ihre Kommunikation an die Lautstärke ihrer Umgebung anpassen. Steigt der Lärmpegel in der Umgebung an, reden Menschen unwillkürlich lauter. Sprechen beispielsweise mehrere Personen in einem kleinen Raum, kann sich so die Lautstärke darin immer weiter hochschaukeln.

# Computer schneiden Grimassen

Animierte Figuren etwa in Filmen und in Computerspielen wirken heute oft lebensecht. Denn sie werden mit aufwendig erzeugten, dreidimensionalen Modellen von Körpern und Gesichtern erschaffen. **Christian Theobalt** und seine Mitarbeiter am **Max-Planck-Institut für Informatik** in Saarbrücken erleichtern es Grafikern deutlich, solche Modelle zu erstellen. Sie ermöglichen dadurch Anwendungen, die bislang undenkbar waren.

TEXT TIM SCHRÖDER

**D**er Schauspieler Tom Cruise ist ein cooler Typ. Im Film *Minority Report* glänzt er als hartgesottener Kämpfer für das Gute. Er spielt John Anderton, einen Polizisten im Jahr 2054 – der, so gehört es sich für Science-Fiction, von jeder Menge Hightech umgeben ist. Sieht man sich den Film heute, nur 14 Jahre nach der Kinopremiere an, wirkt die Zukunftsvision streckenweise gar nicht mehr so fortschrittlich. In einer damals noch futuristisch anmutenden Szene lässt der Schauspieler auf einer Glaswand, die als Monitor dient, per Handbewegung Bildschirmfenster aufleuchten. Per Fingerzeig zieht und staucht er die Bilder, mit einer flotten Wischbewegung zaubert er sie fort. Das sieht chic aus, allerdings trägt er dabei einen schwarzen Handschuh mit Leuchtpunkten – einen Datenhandschuh, den *data glove*. Und dafür haben Wissenschaftler heute allenfalls noch ein müdes Lächeln übrig.

Auf das Prinzip, nach dem Tom Cruise alias John Anderton per Datenhandschuh einen Computer steuert, setzt die Filmindustrie seit rund 20 Jahren auch bei der Produktion neuer Streifen. Sie filmt eine Person, die einen ganzen Anzug mit Markierungen, sogenannten Markern, trägt, damit ein Computer anhand der Markierungen die Position von Kopf, Rumpf, Armen und Beinen nachverfolgen – tracken – kann. Damit lässt sich dann die Bewegung in eine Filmszene oder eine Computerwelt übertragen, zum Beispiel, um eine fiktive Figur menschenecht zu animieren. Doch diese Art des Trackings ist recht umständlich. Der Schauspieler muss sich in Handschuhe und Anzug zwängen.

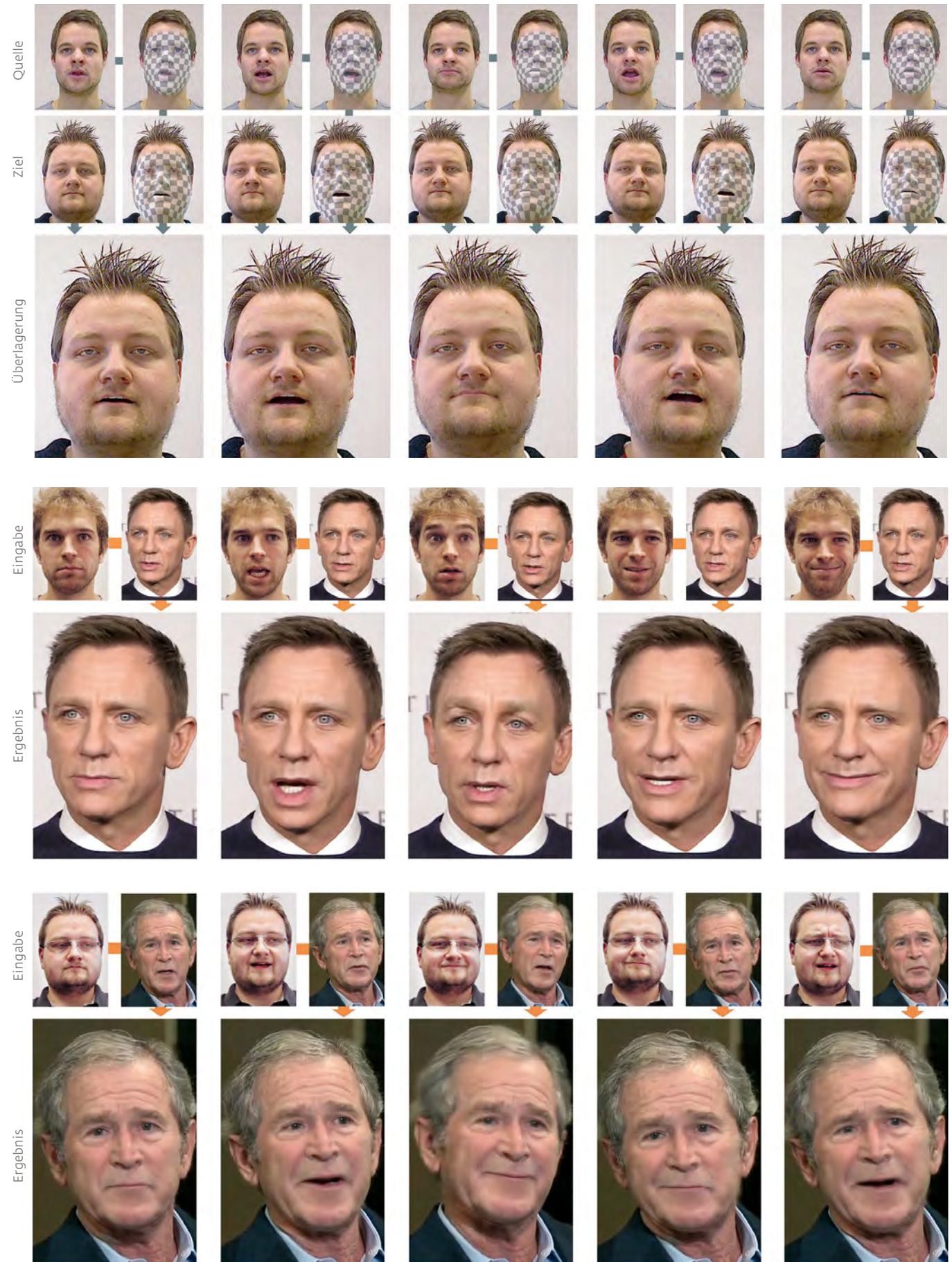
Dass das Tracking mit Markern allmählich aus der Mode kommt, ist unter anderem Christian Theobalt und seinen Mitarbeitern am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken zu verdanken. Der Informatiker ist dort Leiter der Arbeitsgruppe „Grafik, Sehen

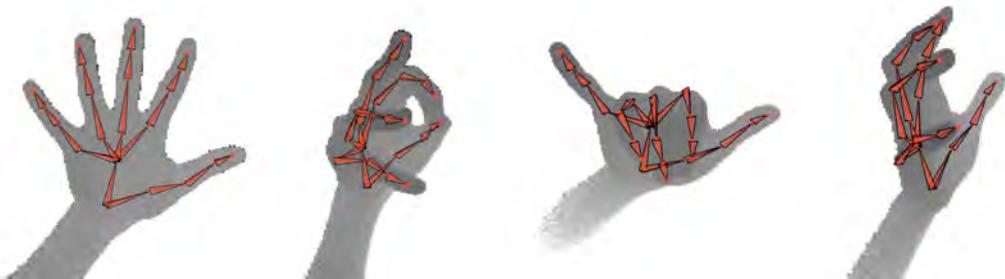
& Video“. Die Wissenschaftler arbeiten an der Grenze zwischen Computergrafik und Bilderkennung. Das große Ziel Theobalts ist es, dem Computer beizubringen, die sich bewegende Realität mit möglichst wenig Aufwand und in Höchstgeschwindigkeit zu analysieren und daraus detailgenaue und vor allem dreidimensionale virtuelle Modelle zu erzeugen, welche sowohl die Form als auch die Reflexionseigenschaften einer Figur sowie die Beleuchtung einer Szene richtig erfassen.

## BEDARF FÜR DIE METHODE HABEN NICHT NUR FILMEMACHER

Seine Arbeitsgruppe hat hier unter anderem zwei Forschungsschwerpunkte: erstens die Erkennung von Bewegungen und zweitens die Analyse von Gesichtern. Bedarf für diese Methoden haben nicht nur Filmemacher, die mit den Modellen etwa bei der Mimik eines Schauspielers nachhelfen oder Fantasiefiguren

Manipulierte Mimik: Saarbrücker Informatiker übertragen den Gesichtsausdruck einer Person in einem Quellvideo auf eine Person in einem Zielvideo. Die grauen und braunen Pfeile geben den Ablauf wieder. In den ersten beiden Reihen sind die beweglichen Gesichtsmodelle im Quell- und Zielvideo als Schachbrettmuster über die Gesichter gelegt. In der vierten und sechsten Reihe von oben ist die Originalmimik von Quelle und Ziel zu sehen.





Richtige Gesten: Franziska Müller (rechte Seite) hat eine Software entwickelt, die sogar subtile Bewegungen einer Hand mit relativ geringem Rechenaufwand verfolgt und die Gesten in einem 3D-Modell rekonstruiert. Um sicherzustellen, dass die wiedergegebenen Haltungen anatomisch möglich sind, verwendet das Programm das Modell eines Handskeletts, das in Rot dargestellt ist (diese Seite).

animieren können. Die Entwickler von Computerspielen könnten auf ähnliche Weise Avataren zu natürlichen Bewegungen und Gesichtsausdrücken verhelfen. Und auch für Roboter könnten die Techniken der Szenenanalyse nützlich sein, damit diese sich von ihrer Umgebung ein genaues Bild machen können. Vor allem müssen sie Menschen im Hintergrund von relevanten Objekten im Vordergrund unterscheiden können. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die *augmented reality*, „erweiterte Realität“, also die Vermischung von Realität und virtueller Welt, bei der man mit Gesten etwa virtuelle Objekte bewegen kann.

Allein der Film- und der Spielebranche dürfte Theobalts Forschung weltweit zukünftig Tausende von Personenjahren an Arbeit ersparen, denn die Animation von Filmen und Videosequenzen ist heute nicht nur wegen des Trackings mit Markern eine Heidenarbeit. Grafiker müssen Aufnahmen einer realen Person in ein mathematisches Modell übersetzen, um daraus dann Figuren zu generieren und diese in eine Computerspiel- oder Filmsequenz zu übertragen.

Heute ist dafür noch viel Handarbeit notwendig. Damit zum Beispiel das künstliche Gesicht eines Schauspielers, das man in eine besonders spektakuläre Filmsequenz hineinkopiert, echt lächelt oder die Stirn kräuselt, müssen die Computergrafiker viele Stunden Feinarbeit investieren.

Was den ersten Teil seiner Forschung betrifft – die Bewegungsanalyse, das *motion capturing* –, sind heute noch ei-

nige Hürden zu überwinden, sagt Theobalt. Um zum Beispiel den gruseligen Gollum in den *Hobbit*- und *Herr-der-Ringe*-Filmen aufzutreten zu lassen, haben die Filmemacher den Körper und die Bewegungen eines Schauspielers in ein Modell übertragen. Die Gestalt und vor allem das Gesicht haben sie dann an ihre Vorstellungen des Fantasiewesens angepasst, die Figur mit der Gollum-Haut texturiert und sie schließlich in eine am Computer erzeugte Höhnenwelt hineinkopiert.

### BEWEGUNGEN VON HÄNDEN ZUVERLÄSSIG ERKENNEN

Damit die Bewegung des Schauspielers vom Computer in ein Modell umgerechnet werden kann, muss der Schauspieler in speziellen Studios perfekt ausgeleuchtet und von mehreren Kameras aus verschiedenen Richtungen aufgenommen werden; nur so werden auch verdeckte Körperteile erfasst. Und natürlich sollten die Aufnahmestudios bis auf den Schauspieler relativ leer sein, weil Gegenstände im Raum den Computer bei der Analyse der Szene verwirren würden.

„Viel einfacher wäre es, wenn man Personen unter freiem Himmel, in einer ganz normalen Umgebung und bei wechselnden Lichtverhältnissen aufnehmen könnte“, sagt Theobalt. „Und am besten mit nur einer Kamera, um den Aufwand möglichst gering zu halten – genau das ist unser Ziel.“ Bis vor Kurzem war das noch undenkbar. Doch

Schritt für Schritt kommen Christian Theobalt und seine zehn Mitarbeiter diesem Ziel näher.

Die Doktorandin Franziska Müller zum Beispiel will dem Computer zusammen mit ihrem Kollegen Srinath Sridhar helfen, die Bewegungen von Händen mit einer Kamera zuverlässiger zu erkennen und in ein dreidimensionales Modell zu übertragen. Das ist besonders schwierig, weil bei den raschen Bewegungen einer Hand und ihrer Finger immer wieder Teile aus dem Blickfeld der Kamera geraten. Den Fingern genau folgen zu können ist aber unter anderem wichtig, um Geräte etwa in der *augmented reality* mit Gesten zu bedienen oder Robotern bestimmte Bewegungen beizubringen. „Dazu muss der Computer die Geste der Hand richtig deuten können“, sagt Franziska Müller.

Das, was Tom Cruise in *Minority Report* vollführt hat, hat Müller dabei bereits weit hinter sich gelassen. Cruise arrangierte mit groben Handbewegungen die Bilder auf einem Monitor um. Franziska Müllers Computer aber kann feinste Greifbewegungen erkennen. Dazu schaltet sie eine kleine Kamera an, die auf ihrem Computerbildschirm sitzt und mithilfe von Laserstrahlen auch die dreidimensionale Gestalt eines Objekts misst. Prompt erscheint auf dem sonst weißen Bildschirm eine künstliche Hand, die jeder ihrer Fingerbewegungen folgt, zum Beispiel wenn Franziska Müller Daumen und Zeigefinger gegeneinanderdrückt oder ihre Hand öffnet und schließt.



Wie so oft steckt der Teufel dabei im Detail. Denn der Computer muss die Position der Finger ständig neu berechnen, und zwar in Sekundenbruchteilen, weil das Bild auf dem Computer sonst ruckeln und stocken würde. „Das ist nur mit mathematischen Verfahren möglich, die die Menge der Bilddaten stark reduzieren und trotzdem die Position richtig berechnen können“, sagt Franziska Müller.

Konkret geht es dabei um die mathematische Analyse von Entfernungsdaten. So misst die kleine Tiefenkamera auf Franziska Müllers Monitor für jeden Bildpunkt die Laufzeit des Lichts – etwa zu einer Fingerkuppe oder zum Handballen und zurück.

Die Doktorandin schaltet ein anderes Programm ein, das sie von einer Softwarefirma gekauft hat, die bereits ein Programm zur Echtzeit-Handmessung anbietet. Das Ergebnis ist enttäuschend: Als die Forscherin ihre Hand schnell bewegt, kommt das Programm nicht mehr hinterher. Das Modell der Hand auf dem Monitor verliert plötzlich Finger, einmal taucht ein Finger an einer falschen Stelle auf. Ganz schlimm wird es, als ein Finger einen anderen verdeckt. Die Hand auf dem

Bildschirm zerfließt stellenweise. Die gekaufte Software hat Probleme, die Bilddaten der Kamera korrekt in das Modell zu übersetzen.

Der Grund: Herkömmliche Programme schaffen den enormen Rechenaufwand nicht, um anhand von Bildern aus einer Kameraperspektive stabil die Bewegungen in drei Dimensionen zu errechnen. Müller setzt deshalb ein anderes Verfahren ein als das kommerzielle Programm. Ihre Software ordnet die Messwerte für einzelne Pixel so, dass benachbarte Pixel, die dieselbe Entfernung zur Kamera haben, als mathematische Wolken, als Gauß-Wolken, dargestellt werden. So lässt sich die Zahl der Punkte deutlich reduzieren. Die Rechenzeit verkürzt sich. Deshalb kann Müllers Programm auch dann Schritt halten, wenn die Forscherin ihre Hand schnell bewegt.

Die Berechnungen aus den Entfernungsmessungen gleicht Müllers Software mit einem Skelettmodell ab, das im Programm bereits hinterlegt ist. Es gibt dem Computer Anhaltspunkte, welche Haltung der Hand und welche Fingerstellungen möglich sind.

Zudem nutzt Müller ein maschinelles Lernverfahren, das aufgrund von

Wahrscheinlichkeiten in Sekundenbruchteilen abschätzt, zu welchem Teil der Hand ein Pixel gehört. Zu diesem Zweck hat Franziska Müller den Computer mit Trainingsdaten gefüttert: Er hat gelernt, wie eine Hand aussehen kann, wenn sie gedreht oder bewegt wird. Außerdem hat Müller in ihr Programm noch eine Art Fehlerabschätzung eingebaut, die Haltungen ausschließt, die gemäß der Handanatomie keinen Sinn ergeben.

„Dank Franziskas Arbeit können wir jetzt auch feingliedrige Bewegungen auflösen, zum Beispiel wenn man Daumen und Zeigefingerkuppe aneinanderreibt“, sagt Christian Theobalt. „Mit herkömmlichen Programmen ist das nicht möglich.“

Die Hand ist natürlich nicht alles. In vielen Fällen muss die Bewegung eines ganzen Körpers erfasst werden. Auch dafür nutzen die Saarbrücker ein Skelettmodell, das in den vergangenen Jahren in Theobalts Arbeitsgruppe entwickelt wurde und ihrer Software gewissermaßen anatomisches Wissen gibt.

„Damit lösen wir uns von der klassischen Bewegungsanalyse“, sagt Theobalt. Normalerweise orientiert sich der Computer in einer Folge von Bildern an



Theobalt will die Gesichtserkennung auf ähnliche Weise vereinfachen wie die Bewegungsanalyse. Sein Team arbeitet daran, Filmaufnahmen, die eine einzige Kamera gemacht hat, in ein 3D-Gesichtsmodell zu übertragen.

charakteristischen Strukturen, nicht nur an Markerpunkten, sondern auch Bildregionen, die ein ähnliches Aussehen haben. „Wir nennen dieses Verfahren Korrespondenzfindung. Der Computer versucht damit, einem Gegenstand zu folgen, der sich in einer Bildsequenz langsam weiterbewegt.“ Das Problem: Bei wechselnder Beleuchtung erzeugen diese Verfahren deutlich mehr Fehler, weil die korrespondierenden Bildpunkte ständig ihre Helligkeit verändern.

Theobalts Team hat die Bewegungsanalyse nicht nur unabhängiger von der Umgebung gemacht, sondern die Zahl der dafür nötigen Kameras von mehr als acht auf drei reduziert. Zu diesem Zweck setzt Theobalt auch hier maschinelle Lernverfahren ein. So können die Forscher wettmachen, dass der Computer verdeckte Körperteile bei nur wenigen Kameras und wechselnder Beleuchtung leicht für kurze Zeit aus den Augen verlieren kann. Sie trainieren das Programm für maschinelles Lernen mit Bildern verschiedener Posen, sodass es lernt, die Körperteile sicher zu identifizieren.

Dieser kombinierte Ansatz macht die Bewegungsanalyse von Theobalts Gruppe besonders leistungsfähig. Es sei das erste Verfahren, sagt der Wissenschaftler, das die Bewegung des kompletten Skeletts unter diesen Bedingungen in 3D schnell und robust

messen könne – also nicht nur im sorgfältig ausgeleuchteten Studio, sondern auch draußen in einer beliebigen Umgebung, unter ständig wechselnden Lichtverhältnissen.

#### THECAPTURY IST SPEZIALISIERT AUF BEWEGUNGSANALYSE

Inzwischen haben ehemalige Doktoranden und Postdoktoranden Theobalts die Firma TheCaptury gegründet, die sich auf Bewegungsanalyse mithilfe des Skelettmodells spezialisiert hat. Das Unternehmen bietet eine Software an, die aus Videoaufnahmen einer oder weniger Kameras die Position und Bewegung der Gliedmaßen analysiert, auch in Echtzeit. „Die Software wird zur Analyse schneller Bewegungsabläufe bei Sportlern verwendet oder auch um die Körperhaltung von Menschen am Arbeitsplatz zu untersuchen“, erklärt Christian Theobalt.

Die Herausforderungen bei der Gesichtserkennung, dem zweiten Schwerpunkt der Saarbrücker Arbeitsgruppe, sind durchaus ähnlich. Um heute realistisch wirkende hochauflöste 3D-Gesichtsmodelle zu erzeugen, muss das Gesicht einer Person definiert ausgeleuchtet und von mehreren Kameras aufgenommen werden. Nur dann kann der Computer die dreidimensionale Form des Ge-

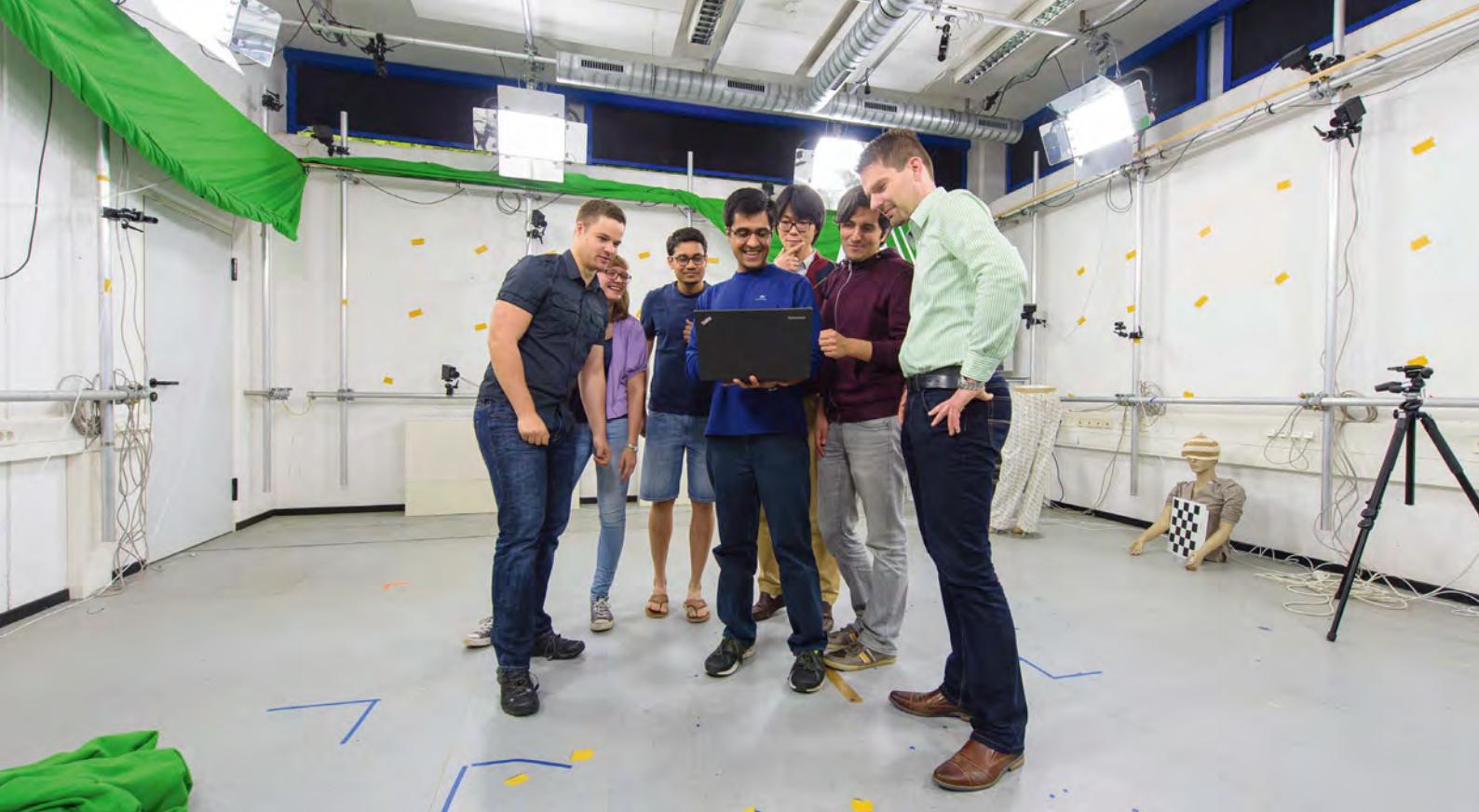
sichts errechnen und Fältchen sowie Reflexe der Haut sauber rekonstruieren. Um etwa das Gesicht eines Schauspielers in künstliche Welten zu versetzen, muss dieser viele verschiedene Gesichtsausdrücke einspielen: Er muss etwa lachen, böse gucken, die Augenbrauen heben. Eine Mimik, die nicht aufgenommen wurde, muss in einer Filmszene aufwendig in das Gesicht modelliert werden.

Gesichtserkennung spielt aber nicht nur in der Film- und Computerspieler-Industrie eine Rolle, sie ist auch für viele andere Anwendungen interessant. So kommt es bei neuartigen Müdigkeitswarnern im Auto darauf an, Gesichtszüge sicher zu deuten. Manche Firmen arbeiten außerdem an Verfahren, um Lippenbewegungen zu interpretieren. Damit ließe sich zum Beispiel die automatische Spracherkennung deutlich verbessern, da man nicht nur den Audiokanal nutzen könnte, sondern auch die Lippenbewegung im Videobild.

Theobalt will die Gesichtserkennung auf ähnliche Weise vereinfachen wie die Bewegungsanalyse. Und dabei dreidimensionale Modelle schaffen, die auch Gesichtsausdrücke wiedergeben können, wenn diese bei der Erzeugung des Modells nicht eingespielt wurden. Sein Team arbeitet daran, Filmaufnahmen, die eine einzige Kamera bei beliebiger Beleuchtung von Gesichtern ge-

Die Methode von Christian Theobalts Team analysiert auch die Bewegungen ganzer Körper mithilfe eines Skelettmodells – hier für einen Boxer gezeigt.





Die bewegte Realität zu analysieren und dabei nicht nur die Formen von Körpern und Gesichtern einzufangen, sondern auch die Reflexions-eigenschaften und die Beleuchtung einer Szene – das ist die Mission von Michael Zollhöfer, Franziska Müller, Abhimitra Meka, Dushyant Mehta, Hyeongwoo Kim, Pablo Garrido und Christian Theobalt (von links).

macht hat, in ein 3D-Gesichtsmodell zu übertragen. Anders als herkömmliche Rechenverfahren arbeitet die Technik so schnell, dass das Modell der Mimik einer gefilmten Person folgen kann.

Um ein bewegtes Kunstgesicht in annehmbarer Zeit aus dem einfachen Videobild einer einzigen Kamera zu rekonstruieren, muss Theobalt einen völlig anderen Weg als bisherige Methoden gehen. Er nennt ihn *inverse rendering*, frei übersetzt: umgekehrte Wiedergabe. Der Begriff *rendering* kommt aus der Computergrafik und steht für die genaue Berechnung von korrekt ausgeleuchteten Bildern aus einem Modell der Szene. Im inversen Rendering dreht man das um, man errechnet das Modell der Beleuchtung, Reflektanz und Geometrie, das am besten das Aussehen und die Schattierungen im Bild erklären kann. Die Gesichtsrekonstruktion wird dadurch sehr robust gegenüber Szenenveränderungen und funktioniert unabhängig davon, ob die Sonne scheint oder der Himmel vor dem Fenster verhangen ist.

Der Trick: Statt wie in herkömmlichen Verfahren ein Gesicht mitsamt Falten, Schatten und Reflexen unter Studiobedingungen Pixel für Pixel zu analysieren, teilt Theobalts Team die Kon-

struktion des Modells in vier parallele Schritte auf: erstens die Erkennung der Gesichtsform; zweitens die Rekonstruktion, wie sich diese bei verschiedenen Gesichtsausdrücken verändert; drittens die Abschätzung der Reflexionseigenschaften der Gesichtsoberfläche, der sogenannten Reflektanz; und viertens die Schätzung der Beleuchtung im Raum.

### RASCHE VERÄNDERUNGEN FLIESSEND WIEDERGEBEN

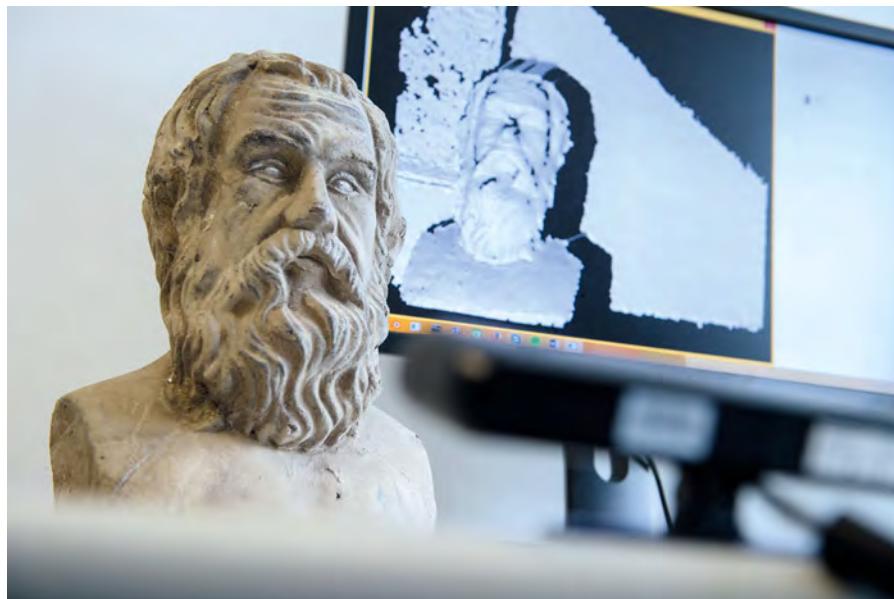
Bei der Erkennung der Gesichtsform und ihrer Veränderungen besteht die Herausforderung darin, aus dem zweidimensionalen Videosignal der Kamera räumliche Informationen zu gewinnen – die Position der hervorstehenden Nase oder der tiefer liegenden Augen beziehungsweise die Form des Mundes. „Wir überlagern die Aufnahme des Gesichts deshalb mit einem 3D-Gesichtsmodell, das vor einigen Jahren hier am Institut entwickelt wurde“ (siehe Max-PLANCKFORSCHUNG 3/2011), sagt Theobalt. „Dessen Stärke ist es, aus wenig Bildinformation ein räumliches Gesicht zu rekonstruieren.“

Separat von der Erkennung der Form wird beim inversen Rendering die Information über Licht und Schatten in

einer Szene beziehungsweise die Reflektanz analysiert. „Wir berechnen daraus zunächst, welche Lichtverhältnisse im Raum herrschen“, sagt Theobalt. Anschließend kann der Computer das Licht im Raum mit der Gesichtsform reagieren lassen. Damit kann er dann aus Schattierungen des Gesichts im Video wieder auf die 3D-Form schließen, inklusive feiner Details im Gesicht. In mehreren Schleifen gleicht der Computer das von ihm erzeugte Gesichtsmodell in Sekundenbruchteilen immer wieder mit dem tatsächlichen Video-bild ab und passt es entsprechend an, bis es mit der Vorlage übereinstimmt. Das geht so schnell, dass das Modell selbst rasche Veränderungen der Gesichtszüge fließend wiedergeben kann.

Wie gut das inverse Rendering funktioniert, hat vor Kurzem Theobalts Post-doktorand Michael Zollhöfer zusammen mit Kollegen von den Universitäten in Stanford und Erlangen gezeigt. Die Forscher sorgten für Medienrummel, als es ihnen gelang, die Mimik eines Gesichts in Echtzeit auf ein anderes zu übertragen – *reenactment*, Nachstellung einer Mimik, heißt der Vorgang.

Zollhöfer zeigt, wie es geht. Er schaltet eine herkömmliche Kamera von der Größe eines Schokoriegels ein und



Rekonstruierte Antike: An einer Büste von Sokrates haben die Saarbrücker Informatiker die Stärke des inversen Renderings vorgeführt. Mit der Methode lassen sich Oberflächen detailliert erfassen, auch wenn diese mit kommerziellen Tiefenkameras aufgenommen werden, die normalerweise nur grob aufgelöste 3D-Modelle liefern.

nimmt damit sein Gesicht auf. Auf dem Monitor erscheint Zollhöfers Kopf, den der Computer zunächst mit einem Gitternetz überzieht. „Der Computer errechnet jetzt das Modell meines Gesichts, das dauert ein paar Sekunden“, erklärt Zollhöfer. Dann aber geht es schnell. Wie eine venezianische Karnevalsmaske erscheint jetzt auf einem zweiten Bildschirm der dreidimensional animierte Gesichtsausschnitt Zollhöfers. Bewegt Zollhöfer jetzt seinen Mund, so folgt die Maske der Bewegung.

#### EINIGE PRODUZENTEN HABEN BEREITS ANGEKLOPFT

Dann schaltet er auf einem zweiten Monitor ein Video hinzu, das Arnold Schwarzenegger in einem Interview zeigt. Auch von Schwarzeneggers Gesicht erzeugt die Software ein Modell, das gewissermaßen hinter Schwarzeneggers Videogesicht liegt. Dann der Knaller: Als Zollhöfer seinen Mund öffnet, öffnet auch Arnold den Mund. Zollhöfer rümpft die Nase, er grinst, zieht die Stirn kraus – und Arnolds Bild folgt brav jeder Bewegung. „Wie man sieht, wird mein Gesichtsausdruck in Echtzeit auf das Gesichtsmodell Arnold Schwarzeneggers übertragen“, erläutert Michael Zollhöfer.

Für die Filmindustrie bedeutet das, dass eine natürlich wirkende Mimik direkt von einer Person in die bewegte

Filmsequenz eingespielt werden kann. Das ist eine kleine Revolution. Nicht zuletzt, weil man jetzt einfach einen beliebigen Gesichtsausdruck in ein Gesichtsmodell übertragen kann.

Inzwischen haben bereits einige Produzenten bei Theobalt angeklopft. Bislang muss er sie allerdings enttäuschen. „Wir müssen unser Gesichtsmodell noch

optimieren, vor allem die Lippenbewegungen. Denn der Mensch ist enorm gut darin, kleine Ungenauigkeiten wahrzunehmen“, sagt der Forscher. Schließen sich die Lippen bei einem Laut nicht hundertprozentig korrekt, wirkt das sehr störend. „Aber ich denke, dass wir in ein paar Jahren so weit sein werden“, sagt Christian Theobalt. ▶

#### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Damit die Mimik und die Bewegungen animierter Figuren in Filmen, Computerspielen oder anderen Anwendungen in der virtuellen oder erweiterten Realität natürlich wirken, verwenden 3D-Grafikspezialisten bislang mit großem Aufwand erzeugte dreidimensionale Modelle von Gesichtern beziehungsweise Körpern.
- Christian Theobalt und seine Mitarbeiter entwickeln Methoden, um mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand die Bewegungen von Gesichtern und Körpern anhand von Aufnahmen von einer oder wenigen Kameras bei beliebiger Beleuchtung und in beliebiger Umgebung zu analysieren und in Modelle umzusetzen.
- Die Forscher verwenden zu diesem Zweck unter anderem anatomische Modelle, die in ihrer Software hinterlegt sind, und Methoden des maschinellen Lernens.
- Dank des geringeren Aufwands, Bewegungen in dreidimensionale Modelle umzusetzen, werden so auch Anwendungen möglich, die bislang undenkbar waren. So können die Forscher die Mimik einer Person in Echtzeit auf das Gesicht einer anderen Person übertragen.

#### GLOSSAR

**Bewegungsanalyse:** Bei dieser auch als *motion capturing* bezeichneten Technik werden die Bewegungen von Personen mit verschiedenen Methoden in drei Dimensionen erfasst. Ältere Verfahren sind dabei auf Marker und genau definierte Aufnahmebedingungen angewiesen.

**Maschinelles Lernen:** Computer werden mithilfe vieler Datensätze für unterschiedliche Aufgaben trainiert. So lernen sie, Objekte wie etwa einen Tisch zu erkennen, auch wenn sie bislang nur ähnliche Gegenstände gesehen haben oder den Gegenstand aus einer ungewohnten Perspektive sehen.

Für Forscher, Entdecker, Wissenschaftler  
- und solche, die es werden wollen:

# Junge Wissenschaft



Das einzige europäische Wissenschaftsmagazin mit begutachteten Beiträgen junger Nachwuchsforscher.

Wissenschaftliche Erstveröffentlichungen und das Neueste aus Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik.

Nur im Abo. Viermal im Jahr News aus Forschung und Technik, Veranstaltungen, Porträts, Studien- und Berufsprofile.

## Vorteilsabo sichern!

abo@verlag-jungewissenschaft.de

Stichwort: „Vorteilsabo“

## Leseprobe anfordern!

leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de

oder per Fax 0211 / 74 95 64-29

**Vorteilsabo**  
nur **20,-€\***

für Schüler, Studenten, Referendare und Lehrer  
(4 Ausgaben für 20,00 EUR statt 30,00 EUR)\*  
\*zzgl. Versandkosten

# Der Tiefsee auf den Grund gehen

Ihre Leidenschaft sind die Ozeane, der Meeresboden ist ihre Laborbank. **Antje Boetius** vom **Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie** in Bremen verfolgt dafür immer mehrere Ziele gleichzeitig: von Entdeckung bis Vorsorgeforschung, von Technologieentwicklung bis Wissenschaftskommunikation. Ein Tanz auf vielen Hochzeiten – in Gummistiefeln und Stilettos.

TEXT TIM SCHRÖDER

**V**orträge im Ausland, Papierkram für die Expeditionsvorbereitung, Teambesprechungen, Kommissionen. „Wenn wir uns bald treffen wollen, dann kommen Sie doch am besten gleich – sonst wird das in den nächsten zwei Wochen sicher nichts mehr“, sagt Antje Boetius am Telefon. „Wie wäre es um fünf?“ Freitag, 17 Uhr – viele andere sind dann schon im Wochenende. Sie aber schiebt vor dem Feierabend noch das Interview dazwischen, denn sie glaubt an den Wert von Wissenschaftskommunikation und hat sich vorgenommen, Anfragen immer sofort zu beantworten.

„Ja, ich arbeite ziemlich viel“, sagt sie später, „ungefähr 14 Stunden am Tag. Und am Wochenende schreibe ich dann gern an Manuskripten – wirklich.“ Boetius betont das „wirklich“, als wolle sie keinen Zweifel daran aufkommen lassen, dass ihr die Arbeit Spaß macht. Doch man glaubt es ihr auch so. Es geht gegen Abend, und sie wirkt so frisch, als habe die Woche gerade angefangen. Kein Zweifel: Antje Boetius brennt für ihre Forschung.

Wenn man erzählen will, was sie alles macht, kommt man auf eine lange Liste. Die Meeresbiologin ist Leiterin der Brückengruppe „Tiefseeökologie“

und -Technologie“ zwischen dem Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen und dem Alfred-Wegener-Institut (Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung) in Bremerhaven. Außerdem ist sie Professorin für Geomikrobiologie an der Universität Bremen und Vizedirektorin des Exzellenzclusters „The Oceans in the Earth System“ des Bremer Marum – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften. Sie tanzt also auf mindestens drei Hochzeiten zugleich – und das mit Erfolg.

## ARTENVIELFALT IM MEERESBODEN

Leitthema ihrer Forschung ist die Rolle des Meeresbodens und seiner Bewohner innerhalb des Erdsystems. Ein großes Thema, denn der Meeresboden macht zwei Drittel der Erde aus, und die Vielfalt seiner Lebewesen übertrifft die an Land. Entsprechend vielfältig sind die Fragestellungen, mit denen Boetius sich beschäftigt. „Ungefähr alle fünf Jahre wechsle ich die Schwerpunkte – mal geht es um einen biogeochemischen Prozess wie den Verbrauch des Klimagases Methan, mal um die Biodiversität am Meeresboden, mal um die Reaktion mariner Ökosysteme auf die Meereisschmelze oder menschliche Eingriffe.“

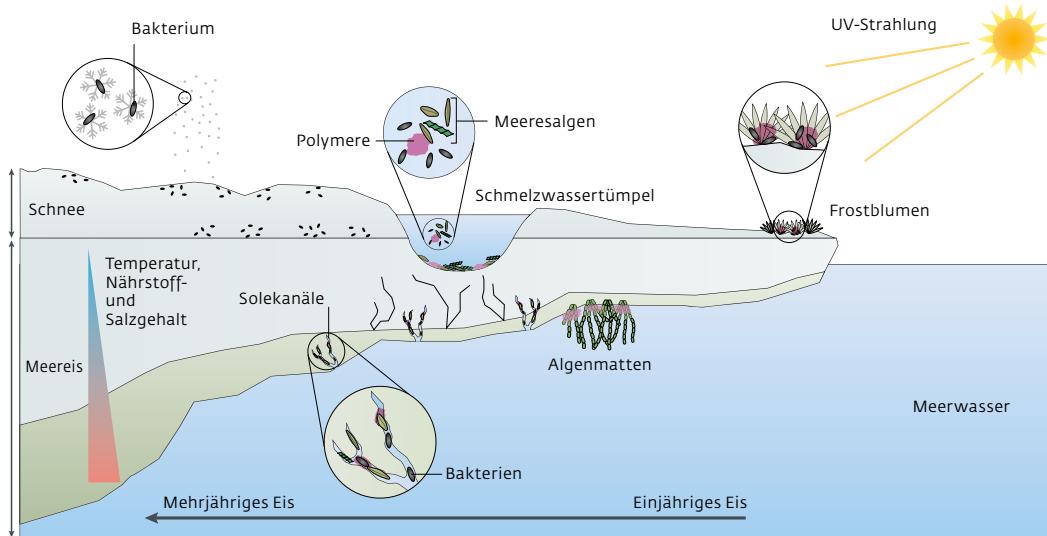
Aber egal, worum es geht, Boetius will möglichst viel draußen auf dem Meer unterwegs sein und Beobachtungen direkt in der Natur machen. Alles in allem hat sie mehrere Jahre ihres Lebens auf Forschungsschiffen verbracht. Wenn sie erzählt, klingt es wie die Sehnsucht eines alten Seebären nach dem Meer. „Ich sehe zu, dass ich wenigstens einmal im Jahr mit dem Schiff auf Expedition bin.“

Boetius ist Tiefseeforscherin und schon Dutzende Male mit Tauchbooten in das ferne Dunkel hinabgeglitten – im Atlantik, im Mittelmeer und im Indischen Ozean, im Pazifik und in den Polarmeeren. Im Licht der Scheinwerfer hat sie bleiche Tiefseefische, bunte Seegurken, bizarre Riesenwürmer und filigrane Schlangensterne gesehen. Am meisten aber interessiert sie sich für die kleinsten Lebensformen – die Bakterien. Die sind zwar winzig, doch ungemein wichtig. Denn mit ihrem Stoffwechsel setzen sie ungeheure Mengen an Substanzen um und beeinflussen damit sogar das Klima der Erde.

Boetius ist in Frankfurt am Main geboren und in Darmstadt aufgewachsen, weit weg von der See. Doch die Distanz zum Wasser macht sie mit ihrer Fantasie wett. Sie ist das erste Kind ihrer Eltern. Die Mutter ist Lehrerin und bringt ihr früh das Lesen bei – mit drei Jahren



Antje Boetius im Expeditions-Outfit: In der Expeditionshalle des Bremer Max-Planck-Instituts wird die Ausrüstung für die nächste Ausfahrt in Kisten gepackt. Links im Bild ein „Tiefseelander“, ein Freifallgerät, das in der Tiefsee die Atmung von Bakterien misst und auch Proben entnehmen kann. Die Forscher haben es zum ersten Mal unter geschlossener Eisdecke in der Nähe des Nordpols eingesetzt.



Mikroorganismen in der Atmosphäre bilden Kondensationskeime für Schneekristalle und gelangen so ins Eis der Arktis (links oben). Bakterien und einzellige Algen besiedeln Schnee, Eis, Schmelzwassertümpel und die sogenannten Frostblumen, obwohl sie dort starker UV-Strahlung durch die Sonne ausgesetzt sind. Die Mikroorganismen im Eis scheiden komplexe Moleküle (Polymere) aus, mit denen sie auch die Eisbildung beeinflussen. Wenn Meereis gefriert, werden das Salz und andere gelöste Stoffe als hochkonzentrierte Sole in winzigen Kanälen innerhalb des Eises eingeschlossen. Die Solekanäle, Schmelzwassertümpel und besonders auch die Unterseite des Meereises sind besondere Lebensräume für Mikroorganismen. Die Kieselalge *Melosira arctica* kann dicke Biofilme unter dem Eis bilden.

schon fängt sie an zu lesen, als Jugendliche schmökert sie am liebsten in Büchern. Piratenromane, *Die Schatzinsel*, *Moby Dick* und alles von Jules Verne. Das liebt sie.

Sie sieht kaum fern, und wenn, dann die Tauchfilme von Hans Hass und seiner Frau Lotte sowie die Abenteuer von Jacques-Yves Cousteau. „Das war toll. Expeditionen als Beruf, Leben auf Jachten, Forschung im Bikini, Abenteuer unter Wasser, all das hat mich begeistert.“ In dieser Zeit trennen sich ihre Eltern. Doch für die Ferien kommt die Familie wieder zusammen. Antje, die Geschwister, die Mutter und der Vater mit seiner neuen Lebensgefährtin fahren gemeinsam ans Meer, meist an den Atlantik – nach Irland, Frankreich oder Norwegen. Sie campen wild, paddeln mit dem Schlauchboot am Ufer entlang, suchen im glasklaren Wasser nach Tieren.

Als sie zwölf ist, bekommt sie von ihrem Vater eine kleine Naturforscher-Ausrüstung: eine Wetterstation, ein Binokular, eine Stereolupe und eine kleine Zentrifuge. Sie weiß früh, was sie will: studieren in Hamburg, wo viele Schiffe sind und das Meer zum Greifen nah ist. Sie will das Meer erleben, als Forscherin.

Boetius hat sich ihren Berufswunsch erfüllt. Heute ist sie vor allem in der Arktis unterwegs, oft mit dem deutschen

Forschungseisbrecher *Polarstern*, der ihr ermöglicht, das eisbedeckte Nordmeer zu erkunden. Sie will verstehen, wie der Klimawandel das Leben verändert: die Zusammensetzung der Mikroorganismen im Eis, die Algenproduktion im Wasser und damit auch die Nahrung für Tiefseegemeinschaften, die Ablagerungen im Sediment.

## EISCHMELZE IN DER ARKTIS

Als sie 2012 in der Arktis unterwegs war, schmolz das arktische Meereis stärker, als Forscher es je zuvor beobachtet hatten. Das Eis war dünn und übersät mit Schmelzwassertümpeln, dadurch war es unter dem Eis besonders hell. Die Kieselalge *Melosira arctica* konnte unter diesen Bedingungen besonders gut wachsen und dichte, tangartige Wälder unter dem Eis bilden. Doch bei der starken Erwärmung schmolz das Eis, und die Algen sanken in faustgroßen Klumpen in die Tiefe.

Boetius und ihre Kollegen schickten Kameras zum Meeresboden, die erstaunliche Bilder lieferten: Der sonst eher wüstenartige Grund der zentralen Arktis war mit einem grünen Algenteppich bedeckt. Nur wenige Seegurken und Schlangensterne konnten etwas mit den *Melosira*-Klumpen anfangen.

Die Tiefseemessungen des Max-Planck-Instituts zeigten, dass vor allem Bakterien die Nahrung verwerten und lokal den Sauerstoff im Boden aufzehren. Diese unerwartete Reaktion des arktischen Ökosystems auf die Eisschmelze konnten die Forscher schon an Bord in einer Veröffentlichung beschreiben.

2014 folgte die nächste Arktis-Expedition zu einem ganz anderen Thema. Diesmal war Boetius mit einem Team unterwegs, um den Gakkelrücken nördlich von Grönland zu erkunden. Hier wurden an einem Seeberg heiße Quellen und besondere Lebensgemeinschaften am Meeresboden vermutet, vier Kilometer unter dem Eis. Solche Quellen sind von den mittelozeanischen Rücken bekannt, wo neue Erdkruste gebildet wird und die Ozeanplatten auseinanderdriften. Das Meerwasser dringt dort tief in den Boden ein, wird an Magmakammern aufgeheizt, reagiert mit dem Gestein und schießt voller Energie und Mineralien wieder in den Ozean. So liefern heiße Quellen eine Nahrungsgrundlage für Bakterien und diese wiederum für höheres Leben. Dort blüht das Leben wie sonst an kaum einem Ort in der Tiefsee.

In der Arktis hatte allerdings bislang niemand das Leben an den heißen Quellen beobachtet, weil das Meereis den Weg versperrte. Seit 2001 gab es

Hinweise auf erstaunlich starken Hitzeausstoß und Rauchfahnen im Meer, doch keine Bilder von diesen extremen Lebensräumen im eiskalten Polarmeer. Boetius und ihr Team aber hatten einen Plan – und jede Menge Glück: Von der *Polarstern* aus konnten sie Unterwasserfahrzeuge auch bei voller Eisbedeckung einsetzen und den Boden absuchen. Am letzten Tag der Expedition klappte es: Kleine Schlotte kamen ins Bild, sogenannte Schwarze Raucher, umgeben von fremdartigen Gärten aus weißen Glasschwämmen. Das internationale Team arbeitet gerade die Ergebnisse auf. Sie wollen beweisen, dass die Spreizung des Arktischen Ozeans anders funktioniert als angenommen. Es sind solche Entdeckungen, die Antje Boetius begeistern.

Ihre ersten Schritte in die Wissenschaft macht sie schon früh: Der Biologieunterricht in der Schule mit all den Beschreibungen von Pflanzen und Tieren langweilt sie zwar, doch als sie 1986 das Abi in der Tasche hat, geht sie nach Hamburg, um Meeresbiologie zu studieren. Ein Verwandter schlägt ihr vor, sich am Hamburger Institut für Hydrobiologie und Fischereiwissenschaft bei dem Tiefseeforscher Hjalmar Thiel zu melden.

Thiel gehört zu den Wissenschaftlern, die damals das Leben auf den Manganknollenfeldern am Grunde des Pazifiks untersuchen. Es gibt erste Überlegungen, die Knollen großflächig abzubauen. Im internationalen Projekt DISCOL pflügen die Wissenschaftler um Hjalmar Thiel und Gerd Schriever einige Quadratkilometer Meeresboden, um zu untersuchen, wie das Leben in der Tiefsee auf einen solchen Eingriff reagiert. Der Abbau von Manganknollen scheint damals kurz bevorzustehen, aber es fehlt an ökologischen Untersuchungen zu den Folgen.

Thiel lädt die Abiturientin zu einem Gespräch ein. Zuerst rät er ihr, als Basis Biologie in aller Breite zu studieren und sich nicht zu früh festzulegen. Doch Antje Boetius weiß schon jetzt, dass sie



Auf einer Expedition mit dem Forschungsschiff *L'Atalante* ins Mittelmeer untersuchte Boetius im Jahr 2003 Tiefsee-Schlammvulkane.

eigentlich nur aufs Meer will. „Er sagte mir, dass ich mich wieder bei ihm melden könne, wenn ich das Vordiplom in der Tasche habe.“ Antje Boetius ist Jahrgang 1967, ein Babyboomer-Jahrgang. Die Hörsäle und Praktika sind rappelvoll, für die interessanten Kurse gibt es lange Wartelisten. Sie muss für ihr Stu-

dium Geld verdienen und jobbt als Kellnerin in einer Pizzeria und als Sekretärin in einer Versicherung – „eine eigenartige Welt“, sagt sie, „in der sich alles um Geld dreht“. Der Höhepunkt im Grundstudium ist eine erste kleine Schiffsreise, die sie endgültig überzeugt: Sie gehört auf ein Forschungsschiff. >

Mit Beginn des Hauptstudiums 1989 kann sie sich endlich auf die Meeresforschung konzentrieren. Sie besucht alle Vorlesungen, die etwas mit Wasser zu tun haben, auch die Tiefsee-Vorlesung von Thiel. Dann sucht er Hilfskräfte für eine größere Reise mit dem Forschungsschiff *Meteor* in den Nordostatlantik, zu ihrer Freude erhält sie einen Platz. Doch bevor die Fahrt beginnt, wartet Thiel mit einer Überraschung auf. Er fragt, ob sie an einem Austauschprogramm teilnehmen wolle – ein Platz am Scripps-Institut für Ozeanografie in den USA sei frei. Scripps in La Jolla, eines der weltweit bekanntesten Meeresforschungsinstitute, direkt am Surfstrand! Gleich nach der ersten großen Reise mit der *Meteor* für ein Jahr ins Ausland gehen, die Jobs aufgeben und das Studium unterbrechen? Boetius denkt nicht lange nach und packt die Koffer für die Reise in die USA.

Eine Entscheidung, die sie nicht bereut. Sie ist begeistert von der direkten Ansprache und der Zuwendung, mit der die Forscher dort den Studenten begegnen. Boetius belegt so viele Praktika und Kurse, dass ihr die Zeit am Scripps in Hamburg komplett als Hauptstudium angerechnet wird. Jetzt muss sie nur noch ihre Diplomarbeit schreiben. Sie nimmt dafür gleich an mehreren

Forschungsfahrten teil, auf einer davon lernt sie ihren späteren Lebensgefährten kennen, einen Bootsmann aus Bremerhaven. Boetius packt die Erkenntnisse von über vier Monaten Expedition in ihrer Diplomarbeit zusammen. „Das war knapp kalkuliert, aber ich habe so viel gelernt.“

### BREMERHAVEN STATT USA

Ihr ist längst klar, dass sie in der Forschung bleiben will und dass als Nächstes die Doktorarbeit folgen muss. Sie hat sich auf den Forschungsfahrten bereits in die Mikrobiologie des Meeresbodens eingearbeitet. Nur weiß sie noch nicht, wo sie ihre Doktorarbeit schreiben soll. Sie sehnt sich nach den USA, der Atmosphäre an den Instituten in Kalifornien. Andererseits hat sie ihren Freund in Bremerhaven. Die Entscheidung fällt, als ihr Mentor vom Scripps ihr den entscheidenden Rat gibt: Wenn sie in Sachen Tiefsee-Mikrobiologie vorankommen wolle, dann gebe es keinen besseren Platz als bei Karin Lochte am Alfred-Wegener-Institut, der heutigen Direktorin des Helmholtz-Zentrums. So bleibt Boetius in Bremerhaven.

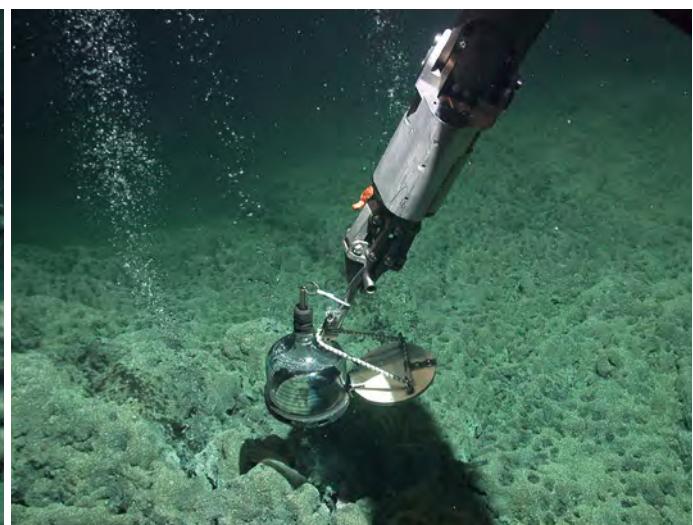
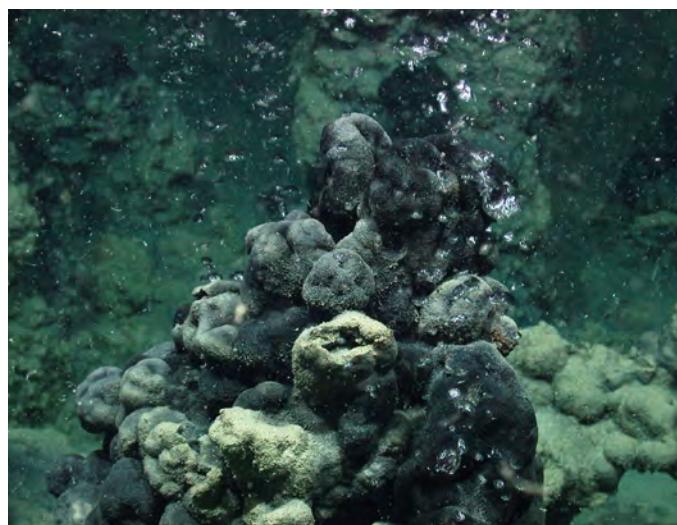
Für ihre Doktorarbeit gelangt Boetius 1993 das erste Mal mit der *Polarstern* an den sibirischen Kontinental-

rand. Sie nimmt Proben aus der eisbedeckten Tiefsee und analysiert, wie der Nahrungsmangel die Aktivität der Bakterien am Meeresboden beeinflusst. „Meine Doktorarbeit war noch kein Knüller“, sagt sie. „Aber heute sind die Proben von damals ein Schatz für neue Untersuchungen. Niemand konnte sich damals vorstellen, dass wir hier nur 20 Jahre später in völlig eisfreien Gefilden arbeiten werden.“ So sind ihre Daten heute eine wichtige Referenz, wenn es um die Frage geht, wie sich die arktischen Bakteriengemeinschaften mit dem Klimawandel verändern.

„Ich war in dieser Zeit fast die Hälfte des Jahres auf See und habe nur in Expeditionen gedacht. Ich wollte einfach nur draußen sein und hatte weniger meine Karriere im Blick“, sagt sie heute selbstkritisch. Dabei ist es wichtig, als Forscherin auch die Rahmenbedingungen für Wissenschaft im Blick zu haben, neue Methoden kennenzulernen, sich sein eigenes Forschungsgebiet zu erschließen. „Das sage ich heute meinen Doktoranden, denn es ist noch schwieriger geworden, früh selbstständig zu werden.“

Zunächst geht sie als Postdoktorandin zusammen mit Karin Lochte an das Institut für Ostseeforschung in Warne-

Im Schwarzen Meer besiedeln Bakterien Gasquellen in 260 Meter Tiefe und bilden mehrere Meter hohe Türme; diese werden im Innern von Kalkgestützt (links). Mit einer Gasglocke messen die Forscher in 850 Meter Tiefe den Gasausstoß an einer kalten Quelle im Schwarzen Meer (rechts).





Boetius und ihr Kollege Torben Klagge vor einer Tauchfahrt. Mit dem Forschungs-U-Boot *Jago* untersuchten die Wissenschaftler im Jahr 2010 sauerstofffreie Zonen im Schwarzen Meer. Im Hintergrund das deutsche Forschungsschiff *Maria S. Merian*.

münde, arbeitet einige Zeit im Indischen Ozean. Zu dieser Zeit, Mitte der 1990er-Jahre, kommen gerade neue molekularbiologische Techniken auf, mit der Forscher aus dem Erbgut von Bakterien deren Verwandtschaftsbeziehungen herauslesen können, besonders durch den Vergleich der Nukleinsäuren der Ribosomen (16S-rRNA-Gensequenzierung). Die Meeresmikrobiologen nutzen die Methoden und bestimmen damit die Vielfalt unbekannter Mikroorganismen sowie deren Verteilung und Aktivität.

1999 wechselt Boetius deshalb ans Bremer Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie und lernt dort neue Methoden der Meeresmikrobiologie kennen. Damals werden gerade die Methanvorkommen im Meer ein großes Thema. Methanhydrat – auch Gashydrat genannt – ist eine feste, eisähnliche Verbindung zwischen Meerwasser und Methan, die sich in großer Tiefe bei niedrigen Temperaturen bildet. Solche Hydrate gibt es an vielen Stellen in den Ozeanen. Weltweit sind Wissenschaftler fasziniert, denn Hydrate könnten

einerseits eine interessante Energiequelle darstellen, aber auch Hangrutschungen und Tsunamis verursachen. Außerdem tobt an ihnen das Leben: seltsame Würmer, Muscheln und unbekannte Mikroorganismen.

### METHAN ALS NAHRUNGSQUELLE

Aber niemand weiß, wovon sich die Tieransammlungen an Gashydraten ernähren, denn bislang ist kein Lebewesen bekannt, das Methan direkt nutzen kann. Es gibt allerdings die Vermutung, dass Organismen aus dem Reich der Archaeen das Methan abbauen und so Energie gewinnen könnten. Boetius kann an einer Ausfahrt des GEOMAR zum pazifischen Hydratrücken teilnehmen und untersucht Sedimentproben. Sie kombiniert dabei die 16S-rRNA-Sequenzierung mit einer weiteren Nachweismethode, der sogenannten Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH). Mit dem FISH-Verfahren lassen sich die in einer Probe vorkommenden Bakterienarten anhand ihres genetischen Fingerabdrucks mikroskopisch unter-

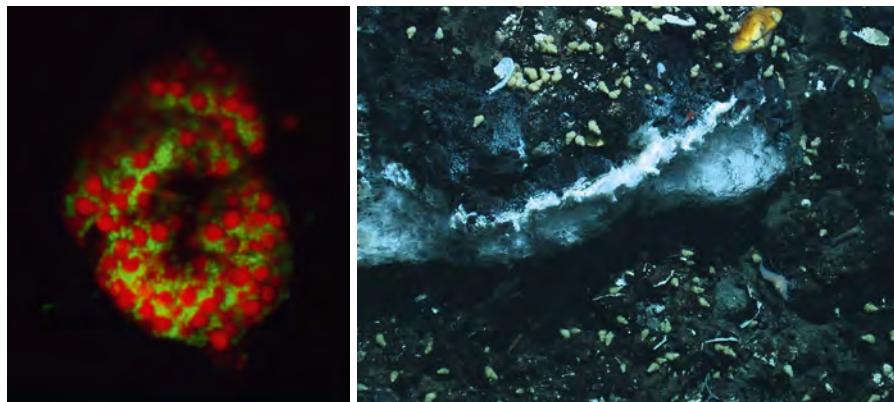
scheiden. Dabei docken mit Fluoreszenzfarbstoffen markierte spezifische Nukleinsäure-Moleküle an den Ribosomen bestimmter Bakterien an und bringen diese zum Leuchten.

Merkwürdigerweise scheinen unter Boetius' Mikroskop immer zwei Zelltypen auf, die aneinander festzuwachsen scheinen: Bakterien, die Schwefelverbindungen verarbeiten, und Mikroben aus dem Reich der Archaeen. Schließlich dämmert es ihr: Das Methan im Meeresboden wird von beiden gemeinsam verarbeitet. Die Lösung für das Rätsel um das Leben auf den Hydraten ist Kooperation! Die Bakterien verschaffen den Archaeen die richtigen energetischen Bedingungen für die Methanatmung und profitieren im Gegenzug von deren Abbauprodukten.

Das angesehene Fachmagazin *NATURE* veröffentlicht die Geschichte um die Archaeen-Bakterien-Symbiose, die erste Hinweise auf die „anaerobe Methanoxidation“ an Gashydraten gibt. Sie stößt auf großes Interesse in den Lebens- und Erdwissenschaften, denn Methan ist ein starkes Treibhausgas. >

**Links** Leuchtendes Duo: Eine Ansammlung methanoxidierender Archaeen (rot) und ihrer Symbiosepartner (grün). Die Farben werden durch Nukleinsäuren erzeugt, die mit fluoreszierenden Farbstoffen markiert sind.

**Rechts** Methanhydrat im Golf von Mexiko in fast 3000 Meter Wassertiefe. Mikroorganismen ernähren sich vom darin enthaltenen Methan und dienen wiederum Würmern, Schnecken und Krebsen als Nahrung.



Seit Jahrzehnten fragt sich die Fachwelt, warum der gasreiche Ozean so wenig Methan in die Atmosphäre entlässt und wie sich das Klima verändern wird, wenn sich die Methanhydrate durch die Erwärmung des Meeres auflösen sollten.

### SPRUNG AUF DER KARRIERELEITER

Boetius hat einen Volltreffer gelandet. Noch als Postdoktorandin kann sie am Max-Planck-Institut ein großes Projekt zur Erforschung der Mikrowelt auf den Hydraten starten, das vom Bundesforschungsministerium gefördert wird und an dem sich alle Abteilungen des Bremer Instituts beteiligen. Dann geht es Schlag auf Schlag. Weitere Projekte folgen. 2003 übernimmt sie am Bremer Max-Planck-Institut die Arbeitsgruppe „Mikrobielle Habitate“. Im selben Jahr wird sie Professorin an der International University Bremen, dem Vorläufer der Jacobs University.

Sie startet etliche neue Projekte zur Tiefseeforschung, viele in Kooperation mit Forschern aus anderen Ländern. 2008 baut sie die Brückengruppe zwischen dem Max-Planck-Institut und dem Alfred-Wegener-Institut auf und erhält eine Professur für Geomikrobiologie an der Universität Bremen. Neben den Projekten zur Entdeckung ex-

tremer Lebensräume und der Funktion des Methanabbaus kommen auch wichtige Fragen der Vorsorgeforschung hinzu. Was geschieht, wenn das Meer versauert? Wie reagieren mikrobielle Gemeinschaften auf Sauerstoffmangel und Überdüngung? Wann erholt sich der Meeresboden nach der Entnahme von Manganknollen?

„Ich habe einfach immer Lust auf neue Aufgaben“, sagt Antje Boetius. „Man muss dem Zufall eine Chance geben, einen zu finden.“ So wie damals, als sie bei Thiel anklopfte. Oder während des Studiums, als sie zur Platzvergabe für die Forschungsreise antrat, obwohl sie eigentlich kaum Chancen auf einen Platz hatte.

Eigeninitiative verlangt sie heute auch ein Stück weit von ihren mehr als 60 Mitarbeitern. „Wir arbeiten in wechselnden Teams an Projekten, jeder Doktorand und Techniker hat mehrere Ansprechpartner – und ich bin immer per E-Mail zu erreichen.“ Und noch etwas ist ihr wichtig: „Wenn wir gemeinsam auf eine Forschungsfahrt gehen, lernt man sich in allen Lebenslagen kennen. Das schafft Vertrauen.“

Seit 2006 ist Boetius regelmäßig Fahrtleiterin. Sie koordiniert die wissenschaftlichen Aufgaben an Bord und stimmt die Forschungsarbeit mit dem Kapitän und der Mannschaft ab. Denn

auf einem großen Forschungsschiff sind meist Forscher vieler Fachrichtungen zusammengewürfelt, die ganz verschiedene Experimente und Fragestellungen haben. Als Fahrtleiterin folgt sie ihrem Vorbild Hjalmar Thiel und dessen Kollegen. „Ich habe damals gelernt, dass man an Bord hart arbeiten muss, damit alle Einsätze und Probennahmen in der kurzen Zeit klappen – dass man Pausen aber auch zum Feiern und Tanzen nutzen sollte, denn mit guter Stimmung geht alles besser.“ Dafür hat sie neben Gummistiefeln auch immer Pumps an Bord.

Als Fahrtleiterin ist sie von früh bis spät auf den Beinen, geregelte Zeiten gibt es nicht, denn das Schiff arbeitet rund um die Uhr. Wichtig ist der gute Kontakt zur Mannschaft. „Als Forscher sind wir ja nur Gäste an Bord. Ich bin auf die Mannschaft angewiesen, denn diese Leute haben die langjährige Erfahrung mit Schiff, Wetter und unseren Forschungsgeräten.“ Sie achtet zum Beispiel darauf, dass die Bilder, die gerade von einem Unterwasserroboter aus der Tiefe zum Schiff geschickt werden, auch auf der Brücke zu sehen sind und die Mannschaft die Forschungsaufgabe versteht. „Damit alle teilhaben können.“

Doch auch jenseits der Expeditionen hat Boetius vielfältige Leitungsfunktionen übernommen, beispielsweise die Vorsitzende der Wissenschaftlichen Kommission des Wissenschaftsrats der Bundesregierung und Leiterin des Ausschusses „Forschungsbauten“. Das Gremium bewertet jedes Jahr Anträge zum Bau von Forschungsgebäuden an Hochschulen, mit einer Gesamtsumme von 450 Millionen Euro im Jahr. Boetius ist immer wieder begeistert von dem Vertrauen, das in sie und die anderen Mitglieder des Wissenschaftsrats gesetzt wird, die besten Konzepte auszuwählen. „Immerhin entscheiden wir ja über Anträge aus den unterschiedlichsten wissenschaftlichen Disziplinen.“ Sie freut sich über das positive Echo, das sie



Im Sommer 2012 tritt Boetius mit den Moderatoren Willi Weitzel (links) und Guido Cantz (Zweiter von rechts) in der ARD-Sendung *Tietjen und Hirschhausen* auf. Mit solchen Auftritten will sie Interesse für Wissenschaft und den Ozean wecken.

in allen Gremien erfahren hat, und die Vielfalt der Erlebnisse und Kontakte. „Manchmal wundere ich mich selbst – eben noch im Ölzeug an Bord, dann im Cocktailkleid beim Bundespräsidenten. Aber ich bin mir sicher: Auch im Wissenschaftsmanagement kommen mir meine Erfahrungen mit steifen Brisen, starkem Seegang und dem allzeit weiten Horizont zugute.“

Auch die Wissenschaftskommunikation ist Boetius wichtig. Derzeit ist sie Leiterin des Lenkungsausschusses von „Wissenschaft im Dialog“, einer Initiative der deutschen Forschungsorganisationen. Fernsehen, Radio, Podcasts und Zeitungsauftritte – sie beantwortet alle Anfragen, vor allem von Kindern, die sie fragen, wie sie Meeresforscher werden können und wie viel Geld man damit verdient. Die Kinderbriefe sammelt sie in einem Aktenordner. Sie liebt die Gespräche mit den Kleinen, nicht nur weil die sie an ihre eigenen Anfänge als Wissenschaftlerin erinnern, sondern „weil diese Grundneugier auf alles in der Welt doch so entscheidend und für mich als Forscher noch immer Antrieb ist“.

„Entdeckungsforschung“ nennt sie das, was sie heute tut. Sie will die Vielfalt von Ökosystemen und die räumli-

che Verteilung von Lebewesen in unbekannten Regionen der Tiefsee verstehen, nicht zuletzt um auch zu sinnvollen Schutzkonzepten für das Meer zu kommen. Entdeckungsforschung im Sinne von Humboldt? Sie lacht: „Nein, eher im Sinne von Maria Sibylla Merian, der

Frankfurter Naturforscherin aus dem 17. Jahrhundert. Es gab ja auch einflussreiche Entdeckerinnen.“ Wahrscheinlich steckt in ihr aber nicht nur der Geist Maria Merians. So wie sie strahlt, wenn sie von ihrer Arbeit erzählt, könnte auch ein wenig Lotte Hass mit dabei sein. ▲

## GLOSSAR

**16S-rRNA-Gensequenzierung:** Die 16S-ribosomale RNA ist eines von drei RNA-Molekülen, die in den Ribosomen von Bakterien die Bildung von Proteinen kontrollieren. Das 16S-rRNA-Gen verändert sich nur sehr langsam durch Mutation. Es eignet sich daher sehr gut dafür, verwandtschaftliche Beziehungen zwischen Bakterien zu bestimmen. Mit der Analyse von 16S-rRNA-Genen können Forscher nicht nur die Artenvielfalt in einer Probe identifizieren, sondern auch, wie häufig die einzelnen Arten darin vorkommen.

**Archaeen:** Archaeen sind Einzeller ohne Zellkern. Früher wurden sie auch als Archaeabakterien oder Urbakterien bezeichnet. Ihre Zellen sind aber deutlich anders aufgebaut als Bakterienzellen, deshalb werden sie inzwischen neben den Bakterien und Organismen mit Zellkern als eine dritte Domäne des Lebens geführt. In manchen Eigenschaften stehen sie den Zellen mit Kern sogar näher als die Bakterien. Viele Arten sind an extreme Umweltbedingungen angepasst, man findet sie zum Beispiel in heißen Quellen der Tiefsee oder in Salzseen.

**Methanhydrat:** Methanhydrat, auch Gashydrat genannt, besteht aus Methan, das in Wassereis eingelagert ist. Im Meer bildet es sich im methangesättigten Porenwasser des Meeresbodens, wo der Druck hoch und die Temperatur niedrig genug ist: in der Arktis schon in etwa 300 Metern. Die Umgebung von Methanhydraten ist besonders artenreich, da einige Mikroorganismen das Methan zur Energieerzeugung nutzen können. Ihre Abfallprodukte wie Schwefelwasserstoff werden wiederum von anderen Mikroben sowie Muscheln, Würmern und Krebsen genutzt, die mit Bakterien in Symbiose leben. Offenbar gibt es weit mehr Methanhydrat auf der Erde als Erdöl und Erdgas. Der Abbau und die Nutzung zur Energiegewinnung sind jedoch technisch schwierig und daher noch nicht wirtschaftlich.



# Der Preis der Unsicherheit

Europa befindet sich im Dauerkrisenmodus: Zur Schuldenkrise, die seit Jahren andauert, kommt inzwischen ein Mangel an Solidarität und Vertrauen. Den Ursprung der instabilen Lage sehen einige Sozialwissenschaftler in der marktfördernden Ausrichtung der Politik ab den 1970er-Jahren. Am **Max Planck Sciences Po Center** in Paris geht das Team um **Jenny Andersson** und **Olivier Godechot** der Frage nach, wie Gesellschaften mit Instabilität umgehen.

TEXT MECHTHILD ZIMMERMANN

**D**eutschland im Jahr 2016. Rosige Zeiten für das Land: Die Arbeitslosigkeit ist so niedrig wie seit Jahrzehnten nicht mehr. Großzügige Tarifabschlüsse lassen die Gehälter wachsen, auch die Renten steigen spürbar. In den öffentlichen Haushalten steht mehr Geld zur Verfügung als jemals zuvor. Die Kriminalität ist auf einem niedrigen Stand: Im Vergleich zur Mitte der 1990er-Jahre ist die Zahl der Raubüberfälle und Diebstähle um fast ein Drittel gesunken, die der Morde sogar um knapp die Hälfte.

Deutschland im Jahr 2016. Die Stimmung ist pessimistisch: Angst vor wirtschaftlichem Abstieg, Neid und Misstrauen gegenüber denen „da oben“ in Politik, Wirtschaft und Medien prägen einen beträchtlichen Teil der Gesellschaft. Im Internet kursieren Verschwörungstheorien, Politiker werden bedroht. Der Absatz von Pfefferspray und Schreckschusspistolen steigt rasant. Die rechtspopulistische „Alternative für Deutschland“ fährt in drei Bundesländern Wahlergebnisse von mehr als zwölf Prozent ein.

Deutschland ist keine Ausnahme. In vielen Teilen Europas wachsen Unsicherheit und Frustration und mit ihnen

die Sehnsucht nach einfachen politischen Antworten, wie sie populistische Politiker verschiedener Couleur liefern. Dies gilt für wirtschaftlich schwächelnde Nationen in Ost- und Südeuropa ebenso wie für Österreich, die Schweiz oder prosperierende nordeuropäische Länder. Woher kommen die Enttäuschung und die Verunsicherung?

Um es vorwegzunehmen: Es gibt keine einfache Antwort auf diese Frage. Auch die Gesellschaftswissenschaften können kein umfassendes Bild all der verzweigten Phänomene liefern, die sich aktuell Bahn brechen. Aber sie entwickeln Ansätze, die Ursachen aufzeigen und die über den bisherigen Rahmen politischer Denkmuster hinausgehen.

Die Historikerin und Politologin Jenny Andersson und der Wirtschaftssoziologe Olivier Godechot befassen sich vor allem mit den ökonomischen Ursachen der gesellschaftlichen Verunsicherung. Die beiden sind Direktoren des Max Planck Sciences Po Center on Coping with Instability in Market Societies mit Standort in der Pariser Innenstadt. Das Center, kurz MaxPo genannt, ist ein gemeinsames Projekt des Max-Planck-Instituts für Gesellschaftsfor- schung in Köln mit der sozialwissen- schaftlich ausgerichteten französischen



Tiefe Kluft: Die Unterschiede zwischen Spitzenverdienern, gerade in den Banken, und Menschen mit prekärem Einkommen sind deutlich gewachsen.



Ende des Spiels: Nach der Finanzkrise gab es in Frankfurt und weltweit Großdemonstrationen gegen die Machenschaften der Banken. Auch die Politik reagierte, indem sie Auflagen verschärfte, Kontrollen verstärkte und die Höhe der Boni beschränkte.

Eliteuniversität Sciences Po Paris. Die zentrale Frage von MaxPo lautet: Wie reagieren vom Markt geprägte Gesellschaften auf die Instabilität? Und wie hängt die wachsende soziale Ungleichheit damit zusammen?

Mit dem Begriff „Instabilität“ bündeln die Forscher mehrere Phänomene, die miteinander zusammenhängen. Der Ausgangspunkt ist die wirtschaftliche Instabilität, die sich nicht nur in Konjunkturzyklen äußert, sondern auch in Veränderungen auf dem Arbeitsmarkt; denn selbst in guten Zeiten verlegen Firmen Arbeitsplätze ins Ausland oder sparen Stellen ein. Die Beschäftigten bekommen das in Form von Arbeits-

verdichtung, Termindruck und steigenden Erwartungen an ihre Flexibilität zu spüren.

Dieser Druck und die Angst, den Job zu verlieren, führen wiederum zu sozialer Instabilität: Der Platz in der Gesellschaft, den man sich erarbeitet hat, ist nicht mehr sicher. Auch eine gute Ausbildung ist keine Garantie für einen Arbeitsplatz, wie sich im Moment in Südeuropa beobachten lässt. Aber auch in Deutschland wächst die Zahl prekärer Arbeitsverhältnisse, also zeitlich befristeter Stellen, Leiharbeit und Minijobs. Innerhalb der Gesellschaft geht die Instabilität mit Unsicherheit und Abstiegsängsten einher.

Für die Politik wiederum ergibt sich seit den 1980er-Jahren aus den neuen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ebenfalls eine instabile Situation: Die Globalisierung macht Teile der Wirtschaft mobiler und deren Besteuerung schwieriger, da die Firmen mit Abwanderung drohen können. Viele internationale Konzerne verschieben ihre Gewinne in Länder mit niedrigen Steuersätzen. In der Folge verschulden sich Staaten, um ihre Aufgaben zu erfüllen. Eine weitere Quelle politischer Instabilität ist das immer kompliziertere und schneller wechselnde Parteiengefüge in fast allen europäischen Ländern.

„Ausgangspunkt der Instabilität ist für uns die Ölpreiskrise in den 1970er-Jahren“, sagt Jenny Andersson. In den westlichen Industrieländern kam es erstmals zu einer Stagflation, einer Stagnation des Wirtschaftswachstums bei gleichzeitig hoher Inflation und hoher Arbeitslosigkeit – ein Phänomen, das es nach der damals vorherrschenden keynesianischen Wirtschaftstheorie nicht hätte geben dürfen.

Der britische Ökonom John Maynard Keynes hatte mit seiner „General Theory“ in den 1930er-Jahren einen bahnbrechenden Ansatz entwickelt, der erstmals erklären konnte, warum sich die Konjunktur nach der Weltwirtschaftskrise nicht erholt und die Arbeitslosigkeit trotz gesunkenener Löhne dramatisch hoch blieb. Keynes sah die gesamtwirtschaftliche Nachfrage als den entscheidenden Faktor für Produktion und Beschäftigung an. In den folgenden Jahrzehnten entwickelten die Keynesianer den Ansatz weiter. So entstanden unter anderem Theorien, die Inflation mit hoher Nachfrage, steigenden Löhnen und niedriger Arbeitslosigkeit verbunden sahen.

In der Ölkrise griffen diese Erklärungen nicht mehr. Die Arbeitslosenzahlen stiegen dramatisch, die Steuereinnahmen brachen ein, die Staaten mussten Ausgaben kürzen, um Haushaltsdefizite in den Griff zu bekom-

» Das Problem ist, dass die Wirtschaft inzwischen die Art und Weise dominiert, wie wir überhaupt über die Zukunft denken können.

men. In der Folge verlor Keynes' Modell an Einfluss. Stattdessen setzten sich wirtschaftsliberale Ansätze durch, die im öffentlichen Sektor mit Konzepten wie *New Public Management* umgesetzt wurden. „Das waren wirtschaftliche Dogmen, die etwa die staatlich organisierte Daseinsvorsorge als Hindernis für eine dynamische Marktentwicklung sahen“, sagt Jenny Andersson. „Man war überzeugt, dass öffentliche Einrichtungen ineffizient arbeiten und ihre Kosten durch Wettbewerb und Marktpreismechanismen gesenkt werden könnten.“

Ein Beispiel dafür ist der soziale Wohnungsbau. In Deutschland hat sich der Staat in den vergangenen Jahrzehnten schrittweise erst aus dem Bau von Wohnungen und dann aus der Wohnbauförderung zurückgezogen. Inzwischen zeigt sich, dass der Markt den Bedarf an günstigen Wohnungen nicht deckt. Nach jüngsten Zahlen sind bei 95 Prozent der privat errichteten Neubauwohnungen die Mieten zu teuer für Durchschnittsverdiener. Defizite zeigen sich etwa im Gesundheitswesen oder im Rentensystem.

Insgesamt entpuppte sich die stabile soziale und wirtschaftliche Lage der Nachkriegsjahrzehnte als Ausnahmerscheinung in der Geschichte. Im kollektiven Gedächtnis blieben die Standards dieser Zeit jedoch als Anspruch

erhalten – ein Grund dafür, dass sich viele Menschen seither vom Staat im Stich gelassen fühlen.

Zugleich ist die Gesellschaft in einen fundamentalen Wandel getreten, der bis heute anhält: Die klassischen Bindungen an die Familie sowie an Institutionen wie Kirche, Parteien und Gewerkschaften schwinden. Die Möglichkeiten, seinen Lebenslauf zu gestalten, sind zahlreicher denn je. Durch Zuwanderung findet sich vor allem in den Großstädten eine Vielzahl von Kulturen und Religionen. Insgesamt ist die Gesellschaft vielfältiger geworden, aber auch unübersichtlicher.

### DIE POLITIK IST VON DEN FINANZMÄRKTNEN ABHÄNGIG

Zusätzlich verändern die Digitalisierung und die unermesslichen Möglichkeiten des Internets unsere Lebenswelt grundlegend. Die Freiheit jedes Einzelnen hat zugenommen, was zugleich bedeutet, dass jeder eine größere Verantwortung zu tragen hat. Dies eröffnet viele neue Möglichkeiten – zugleich fühlen sich viele Menschen verunsichert, überlastet oder überfordert.

Die Finanzkrise ab 2007/2008 hat die wirtschaftliche und politische Lage weiter destabilisiert. Ausgehend vom Platzen einer Immobilienblase in den USA, führte die Krise dazu, dass Staaten

Banken retteten und sich dabei zusätzlich verschuldeten. Die Probleme griffen schließlich auf die Realwirtschaft über und belasten noch heute viele Länder durch lahmende Konjunktur, hohe Arbeitslosigkeit und Schuldenlast.

„Die Finanzkrise hat gezeigt, wie abhängig die Politik, wie abhängig wir alle von den Finanzmärkten sind“, sagt Andersson. Das zeige sich etwa, wenn Ratingagenturen die Kreditwürdigkeit von Staaten bewerten und auf diese Weise mitbestimmen, welche Handlungsspielräume eine Regierung hat. Diese Abhängigkeit ist Teil eines Phänomens, das die Forscher „Finanzialisierung“ nennen. Deren Hauptmerkmale sind die wachsende Bedeutung der Finanzindustrie und der Einfluss ihrer Interessen auf die Politik und die reale Wirtschaft. So stehen Aktienunternehmen unter dem Druck, ihre Gewinne zu maximieren, um sie an die Shareholder auszuschütten – was dann wiederum zu Personalabbau und zur Verlegung der Produktion in Billiglohnländer führt.

Olivier Godechot, der zweite Direktor des Pariser Centers, hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Auswirkungen der Finanzialisierung auf die soziale Ungleichheit in der Gesellschaft zu untersuchen. In einem breit angelegten Vergleich von 18 OECD-Staaten – darunter Deutschland, Frankreich, die USA, Großbritannien und Dänemark – analysierte er über einen Zeitraum von 1970 bis 2011, welche Rolle die Finanzmärkte und ihre Aktivitäten für den Anstieg der Ungleichheit in diesen Ländern spielte. „Zunächst kann man sehen, dass der Finanzsektor deutlich gewachsen ist“, sagt Godechot. „Sein Anteil am Bruttoinlandsprodukt hat sich durchschnittlich von vier auf fast sieben Prozent gesteigert.“

Nach den Auswertungen des Forschers folgt aus dem Anstieg der Finanzmarkttätigkeiten eine Zunahme der sozialen Ungleichheit. „Vor allem die außerordentlich hohen Gehälter und Bonuszahlungen im Finanzbereich

### MAX PLANCK CENTER

Max Planck Center verbinden Max-Planck-Institute mit den weltweit besten Forschungseinrichtungen. Sie schaffen eine Plattform, auf der die Wissenschaftler und ihre internationalen Partner Kenntnisse, Erfahrungen und Expertise zusammenbringen und gemeinsam die Forschung vorantreiben können. Ziel ist, den Austausch junger Wissenschaftler zu fördern, gemeinsame Workshops zu veranstalten und gegenseitig den Zugang zu technischen Einrichtungen, Geräten und Bibliotheken zu eröffnen. Die Center sorgen auch dafür, dass die Kooperationen sichtbarer werden und die Max-Planck-Gesellschaft an den jeweiligen Standorten an Bekanntheit gewinnt. Derzeit gibt es 16 Center in Europa, Israel, den USA, Kanada, Indien, Japan und Südkorea.

haben dazu geführt, dass die Kluft zwischen Arm und Reich wächst“, sagt der Wirtschaftssoziologe.

Auch auf regionaler Ebene hat Olivier Godechot den Einfluss der Finanzialisierung nachgewiesen. Besonders die großen Finanzzentren sind Treiber für die soziale Ungleichheit innerhalb eines Landes. Dort konzentrieren sich die landesweit höchsten Einkommen, und zugleich öffnet sich in diesen Zentren die Schere zwischen Spitzenverdiennern und Menschen mit prekärem Einkommen besonders weit.

In einem weiteren Schwerpunkt befasst sich Olivier Godechot damit, wie Arbeitgeber und Arbeitnehmer an verschiedenen Enden der Gehaltsskala mit der wachsenden Ungleichheit umgehen. Dazu ist Godechot unter anderem der Frage nachgegangen, wie sich die Bonuszahlungen in Banken seit der Finanzkrise entwickelt haben. Die EU hatte als Reaktion auf die Finanzkrise ab 2014 Bonuszahlungen für Banker gesetzlich auf maximal die doppelte Höhe des jährlichen Grundgehalts begrenzt.

Die erste Reaktion der Banken sei eine Anhebung der Gehälter gewesen, erzählt Olivier Godechot. „Britische Banken haben noch einen weiteren Weg gefunden, die Regelung zu umgehen: Sie geben ihren Top-Angestellten einfach zusätzlich zum Gehalt und zu den erlaubten Bonuszahlungen eine monatliche Zulage. Und die ist so gestaltet, dass sie – wie die Boni – jedes Jahr neu verhandelt wird.“

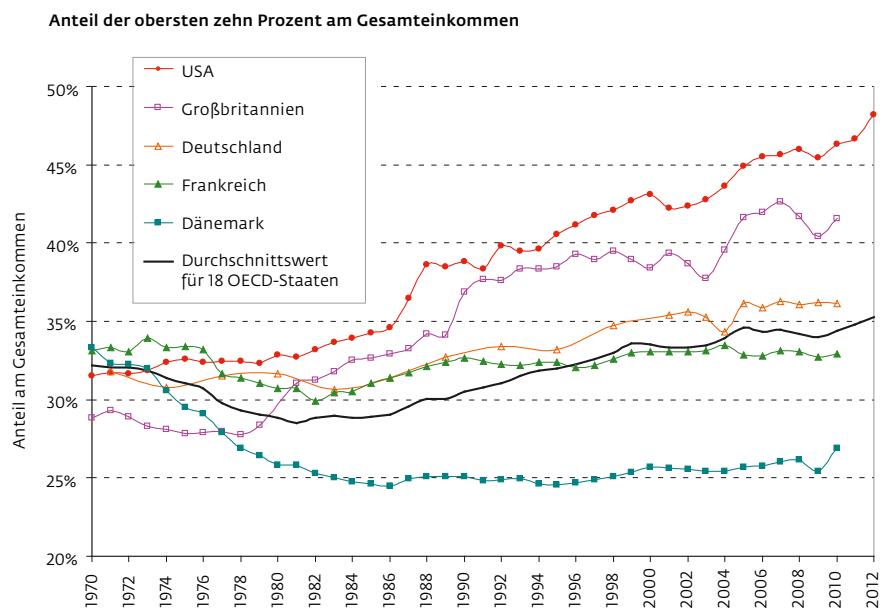
Fakt sei andererseits, dass die Bonuszahlungen in der Branche insgesamt zurückgehen. „Wir können noch nicht beurteilen, ob das vor allem daran liegt, dass die Gewinne zurückgegangen sind. Oder ob es auch eine Reaktion auf den sozialen Druck ist, dass Bonuszahlungen in der bisherigen Höhe gesellschaftlich einfach nicht mehr akzeptiert sind“, sagt der Wissenschaftler.

Ein Kennzeichen von MaxPo ist, dass hier ein breites Spektrum an Ansätzen vereint wird. Es reicht von der Mikroebene mit der Frage, wie einzelne Gruppen und Individuen mit den wachsenden Unsicherheiten umgehen, bis zur Makroebene, also großen gesellschaftlichen Trends.



**Oben** Die Wirtschaftshistorikerin Jenny Andersson und der Wirtschaftssoziologe Olivier Godechot leiten das Max Planck Sciences Po Center in Paris.

**Unten** Die Ungleichheit wächst. Die obersten zehn Prozent Spitzenverdiener erhalten mittlerweile im Schnitt 35 Prozent des gesamten Arbeitseinkommens – teils sogar noch mehr. Olivier Godechot wertete dazu Daten aus 18 OECD-Ländern aus.



Jenny Andersson hat ihre Stelle im November 2015 angetreten. Ihr zentrales Thema sind Prognosen im politischen und wirtschaftlichen Bereich. Solche Prognosen, Vorhersagen oder Szenarien bestimmen ganz wesentlich politische Entscheidungen. Das fängt bei der Haushaltsplanung an, die auf Steuerschätzungen beruht, betrifft

aber auch Gesetzes- und Regulierungsentscheidungen.

„Prognosen sind ein paradoxes Phänomen“, sagt Jenny Andersson. „Einerseits weiß man nie, ob Vorhersagen wirklich eintreffen, so tragen sie zur Unsicherheit bei. Andererseits brauchen die Politik und gerade auch die Finanzwirtschaft Vorhersagen,

um Erwartungen zu kanalisieren. Und auf diese Weise können sie wiederum stabilisierend wirken – manchmal auch als Selffulfilling Prophecy.“

Als die Finanzkrise akut wurde, habe man das gut beobachten können: „Für die Finanzmarktinstitutionen musste sichergestellt werden, dass ihre Solvenz nicht gefährdet würde“, erklärt Andersson. „Daher war auch die erste Reaktion auf die Finanzkrise, die Ängste auf den Finanzmärkten zu beruhigen und zu verhindern, dass die Akteure irrational reagieren und dadurch die Krise weiter verschärfen.“ Dazu gehörte etwa die Ankündigung von EZB-Chef Mario Draghi, die Europäische Zentralbank werde „alles Notwendige“ tun, um den Euro zu erhalten – den Kauf von Staatsanleihen eingeschlossen. Die Konsequenz ist mittlerweile als Draghi-Effekt bekannt: Die Finanzmärkte beruhigten sich.

Jenny Andersson kritisiert, dass die eigentlichen Ursachen der Krise nicht angetastet wurden: Die Macht der Finanzmarktakteure, die Dominanz der Märkte und die Erwartungen an dauerhaftes Wachstum – all das sei erhalten geblieben. „Das Problem ist, dass die Wirtschaft inzwischen die Art und Weise dominiert, wie wir überhaupt über die Zukunft denken können“, sagt die Wissenschaftlerin. Als Beispiel nennt sie die sogenannte Austeritätspolitik, also die strikte Vorgabe, dass Staatshaushalte selbst in wirtschaftlich schlechten Zeiten durch Ausgabenkürzungen und Steuererhöhungen vor weiterer Verschuldung geschützt werden müssen.

„Den Bürgern wird gesagt, dass der Staat sparen und kürzen muss, um für die Zukunft Stabilität zu gewährleisten. In Wirklichkeit erfüllt die Sparpolitik vor allem die Erwartungen der Finanzmärkte – die werden stabilisiert. Die Sparpolitik ist ein Dogma, und das macht es schwierig, sozioökonomische Alternativen überhaupt zu diskutieren“, sagt Andersson. Mit anderen Worten: Die Politik wird als „alternativlos“ dargestellt.

Und da schließt sich der Kreis zu den aktuellen politischen Entwicklungen, vor allem zum Erstarken populistischer Parteien. „Gerade in der Sozial- und Wirtschaftspolitik bieten die alten

Volksparteien keine Alternative zur Dominanz der Märkte“, sagt Jenny Andersson. Als Historikerin hat sie sich intensiv mit der Geschichte der Sozialdemokratie in Europa befasst.

### KRISEN KÖNNEN DIE POLITIK ZUM POSITIVEN VERÄNDERN

Die sozialdemokratischen Parteien hätten in den 1990er-Jahren das Vertrauen ihrer Wählerschichten dadurch verloren, dass sie Grundsätze wie Umverteilung und soziale Absicherung zugunsten marktkonformer Ziele aufgaben – mit spürbaren Auswirkungen auf weite Teile der Bevölkerung: „In den 1970er- und 1980er-Jahren war wirtschaftliche Unsicherheit ein Phänomen der Arbeiterklasse. Inzwischen fühlt sich auch die Mittelschicht bedroht und sucht Antworten bei populistischen Parteien“, so Andersson.

Viele ziehen inzwischen Parallelen zu den 1930er-Jahren und den Konsequenzen, die aus der damaligen Krise und der wachsenden Ungleichheit folgten. Jenny Andersson plädiert als Historikerin dafür, die Geschichte differenziert zu betrachten und auch aus

positiven Beispielen zu lernen: „Die Weltwirtschaftskrise der 1930er-Jahre hat etwa in den USA dazu geführt, dass die Politik Strategien entwickelt hat, negative Auswirkungen von Marktmechanismen einzudämmen: mit aktiver Arbeitsmarktpolitik und mit sozialstaatlichen Einrichtungen, welche die Solidarität zwischen den Bevölkerungsschichten gefördert haben.“

Olivier Godechot weist darauf hin, dass die Arbeit am Center dazu beiträgt, die Ursachen ebenso wie die Auswirkungen zunehmender Instabilität aufzudecken. Es geht darum, ein klareres Bild der wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Zusammenhänge zu bekommen – eine wesentliche Voraussetzung, um neue Ansätze zu entwickeln und damit den Populisten aller Länder etwas entgegenzusetzen.

In Hinblick auf die letzte Finanzkrise müsse man noch abwarten, welche politischen Reaktionen sich letztendlich durchsetzen, sind sich die Direktoren von MaxPo einig. „Und wir müssen genau analysieren: Welche politischen Lösungen, welche sozialen Ansätze waren oder sind erfolgreich und welche nicht?“

### AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Für die Menschen in Europa ist die Lage in den vergangenen Jahrzehnten in vielerlei Hinsicht instabiler geworden.
- Die Gesellschaft hat sich gewandelt: Institutionen wie Kirchen, Parteien und Gewerkschaften haben an Autorität verloren, die Vielfalt an Kulturen und Lebensweisen ist gewachsen, ebenso die finanzielle Ungleichheit.
- Veränderungen im Bereich der Wirtschaft, wie die Globalisierung oder die Einführung neuer Technologien, und die sich öffnende Gehaltsschere zwischen Gering- und Spaltenverdiennern tragen wesentlich zur Instabilität bei.
- Die Politik hat der Wirtschaft seit den 1970er-Jahren mehr Freiheit eingeräumt. Gleichzeitig ist die Politik abhängiger von der Wirtschaft geworden – etwa dadurch, dass Firmen mit Abwanderung drohen.
- Wissenschaftler am Max Planck Sciences Po Center in Paris arbeiten daran, Ursachen und Auswirkungen der zunehmenden Instabilität aufzudecken und Ansätze zu entwickeln, die über den bisherigen Rahmen politischer Denkmuster hinausgehen.

### GLOSSAR

**Austeritätspolitik:** Vorgabe, dass Staaten auch in wirtschaftlich schlechten Zeiten sparen und Steuern erhöhen sollen, um Verschuldung zu vermeiden.

**Finanzialisierung:** Wachsender Einfluss der Finanzindustrie auf Politik und Realwirtschaft. Dazu gehört, dass die Regeln der Finanzbranche – vor allem die kurzfristige Gewinnmaximierung – in anderen Bereichen an Einfluss gewinnen.

# Liaison im Reagenzglas

Mitte der 1970er-Jahre gelang es Georges Köhler, später Direktor am Freiburger **Max-Planck-Institut für Immunbiologie**, eine kurzlebige Immunzelle mit einer teilungsfreudigen Krebszelle zu verschmelzen. Heraus kam eine unsterbliche Zellschimäre mit der Fähigkeit, baugleiche („monoklonale“) Antikörper zu produzieren – eine Revolution in der Biologie und Medizin. 1984 bekam Köhler dafür den Nobelpreis, gemeinsam mit César Milstein und Niels Kaj Jerne. Dieses Jahr hätte der früh verstorbene Forscher seinen 70. Geburtstag gefeiert.

TEXT ELKE MAIER

Schwanger oder nicht – der Frosch weiß Bescheid: Injiziert man einem Krallenfroschweibchen etwas menschlichen Urin und legt das Tier aufgrund der darin enthaltenen Hormone binnen eines Tages Eier, lautet die Antwort Ja. Einfacher und schneller geht es mit einem Teststäbchen: In wenigen Minuten erscheint das Ergebnis in Form einer farbigen Linie. Grundlage des Tests sind monoklonale Antikörper. Sie heften sich an das Schwangerschaftshormon Choriongonadotropin an und lösen damit die Farbreaktion aus.

Seit sie sich im Labor herstellen lassen, haben die monoklonalen Antikörper längst nicht nur den Schwangerschaftstest modernisiert. Als molekularbiologische Universalwerkzeuge sind sie aus Biologie und Medizin nicht mehr wegzudenken: Sie identifizieren einzelne Moleküle in Stoffgemischen, spüren Tumorzellen im Körper auf, helfen bei der Diagnose von Krankheiten und bei Organtransplantationen oder werden in der Krebstherapie eingesetzt.

Die Methode, um sie zu gewinnen, war dabei keineswegs das Resultat biomedizinischer Forschung auf der Jagd nach vermarktbaren Ergebnissen. Ihre Entdecker waren vielmehr passionierte Grundlagenforscher mit dem Ziel, die Funktionsweise des Immunsystems zu verstehen. Der Jüngere von beiden, Georges Köhler, war gerade einmal 28 Jahre alt, als ihnen der große Wurf gelang.

Georges Jean Franz Köhler wurde am 17. April 1946 in München geboren. Nach seinem Biologiestudium in Freiburg ging er als Doktorand ans Institut für Immunologie nach Basel, eine vom

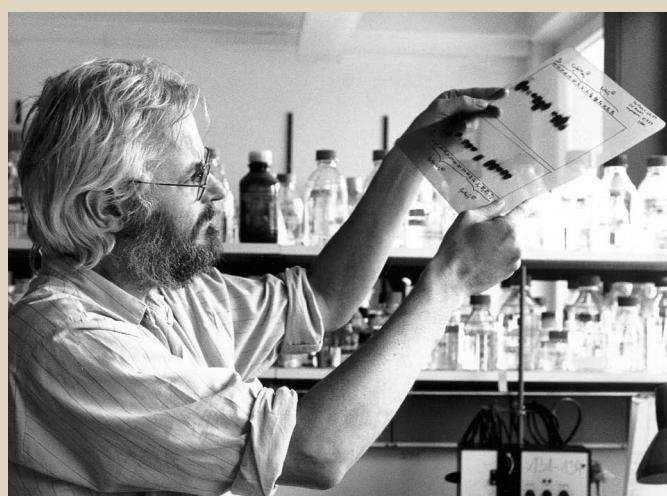
Pharmakonzern Hoffmann-La-Roche finanzierte Ideenschmiede. Seinem Doktorvater Fritz Melchers war damals noch nicht klar, dass er es mit einem künftigen Nobelpreisträger zu tun hatte. Er wunderte sich vielmehr über die entspannte Arbeitsmoral seines Doktoranden: „Georges war gern in der Natur, er hat niemals am Wochenende gearbeitet. Dafür hatte er jede Menge oft verrückter Ideen“, erzählt Melchers heute.

Was Köhler am meisten interessierte, war die kaleidoskopische Vielfalt der Antikörper. Diese y-förmigen Abwehrmoleküle bilden die Vorhut unseres Immunsystems. Sie haben die Aufgabe, Eindringlinge wie Viren und Bakterien, Giftstoffe oder auch Krebszellen zu binden und aus dem Körper zu entfernen. Dabei hat jeder Antikörper sein eigenes „Feindbild“: Spezifische Einbuchtungen an den Enden seiner beiden „Arme“ passen nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip zu einer ganz bestimmten Fremdstruktur, dem sogenannten Antigen. Trifft ein Antikörper auf sein Gegenstück, heftet er sich daran fest – an ein lösliches Protein ebenso wie an die Oberfläche eines Bakteriums oder einer Krebszelle.

Bildungsstätte der Antikörper sind die B-Lymphozyten – weiße Blutkörperchen mit der Fähigkeit, Fremdstrukturen zu erkennen und sich zu vermehren. Damit der Körper gegen sämtliche Antigene gewappnet ist, patrouilliert im Blut eine Armada aus mehreren Millionen unterschiedlichen Antikörpern. Dabei produziert jeder B-Lymphozyt nur einen ganz bestimmten Antikörpertyp.

Wie es zu dieser immensen Zahl kommt, war lange Zeit ein Rätsel: Waren die vielen unterschiedlichen Baupläne im Erbgut festgeschrieben, oder kamen sie durch zufällige Mutationen in den Antikörper produzierenden Zellen zustande? An dieser Frage waren die Forscher bis dahin gescheitert, denn um sie zu beantworten, brauchte man Immunzellen, die sich im Labor züchten ließen und gleichzeitig Antikörper mit bekannter Spezifität gegen ein bestimmtes Zielmolekül produzierten. Normale Lymphozyten sterben jedoch außerhalb des Körpers nach kurzer Zeit ab.

Trotz dieser Hürde war Georges Köhler entschlossen, das „Antikörper-Problem“ in Angriff zu nehmen. Das Rüstzeug dafür wollte er sich bei dem Immunologen César Milstein holen, der am MRC Laboratory of Molecular Biology in Cambridge forschte. Mil-



Kritischer Blick: Georges Köhler begutachtet im Labor die Ergebnisse seiner neuesten Experimente. Als Grundlagenforscher war er den Geheimnissen des Immunsystems auf der Spur. Praktischerweise fielen dabei als Nebenprodukt die monoklonalen Antikörper ab.

stein galt als brillanter Experimentator und Spezialist auf dem Gebiet der Zellfusion. Im Frühjahr 1974 machte sich Georges Köhler auf den Weg nach England, gemeinsam mit seiner Frau Claudia und den drei Kindern.

In Milsteins Labor war es gelungen, sogenannte Myelomzellen aus Mäusen zu kultivieren. Diese entarteten Immunzellen verhielten sich ganz nach Tumorart, indem sie sich unbegrenzt teilten. Gleichzeitig produzierten sie Antikörper, allerdings von unbekannter Spezifität. Die B-Lymphozyten hingegen brachten zwar eine bestimmte Sorte von Antikörpern hervor, gingen aber in Kultur zu grunde. Gesucht war eine Zelle, die beides konnte: sich im Labor vermehren und gleichzeitig spezifische Antikörper produzieren.

Die entscheidende Idee sei ihm nachts im Bett gekommen, gab Georges Köhler später an: Was, wenn sich ein Lymphozyt mit einer Myelomzelle verschmelzen ließe? Könnte man so nicht die Vermehrungswut der Tumorzelle auf die Immunzelle übertragen? Köhler schwiebte vor, eine unsterbliche, Antikörper produzierende Zellschimäre zu basteln. „Ich war auf einmal hellwach und konnte überhaupt nicht mehr schlafen und dachte die ganze Nacht nach. Am anderen Morgen erzählte ich Claudia beim Frühstück von meinen Nachtgedanken“, berichtete er. Am Institut suchte er sofort Milstein im Keller bei den Zellkulturen auf, um mit ihm seine Idee zu diskutieren.

DIE ZEIT vom 11. Mai 1984

» Monoklonale Antikörper entstammen keineswegs gezielter medizinischer Forschung, sondern den Träumen eines jungen Biologen. Georges Köhler [...] suchte nach einem einfachen Versuchsansatz für seine immunologischen Forschungen.

Im Herbst 1974 machte sich Georges Köhler an die Arbeit. Als Testantigen dienten ihm rote Blutkörperchen vom Schaf. Diese injizierte er einer Maus. Nachdem im Mäusekörper die Immunreaktion angelaufen war, entnahm er die Milz. Er homogenisierte das Milzgewebe, um an die dort reichlich vorhandenen B-Lymphozyten zu gelangen. Diese mischte er mit Myelomzellen. Um der Liaison auf die Sprünge zu helfen, griff Köhler in die Trickkiste der Immunologen und fügte noch einen speziellen Virus hinzu, der als molekularer Partnervermittler tätig werden sollte. Nun hieß es abwarten, ob die beiden Zelltypen bereit waren, die erhoffte Zwangsehe einzugehen und obendrein die gewünschte Sorte von Antikörper zu produzieren.

Sieben Wochen lang hielt Köhler die Zellen in einer Nährlösung, wo sie sich ungehemmt vermehrten. Erst dann wagte er sich an den entscheidenden Test: Würden die Hybridome – so die Bezeichnung der Zellmischninge – Antikörper gegen das Testantigen bilden? Um das herauszufinden, überführte er die Zellen in Petrischalen, deren Nährmedium rote Blutkörperchen vom Schaf enthielt. Waren die gesuchten Antikörper vorhanden, würden sie sich an die Blutzellen anheften und sie zersetzen. Um die Zellkolonien herum wären dann helle Höfe zu sehen, sogenannte Plaques.

An jenem Tag setzte Köhler gegen 17 Uhr sein Experiment an. Bis mit einem Ergebnis zu rechnen war, würden vier oder fünf Stunden vergehen – genügend Zeit also, um zu Hause in Ruhe zu



Ein Gläschen in Ehren: Georges Köhler (Mitte) und seine Institutskollegen stoßen auf den Nobelpreis an.

Abend zu essen. Danach kehrte er ans Institut zurück. Im Schlepptau hatte er seine Frau, als moralische Unterstützung, falls der Versuch gescheitert war. Gemeinsam betratn die beiden das fensterlose Labor im Keller des Instituts. Köhler nahm die ersten beiden Petrischalen in die Hand. Deutlich zeichneten sich die Plaques gegen den dunklen Hintergrund ab.

„Ich habe gejubelt vor Freude. Ich küsste meine Frau. Ich war überglücklich. Das Ergebnis war besser, als ich je zu denken gewagt hätte“, erinnerte er sich später. Georges Köhler hatte Zellfabriken geschaffen, die wie am Fließband baugleiche Antikörper produzierten. Da alle von derselben Zelllinie abstammen, werden sie „monoklonal“ genannt.

Am 7. August 1975 veröffentlichten Köhler und Milstein ihre Methode im angesehenen Fachblatt NATURE. Sie könnte „nützlich für den medizinischen und industriellen Gebrauch“ sein, schrieben sie am Ende ihres Artikels. Sie sollten mehr als recht behalten.

Kurz darauf trat die Hybridom-Technik ihren Siegeszug durch die Labors an. Denn schnell war klar, dass sie weit mehr ist als ein hilfreiches Werkzeug für Immunforscher. Sie ermöglicht es, maßgeschneiderte Antikörper gegen ein beliebiges Antigen herzustellen, und das in praktisch unbegrenzter Menge.

Diese kann man etwa auf ein komplexes Stoffgemisch loslassen, um einzelne Moleküle herauszufischen. Es ist möglich, sie mit leuchtenden Farbstoffen zu markieren, um damit Bakterien, Viren oder Krebszellen aufzuspüren. Sie lassen sich als Transportvehikel für Arzneistoffe nutzen, um etwa gezielt Tumore zu bekämpfen. Bei Organtransplantationen helfen sie, eine Abstoßung zu verhindern – die Zahl der Möglichkeiten ist schier endlos.

Für die Pharmabranche wurden die monoklonalen Antikörper zu einem Milliardengeschäft. Vor ihrer Publikation hatte Milstein die Methode der britischen Regierung zur Patentierung angeboten. Es kam keine Antwort. Offenbar hatten die zuständigen Beamten die Sternstunde der Molekularbiologie verschlafen.

Nach seiner Jahrhundertentdeckung konnte sich Georges Köhler vor Angeboten kaum retten. Er lehnte sie allesamt ab. Anstatt sich als „bestbezahlter Maßschneider“ für monoklonale Antikörper ködern zu lassen, blieb er der Grundlagenforschung treu. Im Jahr 1984 ging er als Direktor ans Freiburger Max-Planck-Institut für Immunbiologie. Wenig später kam der Anruf aus Stockholm: Georges Köhler und César Milstein wurden mit dem Nobelpreis für Medizin ausgezeichnet, gemeinsam mit dem dänischen Immunologen Niels Kaj Jerne. In den folgenden Jahren arbeitete Köhler daran, die Geheimnisse der Immunabwehr zu enträtselfn. Am 1. März 1995 starb er an Herzversagen. Er wurde nur 48 Jahre alt.



## Von Mauritius lernen

Reiner Klingholz, Wolfgang Lutz, **Wer überlebt?** Bildung entscheidet über die Zukunft der Menschheit

300 Seiten, Campus Verlag, Frankfurt am Main 2016, 24,99 Euro

Ihr Anliegen ist leidenschaftlich. Und es ist dringlich: Es wird allerhöchste Zeit, für flächendeckende Bildung auf der Welt zu sorgen. Dies mahnen die Bevölkerungsforscher Reiner Klingholz und Wolfgang Lutz in ihrem Buch *Wer überlebt? Bildung entscheidet über die Zukunft der Menschheit* an. Denn virulente globale Missstände wie Hunger, Geschlechterdiskriminierung, Klimawandel und der zunehmende religiöse Fanatismus – und damit Fragen des schieren Überlebens – könnten allesamt auf einen eklatanten Mangel an Bildung und Bildungschancen zurückgeführt werden. Mit „Bildung“ meinen die Demografen zuvorderst essenzielle Fähigkeiten wie Lesen, Schreiben und Rechnen.

Deutlich wird gleich zu Beginn des Buchs, dass die Autoren insbesondere im islamischen Fundamentalismus eine der größten Gefahren für die Zukunft unserer Welt sehen. Er sei eine direkte Folge von fehlenden Bildungschancen und werde nun umgekehrt auch zu deren Ursache. In Kombination mit sprachlichen Wendungen wie „Kampf der Bildungskulturen“ (zwischen „einer Wissens- und einer Unwissensgesellschaft“) und einigen eher unglücklichen Zwischenüberschriften wie „Zeugungskraft ersetzt keine Bildungskraft“ kommen zu Beginn der Lektüre einige Fragen nach der Stoßrichtung des Manifestes auf. Doch schnell wird klar, dass es weder für die reaktionäre noch die allzu simple Argumentationsecke taugt.

Denn Klingholz und Lutz betonen: „Die heutigen Krisen deuten darauf hin, dass hinter den unübersehbaren neuen Konflikten eher mangelnde Investitionen in Bil-

dung stehen als religiöse oder kulturelle Prägungen.“ Sie bringen Beispiele für islamisch geprägte Staaten, etwa Indonesien und Malaysia, in denen Bildung und damit Wohlstand Konjunktur haben: „Es ist also keineswegs der islamische Glaube, der sich für bestimmte Länder als Entwicklungshemmnis erweist, sondern es sind die politischen und religiösen Institutionen, die mit dem Argument der Religion für soziale Ungerechtigkeit sorgen und die Menschen daran hindern, frei und eigenverantwortlich ihr Glück zu suchen.“

Insbesondere in den Staaten südlich der Sahara, im Nahen Osten und in einigen Teilen Asiens seien Bildungschancen verloren worden – mit fatalen Folgen für die Nationen selbst, aber auch für die ganze Welt. Diese Staaten könnten und sollten, so fordern die Experten, auch von Ländern wie China, Singapur und Mauritius lernen. Deinen Machthaber hätten in eine Bildungs offensive investiert und damit gute Voraussetzungen für Wohlstand geschaffen.

Als Indikatoren für diese Trends und Prognosen dienen den Autoren unter anderem der Zugang, die Dauer und die Qualität von Bildung für alle Mitglieder einer Bevölkerung. Insbesondere für Mädchen und Frauen sei dies dringlich, denn fast zwei Drittel aller Analphabeten auf der Welt seien weiblich. Die unter anderem auch daraus resultierende Diskriminierung von Mädchen und Frauen ist in den Augen der Forscher „vermutlich das größte Entwicklungshemmnis der Menschheit“.

Die Autoren – und das zählt zu den Stärken des Buchs – drängen immer wieder und mit Nachdruck darauf, dass insbesondere

Mädchen und Frauen Zugang zu Bildung erhalten müssten. Dies würde vor allem auch zu einem weltweiten Rückgang der Geburtenraten führen und sei wichtig, weil sich damit sowohl Gesundheit und Lebenschancen verbesserten als auch die nationale und internationale Versorgungslage entspannte. Wirtschaftliches Wachstum sei ebenfalls eine der wichtigsten Folgen von mehr Bildung, schreiben Klingholz und Lutz – ohne allerdings das Wachstums postulat kritisch einzuordnen.

Die Bevölkerungsforscher belegen ihre Thesen und ihr Anliegen für mehr Bildung weltweit – das sie selbst als „Binsenwahrheit“ bezeichnen – mit einer Vielzahl an Statistiken und Fallstudien, die sie sehr lese- und laienfreundlich in ihr Manifest einbinden. Auch jeweils ausschnittartige Blicke in die (Religions-)Geschichten seit dem Mittelalter fließen in ihre Analyse ein.

Ihre konkreten Forderungen daraus lauten unter anderem: (wieder) mehr finanzielle Entwicklungshilfe explizit für Bildung, die Einrichtung einer weltweiten Stiftung nur für Bildung – und mehr Geduld, sowohl von den Geldgebern als auch von den Regierungschefs. Dies gelte insbesondere für Staaten, für die Breitenbildung essenziell nicht nur für das Überleben ihrer eigenen Bevölkerung sein werde. Dazu zählen die Autoren vor allem Äthiopien, Nigeria und Pakistan: „Alle drei Länder werden über die kommenden Jahrzehnte maßgeblich die Zukunft und die Stabilität ganzer Weltregionen prägen.“

Anne-Kathrin Weber



## Wie wir denken

Michael Madeja, Joachim Müller-Jung (Hrsg.), **Hirnforschung – was kann sie wirklich?**  
Erfolge, Möglichkeiten und Grenzen

240 Seiten, Verlag C.H. Beck, München 2016, 19,95 Euro

Wien, Mitte der 1890er-Jahre: Ein passionierter Neurowissenschaftler namens Sigmund Freud ist dem „Seelenleben“ und seinen Erkrankungen auf der Spur. Im Labor des damals führenden Neuroanatomens Ernst von Brücke sucht er nach den Grundlagen des Seelischen. Der Erfolg bleibt jedoch aus: Zu wenig ist seinerzeit über die Bedeutung der unterschiedlichen Hirnareale bekannt, noch weniger darüber, wie im Gehirn Informationen verarbeitet werden. Freud legt seinen *Entwurf einer Psychologie* schließlich zu den Akten. Erst mehr als zehn Jahre nach Freuds Tod wird das unferige Werk im Jahr 1950 veröffentlicht.

Heute liefern bildgebende Verfahren wie die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRI) hochauflösende Bilder der Hirnaktivität. Gelähmte können mittels Elektroden allein durch Gedankenkraft Rollstühle und Roboterarme lenken oder schriftlich mit ihrer Umwelt kommunizieren. Hirnschrittmacher helfen Menschen mit Parkinson oder Zwangsstörungen, Cochlea-Implantate geben Hunderttausenden Patienten ihr Hörvermögen zurück.

Die noch junge Disziplin der Hirnforschung hat zweifelsohne gewaltige Fortschritte gemacht. Entsprechend groß ist die Begeisterung – und die Bereitschaft, Geld zu investieren: Allein für das „Human Brain Project“ werden mehr als eine Milliarde Euro bereitgestellt, um das menschliche Gehirn am Computer zu simulieren. Doch bei aller Euphorie melden sich auch Kritiker zu Wort: Bei drängenden Problemen wie Alzheimer oder Schlaganfall sei die Wissenschaft trotz intensiver Förderung nicht weitergekommen, lautet ein

Vorwurf. Ist der aktuelle „Neuroboom“ daher wirklich gerechtfertigt? Oder wird die Hirnforschung überschätzt?

Diesen Fragen widmet sich das vorliegende Buch, in dem führende Fachleute die Erfolge, Möglichkeiten und Grenzen ihres Fachs ausloten. Unter den Autoren sind auch Angela D. Friederici vom Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften sowie Wolf Singer vom Max-Planck-Institut für Hirnforschung. Die 18 Beiträge beruhen auf einer Veranstaltungsreihe und Artikelserie mit dem Titel *Hirnforschung, was kannst du?*, welche die Gemeinnützige Hertie-Stiftung zusammen mit der FRANKFUTER ALLGEMEINEN ZEITUNG organisiert hat.

Die Themenauswahl gliedert sich in vier Gebiete: Wie funktioniert das Gehirn als zentrales Steuerungsorgan des Menschen? Was kann die Hirnforschung zum Verständnis des eigenen Ich beitragen? Wie wirken sich Störungen der Hirnfunktionen aus? Und wie kann die Hirnforschung bei gesellschaftlichen Problemen helfen? In den „Betrachtungen“ kommen gegen Ende auch noch ein Philosoph, eine Psychoanalytikerin und ein Soziologe zu Wort.

Dabei berücksichtigt das Buch, dass mit den Fortschritten der Hirnforschung auch Ängste verknüpft sind: Wird es irgendwann einmal möglich sein, Gedanken zu lesen? fragt etwa Onur Güntürkün, Biopsychologie-Professor an der Ruhr-Universität Bochum. Was wie Science-Fiction klingt, funktioniert auf einem einfachen Niveau schon heute. So können Forscher unter bestimmten Voraussetzungen grob nachvollziehen, woran jemand gerade

denkt oder für welche von zwei Möglichkeiten er sich gleich entscheiden wird.

Dass wir in einigen Jahren geistig glänzen sein werden, glaubt Güntürkün trotzdem nicht: Die Experimente klappen nur, wenn die Probanden zunächst stundenlang im Versuchslabor ausharren und bestimmte Stimuli betrachten, damit der Scanner die individuellen Aktivierungsmuster kennenzulernen kann. Auch müssen die Testpersonen genau an das Wort oder das Bild denken, das der Computer erfassen soll. Bei komplexen Gedankengängen dürfte das System also schnell an seine Grenzen stoßen und damit auch nicht zur Überführung potenzieller Verbrecher taugen.

Das Buch ist zum größten Teil verständlich geschrieben und ansprechend aufgemacht. Zu Beginn jeden Kapitels stimmt ein ganzseitiges Bild der preisgekrönten Fotografin Barbara Klemm auf das Thema ein. Auf den letzten Seiten werden die Beitragenden vorgestellt, und ein Glossar erklärt die wichtigsten Fachbegriffe. Naturgemäß können die Artikel das Gebiet nicht komplett abdecken, auch bleiben Fragen offen. Dafür setzen sie sich differenziert mit den Möglichkeiten der Hirnforschung auseinander und helfen einzuschätzen, was sie leisten kann – und was nicht.

Elke Maier



## Historischer Wissenschaftskrimi

Gerhard Ertl, Jens Soentgen, **N**, Stickstoff – ein Element schreibt Weltgeschichte

272 Seiten, oekom verlag, München 2015, 24,95 Euro

Stickstoff macht 78 Prozent unserer Luft aus. Wenn wir das Gas jedoch pur einatmen, ersticken wir. Dennoch könnten wir ohne Nitrogenium (N) nicht leben. Denn das Element, das in Böden Mangelware ist, lässt Pflanzen erst wachsen: Ohne Ammoniak, eine Stickstoffverbindung, entwickeln sie sich nur kümmerlich und bekommen gelbe Blätter. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts tobte deshalb ein globaler Machtkampf: Wer würde es zuerst schaffen, das unendliche Stickstoffreservoir der Luft anzuzapfen? Denn Ammoniak diente zusammen mit Salpeter nicht nur als Ausgangsquelle für Dünger, sondern auch für Sprengstoff.

Die Protagonisten dieses Krimis waren zwei sehr unterschiedliche Persönlichkeiten, Fritz Haber und Carl Bosch. In der Badischen Anilin- und Soda-Fabrik (BASF) in Ludwigshafen entwickelten sie eine Technologie, das als Haber-Bosch-Verfahren in die Geschichte eingehen sollte. Der Chemiker Fritz Haber schaffte es zuerst in seinem Labor, Luftstickstoff und Wasserstoff in nutzbares Ammoniak zu überführen. Carl Bosch brachte das Verfahren 1913 aus dem Labor in die Werkhallen der BASF. Trotz internationaler Proteste wegen seiner umstrittenen Rolle während des Ersten Weltkriegs erhielt Fritz Haber 1919 den Nobelpreis für Chemie. Die Nobelstiftung ehrte Carl Bosch 1931 ebenfalls mit der renommierten Auszeichnung.

Die Herausgeber des Buchs, der Chemiker Gerhard Ertl – Wissenschaftler am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft und selbst Nobelpreisträger – und der Philosoph Jens Soentgen, erzählen in kurzen

Kapiteln das Leben dieser unterschiedlichen Persönlichkeiten. Zahlreiche Schwarz-Weiß-Bilder erwecken die Historie zum Leben. Darüber erfahren die Leser viel über ein Element, das einerseits als Kunstdünger große Ernten erst möglich machte, andererseits aber den Ersten Weltkrieg in die Länge zog und so deutlich mehr Todesopfer forderte.

Doch nicht nur in Kriegszeiten entwickelte sich der Traum vom unbegrenzt verfügbaren Stickstoff zum Albtraum. Die Überdosis Stickstoff in der Natur belastet auch heute noch Gewässer und Luft. Gelangt Kunstdünger in Seen, verursacht dies Algenblüten, die Seen können umkippen. Stickoxide, die bei Verbrennungsprozessen zum Beispiel in Autos oder Industrieanlagen entstehen, führen zu Luftverschmutzungen und dadurch zu Gesundheits- und Umweltproblemen.

Insgesamt bringen 21 Autoren ihr Fachwissen in die Stickstoff-Geschichte mit ein, und zwar so, dass diese nicht nur für Experten interessant und verständlich wird. Das Buch beginnt mit einem berühmten Text – mit der Geschichte des Stickstoffs aus Primo Levis *Das periodische System*. Das erste Kapitel widmet sich dann ausführlich dem Zusammenhang zwischen Stickstoff und Leben. Besonders spannend ist hier die biologische Stickstofffixierung von Pflanzen wie Klee, Luzerne und Erle, die in Symbiose mit Bakterien leben. Letztere bringen mithilfe eines Enzymkomplexes, der Nitrogenase, das Kunststück fertig, die äußerst stabile Drei-fachverbindung des Stickstoffs zu knicken und verfügbar zu machen. Dies ist unter

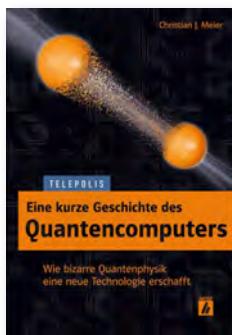
anderem der Grund dafür, warum vor allem auch die Luzerne häufig auf Äckern zur biologischen Düngung zum Einsatz kommt.

Salpeter, mit dem sich das zweite Kapitel befasst, kommt auch in der Natur vor, etwa als Ausblühungen von Höhlenwänden. Die Substanz, die für die Militärgeschichte zentral ist, wurde früher von Salpeterern gewonnen, ein ausgestorbener Beruf. Die Entdeckung großer Lagerstätten an der südamerikanischen Pazifikküste Anfang des 19. Jahrhunderts machte ihr Fachwissen unnötig. Europa und die USA importierten Chilesalpeter.

Nach dem dritten Kapitel, das vor allem das Haber-Bosch-Verfahren erklärt, thematisiert der Abschluss des Buchs die ökologischen Probleme des Düngmittel-einsatzes und entwickelt Lösungsvorschläge. Dabei geht es vor allem um strategisch aufeinander abgestimmte Natur- und Umweltschutzmaßnahmen und veränderte Düngungspraktiken. Zum Schluss folgen ein Hinweis auf die Stickstoffausstellung *Grüner Klee und Dynamit*, die vom Carl Bosch Museum initiiert wurde, sowie viele Versuche, die sich vor allem für den Einsatz in Schulen eignen. Alles in allem also ein sehr abwechslungsreiches Kompendium rund um die widersprüchliche Substanz Stickstoff.

Barbara Abrell

Die Wanderausstellung zum Thema Stickstoff:  
[www.stickstoffausstellung.de](http://www.stickstoffausstellung.de)



## Die Perspektive des Quantenbergsteigers

Christian J. Meier, **Eine kurze Geschichte des Quantencomputers**

Wie bizarre Quantenphysik eine neue Technologie erschafft

188 Seiten, Heise Zeitschriften Verlag, Hannover 2015, 16,90 Euro

Der Vergleich wirkt martialisch und überspitzt – erst einmal: der Quantencomputer als Atomwaffe des Informationszeitalters! Auf den zweiten Blick trifft er jedoch ziemlich gut, und das in doppelter Hinsicht. Christian J. Meier präsentiert den Quantencomputer zu Beginn seines Buchs provokativ als das Instrument, das eine gängige Datenverschlüsselung im E-Mail-Verkehr oder im Onlinebanking mit einer der Atombombe vergleichbaren Zerstörungskraft zunichten machen könnte. Wenn das so kommen sollte, wäre der Quantenrechner auch ein weiteres Beispiel für die ambivalenten Fortschritte von Wissenschaft und Technik – wie die Atombombe, genauer: die Kernenergie, deren militärischer Einsatz schon immer die schreckliche Kehrseite ihrer zumindest anfangs weitgehend begrüßten friedlichen Nutzung darstellte.

Meier, Physiker und Wissenschaftsjournalist, auch für MAXPLANKFORSCHUNG, gelangt jedoch nach seinen Recherchen bei einigen der führenden Wissenschaftler in der Quanteninformationstechnologie zu dem Schluss, dass die heute bekannten Anwendungen des Quantencomputers dessen Risiken aufwiegen.

Ehe er dieses Fazit zieht, stellt Meier eingehend dar, nach welchem Prinzip ein Quantenrechner funktionieren soll, warum er einige Aufgaben grundsätzlich viel schneller lösen könnte als jeder klassische Computer, welche Ideen Physiker verfolgen, um einen solchen Rechner zu konstruieren, und welche Hürden noch bestehen. Meier geht aber auch auf andere Techniken, etwa die Quantenkryptografie, ein,

die teils schon heute ebenfalls auf quantenphysikalische Gesetze und Effekte setzen.

Vor diesem Hintergrund präsentiert der Physiker die Eigenheiten der Quantenwelt, denen die Quantentechniken ihre Vorteile verdanken, die sich mit unseren Alltagserfahrungen aber kaum vertragen. Krassester Beleg dafür sind vielleicht Teilchen, die kilometerweit voneinander entfernt sein können und sich trotzdem verhalten wie ein einziges Teilchen, also irgendwie voneinander wissen.

Meier schreibt anschaulich und ohne Fachjargon. Um etwa die Stärke eines Algorithmus, der für den Quantenrechner entwickelt wurde, zu veranschaulichen, führt er Quantenbergsteiger ins Gebirge und lässt sie dort die Topografie vermessen. In vielen Fällen helfen einfache Illustrationen, die Effekte zu veranschaulichen. Dennoch lassen sich die Quanten-Absonderlichkeiten nicht immer mühelos verstehen; manche kann man vielleicht auch nur akzeptieren. Für die ein oder andere Passage bietet Meier daher alternative Routen an, damit die Leser sich nicht durch Zusammenhänge wühlen müssen, die vielleicht nur derjenige wirklich begreift, der die Originalpublikationen lesen kann.

Dennoch gibt Meier einen umfassenden und kurzweiligen Überblick, wo die Entwicklung des Quantencomputers und verwandter Techniken steht, was wir uns von ihnen erhoffen können und in welcher Hinsicht wir vor allem den Quantencomputer nicht mit zu viel Euphorie erwarten sollten. Und das fängt damit an, dass noch nicht ausgemacht ist, ob es ihn überhaupt einmal geben wird.

Peter Hergersberg

Der Ernst Haage-Preis zeichnet seit 2006 junge WissenschaftlerInnen für herausragende Leistungen auf dem Gebiet der chemischen Energiekonversion aus und fördert insbesondere den wissenschaftlichen Nachwuchs. Die Auszeichnung wird von der Mülheimer Ernst Haage-Stiftung verliehen und ist mit einem Preisgeld von € 7.500,- dotiert.

Nominiert werden können promovierte WissenschaftlerInnen einer deutschen Forschungseinrichtung. Sie sollten ihren Lebensmittelpunkt in Deutschland haben, in der Regel nicht älter als 40 Jahre alt sein und noch nicht in einem unbefristeten Anstellungsverhältnis stehen.

Nominierungen können ab sofort bis zum **15. September 2016** schriftlich beim Stiftungskuratorium eingereicht werden. Folgende Unterlagen sollten Teil der Kandidatenvorschläge sein:

- zweiseitige Laudatio
- tabellarischer Lebenslauf
- vollständige Publikationsliste
- bis zu drei Sonderdrucke von Arbeiten der nominierten Person.

Eigenbewerbungen können nicht berücksichtigt werden.

Mit dem Preis sollen exzellente grundlegende wissenschaftliche Leistungen auf dem Gebiet der chemischen Energiekonversion ausgezeichnet werden, z.B. in den Bereichen:

- Wasserstoff als Energieträger/-speicher
- Photovoltaik-Speicherlösungen
- Elektrochemische Speicher
- Biomasse – Bioenergie
- CO<sub>2</sub> Umwandlung
- Wasserstoffoxidation bzw. Elektrolyse
- Stickstoffreduzierung
- Artifizielle und natürliche Photosynthese
- Entwicklung neuer experimenteller und theoretischer Methoden, die in der Energieforschung neue Anwendungsfelder ermöglichen.

## ERNST HAAGE-PREIS AUSSCHREIBUNG 2016

Direktorium des  
Max-Planck-Institutes  
für Chemische Energiekonversion  
z.Hd. Frau Christin Ernst  
Stiftstr. 34-36  
D-45470 Mülheim an der Ruhr  
Stichwort: Ernst Haage-Preis



Weitere Informationen zum Ernst Haage-Preis, zur Stiftung und Preisverleihung stehen unter <http://www.eec.mpg.de> zur Verfügung.

Prof. Dr. Robert Schlögl  
Prof. Dr. Wolfgang Lubitz  
Prof. Dr. Frank Neese



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR  
CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION



FORSCHUNGSPREIS  
„CHEMISCHE ENERGIEKONVERSION“



## Viel Lärm um nichts

Klaus Liebers, **Das Wunder Vakuum**, Experimente, die Geschichte schrieben

176 Seiten, epubli, Berlin 2016, 12,90 Euro

An jenem Tag anno 1647 hatte sich in Rouen eine ansehnliche Menschenmenge versammelt. Gespannt blickte man auf die Versuchsanordnung, für die der Experimentator Blaise Pascal weder Kosten noch Mühen gescheut hatte. In einer der besten Glasmanufakturen hatte er eine zwölf Meter lange Glasröhre anfertigen und an einem noch längeren Schiffsmast befestigen lassen. Die Röhre war mit Wasser gefüllt und am oberen Ende verschlossen. Der untere Teil stand in einem Wasserbottich und mündete in einen Hahn. Ziel des eindrucksvollen Aufbaus war kein geringeres, als ein jahrtausendealtes Dogma zu widerlegen.

Schon in der Antike hatten sich Menschen die Frage gestellt, ob es in der Natur ein Vakuum geben kann. Aristoteles hielt das physikalisch für undenkbar: Die Natur habe eine Scheu vor der Leere – *horror vacui* –, lehrte er. Seine Anhänger, darunter einflussreiche Wissenschaftler und Kirchenmänner wie Gasparo Berti, Athanasius Kircher oder Niccolò Zucchi hielten noch im 17. Jahrhundert daran fest. Forscher wie Galileo Galilei, Evangelista Torricelli oder Blaise Pascal gaben sich hingegen nicht damit zufrieden, die alte Lehre ungeprüft zu übernehmen.

In Rouen hielten die Schaulustigen den Atem an: Was würde geschehen, wenn Blaise Pascal den Verschluss öffnete? Würde das Wasser auslaufen? Pascal drehte den Hahn auf. Das Wasser floss heraus – aber nicht alles: Von einer unsichtbaren Kraft gehalten, blieb eine knapp neuneinhalb Meter hohe Wassersäule stehen. Darauf war leerer Raum, der sich sofort mit Wasser füllte, sobald man die Röhre neigte. Pascal war hochzufrieden, hatte er doch gezeigt, dass es sehr wohl ein Vakuum gab!

Die Anhänger des Aristoteles waren dagegen nicht so leicht zu überzeugen. Trotz immer neuer Hinweise hielten sie hartnäckig am *horror vacui* fest und hatten selbst die abwegigsten Theorien parat: René Descartes etwa sprach von winzig kleinen „abgeschabten Teilchen“, die alle Zwischenräume ausfüllen. Und überhaupt könne es keine Leere geben, „denn ein leerer Raum sei unnütz und man wäre dann gezwungen, an nutzlose Werke Gottes in der Natur zu glauben“.

Den leidenschaftlich ausgefochtenen Streit um das Nichts schildert der Autor Klaus Liebers mit viel Freude am Erzählen. Liebers ist emeritierter Professor für Di-

daktik der Physik, sein besonderes Interesse gilt der Geschichte der Naturwissenschaften. In seinem neuen Buch lässt er die Leser anhand von anschaulichen Beschreibungen und lebendigen Dialogen an den Versuchen und Disputen der Forscher teilhaben. Der Text ist mit historischen Stichen bebildert, am Ende finden sich einige Literaturhinweise zum Weiterlesen sowie eine Zeittafel. Ein Personenverzeichnis mit den Lebensdaten der Wissenschaftler wäre eine gute Ergänzung.

Das wohl spektakulärste Experiment zum Thema Vakuum fand übrigens erstmals im Jahr 1654 statt: Damals ließ der Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke auf dem Reichstag zu Regensburg 16 Pferde anspannen. Sie sollten versuchen, zwei luftleer gepumpte Halbkulgen aus Messing auseinanderzureißen. Von Guericke, bekannt auch als der „deutsche Galilei“, taucht im vorliegenden Buch allerdings nirgends auf. Dafür hat ihm Klaus Liebers ein eigenes Buch gewidmet.

Elke Maier

## Weitere Empfehlungen

- Clive Gamble, John Gowlett, Robin Dunbar, **Evolution, Denken, Kultur**, Das soziale Gehirn und die Entstehung des Menschlichen, 376 Seiten, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg 2016, 24,99 Euro
- Matt Parker, **Auch Zahlen haben Gefühle**, 496 Seiten, Verlag Rowohlt, Reinbek 2015, 24,95 Euro
- Metin Tolan, **Die Star Trek Physik**, Warum die Enterprise nur 158 Kilo wiegt und andere galaktische Erkenntnisse, 352 Seiten, Piper Verlag, München/Berlin 2016, 20 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](http://www.mpg.de/mpforschung)  
Kostenlose App: [www.mpg.de/mpf-mobil](http://www.mpg.de/mpf-mobil)

### Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

### Redaktionsleitung

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

### Redaktion

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

### Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

### Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Ostertag  
Voßstraße 9  
81543 München  
Telefon: 089 27818770  
E-Mail: [projekte@designergold.de](mailto: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](mailto: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 22200 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 6000 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2016 umfasst insgesamt 1,6 Milliarden Euro. Die **Max-Planck-Institute** betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.

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



