

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

NOBEL-  
PREISE  
2010



DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

COMPUTERLINGUISTIK

Wikipedia als Wissensbasis  
für künstliche Intelligenz

ASTRONOMIE

Schattenrisse schwerer  
Schwarzer Löcher

KONFLIKTFORSCHUNG

Wenn Roboter  
Krieg führen

## Als der Mensch fast ausstarb

Das Überleben der  
Menschheit hing einst  
am seidenen Faden –  
an Afrikas Südküste



7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.  
D6179E



www.spektrum.de

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

12/10

DEZEMBER 2010





Reinhard Breuer  
Chefredakteur



## Warum wollen wir Tiere schützen?

**Unser Umgang mit Tieren ist prekär.** Das soll nicht heißen, dass die Menschheit keine Fortschritte im Umgang mit ihnen gemacht hätte. Seit 1990 sind Tiere bei uns immerhin keine Sache mehr (Tierquälerei galt bis dahin als Sachbeschädigung, heute kann sie eine Straftat sein), die EU erkennt Tiere seit 1997 als fühlende Wesen an, und im Jahr 2002 wurde der Tierschutz sogar ins deutsche Grundgesetz aufgenommen (im Artikel 20a).

Aber warum wollen wir Tiere überhaupt schützen? Dies fragte im letzten Jahr der Schweizer Ethologe Hanno Würbel von der Universität Gießen auf einer Tagung zur »Animal Welfare Science«. Seine Antwort hat mich sehr überrascht: Es gebe für uns gar keinen biologischen Grund, Mitleid mit Tieren zu haben. Was dann? Offenbar liege sozusagen eine Verwechslung vor. Unsere Fähigkeit zur Einfühlung in andere Menschen brächte als Nebenprodukt eben auch Mitleid mit Tieren hervor. Außerdem sei unsere Sicht verzerrt. Haustiere wie Hunde oder Katzen würden in ihrem Schutzbedürfnis überschätzt, während bei Nutztieren – Schafen, Schweinen oder Rindern – unser Mitgefühl doch deutlich geringer ausfalle.

Die Folgen sind evident. Wer unsere Massentierhaltung mit all ihren Begleiterscheinungen etwa bei quälenden Transporten oder anderen offensichtlichen Grausamkeiten etwas genauer betrachtet, dem drängt sich nicht gerade der Eindruck auf, dass wir diesbezüglich bereits in der besten aller möglichen Welten leben. Kaum besser steht es mit unserem Umgang mit Versuchstieren: Sie sind für Experimente zur Medikamenten-

sicherheit zwar noch unerlässlich (wenngleich es zunehmend Ersatzmethoden gibt). Doch wie beim Fleischverzehr will man vielleicht nicht immer so ganz genau wissen, was hinter den Mauern von Forschungslabors, Großställen oder Schlachthäusern stattfindet.

**Aber womöglich hat diese Verdrängung ihren Preis,** vielleicht spüren wir Fleischesser ja alle ein gewisses Unbehagen. Wie sonst ließe sich verstehen, dass soeben das Sachbuch des amerikanischen Autors Jonathan Safran Foer »Tiere essen« weltweit zum Bestseller wurde? Dabei stellt der gerade 33-jährige nur schlichte Fragen: Woher kommt unser Fleisch? Wie wird es produziert? Welche Folgen hat unser Fleischkonsum für Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt? Kann Fleischverzicht auch falsch sein? – Themen also, die jeder einmal für sich geklärt haben sollte.

Gerade weil Foer niemanden zum Vegetarierturn bekehren will (auch wenn er selbst inzwischen einer ist), scheint er viele anzusprechen. Sein Buch könnte so mehr bewirken als manch absurde Aktion wohlmeinender Tierschützer. Doch neben der Betroffenheit lässt sich die Frage nach Schutz und Rechten für Tiere auch wissenschaftlich angehen. Der Essay des Berliner Tierethikers Jörg Luy bilanziert folglich nicht nur den Stand der Tierrechte, sondern zeigt zugleich, wie sich mit diesem oft emotional aufgeladenen Thema methodisch umgehen lässt (S. 80).

**Jörg Luy, Autor unseres Essays auf S. 80 über Tierrechte, leitet an der Freien Universität Berlin das Institut für Tierschutz und Tierverhalten.**

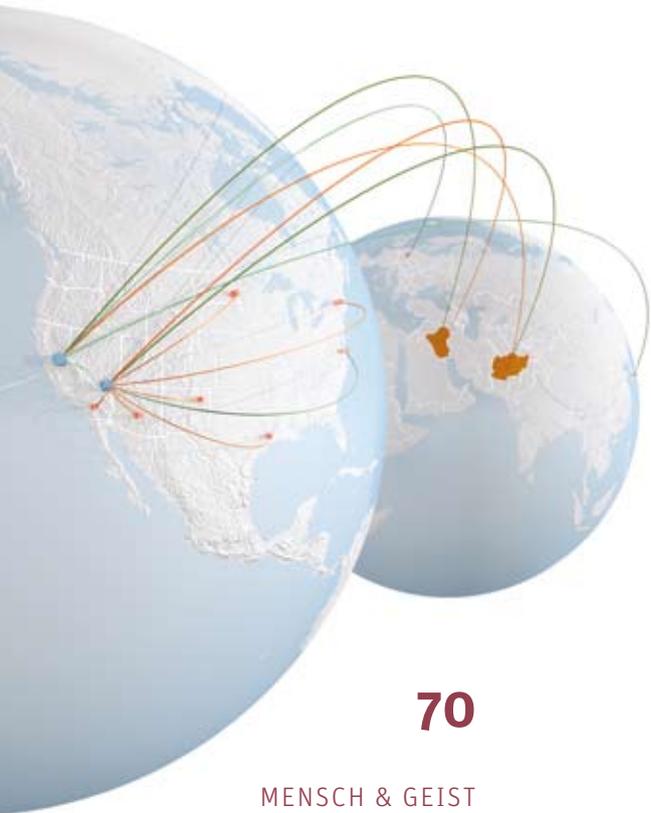


MIT FRODL. GEN. VON JÖRG LUY

Herzlich Ihr

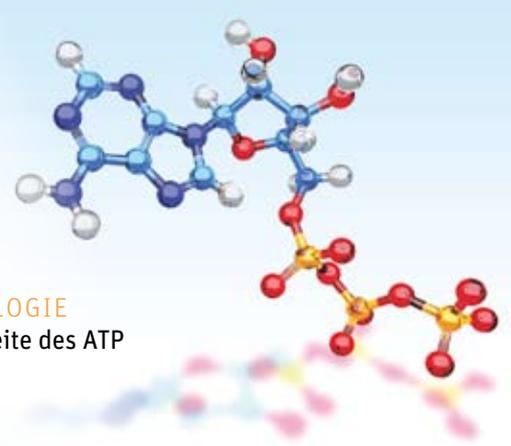
*Reinhard Breuer*

# INHALT



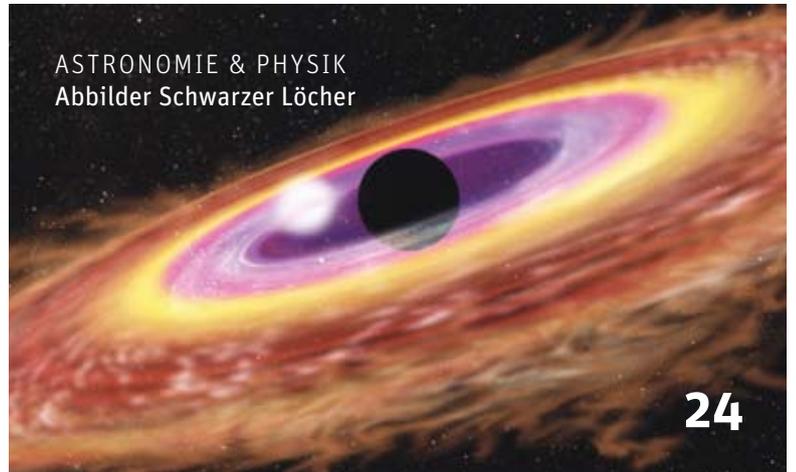
70

MENSCH & GEIST  
Ferngesteuerte Kriege?



40

MEDIZIN & BIOLOGIE  
Die unbekannte Seite des ATP



ASTRONOMIE & PHYSIK  
Abbilder Schwarzer Löcher

24

## AKTUELL

### 8 Spektrogramm

Gedanken stärker als Sinneseindrücke · Galaxie mit Rekordalter · Nervenregeneration mit Natrium · Elektronen tanzen aus der Reihe · Fliegende Fische im Windkanal · Zarte Roboterhand · Temperatur taktet Körperrhythmen

### 11 Bild des Monats

Verschaltung des Katzenhirns

### 14 Nobelpreis für Medizin

Babyboom aus der Retorte

### 16 Nobelpreis für Physik

Mit Tesafilm zum molekularen Maschendraht

### 18 Nobelpreis für Chemie

Verknüpfung von Kohlenstoffatomen mittels Palladium

### 21 Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften

Sand im Getriebe des Arbeitsmarkts

### 22 Springers Einwüfe

Folgt Politik Gesetzen?

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### 24 ► Schwarze Löcher im Schattenriss

Mit einem Netzwerk von Radioteleskopen wollen Astronomen supermassereiche Schwarze Löcher im Herzen von Galaxien abbilden

SCHLICHTING!

### 32 Tunken für Fortgeschrittene

Sind physikalisch Vorgebildete beim Umgang mit getunkten Keksen im Vorteil?

INTERVIEW

### 34 Der Welterklärer

Steven Weinberg von der University of Texas in Austin gehört zu jenen, denen die Vereinheitlichung der Physik gelingen könnte

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### 40 Energiemolekül mit Doppelleben

Adenosinriphosphat (ATP) dient Zellen als universeller Energieträger – das lernt man schon in der Schule. Weniger bekannt dagegen ist bislang die Funktion des Moleküls als wichtigem Botenstoff in fast allen Geweben. Sie erschließt innovative Behandlungsansätze für verschiedenste Erkrankungen

Titelmotiv: Jean-François Podgevin

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)



TITEL

# Als die Menschen fast ausstarben

58



80

## MENSCH & GEIST Zur Lage der Tierrechte



86

## ERDE & UMWELT Heiße Zeiten für arktische Pflanzen

### MENSCH & GEIST

► **TITEL**

**58 Wo überlebte *Homo sapiens* in seiner Frühzeit?**  
Nur wenige moderne Menschen überstanden anfangs eine lange harte Klimaphase Afrikas – wozu am Meer der Südküste

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

**66 Goldene Rauten und der sechsdimensionale Raum**  
Sándor Kabais Geometrien folgen dem Bauprinzip von Quasikristallen

**70 ► Ferngesteuerte Kriege?**  
Auf und über dem Schlachtfeld sorgen Roboter für ungeahnte Entwicklungen und stellen uns vor dramatische ethische Probleme

ESSAY

**80 Welche Rechte haben Tiere?**   
Der Tierethiker Jörg Luy gibt fünf Antworten auf die Frage, inwieweit das Recht Tiere schützt

### ERDE & UMWELT

**86 Klimawandel erfasst arktische Flora**   
Die globale Erwärmung lässt nicht nur das Polareis schmelzen, sondern beeinflusst auch die Vegetation der hohen Breiten: Die baumlose Tundra ergrünt, und Teile der borealen Wälder werden durch Austrocknung braun.

### WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Warum wollen wir Tiere schützen?
- 6 Leserbrief/Impressum
- 103 Frag den Experten
- 48 Im Rückblick
- 113 Onlineangebote
- 114 Vorschau

### TECHNIK & COMPUTER

**94 ► Wikipedia: Quelle der künstlichen Intelligenz**  
Computerlinguisten destillieren aus der Online-Enzyklopädie einen maschineneigneten Korpus des Allgemeinwissens

- 104 Rezensionen:
- Stefan Seip et al. (Hg.) *Zauber der Sterne*
  - Richard Jones *Rekorde der Insektenwelt*
  - Arto Juvonen et al. *Vogelwild*
  - Jörg Hüfner, Rudolf Löhken *Physik ohne Ende*
  - Jörg Blech *Gene sind kein Schicksal*
  - Tobias Niemann *Kamasutra kopfüber*
  - Markus Bennemann *Die Evolution im Liebesrausch*

## Gepard, nicht Löwe

Die zwei Gesichter der Zeit, Juli 2010

Der Ausschnitt aus dem ägyptischen Totenbuch auf S. 65 zeigt zwei Geparde und nicht zwei Löwen, wie in der Bildunterschrift vermittelt wird. Das weiß-schwarz gestreifte Ende des Schwanzes, die schwarzen Flecken, die langen Beine kennzeichnen eindeutig Geparde. Die Mähne kennen wir alle natürlich vom Löwenmännchen, aber auch junge Geparde tragen in den ersten Wochen eine auffällige Mähne. So wird die Sonne auf dem Bild nicht von zwei Löwen, sondern von zwei Geparden flankiert.

Berthold Rupprecht, Tecklenburg

## Jahreszeit und Sonnenuhren

Vom Werden der Zukunft  
September 2010

Der Artikel behauptet, dass die Stundendauer bei Sonnenuhren im Lauf der Jahreszeiten variiert. Das trifft aber nur auf den Sonderfall der kanonischen Sonnenuhren zu, die auch speziell für diesen Zweck gebaut wurden. Sonnenuhren, deren Schattenstab parallel zur Erdachse ausgerichtet ist (und dieses Wissen war schon seit der Antike bekannt) lassen eine sehr genaue Zeitangabe zu und sind von den Jahreszeiten unabhängig.

Raimund Zopp, Son Macià, Mallorca

## Antwort des Autors Prof. Dr. Thomas Maissen, Universität Heidelberg

Der Leser hat Recht mit dem Hinweis auf die Technologie. Der Polstab, den er

meint, wurde aber erst im späten Mittelalter gebräuchlich oder ist jedenfalls erst dann belegt, wie es scheint; antike Vorläufer kann es gegeben haben, aber die entsprechende Stelle bei Herodot scheint unklar. Wie auch immer, das Entscheidende ist der Übergang von den mittelalterlichen Temporalstunden, wie sie in den Klöstern galten, zu den Äquinoktialstunden, die erst im späten Mittelalter auftauchten, dank Sonnenuhr mit Polstab oder Uhr mit mechanischem Räderwerk.

## Die Zeit existiert – oder auch nicht

Ist Zeit eine Illusion?  
Oktober 2010

### Ausdehnung des Universums

Interessanter Artikel, allerdings ist das Argument, unsere Zeiteinteilung (Umlaufbahn Erde/Mond, Erdrotation) sei willkürlich, trivial und kein Argument für die Nichtexistenz von Zeit per se. Vielleicht bin ich als Mikrobiologe naiv, für mich resultiert Zeit einfach aus der Ausdehnung des Universums oder umgekehrt. Vom anderen Ende des Ereignishorizonts aus gesehen (etwa 4 Gigaparsec entfernt) entfernen wir uns mit Lichtgeschwindigkeit wohl in die vierte Dimension der Raumzeit, die Zeit? Damit wäre Zeit vektoriell und es gibt Vergangenheit (da waren wir eben noch) und Zukunft (da »dehnen« wir hin). Nimmt man Masse als Widerstand einiger Energieformen gegen diese Ausdehnung an, resultieren Gravitation und



die Verkrümmung der Raumzeit an Orten hoher Massedichten. Kontinuierliche Raumdilataion führt zur Entropie. Im Quantenbereich sind die Ereignisse so kurzlebig, dass es zeitliche Unschärfen nach Heisenberg gibt. Alles ganz einfach. Hoffentlich bin ich jetzt kein »Welträtsellöser«!

Prof. Dr. Dietrich H. Nies, Brachwitz

## Ja, Zeit ist eine Illusion

Ist die Zeit eine Illusion? – Ja und Nein! Der große Königsberger Philosoph Immanuel Kant hatte sich schon 1781 im Zusammenhang mit seiner »Kritik der reinen Vernunft« (Die Transzendente Ästhetik, 2. Abschnitt. Von der Zeit) zwangsläufig mit diesem Thema befasst.

Das Ergebnis in Kurzfassung: Ja. Zeit existiert als konstitutives Element »Anschauungsform« (ebenso wie Raum) menschlichen Erkennens und nur für dieses! Alles was wir erkennen beziehungsweise wie wir es erkennen, »das

## Spektrum DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur** (v.i.S.d.P.): Dr. habil. Reinhard Breuer, Dr. Carsten Könniker  
**Stellvertretende Chefredakteure**: Dr. Hartwig Hanser (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser  
**Redaktion**: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com  
**Ständiger Mitarbeiter**: Dr. Michael Springer  
**Schlussredaktion**: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion**: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Art Direction**: Karsten Kramarczik  
**Layout**: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Redaktionsassistent**: Britta Feuerstein, Petra Mers  
**Redaktionsanschrift**: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729  
**Verlag**: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg  
 Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114  
**Verlagsleiter**: Richard Zinken  
**Geschäftsleitung**: Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung**: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733  
**Marketing**: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com  
**Einzelverkauf**: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744  
**Übersetzer**: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Thomas Brückner, Dr. Markus Fischer, Doris Gerstner, Christian Hammer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

**Leser- und Bestellservice**: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com  
**Vertrieb und Abonnementverwaltung**: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise**: Einzelheft € 7,90 (D/A)/ € 8,50 (L/S)fr. 14,00; im Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomerkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.  
**Anzeigen**: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenvertretung**: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Ursula Haslauer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de  
**Druckunterlagen an**: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenpreise**: Gültig ist die Preisliste Nr. 31 vom 01. 01. 2010.  
**Gesamtherstellung**: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2010 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917  
 Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.



Ding in der Erscheinung«, erscheint uns zeitlich (und räumlich) geordnet.

Nein: Zeit existiert nicht, denn das »Ding an sich«, alles was dahinter steht, also frei ist von den konstitutiven Bedingungen unseres Erkennens, ist davon frei!

Hans Pröpper, Korschenbroich

### Die Physik des Subjekts

Die Quantenmechanik selbst weist auf die zentrale Rolle des Beobachters hin: Zeit als wenig greifbares Substrat, das sich der Objektbeschreibung entzieht, sei es die Wheeler-DeWitt-Gleichung oder Hawkings Universum als Summe aller seiner Geschichten.

Andrei Linde hat in »Elementarteilchenphysik und inflationäre Kosmologie« sehr anschaulich das Phänomen Beobachtung beschrieben – nämlich als Zerfall des Universums in den Beobachter und das beobachtete »quasiklassische« Restuniversum. Für Letzteres finden wir in der Quantenmechanik eine hervorragende Beschreibung. Für Ersteres, das beobachtende Subjekt, fehlt uns bislang jeder Ansatz einer Theorie.

Zeit kann nur als Phänomen der Wechselwirkung zwischen Subjekt und Objekt verstanden werden, Veränderung nur in Bezug auf etwas geschehen. Um eine Analogie aus der objektorientierten Programmierung zu bemühen: Die Klasse, das Objekt, ist zeitlos und unveränderlich, erst die Instanz »erfährt« Veränderung und Zeit. Der Vorgang der Instanziierung eines Programmobjekts kann *cum grano salis* als Selbstbeobachtung des Programms verstanden werden. Im Fokus der Selbstbeobachtung fließt Zeit, geschieht Veränderung. Eine vollständige Theorie des Universums muss also eine Theorie des Beobachters mit einschließen. Eine Physik des Subjekts.

Dr. Michael Klement,  
St. Johann im Pongau, Österreich

### Zwei Bedeutungen von Zeitlosigkeit

Die Entfernung der (physikalischen) Zeit aus einer zu erstellenden fundamentalen Theorie der Natur geschieht in zwei Schritten, die oft nicht auseinandergehalten werden: Zuerst beseitigt man die absolute Zeit (Newtons) als eine externe Parameterzeit, denn diese wird von der allgemeinen Relativitätstheorie nicht mehr zugelassen. Man kommt zu einer relationalen Zeit als »Zahl der Bewegung(en)« (Aristoteles), die jedoch sofort von der



Quantenmechanik zurückgeführt wird auf Korrelationen von statischen (bewegungslosen) Zuständen. »Zeitlos« hat also in diesem Zusammenhang zwei Bedeutungen: »Ohne absolute Zeit« oder »ohne relationale Zeit« (Callender vermischt diese Bedeutungsunterschiede meines Erachtens ein wenig). Wie freilich aus einem »absolut« statischen Zustand (analytisch, nicht durch eine Annäherung beschrieben) eine Veränderung emergieren soll, bleibt rätselhaft; auch für Callender.

Peter Eisenhardt, Frankfurt am Main

### Veränderung ist der grundlegende Begriff

»Ohne Zeit stünde die Welt still«, so beschreibt Prof. Callender das Zeitverständnis der meisten Zeitgenossen. »Wenn die Welt stillsteht, dann auch die Zeit« ist aber vielleicht ein besserer Ansatz zu einem intuitiven Verständnis der Zeit.

Wären wir in der Lage, in einem von seiner Umwelt isolierten Raumgebiet die Veränderung oder Fortentwicklung von Materie und Feldern »einzufrieren«, liefe dort dann weiterhin Zeit ab? Wenn keine Wechselwirkungen mehr stattfinden, wenn selbst eine Atomuhr aufhört zu »ticken«, wenn jeder Veränderungsprozess, der zum Messen von Zeit herangezogen werden könnte, eingefroren ist, läuft dann noch Zeit ab? Ich denke, nein.

Meiner Meinung nach ist Zeit lediglich ein Weg zum Messen und Vergleichen der durch die Grundkräfte der Physik getriebenen Fortentwicklung von Materie und Feldern. Jede Uhr beruht auf dem Mitzählen einer regelmäßigen Veränderung und dient damit als Maß-

stab für alle anderen in uns und um uns ablaufenden Veränderungen. Würde die Welt, und mit ihr unsere Uhren, »langsamer ticken«, wir hätten keine Möglichkeit dies zu bemerken.

Tatsächlich passt diese Sicht der Zeit hervorragend zur speziellen Relativitätstheorie, in der die Veränderungsgeschwindigkeit vom Beobachter abhängt. Und die unterschiedlichen Veränderungsgeschwindigkeiten implizieren unterschiedliche, beobachterabhängige Zeitmessungen.

Harald Kirsch, Düsseldorf

## Sexuelle Selektion beim Menschen – ein Tabu?

Warum Menschen nackt sind  
Oktober 2010

Die Bedeutung der Nacktheit als Seh- und Berührungsreiz für die Sexualität ist eigentlich unübersehbar. Bei heutigen Evolutionsbiologen ist im Gegensatz zu Charles Darwin anscheinend sexuelle Evolution beim Menschen ein Tabuthema, auch der Artikel erörtert sie nur verschämt als Nebeneinfluss. Das führt zu teilweise unsinnigen Spekulationen, etwa der, dass die Behaarung von Achsel und Scham vor Bewegungsreibung schützt. Es ist doch offensichtlich, dass Auftreten und langsame Zunahme der Schambehaarung in der Pubertät die Geschlechtsreife signalisiert. Im Übrigen spricht Geschlechtsverschiedenheit eines Merkmals für sexuelle Selektion – in diesem Fall wie überhaupt bei der Körperbehaarung.

Prof. Dr. Dieter Böning, Berlin

## Aufrechter Gang

Warum Menschen nackt sind  
Oktober 2010

Wir erfahren von N.G. Jablonski nichts darüber, warum unsere Vorfahren zum aufrechten Gang mit langen Gliedmaßen übergangen. Die Umstellung von der vierbeinigen zur zweibeinigen Fortbewegung hat sehr umfangreiche anatomische Veränderungen erfordert: an den Fußgelenken, den Knie- und Hüftgelenken, am Becken, an der Wirbelsäule und auch am Schädel. Das hat sehr lange gedauert, und in dieser Phase konnten sich Primaten nur langsam und sehr schwerfällig fortbewegen. Sie konnten kein Großwild in der Savanne jagen. Jeder vierbeinig laufende Konkurrent war ihnen haushoch überlegen. Sie waren eine leichte Beute. Der aufrechte Gang machte sie weithin sichtbar.

Klaus Herrmann, Hürth

## Augenbewegungen des Träumers

Folgt das Auge dem Traumgeschehen?, Forschung aktuell  
November 2010

Dieser Artikel schildert die Hypothese, dass unsere Augen tatsächlich entsprechende Bewegungen vollführen, wenn wir im Traum unseren Blick schweifen lassen. Als Grundlage wurden Untersuchungen an Personen mit Schlafstörung durchgeführt, die ihre Träume körperlich ausleben. So wie es im Artikel geschildert wird, mussten die Wissenschaftler erraten, was der Betreffende gerade träumt, und überprüfen, ob die Augenposition mit der Handlung übereinstimmen könnte.

David Tomzik, Aachen

## Elektrotaxis in China

Heilmittel gegen den Individualverkehr, November 2010

Der Wirkungsgrad von Batterien, Lade- und Entladevorgang sowie der von Invertern – Wandlern zwischen Gleich- und Wechselstrom – darf auch nicht vernachlässigt werden. Ebenso wenig wie die Stromtransportverluste durch Leitungen.

Batteriegespeiste Elektrofahrzeuge machen eigentlich nur dann Sinn, wenn der Ladestrom hauptsächlich aus Solar-energie und aus Windenergie stammt und nachts bei Stromüberangebot aus Nuklearkraftwerken (was vielen Deutschen ja nicht passt).

Interessanterweise laufen gerade in China Pilotversuche mit hunderten Elektrotaxis und außerdem ein Initialprogramm mit 10 000 Ladestationen für Elektrofahrzeuge in Shenzhen, die übrigens vornehmlich über Solaranlagen vor Ort und Windanlagen in der Umgebung gespeist werden sollen. Vorreiter ist BYD, ein chinesischer Autohersteller und zugleich einer der größten Akkuersteller der Welt.

Ralf Metzner, Schanghai

## Doppler- oder Expansionseffekt?

Verliert das Universum Energie?  
November 2010

Richtig ist, dass der Betrag der kosmologischen Rotverschiebung ( $z$ ), einmal gedeutet unter Zugrundelegung des Dopplereffektes (Bewegung im statischen Raum), das andere Mal gedeutet unter Zugrundelegung der Expansion des Universums, sich für kleine Werte der Rotverschiebung numerisch nur unwesentlich unterscheidet. Für größere Werte von  $z$  gilt das nicht mehr. Für welche der beiden Vorgehensweisen man sich entscheiden sollte, dazu erfährt man mehr im Leserbrief von Wolfgang Illig unter [www.spektrum.de/artikel/1052915](http://www.spektrum.de/artikel/1052915).

Was mich noch gestört hat, war die Grafik auf S. 29: »Galaktische Rotverschiebung als Dopplereffekt«. Die Darstellung des Sachverhalts in einem Raumzeitdiagramm, mit der Trajektorie der Galaxie, die das Licht zu uns zurückgeschickt hat, mit der Trajektorie des Beobachters und der des Photons (Rückblicklichtkegel) ist wirklich die hierfür passende Darstellung.

Man muss sich allerdings entscheiden, aus welcher Perspektive man die Verhältnisse zeigt. Nicht nur aus didaktischen Gründen ist es empfohlen, dazu die Perspektive des Beobachters einzunehmen. Dann aber ist die Zeitachse des Raumzeitdiagramms identisch mit der Trajektorie des Beobachters, steht senkrecht auf der »Raumbene«. Und die Ge-

schwindigkeit des Beobachters in der Raumzeit ist dann gleich null!

Mit Verlaub, ich werde mich nicht wieder mit dem Dopplereffekt als Erklärungsmodell für die kosmologische Rotverschiebung anfreunden, auch nicht mit der im Artikel sich darauf gründenden Erklärung dafür, dass im expandierenden Universum keine Energie verloren geht.

Peter Wüst, Überlingen

## Korrigenda

Aufstieg und Fall der Nanobakterien  
Oktober 2010

Auf S. 50 in der vorletzten und letzten Zeile unten rechts wurde der Eindruck erweckt, es handele sich bei Apatit um Kalziumkarbonat. In Wirklichkeit handelt es sich dabei um Kalziumphosphat.

Im Kasten auf S. 50 wird suggeriert, dass Ketten von Hydroxylapatitkugeln mit 10 Nanometer Durchmesser, also nichtkristallines Material, zum Aufbau von Wirbeltierknochen beitragen. Tatsächlich baut sich Knochensubstanz auf durch struktororientierte Einlagerung von Hydroxylapatit-Nanokristallplättchen von etwa 30 mal 50 mal 2 Nanometer in Mikrofibrillen aus Kollagen-I-Tripelhelices.

Ein Mond mit dem Zeug zum Planeten, Oktober 2010

Leser haben uns auf einen Fehler in der Bildunterschrift auf S. 23 hingewiesen: Die Computergrafik, auf welcher die dunstverhüllte Sonne zu sehen ist, zeigt natürlich keine nächtliche Szene.

## Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe) oder direkt beim Artikel: Klicken Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) auf das aktuelle Heft oder auf »Magazin«, »Magazinarchiv«, das Heft und dann auf den Artikel.

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft

Sigrid Spies

Redaktion Leserbriefe

Postfach 104840

69038 Heidelberg

E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

Die vollständigen Leserbriefe finden Sie unter:

[www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)



## HIRNFORSCHUNG

### Gedanken stärker als Sinneseindrücke

■ Es ist schon länger möglich, einen Cursor auf dem Computerbildschirm durch die Kraft der Gedanken zu lenken; dazu werden die Gehirnströme gemessen und in Steuerbefehle umgesetzt. Forscher um Christof Koch vom California Institute of Technology in Pasadena fanden nun heraus, dass Menschen sogar die Aktivität einzelner Neuronen gezielt beeinflussen können, und

das in einer Gehirnregion, von der man bisher annahm, sie sei der bewussten Kontrolle entzogen: dem medialen Temporalappen, der als Sitz des Gedächtnisses gilt.

Die Hirnforscher präsentierten Versuchspersonen Bilder, um festzustellen, welche Gehirnzellen wann feuerten. Dabei identifizierten sie schließlich vier einzelne Neuronen, die bei je einem von vier Fotos besonders stark ansprachen. Die Probanden konnten anschließend das entsprechende Bild auf einem Monitor erscheinen lassen, indem sie intensiv daran dachten und dadurch die zugehörige Gehirnzelle

aktivierten. Aber was würde geschehen, wenn die Augen einen Sinnesreiz ans Gehirn lieferten, der im Widerspruch zur inneren Vorstellung stand? Welches Neuron würde dann bevorzugt feuern – das für das Foto, das die Versuchsperson tatsächlich sah, oder jenes für das andere, das sie vor ihrem geistigen Auge hatte?

Zur Klärung dieser Frage zeigten die Forscher eine Überlagerung aus zwei Aufnahmen. Die Versuchspersonen sollten dann das »Zielbild« deutlich erscheinen lassen und das andere verdrängen. In der Tat gelang ihnen das in 70 Prozent der Fälle innerhalb von zehn Sekunden. Selbst wenn das »falsche« Bild klar dominierte, schafften sie es oft, das gewünschte zurückzuholen. Die innere Vorstellung beeinflusste die neuronale Aktivität also stärker als der äußere Sinneseindruck.

*Nature, Bd. 467, S. 1104*



ANDRAN CERF UND MARIA MOON, CALTECH

**Versuchspersonen konnten ein Foto von Marilyn Monroe am Computerbildschirm erscheinen lassen, indem sie intensiv an sie dachten und so ein Neuron aktivierten, das besonders stark auf ihr Konterfei anspricht.**

## ZELLWACHSTUM

### Nervenregeneration mit Natriumionen

■ Verletztes Rückenmark, einen Arm oder ein Auge einfach nachwachsen lassen – das wird wohl noch einige Zeit ein Traum bleiben. Aber nun lassen ihn Tierversuche vielleicht ein Stück näher rücken. Einem Team um Michael Levin von der Tufts University in Medford (Massachusetts) ist es gelungen, relativ alten Kaulquappen von Krallenfröschen, die ihren Schwanz bei einer Verletzung nicht mehr regenerieren können, diese Fähigkeit zurückzugeben.

Als Wundermittel erwies sich ein spezieller Wirkstoffcocktail, der vermehrt Natriumionen durch die Außenmembranen ins Innere der Zellen einströmen ließ. Wurden die amputierten Tiere eine Stunde lang darin gebadet, wuchs ihnen ein neuer Schwanz. Dabei konnten sich die Forscher Zeit lassen: Die Regeneration funktionierte sogar noch bis zu 18 Stunden nach dem Verlust des Körperteils.

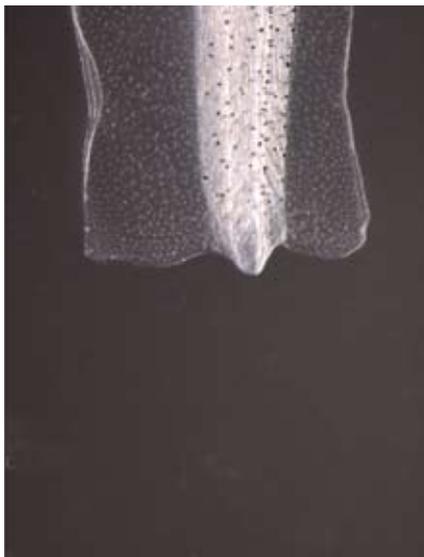
**Normalerweise wächst bei Kaulquappen ein abgetrennter Schwanz nicht nach (links). Ein Wirkstoffmix, der den Einstrom von Natrium in Zellen anregt, ermöglicht jedoch die Regeneration (rechts).**

Schon seit Längerem gibt es Anhaltspunkte dafür, dass der Einstrom von Natriumionen eine Rolle beim Gewebewachstum spielt. Levin und seine Kollegen konnten das nun erstmals experimentell bestätigen. Ihr Erfolg ist umso bemerkenswerter, als es sich beim Schwanz von Kaulquappen um ein recht komplexes Gebilde handelt, das auch Muskeln und

Rückenmark enthält. Beim Menschen ist die Regeneration von derartigem Gewebe bisher nicht gelungen.

Die Versuche am Krallenfrosch stimmen deshalb hoffnungsvoll. Vielleicht bietet die Behandlung mit Natriumionen auch einen neuen Ansatz zur Behandlung von Querschnittsgelähmten.

*Journal of Neuroscience, Bd. 30, S. 13192*



AL-SUN TSENG UND MICHAEL LEVIN, TUFTS UNIVERSITY

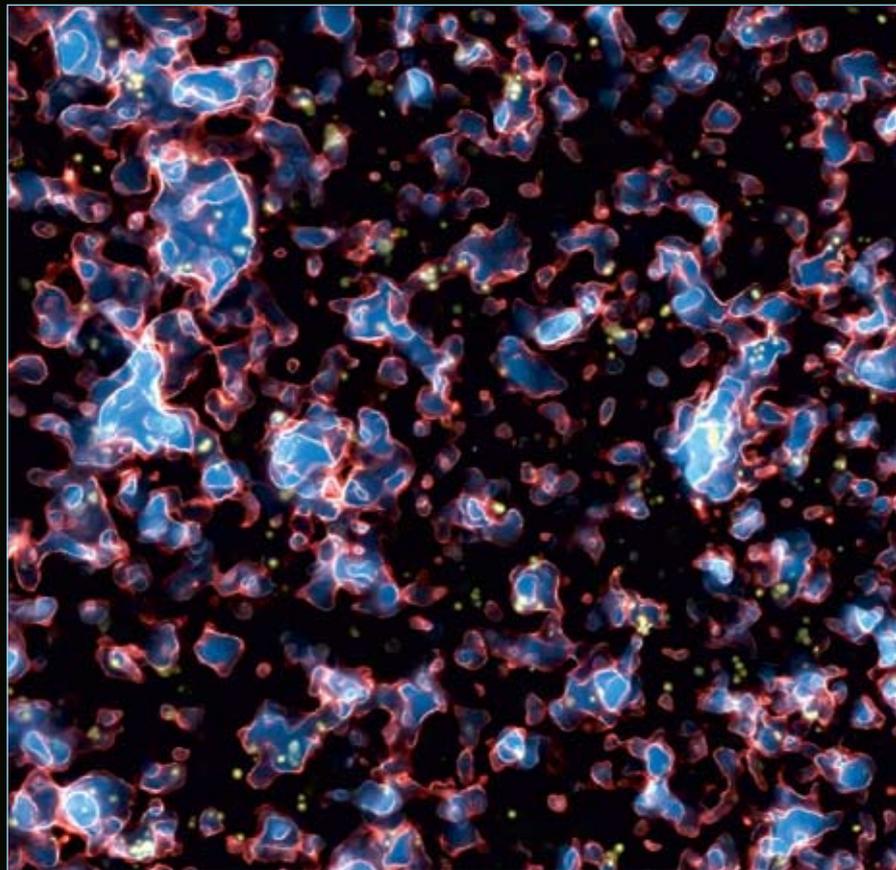
## Galaxie mit Rekordalter

■ Schon 2009 registrierte das NASA-Weltraumteleskop Hubble die extrem schwachen Signale der Galaxie UDFy-38135539. Nun stellten Forscher um Matt Lehnert vom Observatoire de Paris fest, dass dieses Himmelsobjekt eine Rekordentfernung von über 13 Milliarden Lichtjahren hat. Es existierte demnach bereits 600 Millionen Jahre nach dem Urknall, als das Universum sich in der so genannten Reionisationsepoche befand. Damals füllte undurchsichtiges Wasserstoffgas noch große Teile des Weltalls aus; die ultraviolette Strahlung der ersten Sterne und Galaxien ionisierte die Moleküle, wodurch der »Nebel« allmählich aufklarte.

Um die Entfernung von UDFy-38135539 zu bestimmen, nahmen die Astronomen mit Hilfe des Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile das Spektrum der Galaxie auf und durchsuchten es nach der Wellenlänge, bei der eine bestimmte Emissionslinie des Wasserstoffs auftritt. Daraus ermittelten sie eine Rotverschiebung von  $z = 8,6$ ; der bisherige Rekordhalter war ein Gammastrahlenausbruch mit  $z = 8,2$ . Die fernste zuvor bekannte Galaxie brachte es sogar nur auf  $z = 6,96$ .

UDFy-38135539 ist von einer überraschend großen Blase aus ionisiertem Gas umgeben. Seine Strahlung dürfte für deren Bildung nicht ausgereicht haben. »Es muss noch andere Begleitgalaxien geben, die dazu beitragen, den Raum transparent zu machen«, erklärt Mark Swinbank von der University of Durham (England). Künftige Teleskope wie das für 2018 geplante European Extremely Large Telescope der ESO könnten diese Begleiter – und vielleicht noch ältere Objekte – aufspüren.

*Nature, Bd. 467, S. 940*



Die ersten Sterne und Galaxien ionisierten mit ihrer Strahlung den »Nebel« aus Wasserstoffgas, der das Weltall zuvor erfüllt hatte. In der Simulation dieses Vorgangs erscheinen die schon ionisierten Bereiche in Blau und die Ionisationsfronten in Rot.

## QUANTENPHYSIK

### Elektronen tanzen aus der Reihe

■ Graphen ist das dünnste Material, das es gibt – besteht es doch nur aus einer einzelnen Schicht wabenartig angeordneter Kohlenstoffatome. Das verleiht ihm gleichermaßen bizarre wie viel versprechende Eigenschaften und macht es interessant für vielerlei Anwendungen wie schnelle elektronische Schalter und empfindliche Sensoren. Seine Entdecker erhielten deshalb den diesjährigen Physiknobelpreis (S. 16).

In dem Bemühen, die exotischen Eigenschaften des Materials besser zu verstehen, hat ein Forscherteam um Young Jae Song vom National Institute of Standards and Technology (NIST) der USA nun die verschiedenen Energieniveaus der Elektronen in einer Graphenschicht unter die Lupe

genommen. Als Instrument dazu diente ein spezielles Rastertunnelmikroskop, das Untersuchungen im Ultrahochvakuum und bei extrem niedrigen Temperaturen bis zu einem hundertstel Kelvin erlaubt.

Die Messungen bestätigten zunächst theoretische Vorhersagen, wonach sich die Energiezustände des Graphens in einem Magnetfeld in vier Unterniveaus aufspalten sollten, deren Abstand sich beim Erhöhen der Feldstärke vergrößert. Doch ab etwa sieben Tesla geschah Unerwartetes. Die Niveaus teilten sich weiter und rückten mal näher zusammen, mal auseinander.

Der Grund dafür ist völlig rätselhaft. Möglicherweise bilden die Elektronen eine Art Kondensat, in dem sie sich nicht mehr einzeln, sondern im Verbund bewegen,



Die Energieniveaus der Elektronen im Graphen – hier ist eines als violetter Ring gezeigt – spalten sich in einem Magnetfeld in ein »Quartett« aus Unterniveaus auf (blaue und rote Ringe links), die sich bei hohen Feldstärken weiter unterteilen (links unten).

spekulieren die Forscher – und erhoffen sich Klarheit von weiteren Experimenten.

*Nature, Bd. 467, S. 185*

## AERODYNAMIK

## Fliegende Fische im Windkanal

■ Fliegende Fische sind einzigartig unter allen Wasserbewohnern. Sie können mehr als 40 Sekunden lang in der Luft dahingleiten und dabei eine Geschwindigkeit von 70 Kilometer pro Stunde erreichen. Warum sie ihr angestammtes Element für solche Ausflüge verlassen, ist und bleibt ein Rätsel. Aber zumindest lässt sich nun genauer sagen, wie sie den Gleitflug bewerkstelligen: Hyungmin Park und Haecheon Choi von der Universität Seoul (Südkorea) haben es erforscht.

Dafür fingen die Wissenschaftler auf eigene Faust fliegende Fische im ostkoreanischen Meer, wählten fünf gleich große Exemplare aus und ließen sie ausstopfen. Dann führten sie Flugsimulationen mit den Präparaten in einem Windkanal durch und maßen bei allen möglichen Stellungen die Reibungs- und Auftriebskräfte, die jeweils auf den Körper wirkten. Das erstaunliche Ergebnis: In horizontaler Lage gleiten



HYUNGMIN PARK, SEOUL NATIONAL UNIVERSITY

**Versuche im Windkanal an ausgestopften fliegenden Fischen der Art *Cypselurus hiraii* ergaben, dass die Anordnung der vier Flossen eine große Rolle für das Gleitvermögen der Tiere spielt.**

fliegende Fische ähnlich gut wie Habichte, Sturmvögel oder Enten.

Die Forscher bliesen auch Rauch in den Windkanal, um die Luftströmung um das extraaquatische Flugobjekt herum sichtbar zu machen. Wie sich dabei zeigte, spielt die Anordnung der vier Flossen eine große Rolle. Sie sorgt dafür, dass die am Fisch vorbeiströmende Luft zum Schwanz hin stark beschleunigt wird, was den Auftrieb erhöht und die Reibung vermindert. Nun wollen die beiden Forscher ein Flugzeug bauen, das die aerodynamischen Eigenschaften von fliegenden Fischen ausnutzt.

*Journal of Experimental Biology, Bd. 213, S. 3269*

## TECHNIK

## Zarte Roboterhand

■ Jedes Kind kann Dinge aufheben und halten – und das, obwohl der Greifvorgang komplexe Entscheidungen verlangt: Wie weit spreizt man die Finger? An welcher Stelle packt man zu, und mit wie viel Kraft? Fingerspitzengefühl ist bisher für Roboter eine große Herausforderung. Ihre Greifer imitieren meist die Form der menschlichen Hand; um damit unbekannte Objekte sicher zu packen, bedarf es komplexer Steuerungssysteme.

Eric Brown von der University of Chicago (Illinois) und Kollegen haben nun gezeigt, dass es auch einfacher geht. Sie verwendeten einen Sack, den sie mit körnigem Material wie beispielsweise Sand füllten. Dieses verhält sich unter Normaldruck wie eine Flüssigkeit. Der Sack passt

sich folglich der Form des Gegenstandes an. Wird der Inhalt dann einem schwachen Unterdruck ausgesetzt, rücken die Körner näher zusammen und verlieren ihre Beweglichkeit: Sie erstarren gleichsam. So kann der Sack das Objekt nun sicher festhalten. Dieser Effekt wird beispielsweise schon in der Medizin bei Vakuumschienen zum Ruhigstellen von Brüchen angewendet.

Die Form oder die mechanische Empfindlichkeit des Gegenstands spielen für den neuartigen Greifer keine Rolle. Zudem kommt er ohne äußere Steuerung oder Kraftsensoren aus. In Zukunft könnte das System also bei den unterschiedlichsten Objekten eingesetzt werden – von Spielzeug bis hin zu rohen Eiern.

*PNAS Online-Vorabveröffentlichung*

**Ein sandgefüllter Sack lässt sich als Greifer verwenden, der beliebig geformte Gegenstände umhüllt und beim Anlegen eines schwachen Unterdrucks festhält.**

## CHRONOBIOLOGIE

## Temperatur taktet Körperrhythmen

■ Blutdruck, Herzschlag, Ausschüttung von Hormonen und viele andere Körperfunktionen schwanken periodisch im Verlauf eines Tag-Nacht-Zyklus. Gesteuert werden sie von einer zentralen inneren Uhr, die sich an den Lichtverhältnissen orientiert und im suprachiasmatischen Nucleus (SCN), einer kleinen Hirnregion, angesiedelt ist. Aber wie schafft sie es, die Rhythmen einzelner Organe – die peripheren Uhren – aufeinander abzustimmen? Das war bisher unklar.

Da das Verhalten lebender Tiere von vielen äußeren Faktoren abhängt, untersuchte ein Team um Ethan Buhr von der Northwestern University in Evanston (Illinois) die Frage an Zellen von Mäusen, die sie in Petrischalen züchteten und genetisch so veränderten, dass sie im Takt der jeweiligen inneren Uhr leuchteten.



Frühere Untersuchungen hatten bereits darauf hingewiesen, dass sich Temperaturschwankungen auf die Rhythmen einzelner Gewebe auswirken. Buhr und seine Kollegen konnten das nun für Zellen aus Organen wie der Lunge oder der Leber bestätigen. Deren Aktivität passte sich innerhalb weniger Tage an den Takt der Temperaturschwankungen an. Die Zellen aus dem SCN reagierten dagegen nur auf Lichtänderungen. Die Forscher schließen daraus, dass der SCN die peripheren Rhythmen über von ihm erzeugte Schwankungen der Körpertemperatur aufeinander abstimmt. Wäre die »Steuerzentrale« gleichfalls temperaturabhängig, hätte das ein großes Durcheinander zur Folge – mehr noch als beim schlimmsten Jetlag.

*Science, Bd. 330, S. 379*

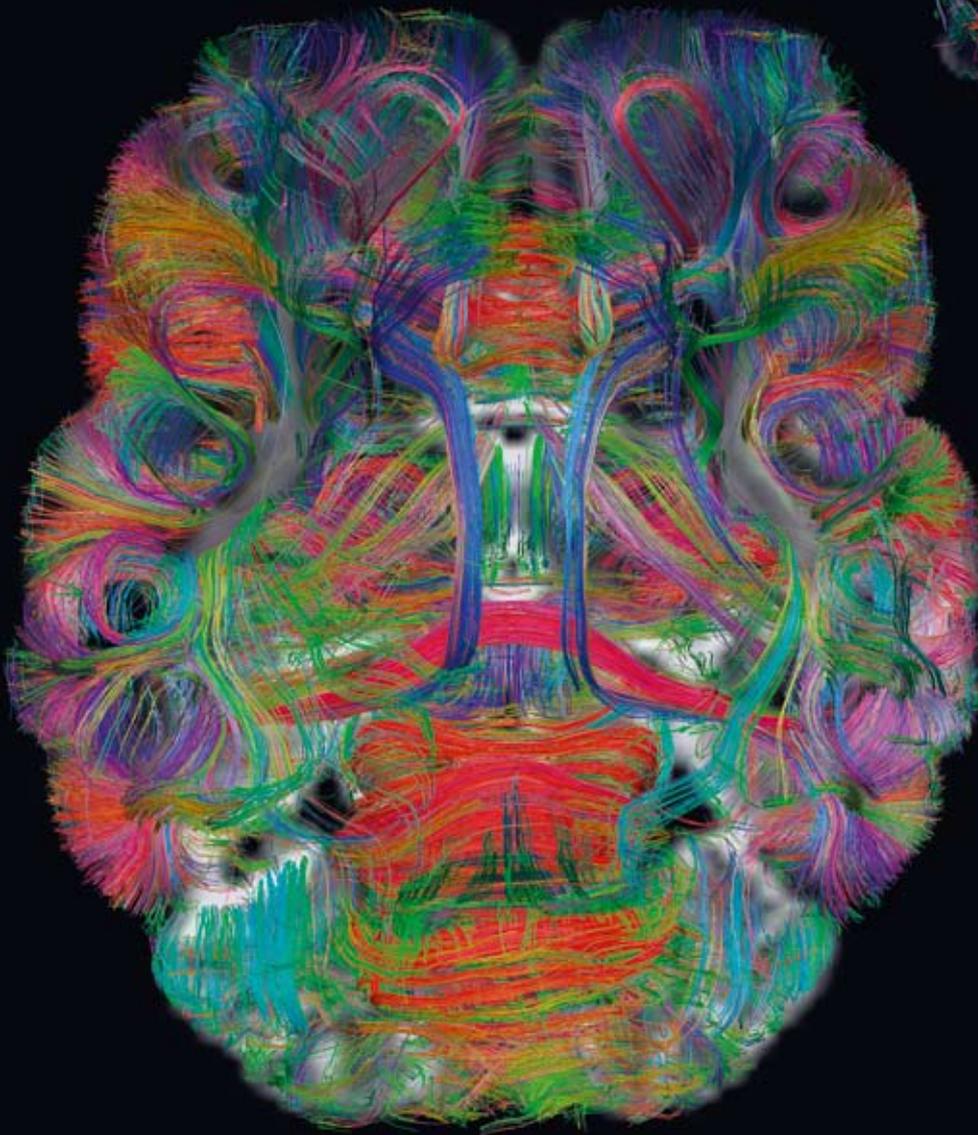
**Mitarbeit:** Manuela Kuhar



# Verschaltung des Katzenhirns

Eine von Van Wedeen am Massachusetts General Hospital in Cambridge entwickelte Variante der Magnetresonanztomografie (MRI nach englisch *magnetic resonance imaging*) lieferte diese eingefärbten Aufnahmen vom Hirn einer zehn Tage (oben) und einer drei Monate alten Katze (unten). Die Diffusions-Spektrum-MRI oder kurz DSI registriert wie die schon länger bekannte Diffusions-Tensor-MRI (DTI) außer der Dichte von Wassermolekülen auch deren Bewegungsrichtung, die in Neuronen dem Verlauf der Nervenfasern folgt. Sie kann im Unterschied zur DTI aber auch sich überkreuzende Nervenstränge darstellen.

Man sieht, dass das Hirn wenige Tage alter Katzen noch keine großräumige Organisation aufweist. Nach drei Monaten ziehen die Nervenfasern dagegen in einem hoch geordneten Muster teils zu weit entfernten Regionen. Beim Menschen läuft diese Reifung schon zwischen dem fünften und siebten Schwangerschaftsmonat ab. Störungen des Vorgangs können spätere neurologische Erkrankungen wie Epilepsie hervorrufen. Untersuchungen der frühen Hirnreifung bei Katzen helfen zu verstehen, was beim Menschen in solchen Fällen schief läuft.



☞ Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

NOBELPREIS FÜR MEDIZIN

## Babyboom aus der Retorte

Im Jahr 1978 gelang es Robert G. Edwards als Erstem, menschliche Eizellen in der Kulturschale zu befruchten und in den Uterus einer Frau zurückzupflanzen. Für diese Pioniertat wurde ihm nun der Nobelpreis für Medizin oder Physiologie verliehen.

Von Stefanie Reinberger

Mehr als zehn Prozent aller Paare weltweit sind unfruchtbar. Ihnen eröffnete Robert G. Edwards einen Weg zum eigenen Nachwuchs, als er – gemeinsam mit seinem inzwischen verstorbenen Forschungspartner, dem Gynäkologen Patrick C. Steptoe – zwischen den 1950er und 1970er Jahren die Methode der In-vitro-Fertilisation (IVF) entwickelte. Rund vier Millionen Menschen wurden mittlerweile im Reagenzglas gezeugt, die ohne den britischen Forscher nicht geboren wären. Sie hatte das Nobelkomitee mit Sicherheit im Auge, als es ihrem wissenschaftlichen Vater nun den Preis für Medizin oder Physiologie zuerkannte.

Erwartungsgemäß stieß diese Entscheidung auch auf Kritik. So bewertete sie der Vatikan als »vollkommen deplatziert« und geißelte die »Vermarktung von Eizellen«. Ein Sprecher verwies auf die unzähligen Embryonen in Gefriertruhen, die im besten Fall darauf warteten, verpflanzt zu werden, aber mit größter Wahrscheinlichkeit zum Tod verurteilt seien. Ethische Bedenken wurden auch schon bei der Geburt des ersten Retortenbabys im Jahr 1978 laut – ebenso wie die Sorge, künstlich gezeugte Kinder hätten eventuell ein höheres Erkrankungsrisiko (Spektrum der Wissenschaft 8/1979, S. 30).

Das Nobelkomitee würdigte allerdings nicht nur Edwards' Beitrag zur Therapie von Unfruchtbarkeit, sondern auch die akribische Grundlagenforschung, mit welcher der inzwischen 85-Jährige fundamentale Prinzipien der menschlichen Befruchtung aufklärte. Schritt für Schritt beantwortete der Physiologe bis dahin offene Fragen zur Reifung der weiblichen Eizellen, zur Hormonregulation dieses

Vorgangs und zum günstigsten Zeitpunkt für eine Befruchtung der Oozyten.

Tatsächlich war der Weg bis zur Geburt des ersten Retortenbabys lang und steinig. Nur weil Edwards ihn mit großer Entschlossenheit und Beharrlichkeit verfolgte, gelangte er schließlich ans Ziel. Schon in den 1950er Jahren hatte der Brite die Vision, unfruchtbaren Paaren durch die Verlagerung des Zeugungsakts aus dem Körper heraus zu Kindersegen zu verhelfen. Die Idee kam nicht von ungefähr: Edwards beschäftigte sich damals an der Edinburgh University (Schottland) mit der Entwicklung von Eizellen und deren hormoneller Kontrolle im Eierstock von Mäusen. Schon 1935 war es dem US-Forscher Gregory Pincus gelungen, Oozyten von Kaninchen im Reagenzglas ausreifen zu lassen. 1959 befruchtete der chinesisch-amerikanische Wissenschaftler Chueh Chang Eizellen der Nager in vitro. Noch im selben Jahr kamen in seinem Labor die ersten Retortenkaninchen zur Welt.

### Mühsamer Hindernislauf

Beim Versuch, diese Ergebnisse auf den Menschen zu übertragen, musste Edwards zunächst jedoch etliche Rückschläge einstecken. Eizellen ließen sich damals nur in unreifem Zustand durch operative Entnahme eines Stücks der Eierstöcke einer Frau gewinnen. Befruchtungsversuche mit ihnen im Reagenzglas scheiterten kläglich. Deshalb begann Edwards, den Reifungsprozess der menschlichen Oozyten genauer zu beobachten, um herauszufinden, wie die weiblichen Hormone diesen Vorgang steuern. In der Folge entwickelte er eine Methode, Eizellen in der Kulturschale hormonell auf die Befruchtung vorzubereiten. Dabei durchlaufen sie die gleiche Reifeteilung wie in



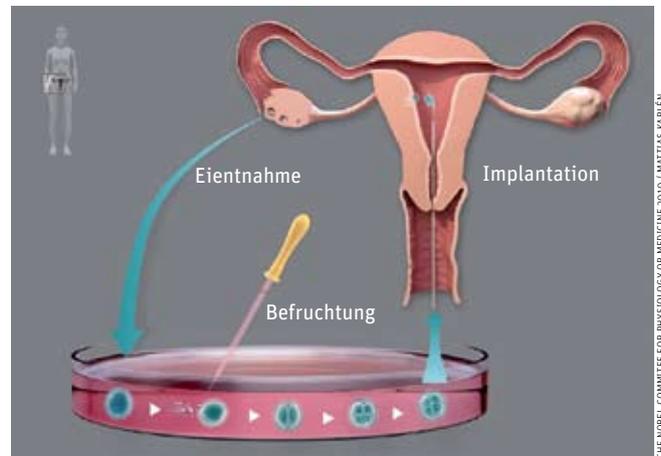
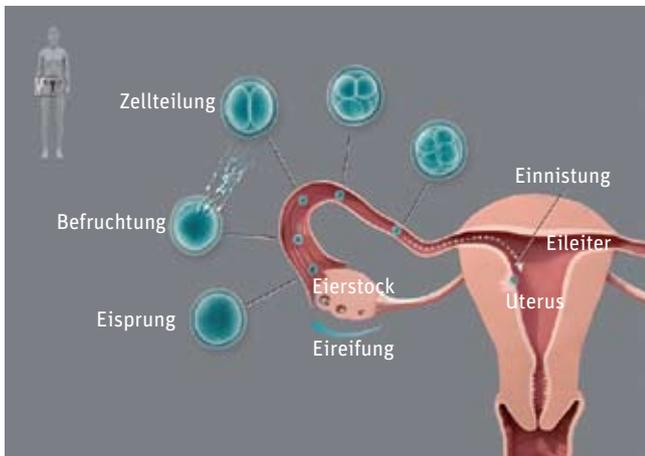
**Robert G. Edwards** war der Wegbereiter der Reagenzglasbefruchtung. Hier umarmt er **Louise Brown**, die durch ihn als erstes Retortenbaby 1978 zur Welt kam.

der Gebärmutter kurz vor dem Eisprung, gehen also, fachlich ausgedrückt, in das Metaphasestadium der Meiose II über. Nur in diesem Stadium sind sie zur Vereinigung mit einer Samenzelle fähig.

Auch die männlichen Gegenspieler beim Befruchtungsvorgang gilt es auf ihre Aufgabe vorzubereiten. Chang hatte 1959 Spermien der Rammler im Uterus lebender Kaninchen vorinkubiert. Die britischen Forscher um Edwards tüftelten eine Pufferlösung aus, mit der sich Samenzellen künstlich aktivieren ließen.

Als Ergebnis der langjährigen Bemühungen glückte 1969 schließlich erstmals die Befruchtung einer menschlichen Eizelle im Reagenzglas. Allerdings teilte sie sich nur ein einziges Mal, bevor sie abstarb. Gleiches geschah bei weiteren Versuchen. Deshalb entschied Edwards, lieber Oozyten zu verwenden, die im Eierstock bereits herangereift waren. Im normalen Menstruationszyklus ist das jeweils nur eine einzige kurz vor der Ovulation. Aus seinen Tierexperimenten wusste der britische Physiologe jedoch, wie sich der Reifungsprozess im Körper durch Hormongaben stimulieren lässt, so dass mehrere Eizellen in das Metaphasestadium der Meiose II übergehen. Sie müssten gezielt entnommen werden. Mit der herkömmlichen operativen Methode war das allerdings nicht möglich.

Hier kam Edwards' wohl wichtigster Forschungspartner ins Spiel: Patrick C. Steptoe. Der britische Gynäkologe zählt zu den Pionieren der Laparoskopie. Bei dieser so genannten Schlüssellochchirurgie werden durch kleine Schnitte in der Bauchdecke ein optisches System und von außen zu bedienende Instrumente eingeführt. Auf diese Weise konnte Steptoe geeignete reife Eizellen auswählen und



THE NOBEL COMMITTEE FOR PHYSIOLOGY OR MEDICINE 2010 / MATTHIAS KARLEN

mit einer Saugvorrichtung entnehmen. Nach künstlicher Befruchtung im Reagenzglas teilten sie sich, und die entstehenden Embryos wurden im Achtzellstadium in die Gebärmutter verpflanzt.

Zunächst allerdings misslang die Einnistung, weil auch der Uterus zur Aufnahme einer solchen »Morula« bereit sein muss. Die Hormonbehandlung für die Eizellreifung störte die dafür nötigen Vorgänge. Es bedurfte weiterer Experimente, dieses Problem zu lösen. So kam erst einige Jahre später nach mehreren Fehlversuchen und einer Eileiterschwangerschaft am 25. Juli 1978 endlich das erste Retortenbaby zur Welt: ein gesundes Mädchen, das mittlerweile selbst Mutter ist.

### Steigerung der Erfolgsquote

Knapp vier Jahre später wurde auch in Deutschland das erste im Reagenzglas gezeugte Kind geboren. Seither haben Ärzte und Wissenschaftler die Methode in vielerlei Hinsicht verfeinert. »Heute werden die Frauen ganz anders hormonell behandelt als damals«, sagt die Münchner Gynäkologin und Genetikerin Tina Buchholz. »Dosis und Zusammensetzung der Hormone sind verändert, und sie werden auch nicht mehr aus menschlichem Serum gewonnen, sondern gentechnologisch hergestellt.«

Eine wichtige Entwicklung seit Edwards' erstem Erfolg ist die Möglichkeit, sowohl reife als auch befruchtete Eizellen einzufrieren und zu einem späteren Zeitpunkt zu verwenden. Davon profitieren insbesondere junge Frauen, die sich aus krankheitsbedingten Gründen die Eierstöcke entfernen lassen oder einer Chemotherapie unterziehen müssen. Sie können ihre Familienplanung auf einen späteren Zeitpunkt verschieben.

**Einige Schritte der natürlichen Befruchtung (links) laufen bei der In-vitro-Fertilisation (rechts) außerhalb des Körpers ab. Eine reife Eizelle wird aus dem Eierstock entnommen, in der Kulturschale mit Spermien versetzt, und der sich entwickelnde Embryo nach einigen Zellteilungen in die Gebärmutter verpflanzt.**

Neue Methoden wie etwa die Intracytoplasmatische Spermieninjektion (ICSI), bei der Spermien unterm Mikroskop direkt in die Eizelle eingeführt werden, erhöhen die Erfolgsquote insbesondere bei mangelhafter Spermienqualität. Das Gleiche gilt für längere Kulturzeiten der bereits befruchteten Eizellen. Dabei beobachten Mediziner nach zellbiologischen Gesichtspunkten, etwa anhand des Aussehens der frühen Embryonen, welche sich aussichtsreich entwickeln und daher geeignete Kandidaten für den Transfer in die Gebärmutter sind. In einigen Ländern besteht zudem die Möglichkeit, sie genetisch zu untersuchen. In Deutschland ist diese Präimplantationsdiagnostik nach einem Urteil des Bundesgerichtshofs mittlerweile an Zellen des so genannten Trophekterds möglich, aus dem während der weiteren Schwangerschaft die Plazenta entsteht. Damit will man schwer wiegende genetische Störungen verhindern.

»Ob die längere Kulturzeit tatsächlich ein Segen ist für die Reproduktionsmedizin, ist aber nicht unumstritten«, erklärt Buchholz. Sie teilt die Bedenken einiger Kollegen, dass die Zeit in der Kulturschale die Entwicklung der Embryonen eventuell negativ beeinflusst. Zum Beispiel könnten epigenetische Schäden auftreten, also eine chemische Modifikation der DNA, die sich auf die Regulation der Genaktivität auswirkt und dadurch die Embryonalentwicklung stört.

Tatsächlich bestehe bei einer assistierten Befruchtung ein erhöhtes Risiko

für Fehlbildungen von vier bis sechs Prozent gegenüber drei bis vier Prozent bei spontanen Schwangerschaften, bestätigt Bernhard Horsthemke vom Universitätsklinikum Essen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 12/2003, S. 36). Nach Untersuchungen aus dem Labor des Humanogenetikers sowie von Forschergruppen aus anderen Ländern existiert ein Zusammenhang zwischen künstlicher Befruchtung und Erkrankungen auf Grund epigenetischer Fehler. Eine umfangreiche australische Studie aus dem Jahr 2004 ergab, dass das Risiko für das Beckwith-Wiedemann-Syndrom, das mit Großwuchs und erhöhter Krebsneigung einhergeht, bei in vitro gezeugten Kindern um das Neunfache erhöht ist. Die genaue Ursache liegt noch im Dunkeln. »Im Verdacht stehen die Kulturbedingungen, aber auch epigenetische Fehler bei Eltern mit eingeschränkter Fruchtbarkeit kommen in Frage«, so Horsthemke. Tierversuche legen zudem nahe, dass die Eizellen durch den künstlich gesteuerten Reifungsprozess Schaden nehmen können.

Der Essener Wissenschaftler sieht trotzdem keinen Anlass, die In-vitro-Befruchtung zu verteufeln oder gar Panik zu verbreiten. Dazu sei das absolute Risiko viel zu gering. Man müsse dem Verdacht aber weiter nachgehen und Paare, die medizinische Hilfe beim Elternwerden suchen, über die Gefahr aufklären.

**Stefanie Reinberger** ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

# Mit Tesafilm zum molekularen Maschendraht

Für die Gewinnung und Charakterisierung von Graphen, einem Material aus wabenartig verknüpften Kohlenstoffatomen, das mit etlichen Superlativen aufwarten kann, wurden Andre K. Geim und Konstantin S. Novoselov mit dem Nobelpreis für Physik geehrt.



**Andre Geim** (links) und sein Kollege **Konstantin Novoselov** (rechts) isolierten und untersuchten als erste Graphen: eine einzelne, atomar dünne Schicht aus Kohlenstoff mit außergewöhnlichen elektronischen wie auch mechanischen Eigenschaften.

Von Patrik Recher und Björn Trauzettel

Kohlenstoff ist nicht nur in seinen Verbindungen, sondern auch als reines Element ungewöhnlich vielseitig. So kommt er in der Natur in kristalliner Form als Diamant und Graphit vor – zwei Modifikationen mit völlig unterschiedlichen Eigenschaften. Diamant ist das härteste bekannte Material und dabei durchsichtig mit hohem Brechungsindex. Er fasziniert deshalb als funkelnder Edelstein. Graphit dagegen ist undurchsichtig schwarz und ein ausgesprochen weiches Material, das sich zum Schreiben und Zeichnen eignet. Außerdem kann elementarer Kohlenstoff auch in Form käfigartiger Moleküle vorkommen, die an Fußballer erinnern. Die Entdeckung dieser »Fullerene« trug Robert Curl, Harold Kroto und Richard Smalley 1996 den Nobelpreis für Chemie ein (Spektrum der Wissenschaft 12/1996, S. 18).

Als erstes Element der vierten Hauptgruppe des Periodensystems hat Kohlenstoff vier Elektronen in der äußeren Schale. Im Diamant dienen sie alle glei-

chermaßen zum Knüpfen kovalenter Bindungen, so dass ein Kohlenstoffatom jeweils tetraedrisch mit vier anderen verbunden ist. Im Graphit dagegen bilden jeweils nur drei Elektronen eine feste chemische Bindung zu benachbarten Atomen. Dadurch entsteht ein ebenes Gitter in Form einer Honigwabe. Das vierte Elektron ist gleichmäßig über dieses Maschennetz verteilt (delokalisiert). Viele solche atomaren Schichten sind im Graphit übereinandergestapelt.

Dass es gelingen könnte, sie auch einzeln zu gewinnen, galt lange Zeit als praktisch ausgeschlossen. Nach der Entdeckung der Fullerene stießen Chemiker bei Versuchen, die Fußballmoleküle auf verschiedenen Wegen zu erzeugen, zwar überraschend auf Nanoröhren, in denen solche Graphit-Einzelschichten zu Zylindern aufgerollt waren. Dass sie sich auch als ebenes molekulares Maschennetz isolieren ließen, glaubte trotzdem kaum jemand – zumal Theoretiker vorausgesagt hatten, strikt zweidimensionale Kristalle seien grundsätzlich nicht stabil (Mermin-Wagner-Theorem).

## Verblüffend einfacher Trick

Im Jahr 2004 aber ist einer Gruppe unter der Leitung von Andre K. Geim und Konstantin S. Novoselov genau dies gelungen, und zwar auf verblüffend einfache Art und Weise (siehe Bild rechts). Die Forscher drückten einen Klebestreifen auf Pulver aus Graphit und übertrugen die daran haftenden Partikel auf ein Substrat. Diesen Vorgang wiederholten sie so lange, bis sich schließlich einige Monolagen auf dem Substrat befanden. Damit hatten die findigen Wissenschaftler das dünnste Material im Universum geschaffen. In Anlehnung an Graphit bezeichnet man es als Graphen.

Die eigentliche Kunst bestand allerdings darin, nachzuweisen, dass es sich

wirklich um Einzelschichten handelte. Wie lässt sich erkennen, wie viele Lagen transferiert wurden? Die Wissenschaftler in Manchester lösten das Problem, indem sie ein Substrat aus Siliziumdioxid mit einer genau definierten Schichtdicke benutzten. In einem Lichtmikroskop konnten sie auf Grund von Interferenzeffekten dann die Monolagen allein durch den optischen Kontrast von mehrlagigen Schichten unterscheiden.

Durch elektrische Transport-Messungen an dem Material bestätigte die Manchester-Gruppe – und unabhängig davon ein Team um Philip Kim an der Columbia University in New York – im Jahr 2005 auch die besonderen elektronischen Eigenschaften, die Theoretiker für Graphen vorausgesagt hatten. So sollten sich die Elektronen darin wie masselose Quasiteilchen bewegen, die einst Paul Dirac beschrieben hatte. Die Folge ist unter anderem, dass schon bei Zimmertemperatur ein so genannter halbzahliger Quanten-Hall-Effekt auftritt, der sonst nur bei Temperaturen von flüssigem Helium zu beobachten ist.

Aus diesen und anderen Gründen weckt Graphen große Hoffnungen auf vielerlei technische Anwendungen. Das bescherte ihm in den vergangenen Jahren einen wahren Boom in der Festkörperphysik, der ungebrochen anhält und auch in andere Teilgebiete der Physik und Chemie abstrahlt.

So mühen sich Forscher, die speziellen elektronischen Eigenschaften von Graphen theoretisch und experimentell besser zu verstehen. Andere suchen nach neuen Herstellungsmethoden. Ein Ansatz ist, Graphen auf einem geeigneten Substrat wachsen zu lassen. Siliziumcarbid und Metalle wie Ruthenium, Iridium oder Kupfer haben sich dabei als viel versprechend erwiesen. Auf diese Weise hofft man die Monolagen großflächiger und

kontrollierter herstellen zu können als mit der Klebestreifenmethode.

Wegen seiner sehr hohen elektrischen Leitfähigkeit stand Graphen von Anfang an im Ruf eines Wundermaterials für die Nanoelektronik. Seine Zweidimensionalität lässt es als ideal für die Herstellung von Transistoren erscheinen, die in elektronischen Schaltkreisen von Computern oder Mobiltelefonen zum Einsatz kommen. Dies trifft vor allem auf schmale Streifen aus Graphen oder auf die zweilagige Variante zu, in der die für Halbleitertypische Bandlücke erzeugt werden kann, auf der die Funktion herkömmlicher Transistoren beruht. Da Graphen lichtdurchlässig ist, eignet es sich auch für so genannte Touchscreens: berührungsempfindliche Bildschirme, die sich neuerdings großer Beliebtheit erfreuen. Zudem hat es eine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit. Wegen seiner großen Oberfläche im Verhältnis zur Masse kann Graphen auch als Sonde zum Aufspüren chemischer Substanzen dienen. Schließlich sind seine mechanischen Eigenschaften höchst beeindruckend: Als stärkstes Material, das jemals gemessen wurde, widersteht es Kräften, die etwa 200-mal der Bruchlast von Stahl entsprechen.

### Material für die Spintronik

Große Erwartungen weckt Graphen auch bei Forschern auf dem Gebiet der so genannten Spintronik. Mit dem Spin (Eigendrehimpuls) des Elektrons ist ein magnetisches Moment verknüpft, das sich ebenso wie die Ladung zur Speicherung und Übertragung von Informationen nutzen lässt. Ein Beispiel dafür liefert der Riesenmagnetowiderstand, für dessen Entdeckung Albert Fert und Peter Grünberg 2007 den Physiknobelpreis erhielten (Spektrum der Wissenschaft 12/2007, S. 18). Da Kohlenstoff ein leichtes Element ist, fällt die Wechselwirkung des Spins mit der Bewegung der Elektronen, die so genannte Spin-Bahn-Kopplung, besonders schwach aus. Außerdem hat das Kohlenstoff-Isotop der Atommasse 12, aus dem das Element zu fast 99 Prozent besteht, keinen Kernspin, der den Elektronenspin negativ beeinflussen könnte. Dieser lässt sich deshalb in Graphen mit nur geringen Verlusten transportieren.

Was sich von all den Hoffnungen wirklich erfüllt und in industriellen Produkten niederschlägt, liegt noch im Dunkeln. Die Möglichkeiten zur Untersuchung von Graphen sind beschränkt,

**Drückt man einen Klebestreifen auf Graphitpulver und dann auf ein Substrat aus Siliziumdioxid, befindet sich dort mit etwas Glück neben mehrschichtigem Graphit auch einlagiges Graphen. Dieses lässt sich erst mit dem Lichtmikroskop durch den optischen Kontrast identifizieren. Die betreffende Flocke kann anschließend kontaktiert und durch elektrische Messungen charakterisiert werden.**

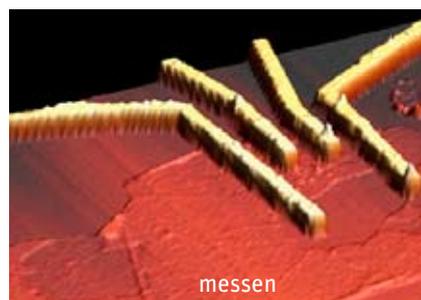
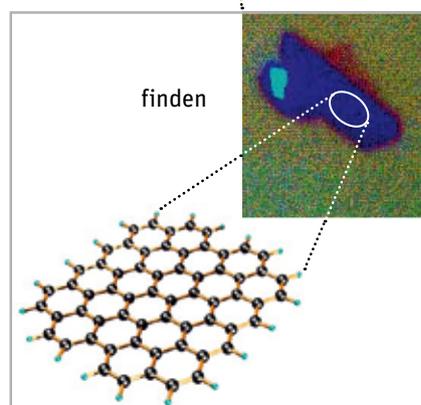
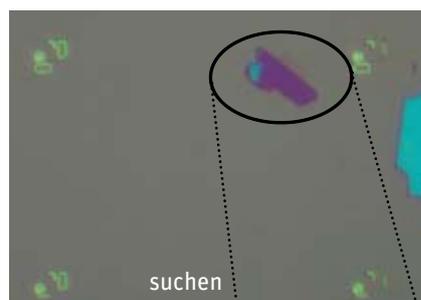
weil es sich bisher nicht gut und günstig genug isolieren und verarbeiten lässt. Vieles spricht jedoch dafür, dass dieses Material mit seinen einzigartigen Eigenschaften in Low- wie auch Hightech-Anwendungen unser zukünftiges Leben mitbestimmen wird.

Andre Geim und Konstantin Novoselov haben beide russische Wurzeln. Geim ist mittlerweile Niederländer. 1958 als Sohn deutschstämmiger Eltern in Sotschi am Schwarzen Meer geboren, erhielt er 1987 den Dokortitel in Physik von der Russischen Akademie der Wissenschaften. Seit 1990 forschte er zunächst als Postdoc an mehreren europäischen Universitäten, bevor er 1994 außerordentlicher Professor für Physik an der Radboud Universität Nijmegen (Niederlande) wurde. Seit 2001 ist er Physikprofessor an der University of Manchester (England) und dort Direktor eines großen Forschungsinstituts. Geim erhielt etliche Auszeichnungen, unter anderem im Jahr 2000 den satirischen Ig-Nobelpreis für ein Experiment, bei dem ein lebender Frosch in einem Magnetfeld zum Schweben gebracht wurde. Er ist somit der erste Wissenschaftler, der sowohl den parodistischen als auch den echten Nobelpreis gewann.

Konstantin Novoselov wurde 1974 in Nischni Tagil im Ural geboren und ist damit einer der jüngsten Nobelpreisträger überhaupt. Er hat sowohl einen britischen als auch einen russischen Pass. Nach dem Physikdiplom am Moskauer Institut für Physik und Technologie ging er 1999 zur Promotion nach Nijmegen zu Andre Geim. Novoselov folgte seinem Doktorvater auch 2001 nach Manchester und hat heute dort eine Physikprofessur inne. Beide wurden für ihre bahnbrechenden Entdeckungen über Graphen mit dem Europhysics Prize 2008 ausgezeichnet. Novoselov hat außerdem einen der begehrten ERC Startup Grants der Europäischen Union erhalten.



MIT FRIEDRICH VON BÜRN TRAUZETTEL



Der diesjährige Nobelpreis kam für die zwei Forscher überraschend. »Ich habe gut geschlafen«, sagte Geim am Tag der Bekanntgabe. Er und Novoselov führten selbst an diesem bedeutendsten Tag ihrer wissenschaftlichen Laufbahn

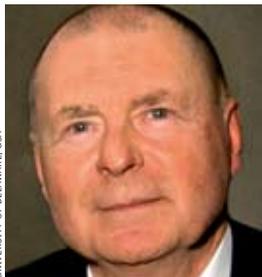
ihre Forschungsarbeiten weiter. Letzterer bedauerte während eines Telefoninterviews, dass er für den Rummel um seine Person eine interessante Messung unterbrechen müsse.

**Patrik Recher** und **Björn Trauzettel** sind promovierte Physiker und am Institut für Theoretische Physik und Astrophysik der Universität Würzburg tätig. Recher als Leiter einer Emmy-Noether-Gruppe und Trauzettel als Professor für theoretische Physik der kondensierten Materie.

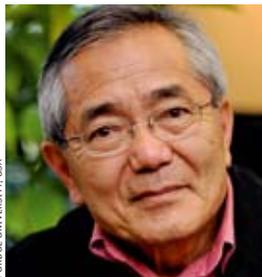
## NOBELPREIS FÜR CHEMIE

# Verknüpfung von Kohlenstoffatomen mittels Palladium

Ein ebenso wichtiger wie schwieriger Schritt beim Aufbau komplizierter organischer Verbindungen ist oft das Knüpfen einer Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung. Für die Entwicklung eines eleganten Verfahrens dazu – in drei Varianten – erhielten Richard F. Heck, Ei-ichi Negishi und Akira Suzuki den Chemie-Nobelpreis.



UNIVERSITY OF DELAWARE, USA



PURDUE UNIVERSITY, USA



HOKKAIDO UNIVERSITY, JAPAN

**Richard F. Heck** (links) entwickelte den Prototyp einer von Palladium katalysierten Kreuzkupplung, bei der ein ungesättigter mit einem halogenierten Kohlenwasserstoff verknüpft wird (siehe Bild auf S. 20). **Ei-ichi Negishi** ersetzte das Alken durch eine zink- und **Akira Suzuki** durch ein bororganische Verbindung, was die Einsatzmöglichkeiten der Reaktion erheblich erweiterte.

In den Grundzügen hat der US-Forscher Richard F. Heck dieses Verfahren schon 1968 entwickelt. Später ersannen die Japener Ei-ichi Negishi und Akira Suzuki Varianten davon, die sein Einsatzspektrum erheblich erweitert haben. Alle drei erhielten für diese Leistungen den diesjährigen Chemie-Nobelpreis.

Bei der Synthese von komplizierten Molekülen kommt es darauf an, in jedem der vielen nötigen Reaktionsschritte nahezu 100 Prozent des gewünschten Produkts zu erhalten. Anderenfalls bleibt am Ende außer Abfall kaum mehr etwas übrig. Wenn sich etwa bei der 28-stufigen Totalsynthese des Krebsmedikaments Taxol in jedem Schritt nur eine Ausbeute von 90 Prozent erzielen ließe, betrüge die Gesamtausbeute lediglich fünf Prozent. Die von Heck, Negishi und Suzuki entwickelten Reaktionen stehen auch in dieser Hinsicht hervor: Sie liefern jeweils spezifisch ein bestimmtes Reaktionsprodukt in hoher Ausbeute. Überdies laufen sie unter milden Bedingungen ab. Möglich macht das der Einsatz eines Katalysators, bei dem es sich in diesem Fall um Palladium handelt.

Richard Heck begann sich in den 1960er Jahren für die katalytischen Fähigkeiten dieses Edelmetalls zu interessieren. Auslöser war dessen Rolle bei der Umsetzung von Ethen (Äthylen) mit Luftsauerstoff zu Acetaldehyd in einem bei der Wacker-Chemie GmbH in München entwickelten Verfahren. Als Heck, der damals bei der Firma Hercules in Wilmington (Delaware) arbeitete, mit Palladium und organischen Verbindun-

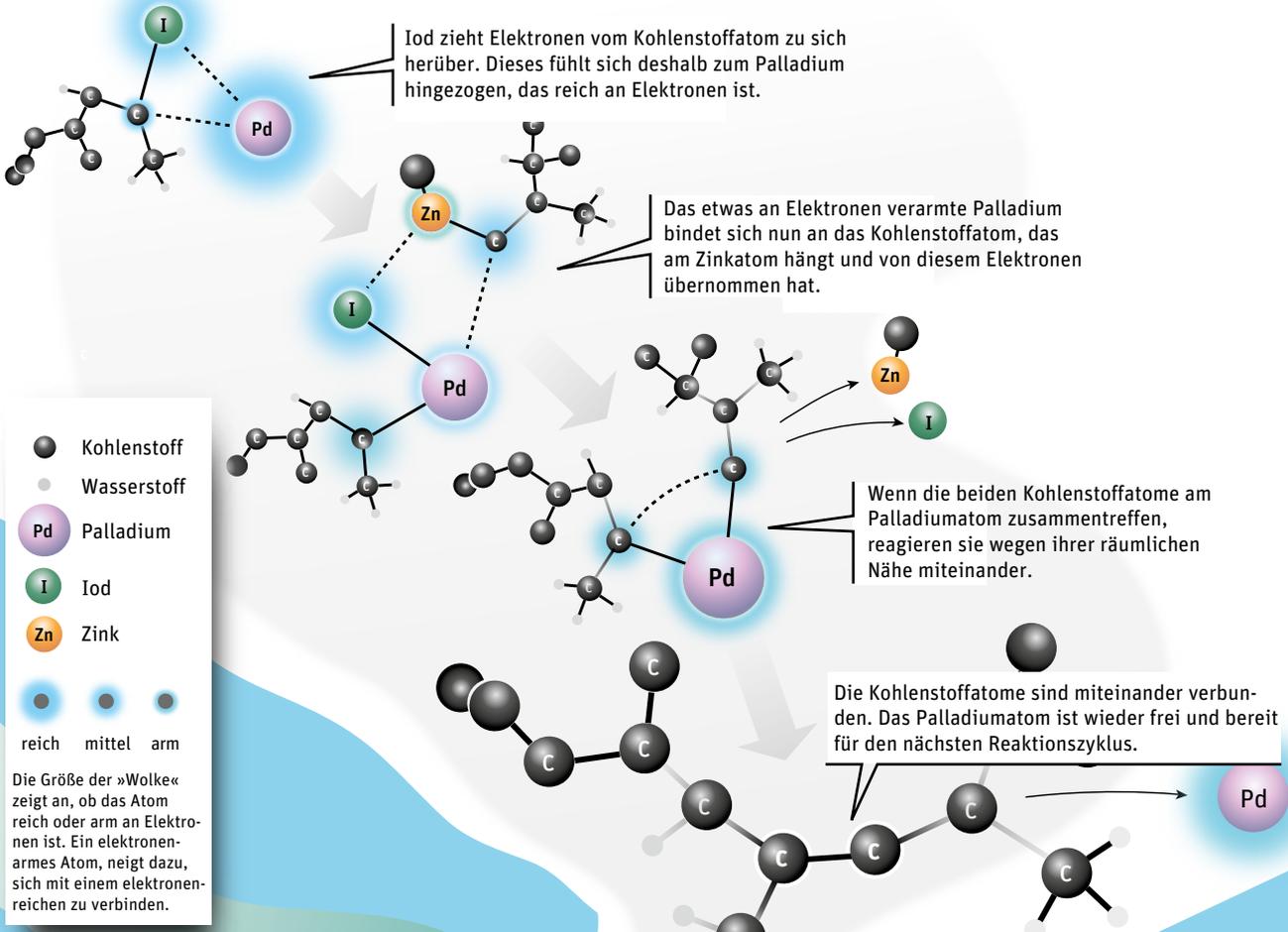
Von Michael Groß

Die Synthese neuartiger oder der Nachbau natürlich vorkommender Kohlenstoffverbindungen ist ein Kerngebiet der Chemie, das in den letzten Jahren und Jahrzehnten ein wenig in den Hintergrund gedrängt wurde. Die Natur liefert uns viele nützliche Substanzen – insbesondere auch solche, die von medizinischem Interesse sind. Die Gewinnung aus der natürlichen Quelle ist aber oft nur in kleinem Maßstab möglich. Ein in jüngster Zeit häufig beschrifteter Ausweg besteht in der biotechnologischen Herstellung mit Hilfe von genmanipulierten Mikroorganismen oder Zellkulturen. Aber auch eine chemische Synthese hat ihre Vorteile. So erlaubt sie, von der Natur nicht vorgesehene Varianten einzuführen, um dadurch etwa die

Wirksamkeit oder Spezifität eines Medikaments zu verbessern.

Der Aufbau organischer Verbindungen erfordert in der Regel, Kohlenstoffatome miteinander zu verbinden. Die aber haben dazu von sich aus wenig Neigung. Ihre Verkettung zählt deshalb nicht nur zu den wichtigsten, sondern auch zu den schwierigsten Kunststücken der organischen Synthese. Um Kohlenstoffatome zu verknüpfen, mussten Chemiker früher oft komplizierte Umwege beschreiten. In den vergangenen Jahrzehnten wurden dann einige direkte Methoden entdeckt. Trotzdem bleibt deren Anzahl überschaubar. Nach der Olefin-Metathese, die allerdings lediglich einen Partnertausch bei schon existierenden Bindungen darstellt (Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 22), ist nun ein weiteres solches Verfahren mit dem Nobelpreis gewürdigt worden.

# Mit der Negishi-Kupplung zum Antikrebsmittel



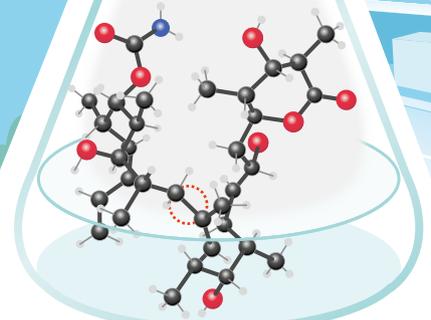
- Kohlenstoff
- Wasserstoff
- Palladium
- Iod
- Zink

● reich    ● mittel    ● arm

Die Größe der »Wolke« zeigt an, ob das Atom reich oder arm an Elektronen ist. Ein elektronen-armes Atom, neigt dazu, sich mit einem elektronen-reichen zu verbinden.

- Sauerstoff
- Stickstoff
- Kohlenstoff
- Wasserstoff

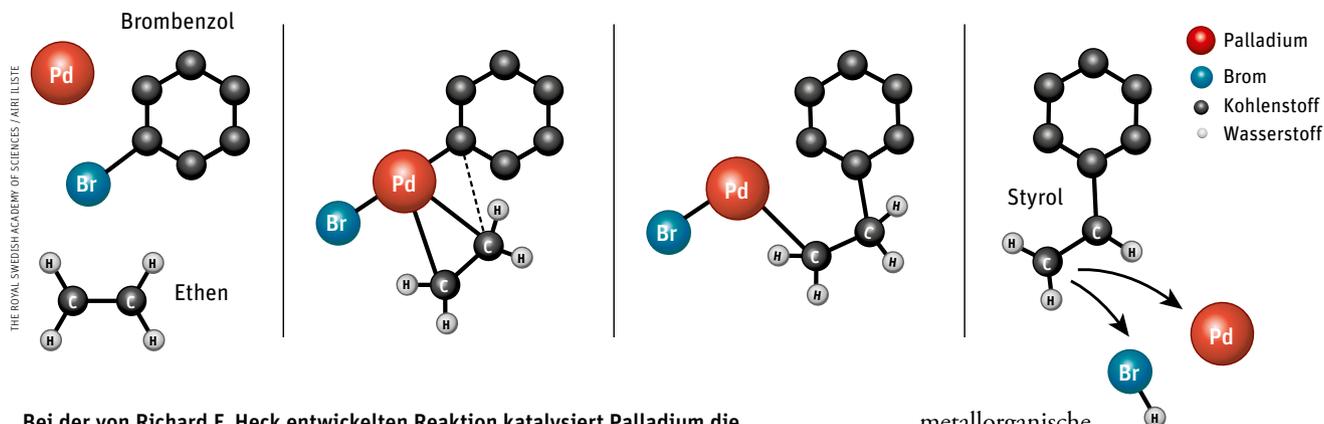
Discodermolid



*Discodermia dissoluta*

Ursprünglich wurde die Substanz Discodermolid aus einem Schwamm im Karibischen Ozean (Foto links) isoliert. Später bauten Forscher sie im Labor nach. Für einen entscheidenden Schritt (rot gestrichelt) dieser Synthese nutzten sie Negishis Variante der palladiumkatalysierten Kreuzkupplungsreaktion. Discodermolid attackiert Krebszellen auf dieselbe Weise wie Taxol, eines des wichtigsten Antikrebsmittel weltweit.

FOTO: NOAA / OER; ILLUSTRATION: THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES / AIR / ILLUSTR



Bei der von Richard F. Heck entwickelten Reaktion katalysiert Palladium die Verknüpfung eines bromierten Kohlenwasserstoffs mit einer ungesättigten Kohlenstoffverbindung. Der genaue Ablauf ist hier am Beispiel der Umsetzung von Brombenzol mit Ethen zum Styrol gezeigt.

gen experimentierte, entdeckte er 1968 eine außerordentlich nützliche und bis dahin nicht auf direktem Wege mögliche Reaktion: die Verknüpfung eines »Aromaten« – eines Kohlenstoffrings mit abwechselnden Einfach- und Doppelbindungen, die ihre Plätze tauschen können – mit einem ungesättigten linearen (»aliphatischen«) Kohlenwasserstoff (Alken). Im einfachsten Fall entsteht so aus Benzol und Ethen das Styrol, der Baustein des Kunststoffes Polystyrol, der sowohl in Plastikgefäßen als auch in aufgeschäumter Form als Styropor zum Einsatz kommt.

### Piraterie auf Molekülebene

Nach einigen Verbesserungen veröffentlichte Heck 1972 dann die Variante, die heute nach ihm benannt ist. Dabei wird der eine Reaktionspartner, der praktisch beliebiger Natur sein kann – sowohl aromatisch als auch aliphatisch –, als Bromverbindung eingesetzt. Da Brom einen starken Drang hat, seine äußere Elektronenhülle mit einem achten Elektron zu komplettieren, reißt es die gemeinsamen Bindungselektronen sozusagen an sich. Das macht das mit ihm verknüpfte Kohlenstoffatom elektronenarm (elektrophil). Das Alken mit seiner Doppelbindung (C=C) ist dagegen elektronenreich (nukleophil). Beide haben nach dem Prinzip, dass Gegensätze sich anziehen, deshalb eine natürliche Affinität zueinander. Aber erst das Palladium sorgt als Kuppler dafür, dass sie auch tatsächlich zusammenkommen.

Es ist das Verdienst von Heck, nicht nur die Reaktion gefunden und das Rezept optimiert, sondern zugleich den Mechanismus der Umsetzung aufgeklärt zu haben. Diese besteht im wesentlichen aus

drei Schritten. Zunächst reagiert die Bromverbindung mit einem Palladiumatom. Dabei schiebt sich das Metall zwischen den Kohlenwasserstoff und das Bromatom, so dass die Verknüpfung zwischen beiden schon gelöst ist. Das Alken ordnet sich dann längsseits zu dieser Dreiergruppe an – wie ein Piratenschiff, das zum Entern ansetzt. Dabei stellt es die Elektronenwolke seiner Doppelbindung dem Palladium teilweise zur Verfügung, das damit unbesetzte innere Elektronenschalen füllen kann, was eine schwache Wechselwirkung zwischen beiden ergibt.

Die räumliche Nähe begünstigt den zweiten Reaktionsschritt, die Verknüpfung eines Kohlenstoffatoms der Doppelbindung mit dem am Metall angelagerten Kohlenwasserstoff-Rest. Parallel dazu schnappt sich das Palladium das andere Ende der Doppelbindung, die bei der ganzen Aktion zur Einfachbindung degradiert wird. Es handelt sich hier um eine so genannte Insertionsreaktion, da sich die C=C-Gruppe zwischen den Kohlenwasserstoff-Rest und das Metall schiebt.

Im dritten Schritt gewinnt das Reaktionsprodukt durch Überlassen eines Wasserstoffatoms an das Palladium die Doppelbindung zurück. Über deren Elektronenwolke ist es jetzt wieder nur lose an das Edelmetallatom gebunden und kann sich von diesem leicht trennen. Am Palladium hängen danach nur noch der Wasserstoff und das Bromid, die sich zum Bromwasserstoff vereinigen und ablösen. Anschließend ist der Katalysator regeneriert, und eine neue Reaktionsrunde kann starten.

Negishi begann im Jahre 1976 damit, die Heck-Reaktion zu variieren, indem er als Nucleophil statt des Alkens eine

metallorganische Verbindung verwendete. Nach einigem Herumprobieren erkannte er, dass sich Zink-Komplexe besonders gut eignen. Die resultierende Umsetzung hat prinzipielle Ähnlichkeit mit der Grignard-Reaktion, die mit Magnesium-Verbindungen operiert und lange die einzige Möglichkeit zur direkten Verknüpfung von Kohlenstoffatomen war (Nobelpreis 1912). Allerdings ist Negishis Verfahren nicht nur spezifischer, sondern auch viel schonender und funktioniert deshalb mit einem erheblich breiteren Spektrum von Substanzen.

Mit dem Element Bor entdeckte Suzuki 1979 ein noch ideales Metall. Es bildet nur schwach nukleophile und ungewöhnlich stabile Verbindungen, die bei der Palladium-katalysierten Kupplung unter sehr milden Bedingungen äußerst selektiv reagieren. Dadurch eignet sich die Suzuki-Kupplung auch für hochempfindliche Ausgangssubstanzen, was sie für viele praktische Anwendungen vor allem in der Naturstoffsynthese attraktiv macht. Ein Vorteil ist auch die geringe Giftigkeit von Bor.

Alle drei Reaktionen werden inzwischen vielfach eingesetzt – sowohl in der Grundlagenforschung als auch im großen Maßstab in der chemischen und pharmazeutischen Industrie. Mehr als 100 publizierte Synthesen benutzen die Heck-Reaktion, darunter eine der Totalsynthesen von Taxol, bei der sie zur schwierigen Schließung des ungewöhnlichen Achtrings dient. Die Negishi-Kupplung kam unter anderem bei der Synthese des antiviralen Wirkstoffs Hennoxazol A zum Einsatz, die Suzuki-Reaktion bei derjenigen des Antibiotikums Vancomycin. Die BASF benutzt sie außerdem bei der Herstellung des Fungizids Boscalid.

**Michael Groß** ist promovierter Chemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

# Sand im Getriebe des Arbeitsmarkts

Den Preis für Wirtschaftswissenschaften der schwedischen Reichsbank im Gedenken an Alfred Nobel erhielten Peter A. Diamond, Dale T. Mortensen und Christopher A. Pissarides für die Analyse von Reibungseffekten vergeben, die das ideale Funktionieren von Märkten beeinträchtigen.

Von Christoph Pöppe

Versetzen wir uns zurück in schwarzmarktähnliche Verhältnisse. Viele Menschen haben Interesse an einer Ware, die man typischerweise nur einmal kauft, sagen wir einem Fernseher. Der wird von zahlreichen Händlern angeboten, die aber den nicht verhandelbaren Preis erst verraten, wenn man sie aufsucht und danach fragt. Dazu hat man nur einmal am Tag Gelegenheit. Die Preise sind nicht fix, sondern ändern sich täglich.

Der Kunde weiß nichts weiter über die Händler und kann sich auch mit seinesgleichen nicht verständigen. Die beste Strategie für ihn ist es deshalb, täglich nach dem Zufallsprinzip irgendeinen Händler aufzusuchen, bis der gebotene Preis ihm zusagt. Dabei sollte er sich innerlich eine Preisgrenze (einen *cut-off price*) setzen und auf jedes Angebot eingehen, das darunter liegt. Wenn er lange nichts Passendes findet, wird er seine Preisvorstellungen nach oben korrigieren oder eben aufs Fernsehen verzichten.

Vor allem wählt er seinen Grenzpreis etwas höher als den Betrag, zu dem er erwartet, ein Gerät zu finden. Schließlich will er für einen geringen und auch noch ungewissen Preisvorteil nicht endlos weitersuchen und all die Zeit ohne Fernseher verbringen. Diese vernünftige Entscheidung treffen alle anderen Interessenten auch – und stürzen sich damit kollektiv ins Unglück. Denn die Händler drehen an den Preisen und die Kunden an ihren Grenzpreisen, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat. Dieses Gleichgewicht aber entspricht dem Monopolpreis, den ein Anbieter ohne Konkurrenten verlangen kann; er liegt im Allgemeinen deutlich über dem normalen Marktpreis.

Mit diesem Ergebnis überraschte 1971 der damals 31-jährige US-Wirtschaftswissenschaftler Peter A. Diamond vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge seine Fachkollegen. Märkte mit Reibungsverlusten durch Suchen (»Markets with search friction«)



**Peter A. Diamond, Dale T. Mortensen** und **Christopher A. Pissarides** entwickelten ein Modell des Arbeitsmarktes, das zum Standard in den Wirtschaftswissenschaften geworden ist.

blieben fortan sein Thema, und seine Erkenntnisse trugen ihm nun den Wirtschaftsnobelpreis ein – gemeinsam mit seinem Landsmann Dale T. Mortensen von der Northwestern University in Evanston (Illinois) und seinem zypriotisch-britischen Kollegen Christopher A. Pissarides von der London School of Economics, mit denen er jahrzehntelang eng zusammengearbeitet hat.

## Die Physik als Vorbild

Der Ausdruck »Reibung« für alles, was dem effizienten (»reibunglosen«) Funktionieren eines Marktes im Wege steht, leuchtet unmittelbar ein, und am liebsten würden die Ökonomen damit so umgehen wie die Physiker. Die verstehen darunter eine rein empirisch ermittelte Kraft, die mit der Geschwindigkeit zunimmt und mit einem geeigneten Proportionalitätsfaktor die Realität gut beschreibt. Wie sie durch das Verhalten der mikroskopischen Oberflächenrauigkeiten der reibenden Flächen zu Stande kommt, ist eine zweitrangige Frage.

Eine solche »mikroskopische« Erklärung hatte Diamond mit seinem Schwarzmarktmodell unternommen und dabei etliche wenig plausible Annahmen gemacht, die nur dadurch zu rechtfertigen sind, dass man gut damit rechnen kann. Seiner Realitätsferne zum Trotz lieferte das Modell einen großen Erkenntnisge-

winn: Es zeigte, dass eine beliebig kleine Reibung eine sprunghafte Zustandsänderung – vom Gleichgewichtspreis eines effizienten Marktes zum Monopolpreis – bewirken kann.

Die Ursachen der ökonomischen Reibungseffekte sind zu vielfältig, um sich allesamt mathematisch modellieren zu lassen. Im eingangs zitierten Beispiel hindert der mangelhafte Informationsfluss den Markt daran, effizient im Sinn der Theorie zu funktionieren; in einem anderen existiert dieser Markt gar nicht, weil die dort feilzubietenden Waren erst noch produziert werden müssen. Wieder ist das Szenario etwas exotisch.

Die Bewohner einer einsamen Insel ernähren sich von Kokosnüssen, aber ein Tabu verbietet ihnen den Verzehr selbstgepflückter Früchte. Sie werden also die beträchtliche Mühe, eine Palme zu erklettern, nur auf sich nehmen, wenn sie für ihre Nüsse Tauschpartner finden. In dieser Situation gibt es abweichend von der klassischen Theorie gleich mehrere ökonomische Gleichgewichtszustände: Wenn alle Inselbewohner auf dem Boden sitzen und hungern, besteht für keinen ein Anreiz, ihr Verhalten zu ändern. Das gleiche gilt für den Zustand der Vollbeschäftigung, in dem alle fleißig auf die Palmen klettern und in Saus und Braus leben.

Eine kleine Änderung holt das »Diamond coconut model« von der fernen In-

## Springers Einwürfe

### Folgt Politik Gesetzen?

Umriss einer sozialen Evolutionstheorie

**Politisches Handeln gleicht dem Stochern im Nebel.** Experten liefern Politikern Prognosen, aber die sind laut Karl Valentin besonders schwierig, wenn sie die Zukunft betreffen. Auch der Blick in die Vergangenheit hilft wenig, weil ihn ideologische Voreingenommenheit trübt. Kann es überhaupt eine Wissenschaft der Politik geben?

In den 1950er Jahren malte sich der Sciencefiction-Autor Isaac Asimov die »Psychohistorik« aus, mit deren Hilfe ein fiktiver Zukunftsforscher den baldigen Zerfall seiner galaktischen Zivilisation vorherzusagen vermag. Asimov skizzierte seine politische Wissenschaft nach dem Vorbild der statistischen Thermodynamik: Den Atomen entsprechen die sozialen Individuen, und deren kollektives Verhalten soll sich ähnlich vorhersagen lassen wie Druck und Temperatur eines Gases.

Etwas später spekulierte der polnische Autor Stanislaw Lem, die seinerzeit moderne Kybernetik könnte zur Erklärung und Steuerung politischer Prozesse beitragen. Auch über diese utopische Idee ist die Zeit hinweggegangen.

Jetzt hat ein Team um die britischen Anthropologen Thomas E. Currie und Ruth Mace den Versuch unternommen, empirische Methoden der Evolutionstheorie auf soziale Systeme anzuwenden. Dazu erstellten die Forscher einen Stammbaum der riesigen austronesischen Sprachfamilie, die sich um 3200 v. Chr. von Taiwan aus über die Philippinen und Indonesien bis nach Südostasien, die pazifischen Inseln und Neuseeland ausgebreitet hat. Heute umfasst sie 1200 Sprachen, die von ganz unterschiedlichen Gesellschaften verwendet werden – von führerlosen, egalitären Gruppen über Stammesfürstentümer bis zu hierarchischen Staatsgebilden (*Nature*, Bd. 467, S. 801).

**Aus den phylogenetischen Daten rekonstruierten die Forscher**, wie die Gesellschaftsformen einander historisch folgten: Gab es große Sprünge von ganz einfachen Verwandtschaftsgruppen zu hochkomplexen Staaten? Schritt die Entwicklung immer von simplen zu hierarchischen Formen fort, oder kamen auch Rückfälle vor?

Die Antwort: Höherentwicklung verläuft niemals sprunghaft, sondern immer graduell. Eine führerlose Verwandtengruppe schafft unter keinen Umständen den Sprung zum komplexen Fürstentum; ebenso wenig wird ein einfacher Stamm direkt zum Staat. Alle evolutionären Zwischenschritte sind nötig. Stets geht es – wenn eine Höherentwicklung stattfindet – von der Gruppe zum einfachen Stamm, von dort zum komplexen Stammesfürstentum und schließlich zum hierarchischen Staat.

Doch die soziale Evolution ist keine Einbahnstraße. Immer wieder kommt es zu politischen Rückfällen: Staaten können durchaus wieder in Stämme zerfallen – oder noch weiter zurück in simple Gruppen. Manchmal geschieht das relativ sanft, als stille Auflösung einer etablierten Hierarchie, manchmal aber auch gewaltsam als katastrophaler Sturz eines mächtigen Reichs. Offenbar ist die Zunahme von Komplexität immer ein umständlicher, zeitaufwändiger Prozess – in der Sozialsphäre ebenso wie in der biologischen Evolution. Hingegen kann der Einsturz eines hoch aufgetürmten und diffizil strukturierten Gesellschaftsgebildes manchmal das Werk eines historischen Augenblicks sein.

Der enorme Forschungsaufwand der britischen Gruppe hat damit erstmals zuverlässige Aussagen über politische Evolutionsprozesse erbracht. Natürlich folgt aus so allgemeinen Resultaten zunächst nicht viel für die konkrete Tagespolitik. Immerhin lässt sich eines lernen: Jedes komplexe Staatsgebilde ist Produkt eines langen, etappenreichen historischen Entwicklungsvorgangs, aber das bietet keine Gewähr dafür, dass es ebenso lange weiter bestehen wird.



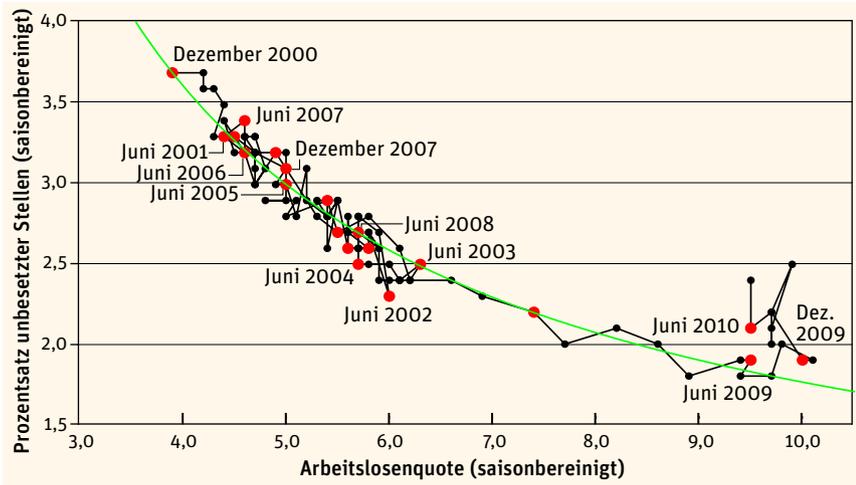
Michael Springer

sel in die moderne Industriegesellschaft: Die Produkte sind nicht alle gleich, aber nach wie vor orientieren sich die Produzenten an der Menge, die sie erwarten absetzen zu können. Die wiederum ist proportional der Kaufkraft und damit der Aktivität der anderen Hersteller. Damit wird der kollektive Arbeitseinsatz aller Produzenten Gegenstand einer Selffulfilling Prophecy. Auch in diesem Fall existieren verschiedene Gleichgewichte.

Während sich der Staat nach der klassischen Theorie aus allen Märkten möglichst herauszuhalten hat, liefert das *cocoon model* einen guten Grund für sein Eingreifen: Er soll und kann die Wirtschaft von einem ungünstigen zu einem wünschenswerten Gleichgewicht treiben – etwa durch eine Ankaufgarantie für Kokosnüsse. Indem Diamond, Mortensen und Pissarides die Insulaner in Kokosnussbesitzer (»Beschäftigte«) und Palmsucher (»Arbeitslose«) einteilen und plausible Bedingungen für den Übergang vom einen zum anderen Zustand aufstellten, gelangten sie zu dem überaus einflussreichen Modell des Arbeitsmarkts, das heute ihre Initialen trägt: DMP-Modell.

Auch bei florierender Wirtschaft ist ein erheblicher Teil der Erwerbsfähigen ohne Arbeit. Die neoklassische Theorie führt das auf die marktverzerrende Wirkung von Institutionen wie Tarifbindung, Kündigungsschutz und Arbeitslosengeld zurück. Nach deren Abschaffung sollten die Löhne auf das (Gleichgewichts-)Niveau sinken, das jedem, der zu diesem Lohn noch arbeiten will, auch Arbeit verschafft. Laut DMP-Modell ist dieser Schluss nicht zwingend, wenn Reibung im System steckt.

Und das ist allein schon deshalb der Fall, weil es Zeit und Mühe kostet, zu einem Bewerber einen passenden Job zu finden oder umgekehrt. Da man die Verschiedenheit der Menschen und der Arbeitsanforderungen schlecht mathematisch erfassen kann, ist das eingangs beschriebene Schwarzmarktmodell ein durchaus plausibler zweitbesten Ansatz: Erst wenn sich Kandidat und Arbeitgeber begegnen, können sie feststellen, ob ein Arbeitsvertrag für beide ein Geschäft ist. Den Zugewinn daraus teilen sich die zwei Parteien nach einer Formel, die von der Stärke ihrer jeweiligen Verhandlungsposition (*bargaining power*) abhängt. Löhne können jederzeit neu ausgehandelt werden, Kündigungsschutz gibt es nicht;



CHRISTOPH PÖPPE NACH U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS

Arbeitslosigkeit und offene Stellen können in erheblichem Umfang koexistieren. Die Daten des US-Arbeitsmarkts aus den letzten zehn Jahren folgen sogar ziemlich genau einer theoretischen Kurve (grün), die nach dem britischen Ökonomen William Beveridge (1879–1963) benannt ist. Nur für die Abweichung nach oben im Gefolge der aktuellen Finanzkrise gibt es noch keine Erklärung.

man trennt sich – ohne Abfindung –, wenn die Stelle der Firma nichts mehr einbringt. Immerhin ist das Arbeitslosengeld Bestandteil des Modells: Es zählt ebenso wie die Gelegenheit zur Hausarbeit, zum Ausschlafen und zu anderen nützlichen oder erfreulichen Tätigkeiten zu den Vorteilen der Nichtbeschäftigung, welche die Verhandlungsposition des Kandidaten verbessern.

In diesem ziemlich frühkapitalistischen Modell besteht der Reibungseffekt darin, dass Versuche zur Paarung von Mensch und Job nicht unbedingt häufig stattfinden oder gar Erfolg haben. Das gilt umso mehr, je weniger Kandidaten und je weniger freie Stellen es gibt.

Diamond, Mortensen und Pissarides gehen noch einen Abstraktionsschritt weiter. Sie modellieren die Gesamtheit der Arbeitsfähigen durch ein Kontinuum, vergleichbar einer Flüssigkeit, die von dem Becken A der Arbeitsuchenden in das Becken B der Beschäftigten strömen kann und umgekehrt. Wie weit das Ventil für den Fluss von A nach B geöffnet ist, hängt, wie Diamond, Mortensen und Pissarides mit einigen Zusatzannahmen zeigen, von einer einzigen Größe ab: der Angespanntheit (*tightness*) des Arbeitsmarkts, also dem Verhältnis von offenen Stellen zu Arbeitsuchenden. Je mehr Jobs

ein Kandidat zur Auswahl hat, desto enger ist das Ventil eingestellt; doch bei genügend Druck, das heißt einer hohen Zahl an Arbeitsuchenden, lässt es immer noch relativ viel Flüssigkeit durch. All das zusammen ergibt das DMP-Modell.

Die Ökonomen konnten dieses Modell – ganz wie die Physiker das Reibungsgesetz – unter Anpassung einiger Parameter an der Realität verifizieren und sogar für Prognosen nutzen. Offenbar bildet es die ökonomischen Vorgänge so gut ab, dass es heute allgemein als *benchmark model* gilt, also als der theoretische Ansatz, an dem sich alle anderen zu messen haben. Insbesondere erklärt es auch ohne Arbeitsschutzmaßnahmen, dass Arbeitslose und – dazu passende – offene Stellen in erheblicher Anzahl koexistieren können (Bild). Viele Varianten des *benchmark model*, die für Arbeitsmärkte mit Besonderheiten entwickelt wurden, unterstreichen seine Brauchbarkeit.

Schon vor der Vergabe des Nobelpreises hatte sich also die Leistung der Preisträger in der Fachwelt herumgesprochen – andernorts weniger. Anfang August widersprach der US-Senat der Nominierung von Peter Diamond für einen der freien Posten im Vorstand der amerikanischen Notenbank durch Präsident Barack Obama. Die Begründung, es mangle dem Kandidaten an Erfahrung in Makroökonomie und vor allem in Geldpolitik, ist einigermaßen kurios – hat Diamond doch einen wesentlichen Teil seines Berufslebens der Theorie und Praxis der Sozialversicherungssysteme gewidmet und auch den derzeitigen Notenbankchef, Ben Bernanke, bei der Promotion betreut.

**Christoph Pöppe** ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

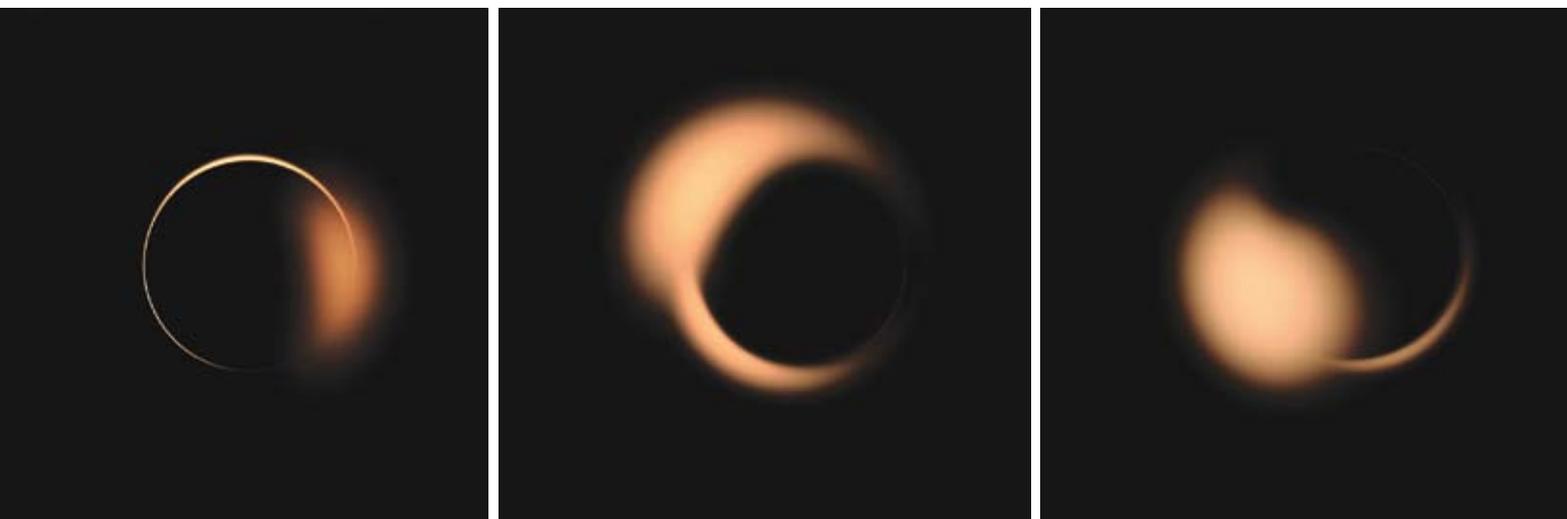
# DIE SPEKTRUM SAMMELKASSETTE



Die Sammelkassette von **Spektrum** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte. Sie können darin alle Ihre **Spektrum**-Hefte und -Sonderhefte aufbewahren. Die stabile Sammelkassette ist aus schwarzem Kunststoff und kostet € 9,50 (zzgl. Inlandsversand).

[www.spektrum.com/sammeln](http://www.spektrum.com/sammeln)

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel.: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751 | service@spektrum.com



# Schattenrisse

Die gewaltige Schwerkraft dieser kosmischen Mahlströme lässt nicht einmal Licht aus ihrem Bannkreis entkommen. Dennoch sollen weltweit vernetzte Radioteleskope demnächst den Schatten eines Schwarzen Lochs vor dem kosmischen Hintergrund abbilden.

Von Avery E. Broderick  
und Abraham Loeb

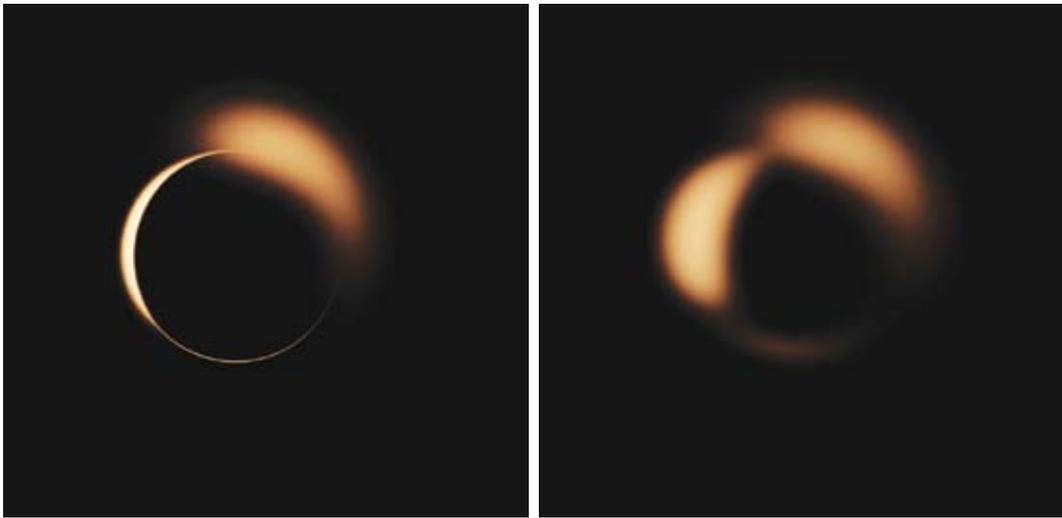
**A**ngenommen, ein Raumfahrer reist ins Zentrum der Milchstraße, wo sich ein gewaltiges Schwarzes Loch mit 4,5 Millionen Sonnenmassen namens Sagittarius A\* – kurz Sgr A\* – verbirgt. Während er sich dem Loch bis auf 10 Millionen Kilometer nähert, verlangsamten sich allmählich seine Funksprüche, seine Stimme wird tiefer und leiser, und schließlich kommt auf der Erde nur noch ein kaum hörbares monotones Flüstern an. Sein Abbild auf irdischen Fernsehschirmen wird zunehmend röter und schwächer, bis es an der Grenze des Schwarzen Lochs, dem so genannten Ereignishorizont, scheinbar für immer erstarrt.

Der Raumfahrer selbst erlebt hingegen keine Verlangsamung der Zeit und sieht am Ort des Ereignishorizonts nichts Ungewöhnliches. Dass er eine Grenze überschritten hat, weiß er nur, weil er uns sagen hört: »Hallo, der Empfang wird jetzt sehr schlecht.« Seine letzten

Eindrücke vermag er uns nicht mehr mitzuteilen, denn nichts, nicht einmal Licht, kann dem extremen Sog der Schwerkraft innerhalb des Ereignishorizonts entkommen. Eine Minute, nachdem er in den Horizont eingedrungen ist, zerreißen ihn die dort herrschenden Gravitationskräfte.

In Wirklichkeit sind solche Reisen unmöglich, doch Astronomen haben Methoden entwickelt, mit denen sie bald zum ersten Mal Bilder der dunklen Silhouette eines Schwarzen Lochs vor dem Hintergrund von heiß glühendem Gas aufnehmen werden.

Halt, werden Sie sagen. Haben Astronomen nicht schon öfters über Beobachtungen Schwarzer Löcher berichtet und alle möglichen Bilder geliefert? Das stimmt, aber diese Aufnahmen zeigen Gas oder anderes Material in der Nähe eines Schwarzen Lochs – mit dem Loch selbst als unsichtbarem Fleck – oder gewaltige Energieströme, die vermutlich von solchen Objekten ausgehen. Eigentlich wissen wir nicht einmal genau, ob Schwarze Löcher tatsächlich existieren (siehe »Schwarze Sterne an Stelle Schwarzer Löcher?«



Wie diese Computersimulationen könnte die dunkle Scheibe des Schwarzen Lochs im Zentrum der Milchstraße aussehen, wenn ein Netzwerk von Radioteleskopen 2011 mit den Beobachtungen beginnt. Von der intensiven Gravitation des Lochs eingefangenes heißes Gas umstrahlt den Ereignishorizont, während interstellares Gas unterwegs die feineren Details trübt.

AMEY E. BRODERICK

# Schwarzer Löcher

von Carlos Barceló et al., Spektrum der Wissenschaft 2/2010, S. 24).

Die Astronomen haben Himmelsobjekte entdeckt, die so massereich und so klein sind, dass sie, wenn Einsteins allgemeine Relativitätstheorie zutrifft, Schwarze Löcher sein müssen, und man hat sich angewöhnt, sie so zu bezeichnen. Doch bis jetzt wissen wir nicht, ob diese Objekte die dafür entscheidende Eigenschaft haben: einen Horizont, der Material nur in einer Richtung durchlässt. Das ist keine nebensächliche Frage; sie hängt mit einem der größten Rätsel der theoretischen Physik zusammen.

## Behält Einstein Recht?

Der Ereignishorizont verdeutlicht eine grundlegende Unstimmigkeit zwischen zwei großen Errungenschaften der modernen Physik: Quantenmechanik und allgemeine Relativitätstheorie. Die quantenmechanische Beschreibung physikalischer Systeme ist zeitlich reversibel; zu jedem Quantenvorgang gibt es einen umgekehrten Prozess, mit dem sich im Prinzip jede Information, die der ursprüngliche Vorgang zerhackt hat, wiedergewinnen lässt. Hingegen erlaubt die allgemeine Relativitätstheorie – welche die Gravitation als Krümmung des Raums erklärt und die Existenz Schwarzer Löcher vorhersagt – keinen Umkehrprozess, der etwas zurückbringt, wenn es einmal in ein Schwarzes Loch gefallen ist. Nicht zuletzt um diesen Gegensatz aufzulösen, suchen die Stringtheoretiker nach einer

Quantentheorie der Gravitation; sie würde die Eigenschaften der Schwerkraft aus Wechselwirkungen erklären, die den Gesetzen der Quantenmechanik gehorchen.

Im Grund möchten die Physiker wissen, ob Einsteins allgemeine Relativitätstheorie die echte Theorie der Gravitation ist, obgleich sie schockierende Abweichungen von der klassischen Theorie Newtons vorhersagt – zum Beispiel die Existenz von Ereignishorizonten. Schwarze Löcher haben einerseits den Vorzug, dass sie besonders einfachen Lösungen der einsteinschen Gravitationsgleichungen entsprechen: Ein Schwarzes Loch wird durch nur drei Zahlen vollständig charakterisiert – seine Masse, seine Ladung und seinen Drehimpuls. Andererseits unterscheidet sich dort die Gravitation am stärksten von der newtonschen Theorie. Darum sind Schwarze Löcher besonders geeignet, in Abweichungen von den einsteinschen Gleichungen unter extremen Bedingungen Hinweise auf eine Quantentheorie der Gravitation zu finden.

Auch verlangen die Vorgänge in der Nähe solcher Gebilde dringend nach einer astrophysikalischen Erklärung. Schwarze Löcher werden durch einfallende Materie – Gas und Staub – gespeist. Während dieses Akkretionsmaterial auf den Horizont des Lochs zustürzt, gewinnt es ungeheuer viel Energie und erzeugt 20-mal so effizient Wärme wie die Kernfusion, die zweitstärkste bekannte Energiequelle. Die von dem heißen rotierenden Gas emittierte Strahlung macht die Umgebungen

## In Kürze

► **Schwarze Löcher** zählen zu den unfassbarsten Objekten im Universum. Bisher konnten die Astronomen sie nur indirekt beobachten – anhand ihrer Gravitationswirkung auf Sterne und durch die Strahlung, die das auf sie einstürzende heiße Gas emittiert.

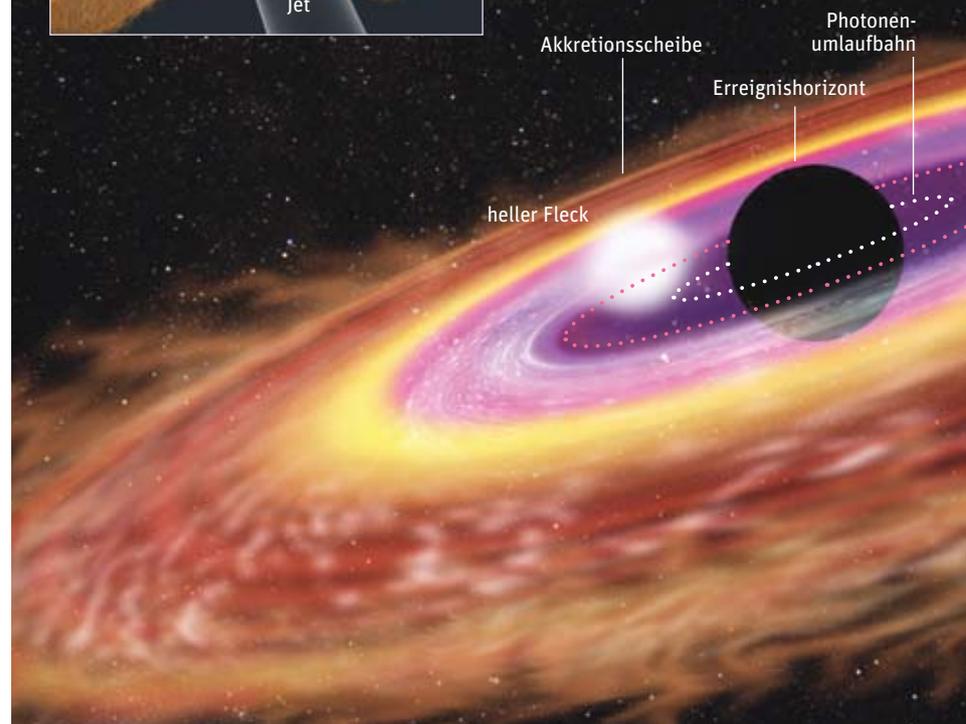
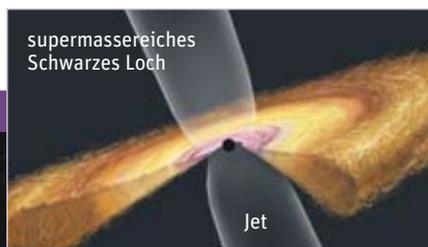
► Derzeit richten Astronomen ein **Netzwerk von Radioteleskopen** ein, um die supermassereichen Schwarzen Löcher, die im Zentrum der Milchstraße und der Galaxie M87 liegen, direkt abzubilden.

► **Direktaufnahmen** Schwarzer Löcher würden nicht nur viele ungewöhnliche Phänomene klären, sondern auch Einsteins allgemeine Relativitätstheorie einem strengen Test bei extrem gekrümmter Raumzeit unterwerfen.

## DIE HÖHLE DES MONSTERS

**Jedes Schwarze Loch hat einen Ereignishorizont** – die kugelförmige Grenze des Gebiets, aus dem nichts der Schwerkraft des Lochs zu entkommen vermag. Gas sammelt sich in einer heißen, leuchtenden Akkretionsscheibe, in der vorübergehend besonders helle Flecken aufscheinen. Die Scheibe ist oft so dünn wie hier abgebildet; sie kann sich aber auch über einen großen Winkel über und unter der Rotationsebene sowie über einen viel weiteren Radius erstrecken. Viele supermassereiche Löcher emittieren leuchtende Materieströme, so genannte Jets, die fast Lichtgeschwindigkeit erreichen.

Der Innenrand der Akkretionsscheibe liegt nahe der innersten stabilen Kreisbahn. Materie, die dem Loch noch näher kommt, gerät in eine instabile Umlaufbahn und stürzt rasch ins Loch. Auf der so genannten Photonenumlaufbahn könnte Licht im Prinzip das Schwarze Loch ewig umkreisen, doch in der Praxis schießt schon die kleinste Störung das Licht auf eine Spiralbahn nach innen oder außen.



Schwarzer Löcher zu den hellsten Objekten im Universum.

Astrophysiker können das Akkretionsmaterial einigermaßen im Modell verfolgen, aber noch ist unklar, wie das Gas mit dem Akkretionsfluss von einer Umlaufbahn mit großem Radius in die Nähe des Horizonts wandert und wie es letztlich in das Schwarze Loch fällt. Dabei müssen durch geladene Teilchen erzeugte Magnetfelder eine wichtige Rolle spielen, doch über deren Struktur und Wirkung wissen wir wenig. Zwar lässt sich das gesamte Akkretionsgebiet grob im Computer simulieren, aber von echten Berechnungen sind die Theoretiker noch Jahrzehnte entfernt. Um neue Ideen zu gewinnen und zwischen konkurrierenden Modellen zu entscheiden, brauchen wir mehr Beobachtungsdaten.

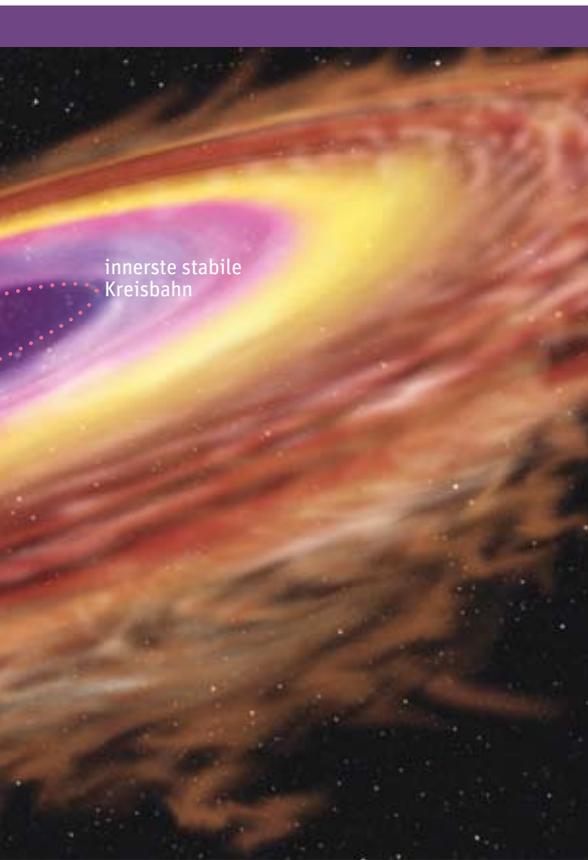
Für Astrophysiker besonders peinlich ist das mangelnde Wissen über die Materieströme, die durch die in der Nähe supermassereicher Löcher wirkenden Kräfte mit bis zu 99,98 Prozent der Lichtgeschwindigkeit ausgespiert werden. Obwohl diese Jets Entfernungen überwinden, die größer sind als ganze Galaxien, entstehen sie als scharf gebündelte Strahlen, die ohne Weiteres durch das Nadelöhr unseres Sonnensystems passen würden. Weder wissen wir, was die Jets so enorm beschleunigt, noch woraus sie bestehen – ob aus

Elektronen und Protonen, aus Elektronen und Positronen, oder hauptsächlich aus elektromagnetischen Feldern. Darum brauchen die Astronomen dringend direkte Beobachtungen des Gases in der Nähe eines Schwarzen Lochs.

### Ein kosmisches Versteckspiel

Leider gelingen solche Beobachtungen aus mehreren Gründen nur schwer. Erstens sind Schwarze Löcher für astronomische Verhältnisse extrem klein. Anscheinend gibt es zwei Arten: zum einen stellare Löcher – die Überbleibsel erloschener Sterne mit 5 bis 15 Sonnenmassen –, zum anderen supermassereiche Schwarze Löcher in Galaxienzentren, die das Millionen- bis Zehnmillardenfache der Sonne wiegen. Der Durchmesser des Ereignishorizonts eines Lochs mit 15 Sonnenmassen beträgt nur 90 Kilometer – auf interstellare Entfernungen praktisch unerkennbar. Selbst ein Monster mit einer Milliarde Sonnenmassen würde bequem in die Neptunbahn passen.

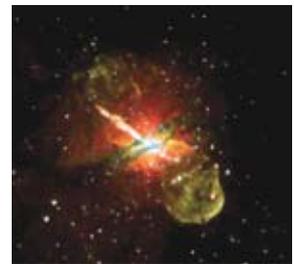
Zweitens sorgen Kompaktheit und intensive Schwerkraft für extrem schnelle Bewegung. Die Materie in großer Nähe eines stellaren Schwarzen Lochs kann in weniger als einer Mikrosekunde (millionstel Sekunde) einen Umlauf vollenden. Nur hochempfindliche Instrumente vermögen derart rapide Vorgänge aufzuzeichnen. Außerdem sind bloß



DON DIXON/EINLICKER OBER: JEN CHRISTIANSEN

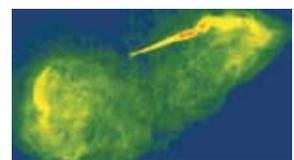
## FERNE ANZEICHEN FÜR SCHWARZE LÖCHER

Astrophysiker glauben, dass weit entfernte Schwarze Löcher, die selbst nicht zu sehen sind, sich durch Röntgenemissionen oder durch den Ausstoß gewaltiger Materieströme – so genannter Jets – verraten.



SCIENCE SOURCE

Das vom Röntgensatelliten Chandra aufgenommene Bild der Galaxie Centaurus A zeigt einen 13 000 Lichtjahre langen Jet, den das im Zentrum vermutete supermassereiche Schwarze Loch emittiert. Die sternähnlichen Flecken sind stellare Löcher, welche die Materie von Begleitsternen aufzehren. Rot, Grün und Blau bedeuten drei Röntgenbereiche.



NRAD / NSF

Das mutmaßliche supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie M 87 ist von Gaswolken umgeben, die sich über rund 15 000 Lichtjahre ausbreiten, und schießt einen ultrarelativistischen Jet in unsere Richtung. Vermutlich jagt ein unsichtbarer Gegenjet Materie in die andere Richtung. Das Very Large Array in New Mexico nahm dieses Bild bei Zwei-Zentimeter-Radiowellen auf. Die Farben zeigen die Intensität des Signals an.

tätstheorie geprägt sein. Zum Beispiel fluktuiert die Stärke der Röntgenemissionen einiger stellarer Löcher fast periodisch in einem Tempo, das auf Umlaufbahnen am Innenrand der Akkretionsscheibe hindeutet.

Den bisher ergiebigsten Zugang zu supermassereichen Schwarzen Löchern bietet die Fluoreszenz von Eisenatomen an der Oberfläche der Akkretionsscheibe. Die schnelle Bewegung der Scheibe und die starke Schwerkraft des Lochs verschieben und verschmieren die charakteristische Wellenlänge der Fluoreszenz. In der Nähe eines rasch rotierenden Schwarzen Lochs umkreist auch die Akkretionsscheibe selbst das Loch schneller – infolge des so genannten Lense-Thirring-Effekts, wonach die Rotation eines schweren Körpers quasi den umgebenden Raum mitzieht –, und dadurch wird die Emission auf charakteristische Weise asymmetrisch. Die japanischen Satelliten ASCA und Suzaku haben solche Emissionen beobachtet. Das interpretieren die Astronomen als direkten Hinweis auf schnell rotierende Löcher mit Umlaufgeschwindigkeiten bis zu einem Drittel der Lichtgeschwindigkeit in der Akkretionsscheibe.

Auskunft über den Drehimpuls stellarer Schwarzer Löcher geben Binärsysteme, in denen ein Schwarzes Loch und ein gewöhnlicher Stern einander so eng umkreisen, dass das Loch allmählich seinen Begleiter aufzehrt. Die Analyse der Röntgenspektren und Umlaufparameter einiger solcher Systeme ergibt, dass die Löcher 65 bis 100 Prozent des maximalen Drehimpulses haben, den die allgemeine Relativitätstheorie für ein Loch mit gegebener Masse zulässt; sehr hoher Drehimpuls scheint die Regel zu sein.

Schwarze Löcher emittieren nicht nur Strahlung – von Radiowellen bis zu Röntgenstrahlen – und energiereiche Jets. Wenn zwei Löcher kollidieren, erschüttern sie die umgebende Raumzeit und erzeugen Gravitationswellen, die sich ausbreiten wie Wasserwellen in einem Teich. Diese Raumzeitschwingungen sollten über riesige Entfernungen nachweisbar sein – allerdings nur mit unglaublich empfindlichen Instrumenten.

Keines der bisher beschriebenen Verfahren liefert ein Bild des Ereignishorizonts, doch nun steht eine Direktaufnahme des kosmischen Mahlstroms Sgr A\* unmittelbar bevor. Er liegt nur 24 000 Lichtjahre entfernt und nimmt am Himmel die größte Scheibe unter allen bekannten Schwarzen Löchern ein. Ein Loch mit zehn Sonnenmassen müsste 100-mal näher sein als der nächste Stern, um so groß zu erscheinen. Zwar gibt es viel größere supermassereiche Löcher als Sgr A\*, aber die sind Millionen Lichtjahre entfernt.

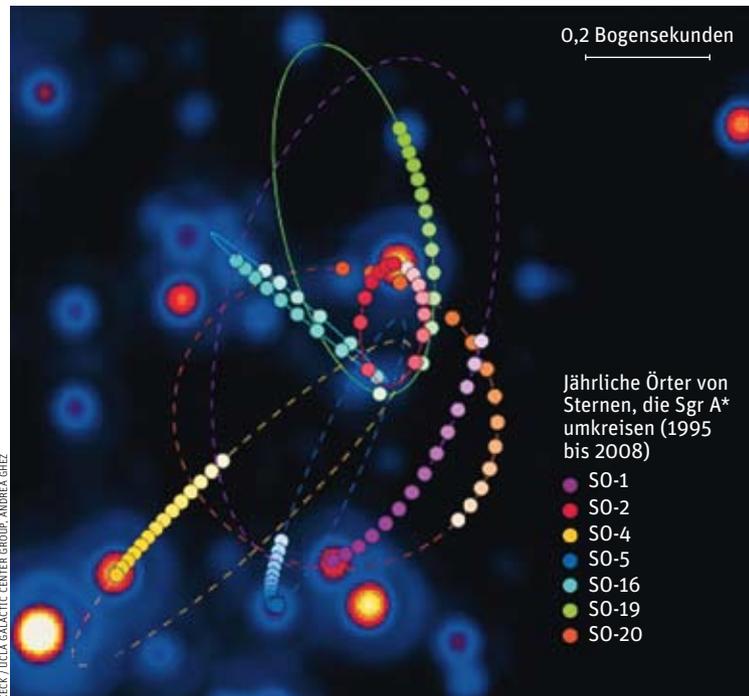
die wenigen Löcher, in deren Umgebung viel Gas für die Akkretion zur Verfügung steht, überhaupt sichtbar; die allermeisten in der Milchstraße bleiben vorerst unentdeckt.

Trotzdem haben Astronomen verschiedene Techniken entwickelt, die zwar keine Direktaufnahmen liefern, aber immerhin Daten über die eng um mutmaßliche Schwarze Löcher kreisende Materie. Beispielsweise kann man die Größe eines supermassereichen Lochs durch Beobachten benachbarter Sterne abschätzen, so wie man aus den Planetenbahnen auf die Masse der Sonne schließt. In fernen Galaxien lassen sich einzelne Sterne in der Nähe eines supermassereichen Lochs nicht auflösen, aber ihr Spektrum zeigt ihre Geschwindigkeitsverteilung an – und diese wiederum die Masse des Lochs. Das supermassereiche Schwarze Loch Sgr A\* im Zentrum der Milchstraße ist hingegen so nahe, dass Teleskope dort einzelne Sterne verfolgen können; das liefert die bislang beste Schätzung für die Masse eines Schwarzen Lochs überhaupt (siehe Kasten S. 28).

Leider liegen diese Sterne weit außerhalb der für uns interessanten Randzone, wo allgemein relativistische Effekte bedeutsam werden. Doch auch der zeitliche Verlauf der in Nähe eines Schwarzen Lochs emittierten Strahlung kann durch die allgemeine Relativi-

## EIN RIESE WIRD EINGEKREIST

Den Ereignishorizont des Schwarzen Lochs Sgr A\* konnten Astronomen bis vor Kurzem nur indirekt anhand der Sternbewegungen nahe dem Zentrum der Milchstraße beobachten. Die Sternbahnen (gestrichelte Linien) enthüllen, dass sie im Bann eines sehr kompakten Objekts mit 4,5 Millionen Sonnenmassen stehen. Die Farbpunkte markieren die Sternörter in den Jahren 1995 bis 2008. Den Hintergrund bildet ein Infrarotbild von 2008. Der Stern SO-16 kommt zwar Sgr A\* am nächsten – bis auf sieben Lichtstunden –, doch selbst dieser Abstand ist noch 600-mal größer als der Radius des Ereignishorizonts.



Infolge der Krümmung der Lichtstrahlen durch die Schwerkraft eines fernen Schwarzen Lochs erscheint seine dunkle Silhouette mehr als doppelt so groß. Dennoch erstreckt sich der Horizont von Sgr A\* scheinbar nur über 55 Mikrobogensekunden (millionstel Bogensekunden) – wie ein Mohnkörnchen in Lissabon, das man von Moskau aus betrachtet.

Das Auflösungsvermögen jedes Teleskops wird prinzipiell durch Beugung begrenzt – einen wellenoptischen Effekt, der auftritt, wenn Licht die durch die Größe des Teleskops vorgegebene endliche Apertur passiert. Im Allgemeinen lässt sich der kleinste Winkel, den ein Teleskop auflösen vermag, verringern, indem man das Teleskop vergrößert oder indem man kurzwelligeres Licht einfängt. Bei infraroten Wellenlängen – die den Vorteil haben, dass sie die Staubwolken durchdringen, die Sgr A\* bei sichtbaren Wellenlängen verbergen – würde eine Winkelauflösung von 55 Mikrobogensekunden ein Teleskop mit sieben Kilometer Durchmesser erfordern. Die kürze-

ren Wellenlängen von sichtbarem oder ultraviolettem Licht würden diese monströse Anforderung nur unwesentlich reduzieren. Längere Wellenlängen kommen erst recht nicht in Frage: Für Millimeter-Radiowellen wäre eine Apertur von 5000 Kilometern nötig. Doch so unglaublich es klingt, Radioteleskope von der Größe der Erde sind bereits in Betrieb.

Eine Technik namens *very long baseline interferometry* (VLBI, Interferometrie mit sehr langer Grundlinie) kombiniert die Signale einer über den ganzen Globus verteilten Anordnung von Radioteleskopen, um die Winkelauflösung einer Radioschüssel von der Größe der Erde zu erreichen. Zwei derartige Teleskopanordnungen oder Arrays arbeiten seit mehr als zehn Jahren: das Very Long Baseline Array (VLBA) in den USA, mit Schüsseln von Hawaii bis New Hampshire, und das European VLBI Network (EVN) mit Schüsseln in China, Südafrika, Puerto Rico und Europa. Ein viel kleineres System, das Very Large Array in New Mexico, war in Spielfilmen wie »Contact« und »2010: Das Jahr, in dem wir Kontakt aufnehmen« zu sehen.

### Zwei schmale Beobachtungsfenster

Leider eignen sich VLBA und EVN nur für Radiowellenlängen oberhalb 3,5 Millimeter; das entspricht einer Auflösung von bestenfalls 100 Mikrobogensekunden – zu groß, um den Horizont von Sgr A\* abzubilden. Außerdem trübt bei diesen Wellenlängen interstellares Gas das Bild. Die Lösung wäre ein Interferometer für kürzere Wellenlängen, im Millimeterbereich und darunter. Doch kleinere Wellenlängen haben einen neuen Nachteil: Sie werden durch den Wasserdampf der Atmosphäre absorbiert. Deshalb sucht man möglichst hohe und trockene Standorte wie den Mauna Kea auf Hawaii, die Atacama-Wüste in Chile sowie die Antarktis.

Alles in allem bleiben nur zwei brauchbare Fenster bei 1,3 und 0,87 Millimetern. Ein Array von der Größe der Erde würde damit Auflösungen von rund 26 beziehungsweise 17 Mikrobogensekunden liefern – genug, um den Horizont von Sgr A\* aufzulösen.

Es gibt auf Hawaii, im Südwesten der USA, in Chile, Mexiko und Europa bereits mehrere Millimeter- und Submillimeterteleskope, die an einem solchen Verbund teilnehmen können. Allerdings müssen sie erst aufwändig adaptiert werden; unter anderem gilt es, eigens extrem rauscharme Elektronik sowie Digitalrekorder mit enormer Bandbreite zu entwickeln. Einem Team unter Sheperd S. Doelman vom Massachusetts Institute of Technology gelang es 2008, diese Probleme zu lösen. Die Gruppe untersuchte Sgr A\* bei 1,3 Milli-

meter Wellenlänge mit einem Array aus nur drei Teleskopen in Arizona, Kalifornien und auf dem Mauna Kea. Die Daten zeigten immerhin an, dass es helle Regionen gibt, die nur 37 Mikrobogensekunden groß sind und somit zwei Drittel des Horizonts umfassen.

Schon diese Beobachtungen im Millimeterbereich machen es äußerst unwahrscheinlich, dass Sgr A\* keinen Horizont besitzt. Die Akkretionsvorgänge um ein Schwarzes Loch unterscheiden sich grundlegend von der Akkretion eines horizontlosen Objekts. In beiden Fällen sammelt das Akkretionsmaterial bei seinem Absturz riesige Energiemengen an. Falls kein Horizont vorhanden ist, wird diese Energie dort, wo das Akkretionsmaterial schließlich zur Ruhe kommt, in Wärme verwandelt und anschließend als Strahlung emittiert. Dabei entsteht ein charakteristisches Wärmespektrum. Bei Schwarzen Löchern hingegen kann das einfallende Material beliebige Energiemengen durch den Horizont transportieren, der sie dann für immer verbirgt.

Die Gesamtleuchtkraft von Sgr A\* gibt Aufschluss über die Absturzquote des Akkretionsmaterials. Die Millimeter-VBLI-Daten setzen dem Radius, den der Innenrand der Akkretionsscheibe höchstens haben kann, eine enge Grenze – und damit auch der Energie, die beim Akkretionsfluss zu diesem Rand freigesetzt wird. Falls Sgr A\* keinen Horizont besitzt und somit kein Schwarzes Loch ist, muss die Überschussenergie, sobald das Akkretionsmaterial zur Ruhe kommt, abgestrahlt werden, und zwar vorwiegend im Infrarotbereich. Doch die Astronomen finden keinerlei infrarote Wärmestrahlung von Sgr A\*. Ohne einen Horizont lässt sich das nur dadurch erklären, dass das Material die gesamte überschüssige Energie schon auf seinem Weg nach innen abstrahlt, doch das würde eine absurd hohe Strahlungseffizienz erfordern.

### Porträt eines Monsters

Wir und andere Theoretiker versuchen vorherzusagen, was ein Beobachter sehen könnte, wenn riesige Teleskopverbände in den nächsten Jahren Bilder von Sgr A\* erzeugen. Im Prinzip wirft ein Schwarzes Loch eine Silhouette auf den Strahlungshintergrund, den das in der Nähe aufgesammelte Gas emittiert. Dieser »Schatten« entsteht, weil das Loch die Lichtstrahlen schluckt, die von direkt dahinter liegenden Punkten ausgehen. Zusätzlich wird das helle Gebiet um den Schatten durch weitere hinter dem Loch entspringende Lichtwellen erleuchtet, die den Horizont knapp verfehlen. Ein starker Gravitationslinseneffekt krümmt die Lichtstrahlen derart, dass sogar direkt hinter dem Schwarzen Loch liegendes

Material zur Helligkeit der nächsten Umgebung beiträgt. Der so entstehende Umriss ergibt ein naturgetreues Porträt, auf dem das Loch wirklich schwarz erscheint.

Dieser Schatten wird allerdings nicht kreisförmig sein – vor allem wegen der fast lichtschnellen Umlaufgeschwindigkeit des Gases. Das Emissionsspektrum derart schnell bewegter Materie wird durch den Dopplereffekt stark verschoben, und die emittierten Strahlen bündeln sich zu einem engen Kegel in Vorwärtsrichtung. Dadurch erscheint die Akkretionsscheibe dort, wo sie zum Beobachter hin rotiert, erheblich heller und auf der wegbelegten Gegenseite viel schwächer. Anstelle eines kompletten hellen Rings um eine kreisrunde Silhouette entsteht eine leuchtende Sichel. Diese Asymmetrie verschwindet nur, wenn wir zufällig längs der Rotationsachse auf die Scheibe blicken.

Eine ähnliche Wirkung hat der Drehimpuls des Schwarzen Lochs selbst, der eine andere Rotationsachse als die Akkretionsscheibe haben kann. Solche Bilder werden darum den Astronomen erlauben, die Orientierung des Eigendrehimpulses zu bestimmen sowie die Neigung der Akkretionsscheibe relativ dazu. Zudem werden die Beobachtungen unschätzbare Daten für die Akkretionstheorie liefern, so dass die Dichte des Gases im Akkretionsfluss und die Geometrie von dessen Innenkante ein für alle Mal geklärt werden können.

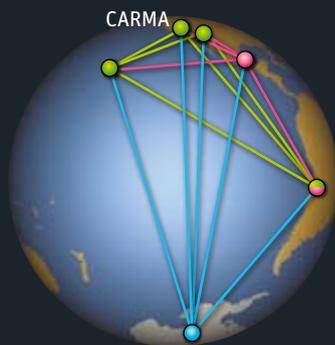
Auch andere supermassereiche Löcher könnten mit Sgr A\* verglichen werden. Wie wir kürzlich gezeigt haben, bietet sich als zweitbestes Ziel das Schwarze Loch an, das im Zentrum der riesigen elliptischen Galaxie M87 vermutet wird. Es ist 55 Millionen Lichtjahre entfernt, und bis vor Kurzem schätzten die Astronomen seine Masse auf

**Sgr A\* ist das einzige supermassereiche Schwarze Loch, bei dem Teleskope die Bahn einzelner benachbarter Sterne aufzulösen vermögen**



**ASTRONOMEN ENTWICKELN** mehrere Radioteleskoparrays, um ein interkontinentales Netzwerk aus Observatorien zu bilden, das Sgr A\* und seine unmittelbare Umgebung bei 0,87 und 1,3 Millimeter Wellenlänge zu beobachten vermag; in diesen »Fenstern« wird Radiostrahlung nicht allzu sehr von der Lufthülle absorbiert oder durch interstellares Gas gestreut. Das weiträumige Netzwerk gewährleistet ein Auflösungsvermögen, das ausreicht, den Ereignishorizont von Sgr A\* abzubilden.

Das Aussehen von Sgr A\* wird Aufschluss über die Lage der Akkretionsscheibe relativ zu unserer Blickrichtung geben sowie darüber, wie schnell das Schwarze Loch rotiert (ganz unten). Falls ein heller Fleck in der Akkretionsscheibe aufscheint, wird das Loch als Gravitationslinse wirken und Mehrfachbilder des Flecks erzeugen (ganz rechts). Wenn sich die Nebenbilder auflösen lassen, werden sie detaillierte Informationen über das Schwerfeld in der Nähe des Lochs liefern. Das wiederum wird die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie auf eine harte Probe stellen.

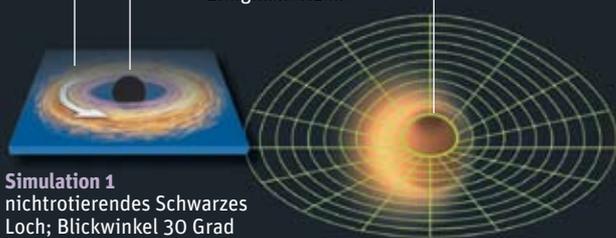


### EIN AUFNAHMEGERÄT, SO GROSS WIE DIE ERDE

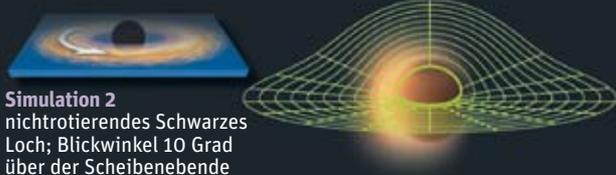
Das Combined Array for Research in Millimeter-Wave Astronomy (CARMA; oben) in Cedar Flat (Kalifornien) ist eines von mehreren Radioteleskoparrays, mit denen Astronomen demnächst den Ereignishorizont von Sgr A\* beobachten wollen. Ein Netzwerk solcher Observatorien (links) mit tausende Kilometer langen Grundlinien (farbige Strecken) verwendet eine Technik namens *very long baseline interferometry*, um ein Auflösungsvermögen zu erreichen, das einer Radioschüssel von der Größe der Erde entspricht. Vier Arrays (grün) sind bereit zur gemeinsamen Verwendung, zwei (rot) werden entwickelt, und das letzte (blau) muss nur noch für Beobachtungen bei Submillimeter-Wellenlängen angepasst werden.

### Akkretionsscheibe

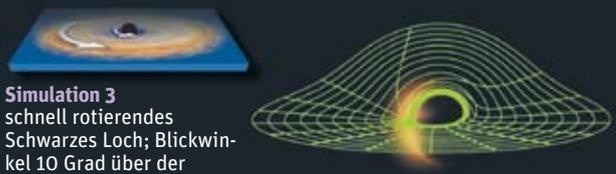
### Ereignishorizont



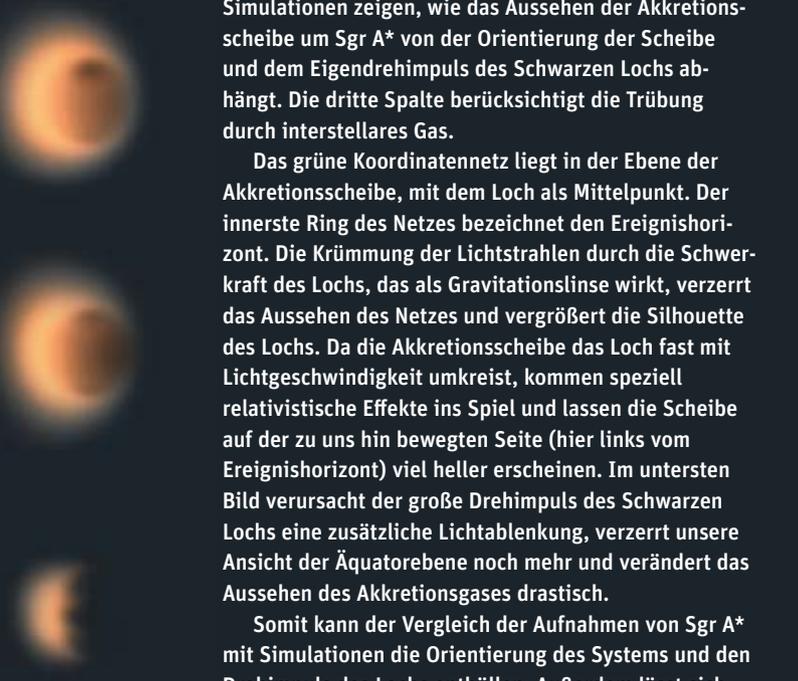
**Simulation 1**  
nichtrotierendes Schwarzes Loch; Blickwinkel 30 Grad über der Scheibenebene



**Simulation 2**  
nichtrotierendes Schwarzes Loch; Blickwinkel 10 Grad über der Scheibenebene



**Simulation 3**  
schnell rotierendes Schwarzes Loch; Blickwinkel 10 Grad über der Scheibenebene

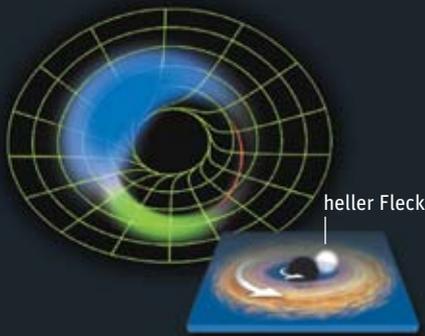


### WAS DIE SILHOUETTE OFFENBART

Simulationen zeigen, wie das Aussehen der Akkretionsscheibe um Sgr A\* von der Orientierung der Scheibe und dem Eigendrehimpuls des Schwarzen Lochs abhängt. Die dritte Spalte berücksichtigt die Trübung durch interstellares Gas.

Das grüne Koordinatennetz liegt in der Ebene der Akkretionsscheibe, mit dem Loch als Mittelpunkt. Der innerste Ring des Netzes bezeichnet den Ereignishorizont. Die Krümmung der Lichtstrahlen durch die Schwerkraft des Lochs, das als Gravitationslinse wirkt, verzerrt das Aussehen des Netzes und vergrößert die Silhouette des Lochs. Da die Akkretionsscheibe das Loch fast mit Lichtgeschwindigkeit umkreist, kommen speziell relativistische Effekte ins Spiel und lassen die Scheibe auf der zu uns hin bewegten Seite (hier links vom Ereignishorizont) viel heller erscheinen. Im untersten Bild verursacht der große Drehimpuls des Schwarzen Lochs eine zusätzliche Lichtablenkung, verzerrt unsere Ansicht der Äquatorebene noch mehr und verändert das Aussehen des Akkretionsgases drastisch.

Somit kann der Vergleich der Aufnahmen von Sgr A\* mit Simulationen die Orientierung des Systems und den Drehimpuls des Lochs enthüllen. Außerdem lässt sich aus der Größe des Schattenrisses die Masse des Lochs neu berechnen.



**GRAVITATIONSMESSUNG MIT VERZERRTEN BILDERN**

Zur Vermessung der Schwerkraft um das Schwarze Loch dienen Mehrfachbilder eines hellen Flecks in der Akkretionsscheibe; sie entstehen, weil das Loch als Gravitationslinse wirkt. Oben wird das simulierte Gesamtbild eines hellen Flecks bei einem mäßig schnell rotierenden Loch gezeigt; die Farben markieren drei Teilbilder, die unten erklärt werden.

Das Primärbild (blaues Gebiet) entsteht aus Radiowellen, die vom Fleck auf direktestem Weg zur Erde gelangen (blaue Linie). Wegen der intensiven Gravitation nehmen einige Strahlen, die der Fleck früher emittiert hat, einen Umweg (grüne Linie) und erreichen die Erde zur selben Zeit; sie bilden das Sekundärbild (grünes Gebiet). Noch früher emittierte Strahlen, die einen vollen Umlauf um das Loch beschreiben (rote Linie), erzeugen das kaum sichtbare Tertiärbild (rotes Gebiet). Da Ort und Form der Nebenbilder davon abhängen, wie die Schwerkraft das Licht in großer Nähe des Lochs beugt, kann die Analyse des Gesamtbilds enthüllen, ob die allgemeine Relativitätstheorie die Gravitation dort richtig beschreibt.



ILLUSTRATIONEN: JEN CHRISTENSEN; COMPUTERSIMULATIONEN: AVERY E. BRODERICK; GLOBUS: GEORGE REISECK; FOTO CARMA: TIMESCAPES.ORG/TOM LOWE

rund drei Milliarden Sonnen; damit wäre seine Silhouette etwa halb so groß wie die von Sgr A\*. Doch im Juni 2010 nutzten Karl Gebhardt von der University of Texas in Austin und Jens Thomas vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching neueste Daten und Modelle für die Verteilung von Sternen und Dunkler Materie; sie kamen auf ein Schwarzes Loch von 6,4 Milliarden Sonnenmassen in M87. Dessen Umriss wächst dadurch auf drei Viertel des Durchmessers von Sgr A\*.

In vieler Hinsicht ist M87 ein noch interessanteres Ziel als Sgr A\*. Es hat einen kräftigen Jet, der sich über 5000 Lichtjahre erstreckt. Anders als Sgr A\* liegt M87 am nördlichen Sternenhimmel, wodurch es für die vorwiegend auf der Nordhalbkugel installierten Teleskope besser zugänglich ist. Da das Schwarze Loch von M87 rund 2000-mal so groß ist wie Sgr A\*, werden dynamische Veränderungen außerdem binnen Tagen statt in Minutenschnelle ablaufen. Die Umlaufperiode an der Innenkante der Akkretionsscheibe wird – je nach dem Drehimpuls des Lochs – eine halbe bis fünf Wochen betragen. Bildfolgen von laufenden Ereignissen wären bei M87 viel leichter zu gewinnen. Aufnahmen mit hoher Auflösung werden höchstwahrscheinlich weniger durch interstellares Gas getrübt als bei Sgr A\*. Derzeit haben die besten VLBI-Bilder von M87, die bei zwei bis sieben Millimeter Wellenlänge aufgenommen wurden, eine Auflösung von rund 100 Mikrobogensekunden; das ist mehr als das Doppelte des erwarteten Schattendurchmessers.

Langfristig besteht bei beiden Objekten die Chance, kurze Strahlungsspitzen abzubilden, die gelegentlich in den Emissionen auftreten. Falls manche dieser Ausbrüche durch helle Flecken im Akkretionsfluss verursacht werden, ließe sich damit die Raumzeit um den Horizont genau vermessen. Das Hauptbild jedes Flecks wird von Nebenbildern begleitet, die stark gekrümmten oder gar mehrfach um das Loch gewickelten Lichtstrahlen entsprechen (siehe Kasten links). Diese Bilder höherer Ordnung spiegeln die Struktur der Raumzeit am Schwarzen Loch wider. Zugleich werden sie die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie für das Verhalten der starken Gravitation in der Nähe Schwarzer Löcher einem strengen Test unterwerfen.

Fast ein Jahrhundert, nachdem Albert Einstein seine berühmte Theorie aufstellte, sind wir endlich im Stande, sie unter extremsten Bedingungen zu überprüfen. Sobald wir echte Porträts von Sgr A\* und M87 besitzen, können wir eine zum Zerreißen gespannte Raumzeit in ungeahnten Details untersuchen. ◀



**Avery E. Broderick** (links) und **Abraham Loeb** arbeiten seit 2005 im Institute for Theory and Computation des Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics zusammen. Broderick forscht derzeit am Canadian Institute for Theoretical Astrophysics der University of Toronto. Er war führend an der Entwicklung von Verfahren zur Abbildung des Horizonts Schwarzer Löcher beteiligt. Loeb ist Astronomieprofessor an der Harvard University und Gastprofessor am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel). Er hat bahnbrechende theoretische Arbeiten über Sternentstehung, supermassereiche Schwarze Löcher und Gammastrahlenausbrüche durchgeführt.

**Broderick, A. E. et al.:** The Event Horizon of Sagittarius A\*. In: *Astrophysical Journal* 701, S. 1357–1366, 2009.

**Broderick, A. E. und Loeb, A.:** Imaging the Black Hole Silhouette of M87: Implications for Jet Formation and Black Hole Spin. In: *Astrophysical Journal* 697, S. 1164–1179, 2009.

**Doeleman, S. S. et al.:** Event-Horizon-Scale Structure in the Supermassive Black Hole at the Galactic Centre. In: *Nature* 455, S. 78–80, 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050005](http://www.spektrum.de/artikel/1050005).

## Tunken für Fortgeschrittene

Sind beim Tunken von Keksen physikalische Vorgebildete gegenüber reinen Empirikern im Vorteil?

*Abbé Montret tauchte zwei Kekse auf einmal in sein Glas und schnappte sie gierig auf, bevor sie sich in der Flüssigkeit auflösten und im Glas verschwinden konnten.*

Pascal Quignard (\*1948)

Von H. Joachim Schlichting

**K**ekse in Kaffee oder Tee zu tunken entspricht nicht den allgemein akzeptierten Tischmanieren. Vielleicht nur deshalb, weil dabei allzuleicht »Unfälle« passieren? Die weiche und anhängliche Keksmaterie könnte an Stellen geraten, wo sie nicht hingehört. Denn ist der Keks zu stark aufgeweicht (wenn man dann überhaupt noch von Keksen sprechen will), können ihn die Finger nicht mehr greifen und er versinkt im Getränk. Diese Kekssuppe muss dann jeder selbst auslöffeln. Oder aber er sackt auf dem Weg zum Mund unter dem eigenen Gewicht zusammen und löst sich fallend vom noch harten Teil.

Allerdings existiert eine Reihe physikalischer Gesetzmäßigkeiten, welche die Probleme abzumildern versprechen. So gelingt es den in der Praxis des Tunkens geübten Menschen, die durch Übung ermittelte Eintunkzeit mit gut dosiertem Schwung so zu kombinieren, dass auch der weiche Teil auf der vorgesehenen Bahn gehalten werden kann und – meistens – sicher den Mund erreicht. Insbesondere wissen die Empiriker auch, dass es nicht genügt, den Keks rechtzeitig vor dessen Zusammenbruch aus dem Getränk zu heben. Denn ist der Aufweichprozess erst einmal in Gang gesetzt, lässt er sich nicht mehr aufhalten; kommt es dann zu einer unerwarteten Verzögerung, entsteht ein akutes

Problem. Dieses lässt sich leicht lösen, mag mancher einwerfen: Man muss nur die Transportgeschwindigkeit erhöhen. Doch so einfach ist es nicht. Denn wird der Keks stark beschleunigt, kommt die Trägheit ins Spiel – und die wirkt sich auf den weichen Teil völlig anders aus als auf den harten, auf dem Ersterer balanciert wird. Während die Bindungskräfte im harten Keksteil so stark sind, dass sich die Beschleunigung der Hand auf alle Teile dieses starren Körpers gleichzeitig »überträgt«, kann die nur locker gebundene weiche Materie trägheitsbedingt hinter der Bewegung zurückbleiben und zu unerwünschten Effekten führen.

Hat man den getunkten Keks erst einmal unfallfrei aus dem Tee emporgehoben, ist es daher aus physikalischer Sicht am sichersten, ihn auf einer Wurfparabel in den Mund zu befördern. Dann ist er, vom Luftwiderstand abgesehen, vorübergehend kräftefrei, und alle seine Bestandteile bewegen sich auf derselben Bahn, egal, ob und wie stark sie miteinander verbunden sind. Dieser Ratschlag, den Knigge ohnehin ablehnen würde, ist allerdings nur von theoretischem Wert. Denn geeignete Anfangsbedingungen – Abwurfwinkel und -geschwindigkeit – lassen sich wiederum nur durch Beschleunigen des Kekses herstellen. Und selbst wer dies nach einiger Übung beherrschte, finge bei Gebäck mit nur geringfügig abweichender Konsistenz wieder ganz von vorne an.

**Kaum ist der Keks in den heißen Tee getunkt (a), beginnt sich die Flüssigkeit – angetrieben durch Kapillarkräfte – in der porösen Materie auszubreiten.**

**Bald wird das vorher spröde Material weich und flexibel (b) – mit der Tendenz, unter der eigenen Schwere abzuknicken.**



FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Woher übrigens das Bedürfnis rührt, Gebäck in Getränke zu tunken, ist nicht eindeutig geklärt. Man weiß aber, dass diese Praxis eine lange Geschichte hat, die mindestens in das dritte Jahrhundert v. Chr. zurückreicht. Die Römer jener Zeit kannten weder Kaffee noch Tee und tunkten ihre harten Backwaren daher in Wein. Ihr *bis coctus*, das zweimal Gebackene, ähnelte offenbar unserem Zwieback: Ein brotähnliches Produkt wurde in Scheiben geschnitten, erneut gebacken und so weit gehend entwässert. Grund für dieses Vorgehen dürfte weniger das spezielle Gaumenvergnügen als vielmehr die größere Haltbarkeit des trockeneren Gebäcks gewesen sein.

### Ist das schon die ganze Wahrheit?

Rein naturgesetzlich gesehen bleibt das Motiv des Tunkens ohnehin unerklärlich. Der Physiker würde es schlicht als Teil des Auflösungsprozesses auffassen, der ansonsten eben im Mund stattfindet. Wozu also könnte es sonst dienen? Die Römer, so dürfen wir spekulieren, mögen ihrem *bis coctus* schlicht die Härte haben nehmen wollen. Doch heute, da es Gebäck verschiedener Härtegrade gibt bis hin zu Keksen, die im Mund fast von selbst zergehen, spielt vielleicht auch noch der Geschmack eine Rolle, der sich angeblich mit dem extraoralen Wässern des Kekses verbessert. Nach Untersuchungen des Duftstoff- und Aromenherstellers Firmenich sollen dadurch bis zu zehnmal so viele Aromen abgegeben werden. Das kann aber nicht die ganze Wahrheit sein. Offenbar kommen zusätzlich taktile Gesichtspunkte ins Spiel: die Wahrnehmung von Druck und Gegendruck beim Kauen und beim Transport der Keksmaterie im Mund. Doch entsprechende Vorlieben sind nicht universell, denn andere Kekesser wollen auch auf den harten Teil der Geschichte nicht verzichten. In »La dame en bleu« hebt

Noëlle Châtelet in poetischen Worten genau diesen Aspekt hervor: »Der Keks knackt, scheint zu widerstehen, dann als ob er sich selbst verleugnete, zergeht er auf einmal unter dem weichen Druck der feuchten Lippen.«

Womit die Physik schließlich doch wieder ins Spiel kommt. Zerbeißt man das spröde Gebäck ungetunkt, entlockt ihm dies solide, wenn auch gedämpfte Geräusche des Knackens und Zermalmens. Warum aber gibt ein so harter Keks in Gegenwart einer Flüssigkeit überhaupt so schnell nach? Je nach Herstellungsart durchzieht das Gebäck ein mehr oder weniger verzweigtes Netzwerk von Kapillaren, in dem sich die Feuchtigkeit ausbreiten kann wie die Tinte im Löschpapier. Dank dieser ausgeprägten Porosität gelangt die Flüssigkeit nach einer gewissen Zeit auch an Stellen, die gar nicht eingetaucht wurden.

Die Feuchtigkeit an sich stellt aber noch kein Problem dar. Es ist wie beim Papier: Auch dieses geht durch Wässerung in eine weiche Pampe über, weil sich die verwendeten Klebstoffe infolge der Feuchtigkeit auflösen. In ähnlicher Weise ist auch Gebäck »verklebt«, nämlich vor allem durch Zucker und Fett. Dadurch erklärt sich die Wirkungssteigerung, die Heißgetränke erzielen: Bei hohen Temperaturen lösen sich sowohl Zucker als auch Fett sehr viel schneller auf.

Kaltes Wasser tut es meist aber auch. Nur Mürbeteigkekse sind dagegen ziemlich resistent. Denn ihr Kapillarnetz ist wenig ausgeprägt, weil die Stärkekörnchen des Mehls durch eine Fettummantelung isoliert sind und aneinanderkleben. Das Fett wiederum schmilzt erst, wenn die Temperatur einen Mindestwert erreicht. Die Römer mussten auf diese Erleichterung allerdings verzichten. *Bis coctus* alias Zwieback mit seinem stark verzweigten Kapillarsystem hält auch kaltem Wein nicht lange stand. ◀



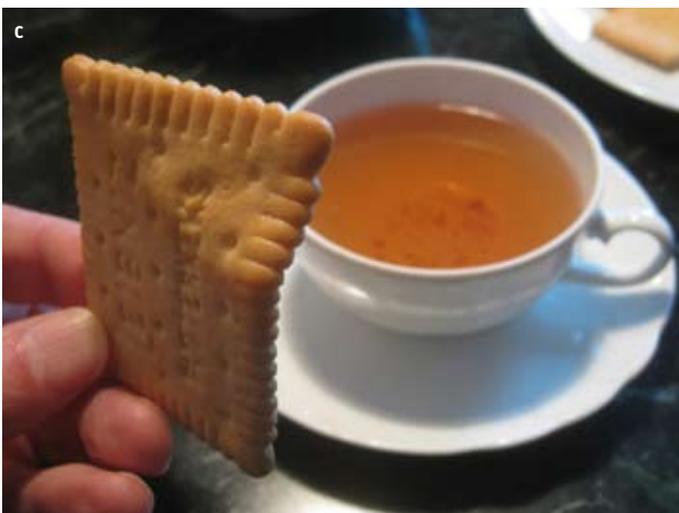
**H. Joachim Schlichting** ist Professor und Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der

Universität Münster. Er erhielt 2008 den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für seine didaktischen Konzepte.

**Quignard, P.:** Die amerikanische Besatzung. Berlin, Aufbau, 2003, S. 69.

**Châtelet, N.:** La dame en bleu. Édition Stock, Paris 1996, S. 59.

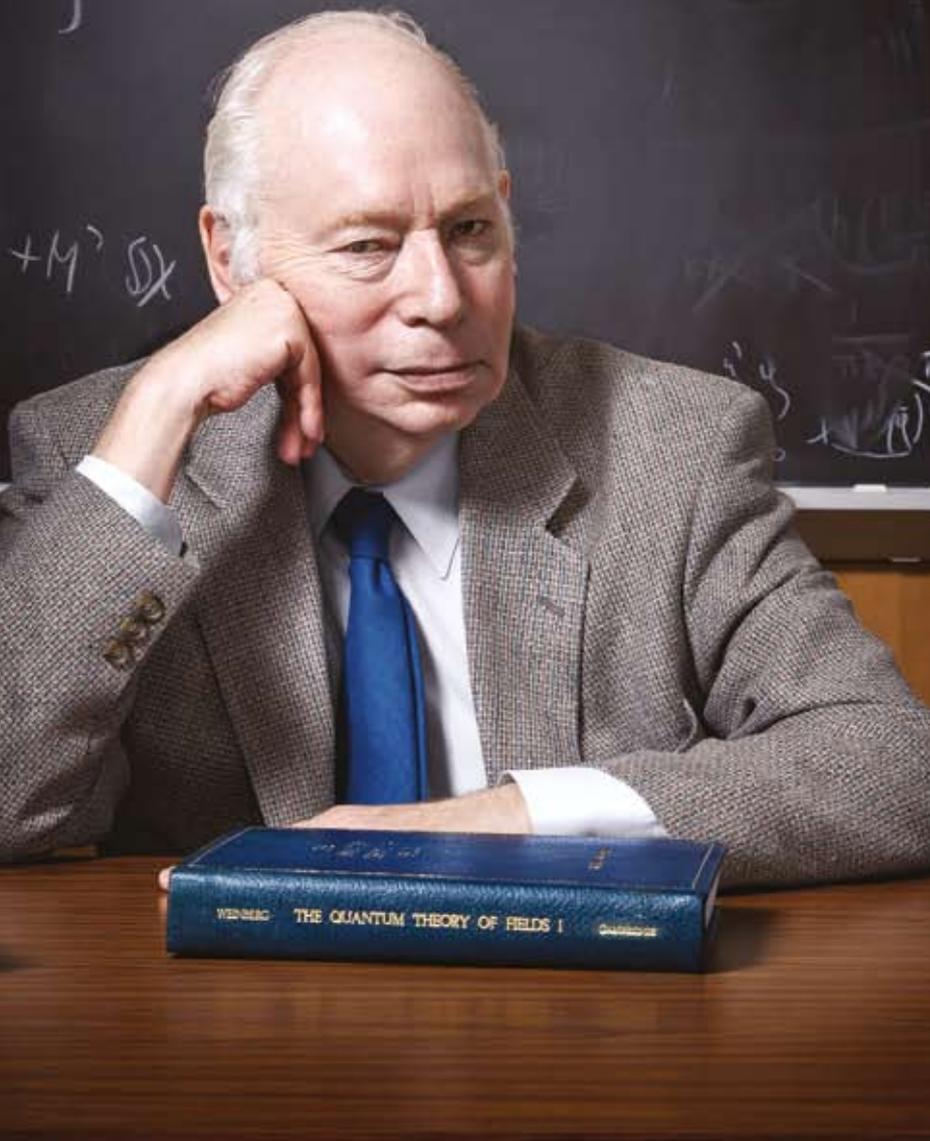
Weblinks finden Sie unter: [www.spektrum.de/artikel/1050043](http://www.spektrum.de/artikel/1050043).



Der virtuose Empiriker beginnt nun, den durchweichten Keksteil auf der noch harten Bruchkante zu balancieren (c). Der Theoretiker hingegen setzt seine Hoffnung auf eine Wurfparabel: Auf ihr kann der Keks kräftefrei, also ohne weitere Deformation, in den Mund gelangen.

# DER WELT-ERKLÄRER

Wie lässt sich das Universum mit dem Mikrokosmos unter einen Hut bringen? Steven Weinberg gehört zu jenen, denen die Vereinheitlichung der Physik gelingen könnte.



JEFF WILSON

Es war Mitte der 1960er Jahre. Eines Tages saß Steven Weinberg am Steuer seines roten Camaro-Sportwagens, als ihm plötzlich eine Idee kam. Die Veröffentlichung, die daraus entstand, »A Model of Leptons«, war einschließlich Literaturverzeichnis und Danksagung gerade einmal zweieinhalb Seiten lang. Und obwohl sie bei ihrem Erscheinen im Jahr 1967 weitgehend unbeachtet blieb, wurde sie im Lauf der Zeit zu einer der meistzitierten Veröffentlichungen der Physik überhaupt. 1979 brachte sie Steven Weinberg gemeinsam mit Abdus Salam und Sheldon Glashow den Nobelpreis ein.

Auf jenen zweieinhalb Seiten hatte Weinberg nachgewiesen, dass zwei der vier Fundamentalkräfte – der Elektromagnetismus und die schwache Wechselwirkung – trotz ihrer äußeren Gegensätzlichkeit verschiedene Erscheinungsformen einer einzigen vereinheitlichten Kraft sein könnten. Seine Theorie der »elektroschwachen« Wechselwirkung sagte auch die Existenz eines neuen neutralen Teilchens voraus. Es sollte der Teilchengruppe der schwachen Bosonen angehören, jener Partikel also, die die schwache Wechselwirkung vermitteln. Weinberg zeigte außerdem, auf welche Weise die inhärente Symmetrie der elektroschwachen Kraft »spontan gebrochen« wird. Genau dieser Vorgang führt dazu, dass Elektromagnetismus und schwache Wechselwirkung als verschiedenartig wahrgenommen werden. Der Mechanismus der spontanen Symmetriebrechung ist auch dafür verantwortlich, dass Teilchen überhaupt eine Masse besitzen können. Daneben leistete Weinberg Beiträge zur Theorie einer weiteren Fundamentalkraft, nämlich der starken Wechselwirkung. Zusammen bilden die genannten und mittlerweile ausgearbeiteten Theorien das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik.

Die Leidenschaft, den tiefen Geheimnissen der Natur nachzuspüren, hat Weinberg nie losgelassen. Seit Jahren arbeitet er an Theorien, die über das Standardmodell hinausgehen und auf eine vollständig vereinheitlichte Theorie hoffen lassen – eine Theorie, die nicht nur den Elektromagnetismus, die starke und die schwache Kernkraft, sondern auch die vierte Fundamentalkraft, die Gravitation, einschließt. Schon früh trug Weinberg zudem zur Stringtheorie bei, die als eine der führenden Kandidatinnen für eine vereinheitlichte Theorie gilt. Zudem schrieb er Bücher für ein breites Publikum; darunter »Die ersten drei Minuten« 1977 und »Der Traum von der Einheit des Universums« 1993 (deutsche Erstausgabe: 1995); jüngst erst erschien die Aufsatzsammlung »Lake Views«.

Mit Weinberg sprach kürzlich Amir D. Aczel vom Center for Philosophy and History of Science der Boston University und Autor von »Present at the Creation: The Story of CERN and

the Large Hadron Collider« (nicht auf Deutsch erhältlich). Aczel fragte nach der Zukunft vereinheitlichter Theorien – jetzt, nachdem der riesige Teilchenbeschleuniger Large Hadron Collider (LHC) bei Genf seine Suche nach dem Higgs-Boson und anderen Teilchen aufgenommen hat.

**Amir D. Aczel:** Mit dem Large Hadron Collider, der seit dem Frühjahr 2010 kontinuierlich Daten kollidierender Teilchen aufnimmt, sind große Erwartungen verknüpft. Mancher rechnet gar mit Revolutionen, wie sie im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts von Relativitätstheorie und Quantenphysik ausgelöst wurden. Sehen Sie das auch so?

**Steven Weinberg:** Es ist durchaus vorstellbar, dass unser physikalisches Denken ähnlich tief greifend revolutioniert wird wie durch die großen Entdeckungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Aber es gibt keinen Grund, fest mit so etwas zu rechnen. Nur etwas völlig Unvorhergesehenes könnte eine solche Revolution auslösen – und deshalb kann ich es nicht vorhersehen!

Auf kurze Sicht werden wir uns einfach weiter darum bemühen, Schritt für Schritt über das Standardmodell hinauszugehen. Dann werden wir nach und nach mit größerer Sicherheit wissen, welche Ereignisse im frühen Universum stattgefunden haben. Dies wird sicherlich noch eine Weile dauern. Darüber hinaus versuchen wir, alles miteinander zu verknüpfen, was wir kennen – eine Theorie zu schaffen, die alle Teilchen und alle Kräfte erklärt. Auch wenn wir heute noch nicht wissen, wie eine solche Theorie aussehen wird.

Wenn wir ein wirklich umfassendes Verständnis der Natur auf ihrer fundamentalsten Ebene gewinnen, wird das auch die Gesellschaft stark beeinflussen. Vermutlich wird ein solches Weltbild sehr mathematisch geprägt sein, und es wird lange Zeit in Anspruch nehmen, bis die allgemeine Öffentlichkeit es versteht. So wie es übrigens auch sehr lange gedauert hat, bis allein schon die Wissenschaftler Newtons Theorie begriffen haben. Mit der Zeit entwickelte das newtonsche Weltbild aber einen sehr prägenden Einfluss darauf, wie die Menschen über die Welt und das menschliche Leben nachdachten. Es beeinflusste die Wirtschaft, die Biologie, die Politik und die Religion. Auch in der Gegenwart gilt: Gelangen wir zu einer wirklich umfassenden Theorie der Natur, kann so etwas erneut geschehen.

Mit der Zeit zeichnen wir ein immer umfassenderes Bild von der Natur. Manches, was bis vor Kurzem noch rätselhaft schien, verstehen wir inzwischen sehr gut, wie etwa die Kraft, die

die Teilchen in einem Atom zusammenhält. Allerdings treten an die Stelle der alten Fragen stets neue, zum Beispiel diese: Warum besitzen die Teilchen im Standardmodell genau die Eigenschaften, die wir beobachten? Das ist typisch für den Prozess, in dem wir uns befinden: Jedes gelöste Rätsel wirft neue Fragen auf. Dieser Prozess wird noch lange dauern, ich vermute jedoch, dass wir irgendwann den Punkt erreichen, an dem sich keine Rätsel solcher Art mehr stellen. Und dies wird für die menschliche Geistesgeschichte ein wirklich bemerkenswerter Wendepunkt sein.

**Aczel:** Als erstes großes Ziel, das der LHC erreichen soll, wird oft die Entdeckung des Higgs-Teilchens genannt. Wie stark hängen die elektroschwache Vereinheitlichung und das Standardmodell von dessen Existenz ab?

**Weinberg:** Meiner Ansicht nach hängen sie vollständig von der Idee ab, dass die elektroschwache Symmetrie gebrochen wird. Wodurch die Symmetrie gebrochen wird, wissen wir allerdings noch nicht. Der Mechanismus der Symmetriebrechung, den Abdus Salam und ich in der elektroschwachen Theorie beschrieben haben, erfordert die Existenz eines neuen Teilchens, das heute als Higgs-Boson bezeichnet wird.

Mit unserem einfachen Bild ließ sich das Massenverhältnis der schwachen Bosonen gut vorhersagen. Aber es ist auch möglich, dass die Symmetrie durch starke Kräfte gebrochen wird, die wir noch gar nicht kennen, und dass es gar kein Higgs-Teilchen gibt. Diese neuen Kräfte müssten dann sehr stark sein, viel stärker als die bekannte starke Kraft. Leonard Susskind von der Stanford University und ich haben unabhängig voneinander eine Theorie dazu ausgearbeitet, die wir dann gemeinsam Technicolor nannten. Die Technicolor-Theorie sagt für die Massen der schwachen Bosonen dasselbe voraus wie die ursprüngliche elektroschwache Theorie. Zwar hat sie Schwierigkeiten, die Massen der Quarks zu erklären, doch manche Theoretiker halten sie für brauchbar und haben deshalb die Arbeit daran fortgesetzt.

Falls sie richtig ist, werden uns die Ergebnisse des LHC das verraten, denn ihre Wechselwirkungen führen zu einem Zoo von ganz neuen Teilchen. Selbst wenn wir also das Higgs-Teilchen nicht finden, könnten wir stattdessen etwas anderes entdecken, was wie etwa die Technicolor-Wechselwirkung eine ähnliche Rolle spielt. Zumal sich zeigen lässt, dass wir in mathematische Inkonsistenzen geraten, wenn wir überhaupt keine neuen Teilchen entdecken.

**Aczel:** Ein weiteres Prinzip, das die Physiker durch den LHC zu bestätigen hoffen, ist die Supersymmetrie. Dieses Konzept verknüpft

## ZUR PERSON

Die Schaffung einer **vereinheitlichten Theorie der Naturkräfte**, welche die Gravitation und die drei anderen Fundamentalkräfte zusammenfasst, ist das höchste Ziel der modernen Physik. Wenige haben so viel dazu beigetragen wie der 1933 in New York geborene US-Amerikaner **Steven Weinberg** von der University of Texas in Austin.

In den 1960er Jahren war Weinberg maßgeblich daran beteiligt, **zwei Säulen des Standardmodells** zu entwickeln: die Vereinheitlichung des Elektromagnetismus mit der schwachen Wechselwirkung sowie die Theorie der starken Wechselwirkung.

Insbesondere hat er auch Beiträge zur **String-Theorie** geleistet, einer der wichtigsten Kandidatinnen für eine vereinheitlichte Theorie aller Naturkräfte.

Weinbergs Modell, das die beobachtete Dichte der Dunklen Energie anhand der **Existenz von Paralleluniversen** erklärt, ist das am häufigsten zitierte Argument für ein Multiversum.

## SERIE: LHC

Teil I: Experimentieren am Limit, SdW 9/2010

**TEIL II: DER WELTERKLÄRER, SdW 12/2010**

Weitere Teile der Serie werden wir Ihnen in lockerer Folge präsentieren.

Kraftteilchen – wie die Bosonen der schwachen Wechselwirkung – und Materieteilchen – wie Elektronen und Quarks – auf eine fundamentale Weise miteinander. Manche Physiker sind von der Supersymmetrie ebenso überzeugt wie einst Einstein von der Relativitätstheorie. Sie halten sie für so zwingend, dass sie wahr sein muss. Sehen Sie das genauso?

**Weinberg:** Nein. Die spezielle Relativitätstheorie fügte sich nahtlos in alles ein, was damals theoretisch und experimentell bekannt war; sie stand im Einklang mit der maxwellischen Theorie des Elektromagnetismus ebenso wie mit der Tatsache, dass niemand die Auswirkungen des vermuteten »Äthers« beobachten konnte. Wenn ich das Glück gehabt hätte, 1905 die spezielle Relativitätstheorie zu erfinden, so hätte ich wie Einstein das Gefühl gehabt, dass die Theorie einfach richtig sein muss.

Dieses Gefühl habe ich bei der Supersymmetrie nicht. Sie kann durchaus eine Reihe kleinerer Erfolge vorweisen. Sie verbessert die Vorhersagen für einen entscheidenden Parameter des Standardmodells. Sie liefert einen natürlichen Kandidaten für Dunkle-Materie-Teilchen. Und sie besitzt die schöne Eigenschaft, die einzig denkbare Symmetrie zu sein, die so verschiedenartige Teilchen wie die schwachen Bosonen und die Elektronen vereinheitlichen könnte. Keine dieser Leistungen ist jedoch so beeindruckend, dass man die Supersymmetrie zwangsläufig für richtig halten muss.

**Aczel:** Sie haben sich mit dem anthropischen Prinzip beschäftigt. Diesem zufolge besitzen einige Eigenschaften unseres Universums keine fundamentalere Erklärung als die, dass wir eben in einer Region eines größeren Ganzen leben, die für Leben besonders gut geeignet ist. Insbesondere haben Sie die Ansicht vertreten, dass das anthropische Prinzip die beste Erklärung für die beobachtete Dichte der Dunklen Energie liefert, dank deren das Universum beschleunigt expandiert. Was meinen Sie damit?

**Weinberg:** Wir spekulieren viel über Dinge, die wir für fundamental halten, wie die Massen der Teilchen, die verschiedenen Kräfte, die Tatsache, dass wir in drei Raumdimensionen und einer Zeitdimension leben. Aber vielleicht ist das alles nicht fundamental, sondern einfach nur in unserer ganz konkreten Umgebung so der Fall. Das Universum könnte weitaus größer sein, als wir es uns vorstellen. Vielleicht gab es auch nicht nur den einen Urknall. Das Universum könnte aus verschiedenen Bestandteilen mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften bestehen, aus Bestandteilen – wobei dieser Begriff völlig Verschiedenes bedeuten kann –, in

denen vielleicht die so genannten Naturgesetze ganz andere sind oder auch die Dimensionen von Raum und Zeit nicht mit dem übereinstimmen, was wir kennen. Alldem muss zwar ein fundamentales Gesetz zu Grunde liegen, das wirklich alles beschreibt. Aber wir sind vielleicht noch weiter davon entfernt, dieses Gesetz zu entdecken, als wir glauben.

Als ich 1987 das erste Mal über dieses Thema geschrieben habe, war ich ziemlich unvoreingenommen – und ich bin es heute noch. Es gibt ja vielfältige Möglichkeiten, sich ein aus verschiedenen Bestandteilen zusammengesetztes Universum vorzustellen. Man kann sich zum Beispiel ein Universum mit Bestandteilen ausdenken, in denen die Dunkle Energie jeweils unterschiedliche Dichte besitzt. Auch das Szenario einer chaotischen Inflation ist denkbar, das Andrei Linde von der Stanford University entworfen hat. Darin finden immer wieder mal Urknallereignisse an verschiedenen Orten statt, und jedes Mal ergeben sich andere Werte für physikalische Parameter wie die Dichte der Dunklen Energie.

Stephen Hawking vermutet, das Universum könnte sich wie Schrödingers berühmte Katze in einer quantenmechanischen Überlagerung verschiedener Zustände befinden. So wie die Katze gleichzeitig in zwei verschiedenen Zuständen verharren kann – einem Zustand, in dem sie tot ist, und einem, in dem sie lebt –, kann dies auch das Universum. In dem Zustand, in dem die Katze lebendig ist, weiß sie, dass sie lebendig ist, in dem anderen Zustand weiß sie gar nichts. Ebenso kann man sich Zustände des Universums vorstellen, in denen Wissenschaftler das untersuchen, was sie für das ganze Universum halten, während gleichzeitig andere Zustände existieren, in denen das Universum vielleicht zu klein ist oder sich zu rasch entwickelt und es weder Wissenschaftler noch überhaupt Beobachter gibt, die seine Eigenschaften wahrnehmen können.

Wenn man anthropisch argumentiert, stellt sich heraus, dass die Dichte der Dunklen Energie nicht allzu groß sein darf, damit sich Galaxien bilden können. Besonders klein darf sie aber auch nicht sein, da Universen mit einer so geringen Dichte der Dunklen Energie selten sind. 1998 führte ich mit zwei Astrophysikern von der University of Texas in Austin, Hugo Martel und Paul R. Shapiro, entsprechende Berechnungen durch. Wenn die Dunkle Energie existiert, so fanden wir heraus, dann muss sie so groß sein, dass wir sie in naher Zukunft entdecken würden. Kurze Zeit darauf wurde sie von Astronomen tatsächlich nachgewiesen.

**Aczel:** Sie verbinden in Ihrer Arbeit zwei Fachgebiete der Physik: Kosmologie und all-

Der Detektor CMS – einer von vier Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC – ist darauf optimiert, das Higgs-Boson zu finden. Noch ist aber keineswegs sicher, dass dieses Teilchen tatsächlich existiert.



gemeine Relativitätstheorie einerseits sowie Teilchenphysik und Quantentheorie andererseits. Hilft das bei Ihrer Suche nach Möglichkeiten, die Physik zu vereinheitlichen?

**Weinberg:** Ich würde wirklich gerne wissen, in welche Richtung wir vorangehen müssen, um zu einer Vereinheitlichung zu gelangen, aber ich kann den Weg derzeit schlicht noch nicht erkennen. Natürlich habe ich Ideen, die sich auf Erfahrungen in der Elementarteilchenphysik stützen, kann aber noch lange nicht abschätzen, ob sie sich in der Realität bewähren.

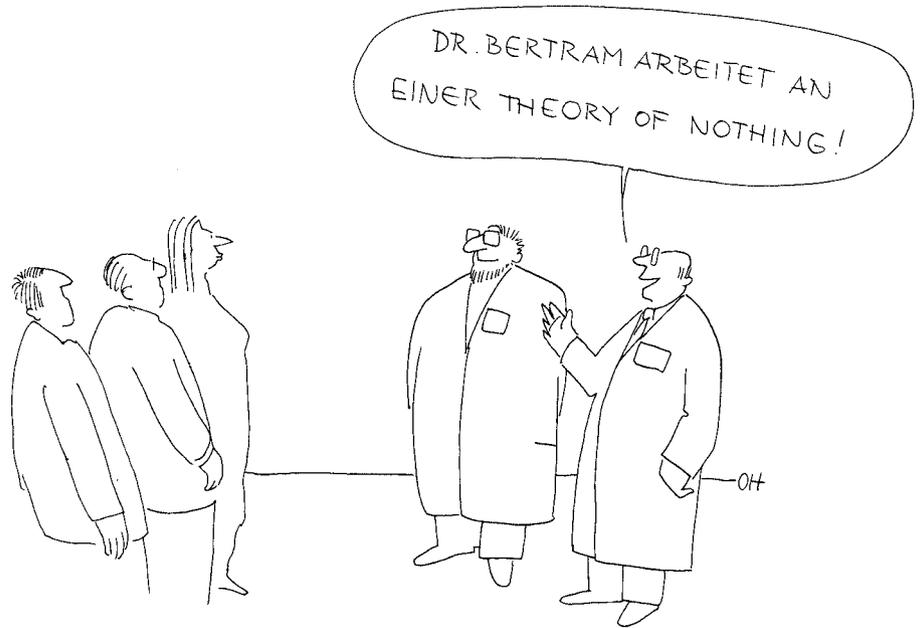
Die String-Theorie gilt oftmals als der einzige Ansatz, der mit den Unendlichkeiten umgehen kann, die in einer Quantentheorie der Gravitation auftauchen – in einer Theorie also, die alle vier Fundamentalkräfte vereinheitlicht. Aber es gibt auch eine Alternative, die auf Quantenfeldtheorien beruht, also auf Theorien derselben Art, wie sie im Standardmodell eine Rolle spielen. Ich bezeichne sie als »asymptotisch sicher«, weil die Stärke der Kräfte bei hohen Energien auf einen endlichen Wert abnimmt. Anders gesagt: Die Kräfte sind asymptotisch sicher, weil die Theorie sie davor bewahrt, unendlich groß zu werden. Lange Zeit ging es mit dieser Idee zwar nicht richtig voran, denn der Nachweis, ob eine Theorie asymptotisch sicher ist oder nicht, ist sehr schwierig zu führen. Einige vorläufige Ergebnisse erschienen mir zwar recht ermutigend. Doch als das Ganze dann zu schwierig wurde, wandte ich mich anderen Dingen zu. Um 2000 herum griffen verschiedene Wissenschaftler in Europa das Thema aber wieder auf. Sie wiesen die asymptotische Sicherheit für verschiedene Näherungen nach und zeigten, dass diese mathematisch ebenso gut definiert sind wie das Standardmodell.

**Aczel:** Worin unterscheidet sich dieser Ansatz von der String-Theorie?

**Weinberg:** Er ist ihr genaues Gegenteil. In der String-Theorie gibt man die Quantenfeldtheorie des Standardmodells auf und erfindet etwas gänzlich Neues. Sie ist also ein großer Schritt in eine neue Richtung. Bei der asymptotischen Sicherheit dagegen ist alles, was man braucht, die gute alte Quantenfeldtheorie, wie wir sie seit 60 oder 70 Jahren benutzen.

Ich sage damit trotzdem nicht, dass die asymptotische Sicherheit der richtige Weg ist. Vielmehr wäre ich keineswegs überrascht, wenn sich die String-Theorie als richtig erweisen würde. Mathematisch ist sie überaus elegant und hält vielleicht tatsächlich die richtige Antwort bereit. Aber es lohnt sich, auch die asymptotische Sicherheit ernsthaft zu erforschen.

Bislang hat keiner der beiden Ansätze zu einem wirklichen Durchbruch geführt, etwa



bei der Berechnung der mathematischen Parameter des Standardmodells. Diese Parameter sind Zahlen, die das Modell als gegeben annimmt, ohne sie weiter zu erklären. Dabei wäre das die wirkliche Feuerprobe: zum Beispiel zu verstehen, warum die Teilchenmassen genau die Verhältnisse aufweisen, die wir beobachten. Derzeit verhält es sich mit den Massen immer noch fast so, als betrachteten wir Dokumente, die in einer unbekanntenen antiken Schrift wie Linear A abgefasst sind. Wir haben zwar den Text, aber wir verstehen nicht, was er uns mitteilt.

**Aczel:** Wie finden Sie die Zeit, über andere Themen als die Physik zu schreiben?

**Weinberg:** Ich liebe die Physik und würde die Zeit nicht zurückdrehen wollen, um einen anderen Beruf zu ergreifen. Aber die Beschäftigung mit ihr ist eine ziemlich kalte und einsame Angelegenheit, besonders für einen Theoretiker wie mich, der nicht in viele Arbeitsgruppen eingebunden ist. Woran ich arbeite, hat nichts mit den allgemein menschlichen Dingen zu tun; menschliche Interessen und Emotionen kommen darin nicht vor. Und nur wenige Kollegen können meine Arbeit überhaupt verstehen.

Um aus dem Elfenbeinturm herauszukommen, beschäftige ich mich daher gern mit anderen Fragen und schreibe darüber. Wie den meisten Wissenschaftlern ist mir außerdem stark bewusst, dass unsere Arbeit mit öffentlichen Geldern unterstützt wird. Wenn wir nicht den Versuch unternehmen, der Öffentlichkeit zu erklären, was wir tun und was wir zu erreichen hoffen, dann lässt sich nur schwer begründen, warum wir ihre Unterstützung verdienen.



**Amir D. Aczel** forscht am Center for Philosophy and History of Science an der Boston University und ist Autor zahlreicher Bücher.

**Aczel, A. D.:** Present at the Creation: The Story of CERN and the Large Hadron Collider. Crown 2010.

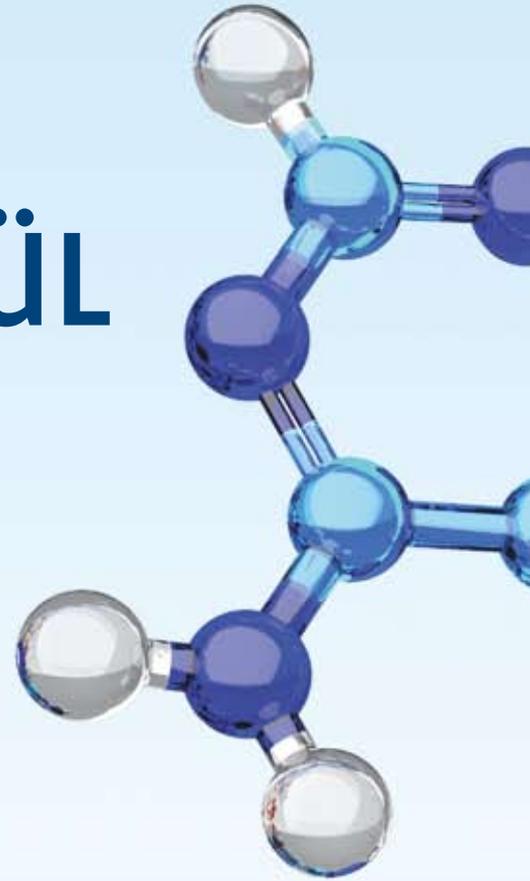
**Niedermaier, M., Reuter, M.:** The Asymptotic Safety Scenario in Quantum Gravity. In: Living Reviews in Relativity 9(5), 2006. [www.livingreviews.org/lrr-2006-5](http://www.livingreviews.org/lrr-2006-5)

**Weinberg, S.:** Der Traum von der Einheit des Universums. Goldmann, München 1995.

**Weinberg, S.:** Lake Views: This World and the Universe. Belknap Press, Cambridge, Mass., London 2010.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050011](http://www.spektrum.de/artikel/1050011).

# ENERGIEMOLEKÜL mit Doppelleben



Viele wissen, dass Adenosintriphosphat (ATP) in Zellen als universeller Energieträger dient. Weniger bekannt ist seine Funktion als Signalüberträger. Letztere ermöglicht vielfältige neue Ansätze zur Therapie verschiedenster Krankheiten.

Von Baljit S. Khakh  
und Geoffrey Burnstock

**E**in kleines Molekül namens Adenosintriphosphat (ATP) dient Zellen als Treibstoff. Es liefert die nötige Energie für all die biochemischen Reaktionen, dank derer Organismen funktionieren und die somit Leben erst ermöglichen. Entsprechend stellt es das wohl am häufigsten produzierte und verbrauchte Molekül im menschlichen Körper dar.

ATP erfüllt jedoch auch eine weniger bekannte, aber ebenso wichtige Funktion: Als Signalmolekül hilft es Zellen und Geweben im ganzen Körper, miteinander zu kommunizieren. Der universelle biologische Energieträger führt also ein Doppelleben als vielfältig nutzbarer Informationsübermittler.

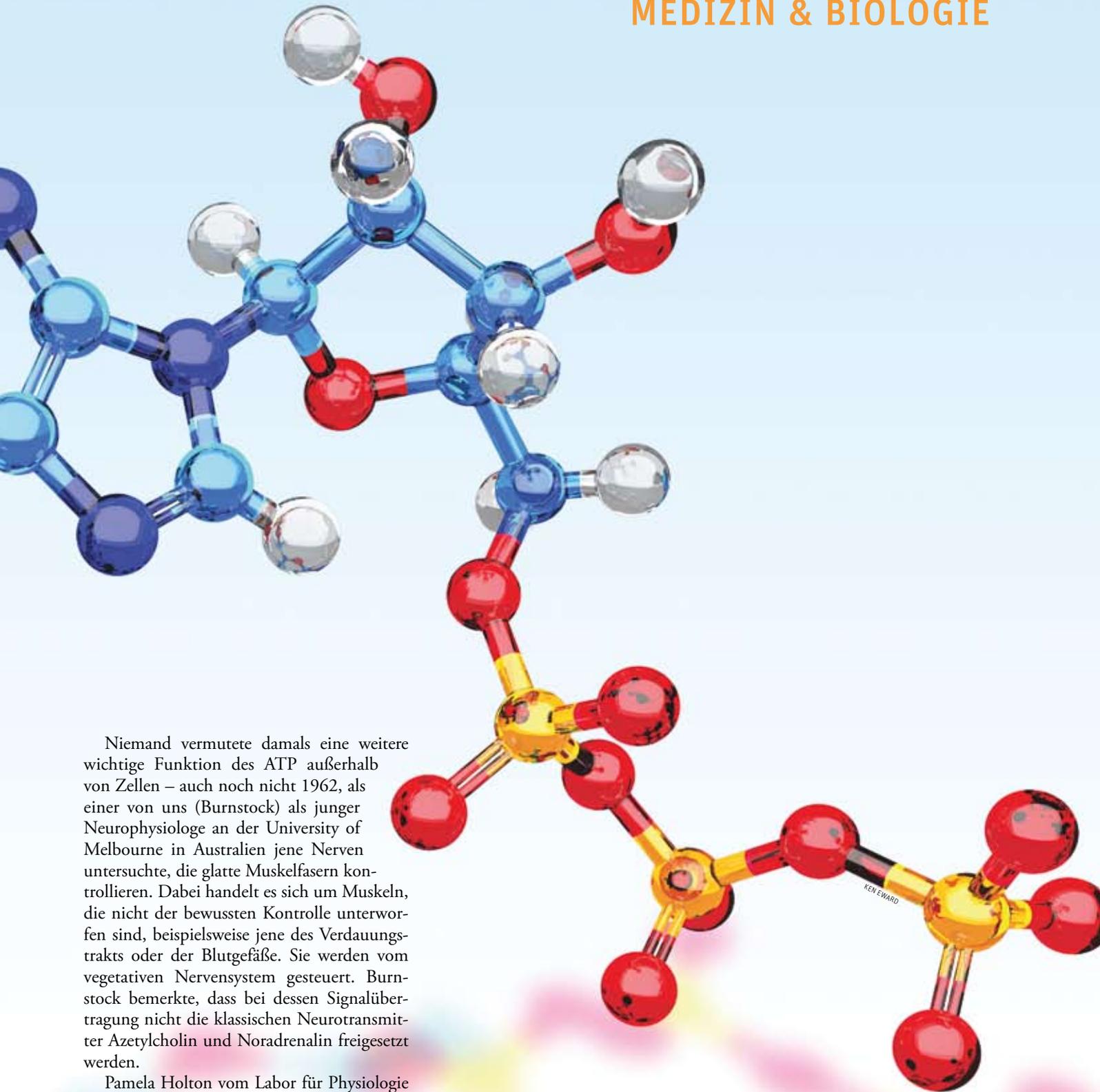
Als Forscher diese zweite Rolle des ATP vor rund einem halben Jahrhundert erstmals publik machten, stießen sie zunächst auf erhebliche Skepsis. Doch eine Lawine von Forschungsergebnissen in den letzten 15 Jahren brachte ans Licht, wie ATP von außen auf Zellen einwirkt und damit deren Entwicklung und alltägliche Funktionen reguliert. Da das Molekül überall im Körper vorkommt, beein-

flusst es ein äußerst breites Spektrum physiologischer Mechanismen und bietet daher ungewöhnlich vielseitige Möglichkeiten, Krankheiten zu behandeln. Kein Wunder, dass zahlreiche Labors in aller Welt darum wetteifern, das heute verfügbare Wissen zu erweitern und therapeutisch nutzbar zu machen.

Entdeckt wurde ATP 1929, und zwar praktisch gleichzeitig von zwei Forscherduos: von Karl Lohmann (1898–1978) und dem 1922 mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Otto Meyerhof (1884–1951) vom Kaiser-Wilhelm-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg sowie von Cyrus H. Fiske (1890–1978) und seinem Doktoranden Yellapragada Subbarao (1895–1948) von der Harvard Medical School in Boston. Beide Teams wiesen nach, dass für die Muskelkontraktion ein Molekül benötigt wird, das aus dem Purin Adenosin – einer Verbindung der Base Adenin mit dem Zucker Ribose – und drei Phosphatresten besteht. 1935 schlug Katashi Makino vom Dailen-Hospital in der Mandschurei eine chemische Struktur für das ATP-Molekül vor, die Basil Lythgoe und Alexander R. Todd vom Chemischen Laboratorium der University of Cambridge zehn Jahre später experimentell bestätigten.

## In Kürze

- ▶ ATP fungiert nicht nur als **universeller Energieträger in Zellen**, sondern auch als Signalmolekül, das wichtige Zellfunktionen steuert.
- ▶ **In fast allen Geweben** spielt ATP eine zentrale Rolle, beispielsweise im Gehirn, in Sinnesorganen und im Blutkreislauf.
- ▶ Die neuen Erkenntnisse erschließen **innovative Behandlungsmöglichkeiten** für eine Vielzahl von Erkrankungen.



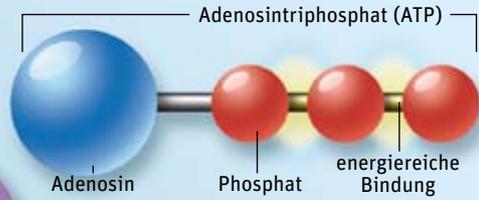
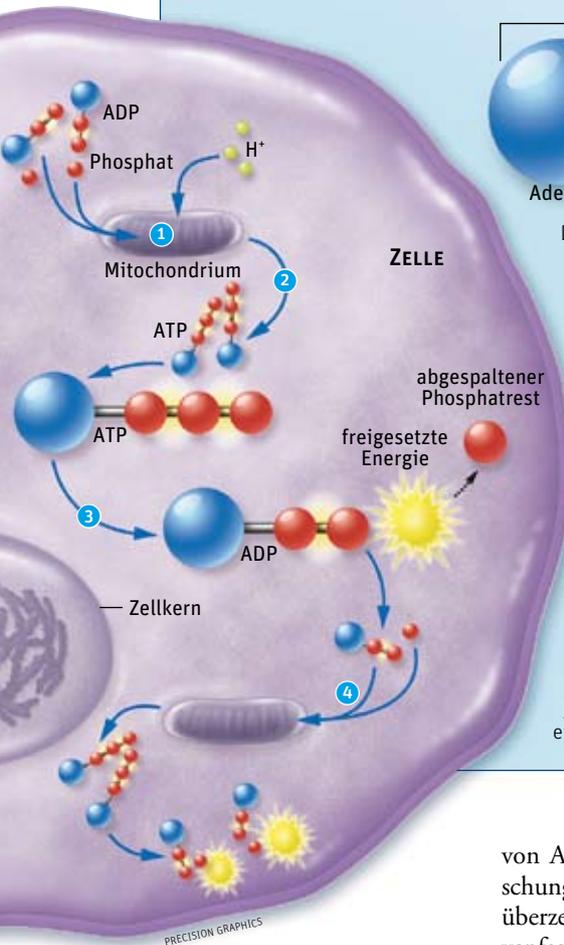
Niemand vermutete damals eine weitere wichtige Funktion des ATP außerhalb von Zellen – auch noch nicht 1962, als einer von uns (Burnstock) als junger Neurophysiologe an der University of Melbourne in Australien jene Nerven untersuchte, die glatte Muskelfasern kontrollieren. Dabei handelt es sich um Muskeln, die nicht der bewussten Kontrolle unterworfen sind, beispielsweise jene des Verdauungstrakts oder der Blutgefäße. Sie werden vom vegetativen Nervensystem gesteuert. Burnstock bemerkte, dass bei dessen Signalübertragung nicht die klassischen Neurotransmitter Acetylcholin und Noradrenalin freigesetzt werden.

Pamela Holton vom Labor für Physiologie der University of Cambridge hatte bereits 1959 vermutet, dass sensorische Nervenfasern ATP abgeben. Dies brachte Burnstock auf die Idee, ATP vermittele möglicherweise die Signalübertragung zwischen motorischen Nervenfasern und Muskelzellen. In einer Serie von Experimenten blockierte er die Signalübermittlung via klassischer Neurotransmitter an glatte Muskelzellen mit Hilfe von Chemikalien. Alle Signale, die jetzt noch bei den Muskelzellen ankamen, würden dann wohl

In diesem Modell des ATP-Moleküls markieren die Farben die verschiedenen Atome, aus denen es sich zusammensetzt: Wasserstoff ist weiß, Stickstoff dunkelblau, Kohlenstoff hellblau, Sauerstoff rot und Phosphor gelb.

ATP IN DER ZELLE ...

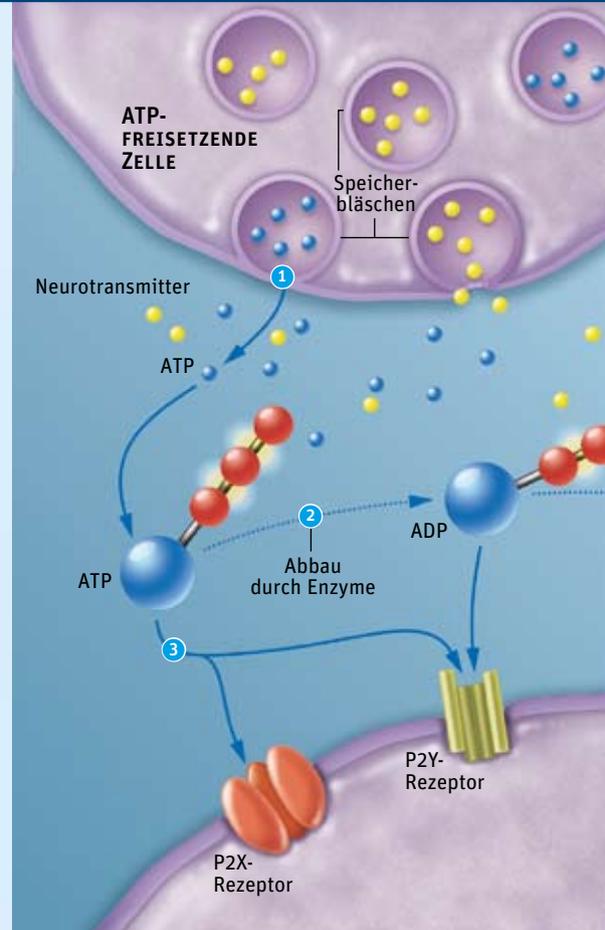
Das kleine Molekül Adenosintriphosphat (ATP) ist der Treibstoff der molekularen Maschinen, die es den Zellen ermöglichen, zu funktionieren und sich zu vermehren (unten). Daneben nutzen verschiedene Zelltypen ATP aber auch als Botenstoff, um Signale an benachbarte Zellen zu senden (rechts).



Das ATP-Molekül speichert Energie in den chemischen Bindungen seiner Phosphatgruppen. Diese sind an Adenosin gekoppelt, das zur Gruppe der Purine gehört.

Zellen produzieren ATP in ihren Mitochondrien. Diese membranumhüllten Zellorganellen nutzen die Energie eines Überschusses an Protonen (H<sup>+</sup>), die in Folge des Abbaus von Glukose (Traubenzucker) in sie hineingepumpt werden, um an Adenosindiphosphat (ADP) eine dritte Phosphatgruppe anzuhängen. Das so erzeugte ATP gelangt dann ins Zytoplasma. Dort nutzen biochemische Reaktionen wie die Proteinherstellung die Energie des ATPs, indem die endständige Phosphatgruppe wieder abgespalten wird. Die Mitochondrien recyceln dann das ADP und den Phosphatrest zur erneuten Herstellung von ATP. Jeder Mensch setzt pro Tag ungefähr sein eigenes Körpergewicht an ATP um.

... UND AUSSERHALB



von ATP übermittelt. Nach jahrelanger Forschungsarbeit war Burnstock 1972 schließlich überzeugt von der Existenz »purinerner Nervenfaser«, die ATP als Botenstoff nutzen. Was muss man sich darunter vorstellen?

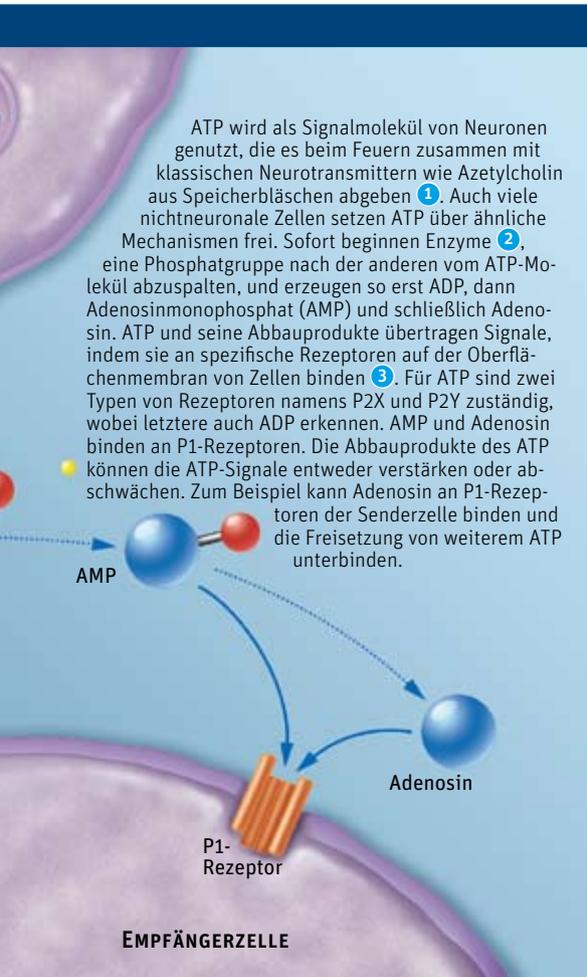
Ein erregtes Neuron erzeugt elektrische Impulse, die sich innerhalb der Zelle fortpflanzen, jedoch den schmalen Spalt zur nächsten Nerven- oder Muskelzelle nicht überspringen können. Daher wird das Signal an dieser Stelle – der Synapse – über chemische Botenstoffe wie Acetylcholin, Glutamat oder Dopamin weitergegeben, die das »feuernde« Neuron abgibt. Die Moleküle durchqueren den synaptischen Spalt und binden an Rezeptoren auf der Empfängerzelle, die daraufhin selbst aktiv wird: Eine stimulierte Nervenzelle gibt wiederum elektrische Signale weiter, während sich Muskelzellen zusammenziehen oder entspannen.

Lange Zeit dachten Forscher, ein bestimmtes Neuron verwende immer nur einen einzigen Neurotransmitter. Nervenzellen, die Acetylcholin nutzen, bezeichnete man daher als cholinerg, solche, die Dopamin freisetzen, als dopaminerg und so weiter. Entsprechend

stellte Burnstock sein Konzept der purinergen Neurone auf. Doch obwohl zahlreiche Untersuchungen die Freisetzung von ATP durch Nervenzellen in Muskelgewebe, Darm und Blase nachwiesen, betrachteten viele Neurophysiologen die Idee, ATP sei ein Signalüberträger, skeptisch. Vor allem hielten sie es für unwahrscheinlich, dass eine so allgegenwärtige Substanz eine derart spezifische Rolle ausübt.

Ein Botenstoff – viele Rezeptoren

Damit ein Botenstoff seine Funktion erfüllen kann, muss er an einen passenden Rezeptor auf der Zielzelle binden. Den ersten Neurotransmitterrezeptor hatten Wissenschaftler erst 1970 isoliert. Jetzt begann die Jagd nach einem möglichen ATP-Rezeptor. Doch schon lange bevor diese Empfängerproteine schließlich entdeckt wurden, versuchten Forscher mit pharmakologischen Methoden herauszufinden, wie die neuronalen ATP-Signale auf Muskelfasern und andere Zielzellen wirken. Auf Grund solcher Untersuchungen postulierte Burnstock 1987 zwei unterschiedliche Familien von Rezeptoren: eine für ATP (P2-Rezeptoren) und eine für sein Abbauprodukt Adenosin (P1-Rezep-



toren). Zudem rufen laut weiteren Studien aktivierte P2-Rezeptoren ganz unterschiedliche Effekte in Zellen hervor. Burnstock und sein Mitarbeiter Charles Kennedy schlossen daraus, dass es zwei Subtypen des P2-Rezeptors gibt, die sie P2X und P2Y nannten.

Die Vorstellung von ATP als Neurotransmitter blieb jedoch weiter umstritten. Erst in den 1990er Jahren erlaubten neue molekularbiologische Methoden, ATP-Rezeptoren zu isolieren und ihre vielfältigen Effekte auf Neurone und andere Zellen genauer zu untersuchen.

Mit Beginn des Humangenomprojekts Anfang der 1990er Jahre entdeckten Forscher nach und nach zahlreiche Gene, die wichtige Proteine des menschlichen Körpers kodieren – darunter auch einige für ATP-Rezeptoren. Damit konnten sie die Rezeptoren auf der Oberfläche verschiedener Zelltypen nachweisen und genauer erforschen. Zudem identifizierten sie eine Reihe von Kanalproteinen und Enzymen auf der Zelloberfläche, die ebenfalls an der Signalübertragung mittels ATP beteiligt sind.

Wie Burnstock vermutet hatte, existieren zwei Klassen von Rezeptoren, doch ließen sie

sich in unerwartet zahlreiche Rezeptorsubtypen weiter unterteilen. Diese erstaunliche Diversität ermöglicht es prinzipiell, einzelne Subtypen mit hochselektiven Medikamenten zu hemmen und so die ATP-vermittelte Signalübertragung gezielt nur in bestimmten Zellen oder Geweben zu beeinflussen. Inzwischen trägt dieser Ansatz bereits erste Früchte (siehe Tabelle S. 47).

### Zwei Wege zur Erhöhung der Kalziumionenkonzentration

Nach der Isolierung der ersten ATP-Rezeptoren stellte sich heraus, dass die beiden Hauptrezeptorklassen P2X und P2Y in deutlich unterschiedlicher Art und Weise funktionieren. Wie einer von uns (Khakh) zusammen mit anderen Wissenschaftlern entdeckte, öffnen P2X-Rezeptoren nach Bindung von ATP einen Kanal, der große Mengen von Natrium- und Kalziumionen in die Zellen einströmen lässt. Sie gehören also zu den »transmittergesteuerten Ionenkanälen«. P2Y-Rezeptoren hingegen sind keine Kanalproteine. Nach ATP-Bindung lösen sie im Innern der Zelle eine molekulare Reaktionskaskade aus, die Kalziumionen aus intrazellulären Speichern freisetzt. In beiden Fällen stößt die ansteigende Kalziumkonzentration biochemische Vorgänge an, die letztlich das Verhalten der Zelle verändern.

Das ATP verbleibt nur kurzzeitig im synaptischen Spalt. Entsprechend kommen die zellulären Effekte der Rezeptoraktivierung manchmal sehr schnell zum Tragen – binnen Millisekunden. Khakh beobachtete, dass via P2X-Kanäle einströmende Kalziumionen die Zellen im Hirngewebe praktisch augenblicklich dazu veranlassten, weitere Botenstoffe abzugeben. In anderen Fällen treten Wirkungen nur sehr langsam auf, manchmal sogar erst nach Jahren. So kann durch ATP-Bindung an P2Y-Rezeptoren freigesetztes Kalzium die Aktivität von Genen beeinflussen, welche die Zellteilung steuern, und auf diese Weise langfristige Veränderungen im Gewebe hervorrufen.

Auf der Oberfläche der meisten Zellen befinden sich so genannte Ecto-ATPasen, die vom ATP-Molekül nacheinander die Phosphatreste abtrennen und es so zunächst in Adenosindiphosphat (ADP), dann in Adenosinmonophosphat (AMP) und schließlich in Adenosin umwandeln. Jedes dieser Abbauprodukte kann aber wiederum die Funktion von Zellen beeinflussen, etwa wenn Adenosin an P1-Rezeptoren bindet.

So wies der japanische Neurophysiologe Fusao Kato von der Medizinischen Hochschule Jikei in Tokio nach, dass ATP und Ade-

### EINE KURZE GESCHICHTE DES ATP

**1929** ATP wird als Energiequelle im Muskelgewebe identifiziert. Im selben Jahr entdeckt Albert Szent-Györgyi (Foto), dass Purine (zu denen ATP gehört) die Herzfunktion stark beeinflussen



GETTY IMAGES / JOHN PHILLIPS

**1945** Molekülstruktur von ATP experimentell bestätigt

**1959** Pamela Holton weist die ATP-Freisetzung aus sensorischen Nerven nach

**1962** Geoffrey Burnstock (Foto) beobachtet Signalübertragung von Neuronen auf Muskelzellen mittels eines bisher unbekanntes Neurotransmitters



MOLLIE HOLMAN UND BURNSTOCK, 1962. MIT FÖHL. GER. VON GEOFFREY BURNSTOCK

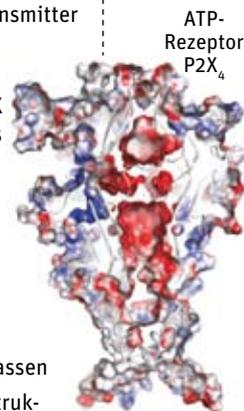
**1972** Burnstock vermutet, dass bestimmte Nervenzellen ATP als Neurotransmitter nutzen

**1976** Burnstock postuliert, dass ATP als Kotransmitter für andere Neurotransmitter wirkt

**1993/1994** Die ATP-Rezeptoren P2X und P2Y werden aus Zellen isoliert

**1998** Clopidogrel, das P2Y-Rezeptoren auf Blutplättchen blockiert, wird als Medikament zur Vorbeugung gegen Blutgerinnsel zugelassen

**2009** Die Kristallstruktur eines P2X-Rezeptors (rechts) ist entschlüsselt



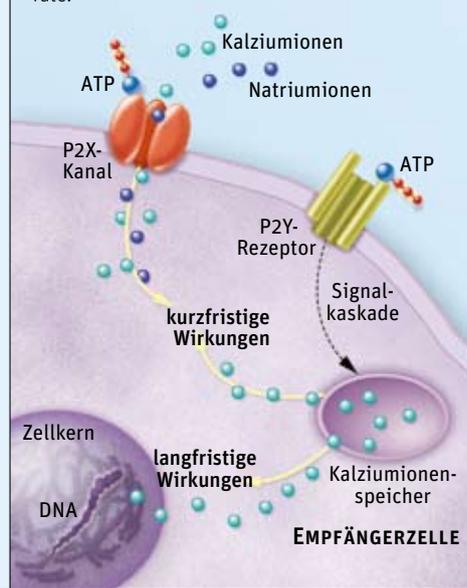
AUS: T. KAWATE ET AL., NATURE 460, 592-598, 30. JULI 2009, FIG. 5G

ATP IN AKTION

REZEPTORTYPEN

Es gibt zwei Formen von ATP-Rezeptoren auf Zelloberflächen: Rezeptoren vom P2X-Typ sind Ionenkanäle, die sich durch Bindung von ATP öffnen und dann Kalzium- und Natriumionen in die Zelle einströmen lassen. Bindet ATP hingegen an einen P2Y-Rezeptor, setzt dieser im Zellinnern eine Signalkaskade in Gang, die schließlich zur Freisetzung gespeicherter Kalziumionen in das Zellplasma führt.

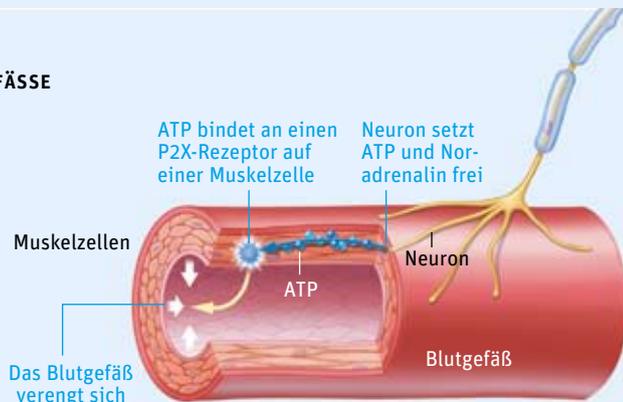
In beiden Fällen kann der Anstieg des intrazellulären Kalziumspiegels kurzfristige Ereignisse auslösen, etwa eine Muskelkontraktion. P2Y-Rezeptoren können zusätzlich die Genaktivität beeinflussen und so dauerhafte Änderungen bewirken, zum Beispiel bei der Zellteilungsrate.



WIRKUNGEN AUF BLUTGEFÄSSE

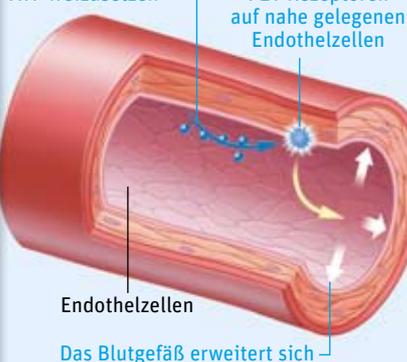
A Gefäßverengung

Zellen des sympathischen Nervensystems setzen ATP zusammen mit dem Botenstoff Noradrenalin frei. ATP bindet dann an Rezeptoren auf Muskelzellen in den Blutgefäßwänden, was eine schnelle Muskelkontraktion bewirkt (Bild rechts).



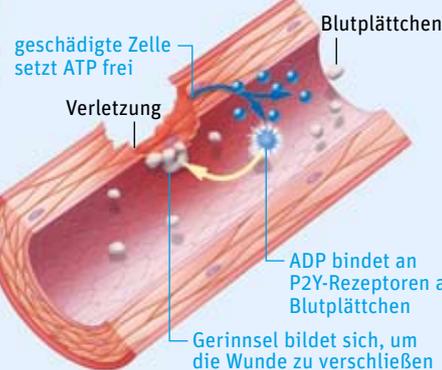
Scherkräfte veranlassen Endothelzellen, ATP freizusetzen

ATP bindet an P2Y-Rezeptoren auf nahe gelegenen Endothelzellen



B Gefäßweiterung

Veränderungen des Blutflusses bewirken Scherkräfte an den Zellen des Endothels, der inneren Auskleidung der Blutgefäße. Einige Endothelzellen setzen daraufhin ATP frei, was Rezeptoren auf benachbarten Endothelzellen aktiviert. Diese reagieren mit der Freisetzung von Stickoxid (NO), wodurch sich das Gefäß erweitert (Bild links).



C Blutgerinnung

Aus geschädigten Zellen am Ort einer Verletzung austretendes ATP wird zu ADP abgebaut. ADP bindet an Rezeptoren auf Blutplättchen, die ein Gerinnsel bilden und so die Wunde verschließen (Bild rechts).

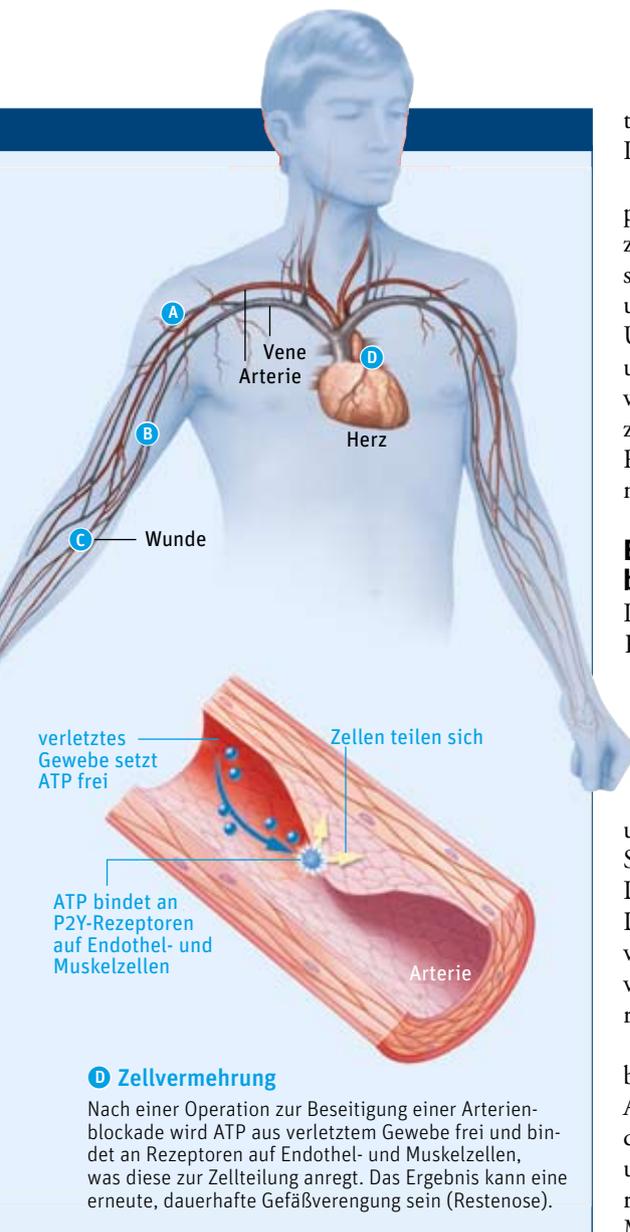
nosin im Hirnstamm zusammenarbeiten, wo grundlegende Körperfunktionen wie Atmung, Herzschlag und Verdauung geregelt werden. In anderen Zusammenhängen jedoch wirken ATP und Adenosin als Gegenspieler, etwa bei der Signalübertragung zwischen manchen Neuronen, bei der Adenosin die ATP-Freisetzung in den synaptischen Spalt hemmen kann. ATP, seine Bestandteile und die Ecto-ATPasen bilden also in vielen Fällen eine sich selbst regulierende Signalschleife.

Darüber hinaus wirkt ATP im Nervensystem gemeinsam mit anderen Botenstoffen als so genannter Kotransmitter, wie Burnstock 1976 herausfand. Diese Entdeckung kippte die althergebrachte Vorstellung, jedes individuelle Neuron besäße nur einen einzigen Neurotransmitter. Seitdem zeigten zahlreiche Untersuchungen, dass ATP oft zusammen mit klassischen Neurotransmittern wie Noradrenalin oder Azetylcholin freigesetzt wird.

Zwar wurde die neuronale Signalübertragung mit Hilfe mehrerer Neurotransmitter zuerst für ATP nachgewiesen, jedoch tritt das Phänomen ebenso bei anderen Transmittern auf. Zum Beispiel wird GABA (Gamma-Aminobuttersäure) auch zusammen mit Glycin, Dopamin mit Serotonin, und Azetylcholin mit Glutamat freigesetzt.

Sehen, hören, schmecken, fühlen

Angesichts der Bedeutung von ATP in der Informationsübertragung zwischen Nervenzellen überrascht es kaum, dass das Molekül auch bei der Sinneswahrnehmung eine wichtige Rolle spielt. In der Netzhaut des Auges zum Beispiel beeinflussen ATP-Rezeptoren auf Nervenzellen deren Reaktion auf die Signale, die sie von den Lichtsensoren – den Stäbchen und Zapfen – erhalten. Die von der Netzhaut ausgehenden Nervenfasern wiederum nutzen ATP und Azetylcholin als Ko-



**D Zellvermehrung**

Nach einer Operation zur Beseitigung einer Arterienblockade wird ATP aus verletztem Gewebe frei und bindet an Rezeptoren auf Endothel- und Muskelzellen, was diese zur Zellteilung anregt. Das Ergebnis kann eine erneute, dauerhafte Gefäßverengung sein (Restenose).

transmitter, um Informationen an die Zentren der sensorischen Informationsverarbeitung im Gehirn weiterzugeben.

Zudem beobachteten mehrere Forschergruppen, dass ATP in bestimmten Abschnitten der embryonalen Entwicklung Weichenstellungen auslöst. So gibt das Molekül laut Nicholas Dale und seinen Kollegen von der University of Warwick in England während der frühen Embryonalphase das Signal zur Ausbildung der Augen. Ebenso ist die Freisetzung von ATP während der Entwicklung für die korrekte Bildung der Cochlea, des Hörorgans im Innenohr, unverzichtbar. Aber auch Erwachsene benötigen noch ATP-Signale für die einwandfreie Funktion des Innenohrs: Beim Menschen kleiden dort rund 50 000 Haarzellen die Cochlea aus, wo sie als Antennen für die eingehenden akustischen Informationen dienen. Etwa die Hälfte davon trägt ATP-Rezeptoren auf ihrer Oberfläche, die un-

ter bestimmten Umständen helfen, neuronale Impulse auszulösen.

Die Sinneszellen in den Geschmacksknospen der Zunge weisen ebenfalls P2X-Rezeptoren auf, und diese vermitteln die Geschmacksempfindungen. Sue C. Kinnamon und ihre Kollegen von der Colorado State University wiesen nach, dass ATP nötig ist, um Informationen an Geschmacksneurone weiterzuleiten: Die von den Forschern gezüchteten Mäuse ohne P2X<sub>2</sub>- und P2X<sub>3</sub>-Rezeptoren besaßen keinen Geschmackssinn mehr.

**Ein Schlüsselmolekül bei der Schmerzentstehung**

Interessanterweise handelt es sich bei diesen Rezeptoren der Geschmacksknospen um die gleichen, die auch an bestimmten Formen der Schmerzwahrnehmung beteiligt sind.

Seit Jahrzehnten ist bekannt, dass ATP Schmerzen hervorruft, wenn man es in die Haut spritzt. Stephen B. McMahon und seine Kollegen an der Guy's, King's and St Thomas' School of Biomedical Sciences in London fanden vor Kurzem heraus, warum: Diese Schmerzen entstehen durch Aktivieren von P2X<sub>3</sub>-Rezeptoren auf sensorischen Nervenendigungen in der Haut, welche auf Berührungen und Schmerzreize reagieren.

Auch bei neuropathischen Schmerzen, die bei Schädigung von Nerven auftreten, spielt ATP eine Rolle. Untersuchungen von Kazuhide Inoue an der Kyushu-Universität in Japan und Michael Salter an der University of Toronto zeigten, dass dabei ATP-Rezeptoren auf Mikrogliazellen im Rückenmark aktiviert werden. Diese Zellen geben dann Moleküle ab, die Nervenzellen reizen und dadurch anhaltende Schmerzen verursachen (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2010, S. 52).

Auf Grund solcher Erkenntnisse haben derzeit mehrere Pharmaunternehmen die P2X-Rezeptoren als neue Ansatzpunkte zur Schmerztherapie im Visier. Und auch auf anderen Gebieten der Medizin werden vielleicht bald Medikamente, die ATP oder seine Rezeptoren beeinflussen, neue Behandlungsmöglichkeiten eröffnen: etwa für Patienten mit Neigung zu Thrombosen.

Bei Verletzungen geben gestresste oder geschädigte Zellen ATP in die Umgebung ab. Blutplättchen tragen auf ihrer Zellmembran den P2Y<sub>12</sub>-Rezeptor, dessen Aktivierung durch das ATP-Abbauprodukt ADP dafür sorgt, dass sich Blutgerinnsel bilden. So versucht der Körper, aus verletzten Blutgefäßen strömendes Blut zu stillen. Dieser Vorgang kann aber auch irrtümlicherweise in der freien Blutbahn ablaufen und wichtige Gefäße verstopfen, was

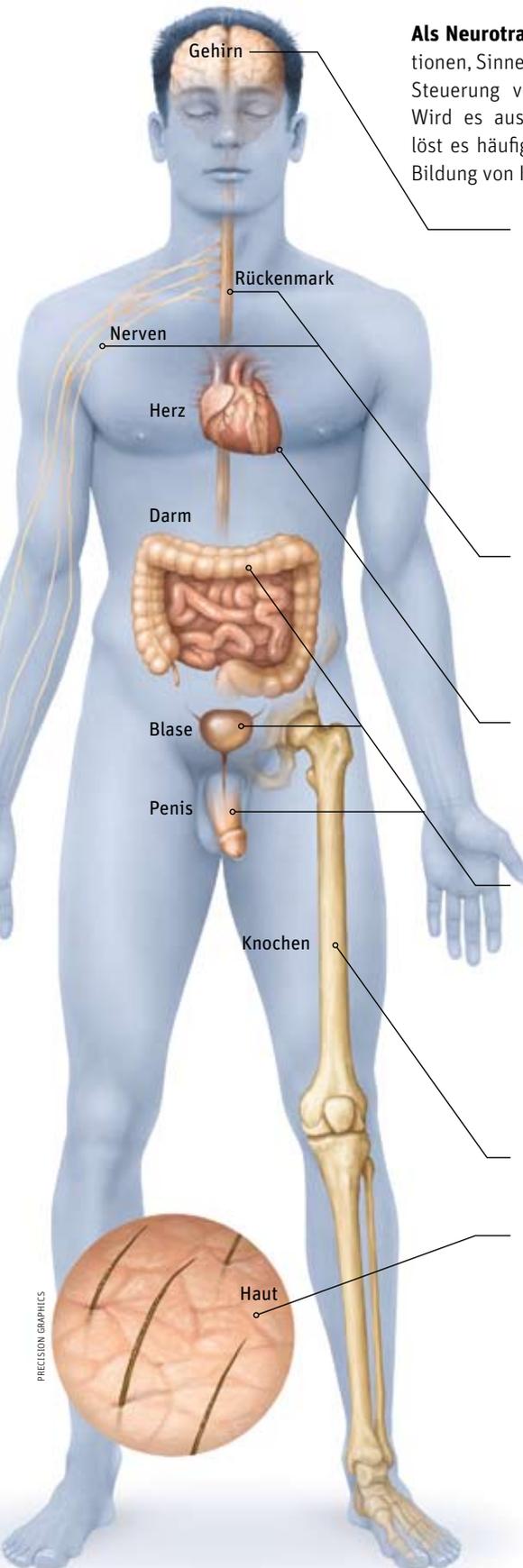
**FRÜHSTART**

Die Entdeckung von ATP-Rezeptoren bei Pflanzen und primitiven Lebensformen wie Amöben und Würmern lässt vermuten, dass das Molekül schon sehr früh in der Evolution eine Rolle als Signalgeber übernahm. In dem Schleimpilz *Dictyostelium discoideum* (unten) steuern P2X-ähnliche ATP-Rezeptoren auf den Zellmembranen den Ein- und Ausstrom von Wasser.



TEXAS TECH UNIVERSITY, M. J. GRINSON UND H. L. BLANTON

## HANDSDAMPF IN ALLEN GASSEN



**Als Neurotransmitter ist ATP direkt** an Hirnfunktionen, Sinneswahrnehmungen und der neuronalen Steuerung von Muskeln und Organen beteiligt. Wird es aus nichtneuronalen Zellen freigesetzt, löst es häufig schützende Vorgänge aus, etwa die Bildung von Knochengewebe oder Zellteilungen.

**GEHIRN:** ATP beeinflusst die Kommunikation zwischen Neuronen und Stützzellen, der so genannten Glia. Durch ATP und seine Abbauprodukte vermittelte Signale sind unter anderem an der Steuerung von Schlaf, Gedächtnis, Lernen und Bewegungen beteiligt. Überschießende ATP-Signale könnten Epilepsie und verschiedene psychiatrische Erkrankungen auslösen. ATP stimuliert auch die Entwicklung von Nervengewebe und seine Reparatur nach Schädigungen. Es könnte jedoch auch das Zellsterben bei neurodegenerativen Erkrankungen begünstigen.

**SINNESORGANE UND SCHMERZWAHRNEHMUNG:** ATP reguliert den Informationsfluss von Augen, Ohren, Nase und Zunge zum Gehirn. Auch Neurone, die bei der Schmerz Wahrnehmung beteiligt sind, nutzen ATP für die Signalübertragung an das Rückenmark.

**HERZ:** ATP, das zusammen mit Noradrenalin vom vegetativen Nervensystem freigesetzt wird, stimuliert die Kontraktionen des Herzmuskels. Fehlfunktionen dieses Signalsystems können Störungen von Herzrhythmus und Blutdruck auslösen.

**ANDERE ORGANE:** Normale Darmbewegungen und Enzymsekretion während der Verdauung werden von ATP-Signalen aus Neuronen im Darm erheblich mitbeeinflusst. Auch die Harnblasenentleerung wird über ATP reguliert, und sowohl Erektion als auch Erschlaffung des Penis beruhen auf ATP-Signalen an glatte Muskelzellen und an Endothelzellen, die wiederum muskelentspannendes Stickstoffmonoxid freisetzen.

**KNOCHEN:** Aktivierte ATP-Rezeptoren stimulieren die Knochenbildung und hemmen den Knochenabbau.

**HAUT:** ATP-Rezeptoren vermitteln die Erneuerung von Hautzellen: bei normaler Regeneration, Wundheilung und möglicherweise auch bei Erkrankungen mit überschießender Vermehrung von Hautzellen wie Psoriasis oder Sklerodermie.

**IMMUNSYSTEM:** ATP, das von geschädigten Zellen freigesetzt wird, ruft Entzündungsreaktionen hervor, die auch schmerzhaft sein können. Übermäßige und anhaltende Entzündungsreaktionen können Gewebe zerstören, wie zum Beispiel den Gelenkknorpel bei der rheumatoiden Arthritis. ATP-Signale helfen Immunzellen auch beim Abtöten von bakteriell infizierten Zellen.

Herzinfarkte oder Schlaganfälle verursacht. Substanzen wie Clopidogrel verhindern dies, indem sie den P2Y<sub>12</sub>-Rezeptor auf Blutplättchen blockieren. Inzwischen befindet sich eine Reihe ähnlich funktionierender Medikamente in fortgeschrittenen klinischen Studien zur Behandlung von Erkrankungen der Herzkranzgefäße.

Auch der Verdauungstrakt stellt ein viel versprechendes Einsatzgebiet für Substanzen dar, die an ATP-Rezeptoren angreifen. Der Neurowissenschaftler James J. Galligan von der Michigan State University und andere Forscher beobachteten, dass von Neuronen des Darmnervensystems freigesetztes ATP über P2X- und P2Y-Rezeptoren die rhythmischen Kontraktionen des Darms steuert, welche den Verdauungsbrei voranschicken. Gleichzeitig sorgen aktivierte P2Y-Rezeptoren auf der Innenseite der Darmwand für die Absonderung von Verdauungsenzymen. Pharmaunternehmen untersuchen daher Wirkstoffe, die diese Rezeptoren beeinflussen, intensiv auf ihre Eignung als Therapeutika beim Reizdarmsyndrom und bei chronisch entzündlichen Darmerkrankungen wie Morbus Crohn.

### Körpereigene Waffe gegen Tumoren?

Da ATP an der normalen Funktion sämtlicher Organe und Gewebe beteiligt ist, stellt es möglicherweise auch einen Angriffspunkt für die Behandlung verschiedenster anderer Krankheiten dar: etwa der Nieren, der Knochen und der Harnblase – oder auch neurologischer und psychiatrischer Erkrankungen. Zudem könnte ATP sogar ein körpereigenes Mittel zur Krebsabwehr sein. Der organische Chemiker und ATP-Experte Eliezer Rapaport, der damals an der Boston University School of Medicine forschte, beschrieb 1983 als Erster einen Antitumoreffekt des Moleküls. Seine Beobachtung wurde zunächst skeptisch aufgenommen, doch ergaben weitere Untersuchungen mehrerer unabhängiger Forschergruppen, dass ATP tatsächlich das Wachstum von Tumoren hemmen kann, etwa bei Prostata-, Brust-, Darm-, Eierstock-, Speiseröhren- und Hautkrebs. Dabei lösen die ATP-vermittelten Signale zum einen ein Selbstmordprogramm in den Tumorzellen aus und fördern zum anderen ihre Differenzierung, wodurch sie sich nicht mehr so oft teilen.

Viele Labors und Pharmaunternehmen entwickeln derzeit Wirkstoffe, die bestimmte ATP-Rezeptorsubtypen selektiv aktivieren oder hemmen, die Freisetzung von ATP erhöhen oder verringern beziehungsweise den Abbau des Moleküls außerhalb der Zellen

## ATP-REZEPTOREN IM VISIER

**Verschiedene Substanzen beeinflussen die Aktivität** von Gliazellen. Zurzeit laufen Tests, ob sie als Medikamente gegen neuropathische Schmerzen eingesetzt werden könnten oder ob sie sich auch dazu eignen, Opiattoleranzen und Entzugserscheinungen zu verringern. Ein Stern bedeutet, dass das Mittel bereits gegen andere Krankheiten eingesetzt wird.

ERKRANKUNG	WIRKSTOFF	WIRKMECHANISMUS	ERPROBUNGSSTADIUM
Mukoviszidose	Denufosol	aktiviert P2Y <sub>2</sub> -Rezeptoren	Wirksamkeitsprüfung beim Menschen in Endphase
trockene Augen	Diquafosol	aktiviert P2Y <sub>2</sub> -Rezeptoren	Wirksamkeitsprüfung beim Menschen in Endphase; 2010 in Japan zugelassen
Entzündung	EVT 104	hemmt P2Y <sub>7</sub> -Rezeptoren	Sicherheitsprüfung beim Menschen abgeschlossen
Schmerzen	GSK1482160	hemmt P2Y <sub>7</sub> -Rezeptoren	Sicherheitsprüfung beim Menschen läuft
	unbenannte Substanz (von Evotec AG)	hemmt P2Y <sub>3</sub> - und P2Y <sub>2/3</sub> -Rezeptoren	Prüfung an Zellkulturen und im Tierexperiment
rheumatoide Arthritis	CE-224535	hemmt P2X <sub>7</sub> -Rezeptoren	Wirksamkeitsprüfung beim Menschen abgeschlossen
	AZD9056	hemmt P2X <sub>7</sub> -Rezeptoren	Sicherheitsprüfung beim Menschen abgeschlossen
arterielle Thromboembolien	Clopidogrel	hemmt P2Y <sub>12</sub> -Rezeptoren	zugelassen
	Prasugrel	hemmt P2Y <sub>12</sub> -Rezeptoren	zugelassen
	Elinogrel (PRT060128)	hemmt P2Y <sub>12</sub> -Rezeptoren	Sicherheitsprüfung beim Menschen abgeschlossen
	Ticagrelor	hemmt P2Y <sub>12</sub> -Rezeptoren	Wirksamkeitsprüfung beim Menschen abgeschlossen



**Baljit S. Khakh** (links) ist Assistenzprofessor für Physiologie und Neurobiologie an der David Geffen School for Medicine der University of California in Los Angeles. Er entwickelte neue Werkzeuge zur Erforschung der Reaktionen von Zellen auf ATP.

**Geoffrey Burnstock** beschrieb als Erster, dass ATP als Signalsubstanz fungiert. Er leitete 22 Jahre lang die Abteilung für Anatomie und Entwicklungsbiologie am University College London und ist heute Präsident des Autonomic Neuroscience Centre an der Royal Free and University College Medical School in London.

**Burnstock, G.:** Pathophysiology and Therapeutic Potential of Purinergic Signaling. In: *Pharmacological Reviews* 58(1), S. 58 – 86, 2006.

**Burnstock, G.:** Physiology and Pathophysiology of Purinergic Neurotransmission. In: *Physiological Reviews* 87(2), S. 659 – 797, 2007.

**Kawate, T. et al.:** Crystal Structure of the ATP-gated P2X<sub>4</sub> Ion Channel in the Closed State. In: *Nature* 460, S. 592 – 598, 2009.

**Khakh, B. S.:** Molecular Physiology of P2X Receptors and ATP Signalling at Synapses. In: *Nature Reviews Neuroscience* 2, S. 165 – 174, 2001.

**Khakh, B. S., North, R. A.:** P2X Receptors as Cell-Surface ATP Sensors in Health and Disease. In: *Nature* 442, S. 527 – 532, 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050006](http://www.spektrum.de/artikel/1050006).

hemmen. Allerdings gibt es ein wesentliches Hindernis bei der Entwicklung von Medikamenten, die nur auf ein bestimmtes Organ oder Gewebe wirken sollen, ohne andernorts Nebenwirkungen hervorzurufen: die Allgegenwart von ATP. Die große Vielfalt an Kombinationen von Rezeptorsubtypen auf verschiedenen Zellen könnte hier jedoch helfen.

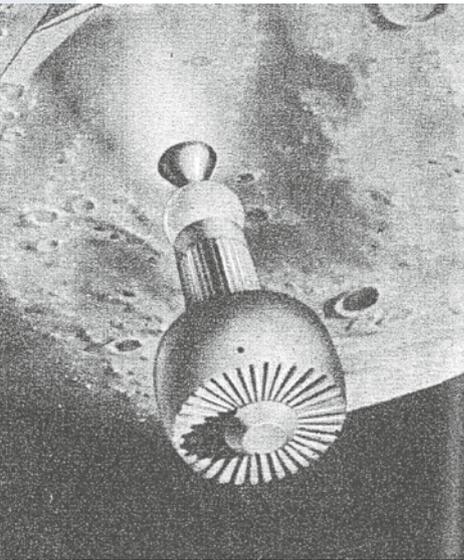
Einer der wichtigsten Durchbrüche auf diesem Forschungsgebiet in den letzten 20 Jahren war die Aufklärung der Kristallstruktur eines P2X-Ionenkanals aus Zebrafischen. Der amerikanische Chemiker Eric Gouaux und seine Kollegen von der Oregon Health and Science University entschlüsselten 2009, wie der Rezeptor auf der atomaren Ebene funk-

tioniert, und eröffneten so den Weg zu einem detaillierten Verständnis der Informationsübermittlung mittels ATP. Damit dürfte sich die Entwicklung spezifischer Medikamente erheblich beschleunigen.

Die kürzliche Entdeckung von ATP-Rezeptoren in Pflanzen und primitiven Organismen wie Grünalgen, Amöben und Schistosoma, dem Erreger der Bilharziose, zeigt, dass sich dieser Signalweg eventuell auch für die Pflanzenzucht sowie die Therapie von Infektionskrankheiten nutzen lässt. Sie legt aber auch nahe, dass ATP schon früh in der Evolution eine Rolle als Signalmolekül übernahm – möglicherweise bereits gleichzeitig mit seiner Funktion als Energieträger. ◀

## Erstes Reiseziel im Weltraum – der Mond

»Seit Herbst dieses Jahres läuft in den Vereinigten Staaten ein Forschungsprogramm, um die Kenntnisse über den Mond auszuweiten. Der Endzweck ist dabei die Vorbereitung der ersten bemannten Flüge. Der erste Teil wird der Versuch



sein, einen Satelliten in eine Umlaufbahn um den Mond zu bringen. Anschließend wird im Sommer 1961 das Strahltriebslaboratorium der Technischen Hochschule von Kalifornien mit einer Serie von »Ranger«-Schüssen beginnen. Die beiden ersten dieser Großraketen sind als Nahschüsse geplant, um die benutzten Techniken zu erproben und neue Kenntnisse über die Bedingungen im Raum zwischen Erde und Mond zu gewinnen. Die restlichen drei Rangers sollen dann Instrumentenkapseln auf den Mond tragen, um »Mondbeben« aufzuspüren und weitere Informationen zu sammeln.« *Populäre Mechanik*, 5. Jg., Nr. 63, Dezember 1960, S. 46–47

**Die Raumsonden der Ranger-Serie sendeten vor ihrem Aufschlag Daten vom Mond**

## Die erste Kernfusion

»Schon vor einiger Zeit gingen Nachrichten durch die Presse, wonach Forschern in Los Alamos erstmals eine thermische Kernverschmelzung geglückt sei. Nun liegen Berichte vor. Erstens stimmt die Zahl der Neutronen, die zudem genau im Maximum der magnetischen Kompression auftreten, mit dem überein, was man bei der errechneten Temperatur – etwa 13 Millionen Grad – erwarten sollte.



Zweitens konnte nachgewiesen werden, daß alle Neutronen ihren Ursprung in dem höchsterhitzten Bereich von etwa 2 cm Größe im Zentrum des Plasmas haben und von dort nach allen Richtungen ausgehen.« *Kosmos*, 56. Jg., Heft 12, Dezember 1960, S. 484–485

## Zum Nashornmelken

»Nachdem im Zoologischen Garten Frankfurt ein afrikanisches Nashorn geboren wurde, dessen Mutter ungewöhnlich zahm war, gelang es durch Melken Proben zu erhalten. Es zeigte sich eine Veränderung sämtlicher Milchbestandteile mit Ausnahme der Rohasche gegen Ende der Laktationszeit. Der Eiweißgehalt fiel um die Hälfte, Fett war nur in geringen Mengen nachweisbar. Dagegen zeigte der Milchzuckergehalt einen geringen Anstieg. Für die Aufzucht von afrikanischen Nashörnern eignet sich von den (verfügbaren) Milchcharten am besten entrahmte Kuhmilch.« *Kosmos*, 56. Jg., Heft 12, Dezember 1960, S. 481



## Gewitter im Telefon

»Spanien ist es vorbehalten gewesen, zuerst die drahtlose Telegraphie zu einer wissenschaftlichen Beobachtung von Gewittern zu benutzen. Durch ein Instrument werden die

elektromagnetischen Wellen, die durch die Entladung von Blitzen in der Atmosphäre erzeugt werden, aufgefangen und können sowohl durch ein Telefon hörbar als durch einen Schreibstift sichtbar gemacht. Wichtig ist die Möglichkeit, die Zugrichtung eines Gewitters und die Schnelligkeit seiner Fortbewegung vorausbestimmen zu können.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik*, 31. Jg., Nr. 24, 15. Dezember 1910, S. 351

## Rassistische Ethnologie

»Es kann unmöglich ein träger Menschenschlag gewesen sein, der einst die weitverstreuten Inseln der Südsee besiedelt hat. Die Samoaner waren für Jahrhunderte dem jede Untauglichkeit rächenden Arm der Geschichte entzogen. Die durch die Tropen fortschreitende Verweichlichung wurde durch ein anderes Moment beschleunigt. Die Abgeschlossenheit gewährleistete Inzucht. Als eine Folge hiervon ist Konservativismus entstanden. Ihren Ausdruck findet diese Eigentümlichkeit in der auf kommunistischer Grundlage aufgebauten Gesellschaftsordnung.« *Umschau*, 14. Jg., Nr. 51, 17. Dezember 1910, S. 1009

## Messen heißt sparen

»Der erste Schritt zur Sparsamkeit ist eine Überwachung der Ausgaben. Zählwerke, Zeigerwerke, Registrierapparate, Hub- und Rotationszähler sind diese wertvollen Mitarbeiter zur Erhaltung eines sparsamsten Betriebes. In der deutschen Technik hat die Rechenkunst von jeher hohen Einfluß gehabt, dieses macht es erklärlich, daß sich Spezialwerke für die praktische Meßkunst durch die Herstellung von gewerblichen Meß- und Registrierapparaten entwickelt haben, deren Erzeugnisse heute über die ganze Welt Verbreitung finden. Die diesjährige Weltausstellung in Brüssel hat diesem Zweig der deutschen Technik neue Lorbeeren zuerkannt.« *Haustechnische Rundschau*, 15. Jg., Heft 11, 1. Dezember 1910, S. 124



**Deutscher Ausstellungsstand in Brüssel**



Ein Leuchtturm für Düsenjets

## Power-Tower

»Wie ein Leuchtturm des Düsenflugzeitalters steht zwischen den beiden Start- und Landebahnen des Flughafens von Newark einer neuer 45 m hoher Kontrollturm, in dem elektronische Geräte im Wert von 1 Million Dollar untergebracht sind. Der dreizehnstöckige Bau ist der Arbeitsplatz von rund 90 Angestellten der amerikanischen Bundesflugbehörde. Im Tag- und Nachtdienst betreiben sie Funksender und -empfänger, Peilgeräte und Radaranlagen zur Luftüberwachung. Außerdem werden vom Turm aus auch die Navigationshilfen gesteuert, darunter zwei Anlagen für Instrumentenladung, nebst den dazugehörigen Anlagen für die Anflugbefeuerung und eine Funksprechverbindung. Der Turm steht fast in der Mitte des 920 ha großen Flugplatzes, der vergangenes Jahr 3 Millionen Fluggäste abfertigte und bis 1945 einen Passagierstand von 6 Millionen erreichen will.« *Populäre Mechanik*, 5. Jg., Nr. 63, Dezember 1960, S. 62

## Eisfreie Windschutzscheibe

»Sowjetische Wissenschaftler haben ein Verfahren entwickelt, mit dem wirtschaftlich ein elektrisch leitendes Glas hergestellt werden kann. Dabei wird Glas fast bis zum Schmelzpunkt erhitzt und dann mit Zinnchlorid behandelt. Dadurch bildet sich eine Zinnoxyschicht, wodurch die Durchsichtigkeit zwar etwas beeinträchtigt wird, aber das Glas kann für Windschutzscheiben im Automobil- und Flugzeugbau verwandt werden. Durch dieses Glas kann Elektrizität von einer niedrigen Ampèrezahl geleitet werden, so daß durch die so erfolgende Erwärmung Eisbildung oder Luftkondensation vermieden werden kann.« *Chemiker-Ztg.*, 84. Jg., Nr. 24, Dezember 1960, S. 829

## Billige Steuergeräte für des Haushalt

»Elektronische Geräte für den Haushalt sollen bis 1965 so billig werden, daß sie für das durchschnittliche Einkommen erreichbar sind, sagte der Leiter der Electronic Components Division der General Electric (USA) voraus. So sollen z. B. elektronische Lichtsteuergeräte zum beliebigen Einstellen der Helligkeit in

Wohnräumen, die heute noch 150\$ kosten, für 10 bis 12\$ erhältlich werden. Ferner soll es in fünf Jahren preiswerte elektronische Steuergeräte geben, mit denen man von einer Stelle im Hause aus die Türen verriegeln und die Fenster öffnen und schließen kann.« *Elektrotechnische Zeitschrift*, Bd. 12, Heft 25, 12. Dezember 1960, S. 617

## Narkosemittel Strom

»Seit Prof. St. Leduc in Paris die anästhetisierende Wirkung rasch unterbrochenen Gleichstroms entdeckt hat, führte eine Reihe von Versuchen zu weiteren auch für die Praxis bedeutungsvollen Ergebnissen. So unterwarf sich Leduc kürzlich selbst der Wirkung solcher rasch folgenden Stromstöße, wobei allmählich Gefühllosigkeit des ganzen Körpers eintrat. Eine Schülerin von Leduc, Frl. Robinovitch aus New York, ging einen Schritt weiter und verwendete die Wirkung in einem Fall praktischer Chirurgie. Ein junger Mann von 23 Jahren litt an Krebs an den Füßen. Die Aerzte beschlossen vier Zehen abzunehmen. Frl. Robinovitch schlug die elektrische Anästhetisierung vor. Zunächst wurden die Elektroden am rechten Bein angelegt, welches sehr schnelle gefühllos wurde. Nach Beseitigung der rechten großen Zehe wurde das Verfahren auf das linke Bein angewendet. Drei weitere Zehen wurden abgenommen. Während der drei Viertel Stunden dauernden Operation verspürte der Kranke keinerlei Schmerzen und scherzte sogar mit Frl. Robinovitch und den behandelnden Aerzten.« *Zeitschrift für Schwachstromtechnik*, Heft 24, Dezember 1910, S. 647

## Ein splendides Licht

»Das Neueste auf dem Gebiete des Beleuchtungswesens dürfte das sogenannte Carbididlicht sein. Wie schon der Name erraten läßt, handelt es sich eigentlich um Acetylen, das ja bekanntlich noch immer bezüglich seiner enormen Leuchtkraft und Schönheit unerreicht dasteht. Die Erzeugung des Carbididlichtes geschieht jedoch nicht durch das gewöhnliche Calcium-Carbid, sondern durch gepresste, zylindrisch geformte, aus besonders präpariertem Carbid hergestellte Körper. Die auf solche Weise fabrizierten Carbididkörper haben die wertvolle Eigenschaft, daß sie ganz langsam vergasen und (sich) die Gasproduktion dem durch die entzündeten, d.h. im Betrieb befindlichen Flammen benötigten Gaskonsum anpaßt. Besonders geeignet ist der Apparat für alle Wohn- und Arbeitsstätten, die fernab von zentralen Gas- oder Elektrizitätswerken liegen

Schöner leuchten



und wo man doch Anspruch auf ein etwas splendideres Licht als es die gewöhnlichen Leuchtmittel bieten können, sieht.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 50, 10. Dezember 1910, S. 1008



Überlebten hier unsere Vorfahren harsche Zeiten? In dieser Höhle – PP13B – bei Mossel Bay ganz im Süden Afrikas hinterließen moderne Menschen schon vor 164 000 Jahren Spuren.

# Als die MENSCHEN fast ausstarben

Beinahe wäre unsere Spezies gleich wieder ausgestorben. Vor mehr als 120 000 Jahren überstanden nur wenige moderne Menschen das damals anhaltend harte Klima Afrikas. Doch die Südküste des Kontinents bot durchgehend gute Lebensbedingungen – am Meer.

Von Curtis W. Marean

**A**ngesichts einer Weltbevölkerung von bald sieben Milliarden können wir uns schwer vorstellen, dass unsere Art einmal kurz vor dem Aussterben stand. Dennoch lassen Erbgutvergleiche von heutigen Menschen einen dramatischen Engpass der *Homo-sapiens*-Population in der Vorzeit vermuten. Ganz genau steht bisher zwar weder fest, wann der so genannte moderne Mensch – eben der *Homo sapiens* – auftrat, noch, wann er fast wieder unterging. Nach Fossilbefunden aber dürfte unsere Spezies vor wenig mehr als 195 000 Jahren in Afrika entstanden sein und sich dann auf dem Kontinent rasch ausgebreitet haben. Damals herrschte dort ein mildes Klima. Bei reichen Nahrungsressourcen ließ es sich gut leben. Doch schon vor rund 195 000 Jahren wurden die Verhältnisse unwirtlicher, als die Erde in eine lange Kaltzeit eintrat. Jenes Stadium, Sauerstoff-Isotopenstufe 6 genannt, dauerte bis vor ungefähr 123 000 Jahren. Geologen erkennen die Warm- und Kaltphasen anhand des Sauerstoffisotopenverhältnisses in Ablagerungen von Organismen am Meeresboden.

Über diese Kaltzeit liegen für Afrika keine genauen Klima- und Umweltdaten vor. Doch immerhin erlauben Befunde von jüngeren Kältephasen einige Rückschlüsse. Demnach dürfte ein kühles, trockenes Klima geherrscht haben. Die Wüstenzonen waren viel weiter ausgedehnt, und viel weniger Land war für Menschen bewohnbar. Unter den schwierigen Verhältnissen schrumpfte ihre Zahl bedenklich. Lebten vorher wohl stets über 10 000 Erwachsene im fortpflanzungsfähigen Alter, so dürften es nun kaum noch einige hundert ge-

wesen sein. Für den genauen Zeitpunkt jenes genetischen Flaschenhalses und die Größe der übrig gebliebenen Population liefern genetische Studien zwar unterschiedliche Schätzwerte, doch zeigen sie einhellig: Alle heute lebenden Menschen stammen offenbar von einer ganz kleinen Bevölkerungsgruppe ab, die irgendwo in Afrika jene Kaltphase überstand.

Ich selbst begann meine Laufbahn als Archäologe in Ostafrika, wo ich zunächst den Anfängen des modernen Menschen nachging. Als in den frühen 1990er Jahren Diskussionen über das genetische Nadelöhr in unserer Vergangenheit aufkamen, fesselte mich dieses Thema ganz besonders. Frappant ist ja unsere geringe genetische Vielfalt im Vergleich zu der vieler anderer Arten – gerade auch der Schimpansen –, die oft wesentlich kleinere Populationen und Verbreitungsgebiete aufweisen. Am besten lässt sich das Phänomen mit einem Populationszusammenbruch irgendwann beim frühen *Homo sapiens* erklären. Ich fragte mich, wo in Afrika die Menschen die erwähnte Klimakatastrophe überlebt hatten. Der Kontinent wies zu jener Zeit nur wenige Gegenden auf, die für Jäger und Sammler genügend Ressourcen bereithielten.

## Zufluchtsstätte mit Meeresfrüchten

Die Experten streiten darüber, welches der Gebiete dafür die besten Bedingungen bot. Meiner Ansicht nach eignete sich in harschen Klimaphasen die afrikanische Südküste hervorragend als Zufluchtsstätte. Dieser Landstrich dürfte sogar damals das ganze Jahr über reichlich essbare Pflanzen geboten haben – vor allem aber jede Menge Muscheln und Schnecken aus dem Meer. Im Jahr 1991 entschloss ich mich, dort nach Fundstellen der fraglichen Zeit zu suchen – genauer gesagt nach einst be-

## In Kürze

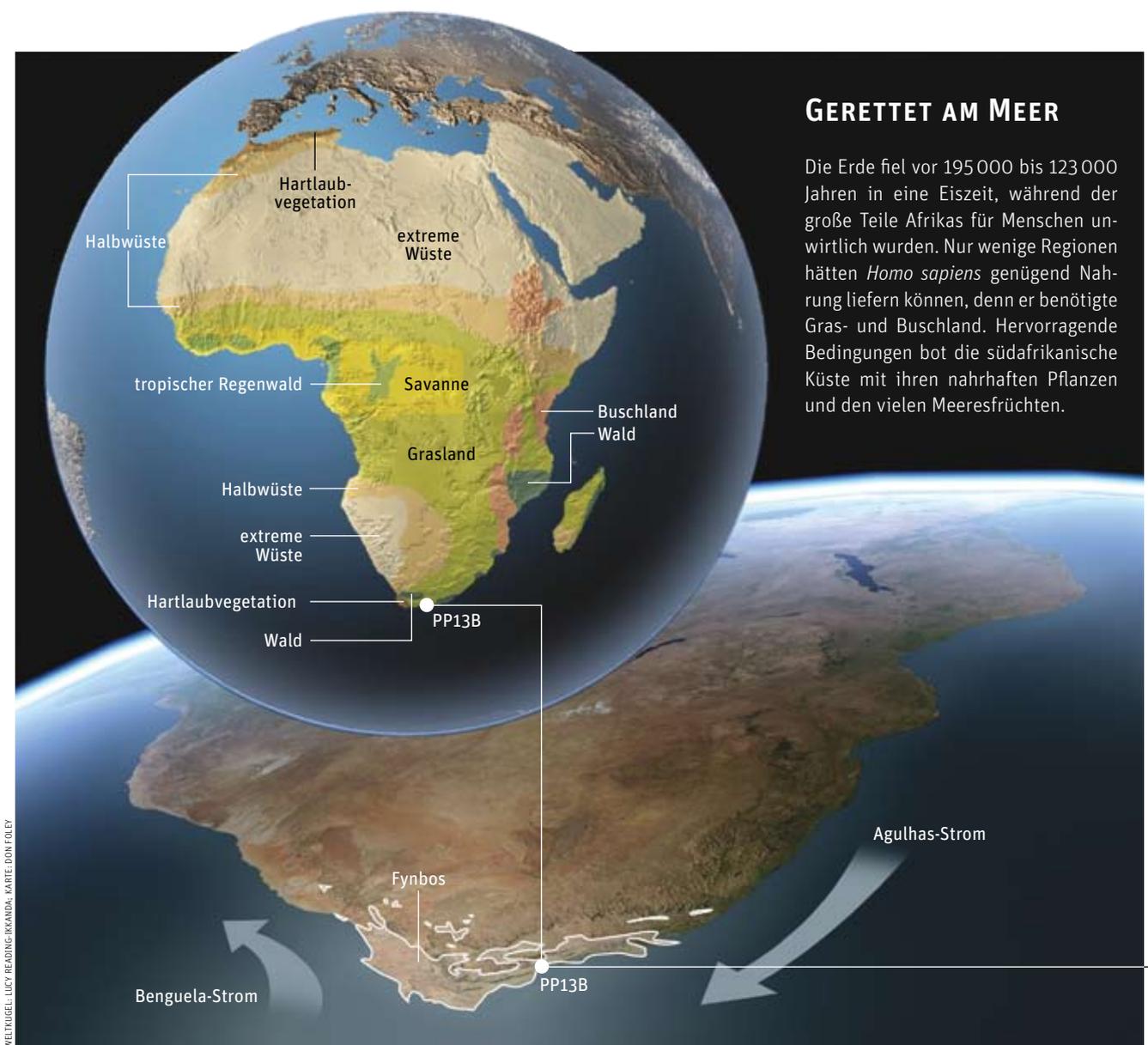
► In seiner Frühzeit erfuhr der *Homo sapiens* einen **dramatischen Bevölkerungsrückgang**. Weite Teile Afrikas waren in einer langen Phase für ihn unbewohnbar. Die heutigen Menschen stammen von einer kleinen Zahl Individuen ab – wo auch immer deren Population überlebte.

► Zu den wenigen damals bewohnbaren Gegenden zählte **die südafrikanische Küste**. Ausgrabungen bezeugen die Anwesenheit von Menschen und eine schon weit entwickelte Kultur.

► Die Funde bestätigen, was manche Forscher seit einiger Zeit vermuten: dass **höhere kognitive Fähigkeiten wesentlich früher auftraten** als bislang gedacht. Unsere Vorfahren dürften die harten Zeiten dank komplexer geistiger Leistungen gemeistert haben.

## GERETTET AM MEER

Die Erde fiel vor 195 000 bis 123 000 Jahren in eine Eiszeit, während der große Teile Afrikas für Menschen unwirtlich wurden. Nur wenige Regionen hätten *Homo sapiens* genügend Nahrung liefern können, denn er benötigte Gras- und Buschland. Hervorragende Bedingungen bot die südafrikanische Küste mit ihren nahrhaften Pflanzen und den vielen Meeresfrüchten.



WELTKUGEL: LUCY READING/IKANDA; KARTE: DON FOLEY

wohnten Höhlen oder Unterständen mit Ablagerungen, die zeitlich in ebenjene Sauerstoff-Isotopenstufe 6 fallen. In Frage kamen Orte, die auch bei dem damaligen viel niedrigeren Wasserstand immerhin so weit in Küstennähe lagen, dass die Menschen Meeresfrüchte einigermaßen gut ernten konnten. Zugleich mussten die Stätten aber so hoch gelegen sein, dass sie den Meeresspiegelanstieg vor 123 000 Jahren trocken überstanden.

Mein südafrikanischer Kollege Peter Nilsson und ich beschlossen 1999, ein paar Höhlen näher in Augenschein zu nehmen, die er auf der wild zerklüfteten Landzunge Pinnacle Point bei der Kleinstadt Mossel Bay am Indischen Ozean erspäht hatte (Bild rechts und S. 58). Und tatsächlich stießen wir in den steilen Klippen auf eine größere Höhle, die viel versprechend aussah. Geführt wird sie schlicht unter der Bezeichnung PP13B.

Nahe beim Eingang kamen dort durch Erosion frei gelegte Schichten mit archäologischen Überresten zu Tage. Wir fanden unter anderem Herdstellen und Steinwerkzeuge. Be-

sonders gefiel uns, dass eine Sanddüne und eine Stalagmitenschicht die alten menschlichen Spuren zumeist überdeckten – demnach schienen diese Ablagerungen wirklich uralt zu sein. Nachdem uns ein Straußenzüchter eine Holzterrasse mit 180 Stufen gebaut hatte und der Zugang zur Höhle nicht mehr halsbrecherisch gefährlich war, begannen wir im folgenden Jahr mit den Grabungen.

An dieser Stätte und mehreren anderen in der Nähe fand unser Team seitdem viele Zeugnisse menschlicher Aktivitäten. Diese Spuren liefern ein bemerkenswertes Bild vom Leben der Bewohner jener Gegend in der Zeit von vor ungefähr 164 000 bis vor 35 000 Jahren – also in der Phase des genetischen Flaschenhalses und dem Abschnitt danach, als sich die Menschenpopulation wieder erholte. Zugleich haben wir die dortigen Umweltbedingungen untersucht. So gewannen wir einen recht detaillierten Eindruck davon, wie die prähistorische Bevölkerung von Pinnacle Point während der Klimakrise ihr Leben fristete.



PER-ANDERS PETTERSON

Mehr noch: Die archäologischen Funde rütteln an der landläufigen Überzeugung, unser moderner Körperbau sei viel früher entstanden als unser moderner Verstand – *Homo sapiens* habe erst lange nach seinem Auftreten auch moderne geistige Eigenschaften entwickelt. Schon in den ältesten archäologischen Schichten der Höhle PP13B stießen wir auf Anzeichen für raffiniertes Verhalten. Zweifellos hatte fortschrittliche Intelligenz am Überleben unserer Spezies entscheidenden Anteil, denn diese Vorfahren verstanden es, die Ressourcen der Küste zu nutzen.

### Das Florenreich bei Kapstadt

Jene Menschen hatten Glück: Während *Homo sapiens*-Populationen in anderen Gegenden zu Grunde gingen, weil Kälte und Trockenheit ihre Nahrung dezimierten, fanden sie an diesem Küstenstrich ausreichend Meeresfrüchte und kohlenhydratreiche Gewächse. Sobald der Meeresspiegel stieg oder fiel – denn das Isotopenstadium 6 gliedert sich in etwas wärmere und kältere Phasen –, mussten sie sich nur an den jeweiligen Küstenverlauf halten.

Der Südrand von Afrika birgt eine einmalige Tier- und Pflanzenwelt. Nirgends sonst auf der Erde wachsen auf einer vergleichbar kleinen Fläche so viele verschiedene Gewächse wie auf diesem schmalen Landstrich entlang der Küste. Botaniker stellen die Kapflora deswegen in ein eigenes Florenreich (von de-

nen sie weltweit sechs unterscheiden). Auf dem nur 90 000 Quadratkilometer messenden Streifen dieser Florenregion leben 9000 Pflanzenarten, und etwa 64 Prozent davon nur dort. Allein der Tafelberg von Kapstadt beherbergt mehr Pflanzenspezies als die gesamten Britischen Inseln. Einen großen Anteil an der Kapflora hat der so genannte Fynbos mit macchiaartigen, immergrünen Sträuchern. Ein Typ davon heißt Renosterveld, benannt nach dem Nashornbusch (Renosterbos). Zum Fynbos im weiteren Sinn gehören außerdem zahlreiche krautige Pflanzen, die diverse unterirdische Speicherorgane ausbilden, also Knollen, Zwiebeln, Speicherwurzeln und dergleichen – in einer einmaligen Vielfalt. Wer mit einem Grabstock umzugehen versteht, kann dort praktisch nicht verhungern.

Auch für heutige Jäger und Sammler gehören nahrhafte unterirdische Pflanzenteile wegen der konzentrierten Kohlenhydrate zur wichtigsten Nahrung. Zudem können sie einplanen, zu welcher Jahreszeit die Ernte am ergiebigsten ist. Und Tiere machen ihnen diese Ressource viel seltener streitig als oberirdisch wachsende Früchte, Nüsse, Samen. Die Kapflora hat noch den besonderen Vorteil, dass die meisten der Zwiebeln und Knollen eher wenig Ballaststoffe, also Fasern, aufweisen, was sie auch für Kinder leichter bekömmlich macht, wobei Kochen die Verdaulichkeit natürlich weiter erhöht. Am bedeutendsten für

**Blick auf die Öffnung der Höhle PP13B auf der Landzunge Pinnacle Point. Dieser Ort lag auch früher oft nah genug am Meer, wurde aber selbst in warmen Klimaphasen nicht überflutet.**

**Wer mit einem Grabstock umzugehen versteht, kann im Fynbos – der besonderen Kapflora – praktisch nicht verhungern**

An einer solchen Küste konnten sich frühe moderne Menschen das ganze Jahr über mit proteinreicher Kost versorgen. Schon vor 164 000 Jahren aßen die Leute hier braune Miesmuscheln (Mitte). Später erweiterten sie ihren Speiseplan, und sie suchten wohl sogar nach hübschen Stücken als Schmuck.



DIESE FOTOS: PER-ANDERS PETTERSON



die Vorzeitmenschen war aber wohl, dass die unterirdischen Knollen und Zwiebeln Speicherorgane der Pflanzen für ungünstige Zeiten darstellen, etwa als Anpassung an Trockenphasen. Das machte sie damals vermutlich zu einer wichtigen Ressource.

Hingegen lieferten an dieser Küste die Schalentiere jede Menge Proteine. Die Jagd auf große Landsäugetiere mag in der Gegend nicht sehr lohnend gewesen sein. Doch das Meer ernährt dort unzählige Muscheln, Schnecken und Krebse. Denn direkt vor Afrikas Südspitze verwirbeln Wasser des kalten, nährstoffreichen Benguela-Stroms, der aus dem Südatlantik kommt und vor Afrika aufsteigt, und des warmen Agulhas-Stroms, der vom Indischen Ozean her an der Südküste entlangfließt. Die Gezeitenzone mit ihren Felsen und Sandstränden bietet dadurch hervorragende Bedingungen für Muschelbänke, Schneckenkolonien und dergleichen. Die Schalentiere enthalten auch wertvolle Omega-3-Fettsäuren. Kühlere Klimaphasen dezimieren diese Küstenfauna nicht etwa – vielmehr gedeiht sie bei niedrigeren Wassertemperaturen sogar besser.

Somit würde dieser Küstenstrich die Urzeitmenschen gut ernährt haben. Vielleicht war sogar von Bedeutung, dass Frauen beide Ressourcen ohne männliche Hilfe erschließen konnten, somit sich und ihre Kinder allein zu versorgen vermochten. Ob die Bewohner der Höhle PP13B Knollen und Zwiebeln aßen, konnten wir bisher nicht belegen. Solche Pflanzenüberreste erhalten sich kaum über so viele Jahrtausende. Zumindest an jüngeren Fundstellen der Gegend fanden wir viele Anzeichen für den Verzehr von dergleichen Pflanzenteilen. Was PP13B betrifft, so haben wir aber eindeutige Anhaltspunkte, dass diese Menschen in der Höhle Schalentiere verspeisten. Sie sammelten Miesmuscheln (braune Muscheln) und kleine Meeresschnecken (Alikreukel), wie Antonieta Jerardino von der Universidad de Barcelona in den Ablagerungen nachwies. Gelegentlich aßen sie sogar größere Meeressäuger, etwa Robben und selbst Wale.

Noch vor wenigen Jahren waren die ältesten Indizien dafür, dass Menschen sich regelmäßig vom Meer ernährten, jünger als 120 000 Jahre. Aber Miryam Bar-Matthews vom Geological Survey Israels und Zenobia Jacobs von der University of Wollongong (Australien) datierten bestimmte Schichten der PP13B-Höhle mit Schalentierresten auf 164 000 Jahre! Später scheint sich der Speisezettel erweitert zu haben. Vor 110 000 Jahren umfasste er auch Napfschnecken, Sandmuscheln und weitere neu hinzugekommene Arten.

Es erfordert einige Umsicht, Meeresfrüchte an einer Felsküste zu ernten. Wer sich zu den Muscheln und Schnecken vorwagt, muss aufpassen, dass er nicht von der Brandung erfasst wird. Eine gute Ausbeute gewinnt ein Sammler in Südafrika nur bei Springniedrigwasser, also wenn Ebbe und Flut wegen der Stellung von Sonne und Mond besonders groß ausfallen. Da außerdem das Hoch- und Niedrigwasser jeden Tag etwa 50 Minuten später eintreten, vermute ich, dass die Bewohner der Höhle PP13B einen Mondkalender führten und ihre Unternehmungen danach ausrichteten. Seit Menschengedenken machen das auch heutige Küstenbewohner noch. Vor 164 000 Jahren könnte eine genaue Planung schon deshalb nötig gewesen sein, weil die Höhle damals vielleicht zwei bis fünf Kilometer landeinwärts lag.

Noch in anderer Hinsicht zeigten die Menschen von Pinnacle Point schon früh fortschrittliches Verhalten. Unter ihren Steinwerkzeugen fanden wir eine Menge sehr kleiner Klingen (so genannte Mikroklingen), oft etwa doppelt so lang wie breit (siehe Bild S. 64). So winzige Geräte lassen sich ohne Zusatz kaum benutzen. Somit dürften diese Klingen an Holzschäften befestigt gewesen sein und als Wurfwaffen gedient haben. Zusammengesetzte Werkzeuge aber gelten als Hinweis auf erhebliches technologisches Können – und die Mikroklingen der Höhle PP13B zählen zu den ältesten überhaupt.

### Mikroklingen aus besonderem Material

Ihre genauere Untersuchung versetzte uns allerdings noch mehr in Erstaunen. Die meisten Steinwerkzeuge von alten Fundstellen der südafrikanischen Küste bestehen aus Quarzit, einem eher grobkörnigen Material, das sich für große Klingen hervorragend eignet. Kleine, feine Geräte lassen sich daraus aber nur schwierig formen. Tatsächlich fertigten die Bewohner unserer Ausgrabungsstätte ihre Mikroklingen aus anderem Gestein, nämlich einem feinkörnigen Kieselkonglomerat (auch Kieselkruste oder englisch *silcrete* genannt). Doch unserem Mitarbeiter Kyle S. Brown von der Arizona State University fiel auf, dass irgendetwas damit nicht stimmte. Der Werkzeugexperte hatte über Jahre vielerorts an jener Küste Proben des Gesteins untersucht und wusste von daher: Im Rohzustand weist es nie die lebhaft rote- und Graufärbung auf wie die Klingen. Hinzu kam, dass man aus diesem Rohgestein die feinen Klingen praktisch nicht fertigen kann. Woher hatten die Menschen das Material?

Ein Verdacht kam uns, als wir im Jahr 2008 in der Höhle PP5-6 von Pinnacle Point einen

großen Brocken des Konglomerats fanden, der in Asche eingebettet war. Färbung und Maserung glichen denen der kleinen Klingen. Hatte die Menschen solches Gestein etwa erhitzt, damit es sich besser bearbeiten ließ? Belegt sind solche Maßnahmen von nordamerikanischen und australischen Ureinwohnern. Um die These zu testen, erhitze Brown vorsichtig einige rohe Brocken und versuchte dann, davon Abschläge zu machen. Das glückte sofort. Vor allem aber schimmerten die neuen Oberflächen in der gleichen Maserung wie die urzeitlichen Klingen. Unser Fazit lautete folglich: Die Menschen hatten dieses Gestein mit Hitze präpariert.

Unsere Fachkollegen wollten dies allerdings zunächst nicht akzeptieren. Bisher galt es in der Archäologie als etabliert, dass jene Technik vor rund 20000 Jahren in Frankreich von Menschen des Solutréen erfunden wurde, die wunderschöne Werkzeuge herstellten. Jedoch konnten wir unsere Behauptung mittels dreier unabhängiger Prozeduren untermauern. Zunächst prüfte Chantal Tribolo von der Université Bordeaux mit Thermolumineszenzmessungen, ob die alten Klingen erhitzt worden waren. Andy Herries von der University of New South Wales in Sydney (Australien) untersuchte die Magnetisierbarkeit, weil die sich bei eisenhaltigem Gestein durch Hitze einwirkung verändert. Und Brown erfasste mit einem Glanzmessgerät (Glossmeter), wie stark der Stein vor und nach dem Erhitzen und Bearbeiten schimmert. Dadurch wissen wir nun genauer: Hitzebehandlung von Gestein gehörte auf Pinnacle Point bereits vor 72000 Jahren zu den vorherrschenden Technologien. Und sie wurde auch vorher schon zwischenzeitlich immer wieder eingesetzt. Die Belege reichen sogar bis zu 164000 Jahre zurück.

Wenn die südafrikanischen Menschen damals Hitze zu solchem Zweck zu nutzen verstanden, müssen sie zu zweierlei geistigen Leistungen im Stande gewesen sein, die den modernen Menschen auszeichnen: Erstens hatten sie offenbar begriffen, dass sie einen Rohstoff in seiner Substanz verändern und damit gefügiger machen konnten – in dem Fall ein ungenügendes Gestein in hochwertiges Material umwandeln. Zweitens vermochten sie eine recht lange, präzise und keineswegs einfache Handlungskette zu ersinnen und umzusetzen, die der eigentlichen Klingenherstellung vorausgehen musste. Zunächst galt es, eine Sandgrube zu bauen, die das Kieselkonglomerat abschirmte. Dann musste es langsam auf 350 Grad erhitzt werden und eine Zeit lang auf dieser Temperatur bleiben. Und danach durfte es nur langsam abkühlen. Jene genaue Abfolge zu finden und zudem



Die spezielle Fynbos-Vegetation eines kleinen Gebiets im Süden Afrikas liefert zu bestimmten Jahreszeiten reichlich leicht verdauliche Kohlenhydrate, die in unterirdischen Speicherorganen stecken: in Wurzeln, Knollen, Zwiebeln und dergleichen.

immer wieder der nächsten Generation zu übermitteln, dürfte ohne Sprache kaum möglich gewesen sein.

Als der moderne Mensch später andere Kontinente erreichte, halfen ihm zweifellos solche Fähig- und Fertigkeiten, die dortigen archaischen Menschen zu überflügeln. Insbesondere die komplexe Handhabung des Feuers, wie für Pinnacle Point nachgewiesen, dürfte ihm im kalten Lebensraum der Neandertaler zum Vorteil gereicht haben, die solch eine Technik anscheinend nicht kannten.

Außerdem hatten die prähistorischen Bewohner von Pinnacle Point eine künstlerische Ader. Wir entdeckten in den ältesten archäologischen Schichten der Höhle PP13B ein paar Dutzend Stücke roten Ockers, ein Eisen-



oxid. Sie tragen eine Menge Ritz- und Schleifspuren. Offenbar gewannen die Menschen davon ein rotes Pulver, das sie wahrscheinlich mit einem Bindemittel, etwa Tierfett, vermischten. Mit der Farbe konnten sie sich selbst wie auch Oberflächen bemalen.

Dergleichen Verzierungen sagen typischerweise etwas über die soziale Identität einer Person aus oder über wichtige kulturelle Aspekte. Es handelt sich also um Symbole. Viele meiner Kollegen wie auch ich selbst denken, dass wir mit diesen Ockerstücken die bisher ältesten eindeutigen Befunde für symbolisches Verhalten vor uns haben. Dieses begann somit einige zehntausend Jahre früher als bisher bekannt.

Auch in jüngeren Schichten der besagten Pinnacle-Point-Höhle entdeckten wir Anzeichen für symbolische Handlungen. Rund 110 000 Jahre alte Ablagerungen enthalten sowohl roten Ocker als auch Schalen von Muscheln und Schnecken, die im tieferen Meer leben. Werden solche Schalen an die Küste gespült, ist das Innere längst verwest. Anscheinend sammelten die Menschen sie, weil sie hübsch aussahen. Die dekorativen Gehäuse zeigen meiner Ansicht nach, dass jene Menschen, die offensichtlich einen Teil ihrer Nahrung mit Meeresfrüchten bestritten, damals erstmals dazu übergingen, ihr Verhältnis zum Meer in ihre Weltanschauung und ihre Rituale einzubeziehen.

Wenn symbolischer Ausdruck und ausgefeilte Technologie schon so früh in Erscheinung traten, berührt das unser Verständnis

von den Anfängen unserer Art. Der anatomisch moderne Mensch war Fossilien aus Äthiopien zufolge vor mindestens 195 000 Jahren evolviert. Schwieriger ist festzumachen, wann moderner Verstand aufleuchtete. Paläoanthropologen prüfen die verschiedensten archäologischen Indizien auf Hinweise, die moderne Kognition und deren Ausmaß bezeichnen könnten. Ihre Aufmerksamkeit gilt dabei mehreren Komplexen. Einer betrifft Werkzeuge, deren Fertigung eine Abfolge von Maßnahmen erforderte, die sich nicht von selbst verstehen – wie bei den feinen Klingen aus erhitztem Gestein. Ein anderer Bereich ist Kunst sowie Beschäftigung mit Symbolen; ein weiterer das Verfolgen von Zeit etwa anhand von Mondphasen. Lange kannten Archäologen und Anthropologen für das alles nur Beispiele von europäischen Fundorten, die jünger als 40 000 Jahre sind. Deswegen hieß es noch vor Kurzem: Viele Jahrtausende mussten verstreichen, bis unsere Spezies zu ihrer einzigartigen Kreativität fand.

### Rötliche Gesteine bevorzugt

In den letzten zehn Jahren jedoch entdeckten Archäologen an vielen Stellen in Südafrika Indizien für hoch entwickeltes Verhalten zu wesentlich älterer Zeit. Der britische Forscher Ian Watts beispielsweise, früher am University College London, untersuchte tausende bearbeitete wie unbearbeitete Ockerstücke von archäologischen Fundstätten, die teils 120 000 Jahre zurückreichen. Merkwürdigerweise schimmern diese Objekte meistens rötlich – ganz wie die von Pinnacle Point. Dabei liefert das örtliche Gestein an sich ganz verschiedene Farbtöne jenes Minerals. Beschafften sich die Menschen am liebsten rote Brocken? Möglicherweise brachten sie die mit Menstruation und Fruchtbarkeit in Verbindung. Jocelyn A. Bernatchez von der Arizona State University in Tempe glaubt sogar, dass viele der Stücke eigentlich gelb gewesen waren, aber erhitzt wurden, damit sie eine rote Farbe annahmen.

Spektakulär sind auch die Funde aus der Blombos-Höhle, rund 100 Kilometer westlich von Pinnacle Point (SdW 12/2005, S. 38). Christopher S. Henshilwood von der Universität Bergen (Norwegen) entdeckte dort Ockerstücke mit eingeritzten regelmäßigen Mustern, auch wie Perlen gelochte kleine Schneckenhäuser sowie raffinierte Knochenwerkzeuge. Die Artefakte haben ein Alter von rund 71 000 Jahren. Es kann wohl kaum anders sein: Unsere Art beherrschte moderne Kognition von Anfang an (SdW 12/2009, S. 66).

Was die Evolution komplexen Denkens betrifft, könnte ich mir Selektionskräfte vorstellen, die dafür Voraussetzungen schufen, dass

Schon ganz früh fertigten die Menschen von Pinnacle Point auch sehr kleine Klingen (links im Bild), wie man sie für Wurfaffen mit einem Holzstiel verwendete. Anscheinend behandelten sie das Gestein dafür vorher mit Feuer, um es für ihre Zwecke bearbeitbar zu machen.



PER-ANDERS PETERSON

sich unsere Vorfahren Standorte von den verschiedensten Nahrungspflanzen genau einprägen. Zugleich mussten jene Menschen in ihrer trockenen Umwelt präzise das von der Jahreszeit abhängige Angebot kennen. Und nicht zuletzt war es wichtig, dieses Wissen Nachkommen und anderen Gruppenmitgliedern zu übermitteln. Solche Kompetenzen bildeten die Grundlage für weitere Entwicklungen, etwa die Gezeiten auf die Mondphasen zu beziehen und hiernach Ausflüge zur Küste zum Muschelsammeln auszurichten.

Weil sich die Menschen in Südafrika mit Meeresfrüchten, Knollen und Wurzeln hochwertig ernähren konnten, mussten sie nicht mehr ständig nomadisch umherziehen. Sie konnten nun mehr Kinder bekommen und auch großziehen. Die steigenden Gruppengrößen wiederum förderten symbolisches Verhalten wie auch komplexere Technologien. Denn nun wollten die Leute ihrer sozialen Identität gegenüber anderen Ausdruck verleihen, wobei sie auch danach strebten, anderswo gesehene technische Verfahren noch zu verbessern.

Die Höhle PP13B von Pinnacle Point bewahrt Spuren einer unterbrochenen Besiedlung über einen langen Zeitraum. Auch die lokalen Klimaverschiebungen und Umweltveränderungen können wir ziemlich genau nachzeichnen. Von daher wissen wir, wie und wann frühe Menschen jene Küste und die Höhle über die Jahrtausende nutzten. Den wechselnden Küstenverlauf hat Erich C. Fisher von der University of Florida in Gainesville modelliert. Die Verhältnisse müssen sich oftmals schnell und drastisch verändert haben – weil der dort sehr breite Festlandsockel oder Kontinentalschelf, die Agulhas-Bank, nur sanft abfällt. Bei tiefem Meeresspiegel, also in Kaltzeiten, verlief die Küstenlinie deswegen deutlich weiter südlich. Manchmal lag Pinnacle Point 95 Kilometer weit im Landesinnern. In Warmzeiten dann wieder befand sich die Höhle nah am Meer.

### Waren das unsere Vorfahren?

Daten zu den Niederschlägen und der Vegetation für die Zeit von vor 350 000 bis vor 50 000 Jahren liefern uns Stalagmiten. Anscheinend blieb die Fynbos-Zone, die für diesen Küstenstrich typische südafrikanische Gemeinschaft von Landpflanzen, immer in Meeresnähe, verschob sich also mit den Klimaphasen. Somit befanden sich die Meeresfrüchte sowie die Knollen- und Zwiebelgewächse stets in gut erreichbarer Nähe voneinander. Ich stelle mir darum vor, dass sich auch die Menschen nach dem sich verändernden Küstenverlauf richteten, also immer in geringer Distanz zu den Nahrungsressourcen lebten. Denn bei der niedrigen Bevölkerungsdichte damals konnten



PER-ANDERS PETERSON

sie sich ihren Aufenthaltsort aussuchen. Je nach Klima wechselnde Standorte würden erklären, wieso PP13B offenbar nur mit Unterbrechungen bewohnt war.

Vielleicht waren die frühen Bewohner von Pinnacle Point die Vorfahren aller heutigen Menschen. Falls meine Überlegungen stimmen, bedeckt heute das Meer die meisten Spuren jener Urbevölkerung. Die Agulhas-Bank wird den Archäologen wegen der gefährlichen Strömungen und großen Haie so bald nicht zugänglich sein. An Fundstätten wie PP13B – sowie inzwischen auch der Höhle PP5-6 – können wir aber prüfen, ob die Menschen regelmäßig dorthin zurückkehrten, wenn der Meeresspiegel höher lag. Ob sie fortlaufend in der Region lebten, wollen wir nun an Küstenabschnitten untersuchen, wo der Festlandsockel sofort steil abfällt und sich die Küstenlinie deswegen wenig verschob.

Nicht nur genetische Analysen, auch Fossilfunde und archäologische Entdeckungen zeigen alle das Gleiche: Die erste große, anhaltende Auswanderungswelle des modernen Menschen aus Afrika erfolgte vor rund 50 000 Jahren. Was dem vorausging, liegt allerdings noch weitgehend im Dunklen. So wissen wir bisher nicht, ob vor 123 000 Jahren – am Ende der Sauerstoff-Isotopenstufe 6 – wirklich nur eine einzige *Homo sapiens*-Population überlebt hat. Vielleicht überstanden sogar mehrere Gruppen die harten Zeiten, auch wenn nur von einer der Populationen alle heutigen Menschen abstammen (SdW 9/2009, S. 58).

Diese Wissenslücken spornen uns Forscher an, nun weitere Gebiete Afrikas in Augenschein zu nehmen, wo Menschengruppen damals hätten existieren können. Interessant sind dabei auch die örtlichen Klimabedingungen vor über 195 000 Jahren, direkt bevor es insgesamt kälter und trockener wurde. Wer waren die Menschen, die später die Welt eroberten? Wo hatten sie als winzige Restgruppe viele Jahrtausende überlebt? ◀

**In Höhlen am Südrand Afrikas – hier PP13B – hielten sich bis vor 35 000 Jahren immer wieder Menschen auf. Ihre Hinterlassenschaften geben unerwartete kulturelle Errungenschaften preis.**



**Curtis W. Marean** hat an der Arizona State University in Tempe eine Professur an der School of Human Evolution and Social Change inne und gehört zur Leitung des Institute of Human Origins. Er ist leitender Forscher eines Studienprojekts an der südafrikanischen Küste, das die Urzeit des modernen Menschen und die Randbedingungen untersucht.

**Marean, C. W. et al.:** Early Human Use of Marine Resources and Pigment in South Africa during the Middle Pleistocene. In: *Nature* 449, S. 905–908, 18. Oktober 2007.

**Brown, K. S. et al.:** Fire as an Engineering Tool of Early Modern Humans. In: *Science* 325, S. 859–862, 14. August 2009.

**Marean, C. W.:** Coastal South Africa and the Co-Evolution of the Modern Human Lineage and the Coastal Adaptation. In: Nuno Bicho et al. (Hg.): *Changing Coastlines and the Antiquity of Coastal Settlement*. Springer, New York 2010.

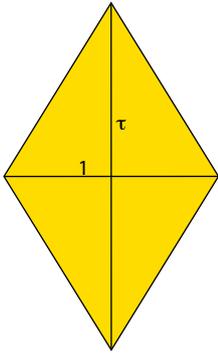
Weblinks unter [www.spektrum.de/artikel/1050007](http://www.spektrum.de/artikel/1050007).

## GEOMETRIE

# Die Goldene Raute und der sechsdimensionale Raum

Sándor Kabais raumgreifende geometrische Strukturen profitieren von demselben Bauprinzip wie die Quasikristalle.

CHRISTOPH PÖPPE

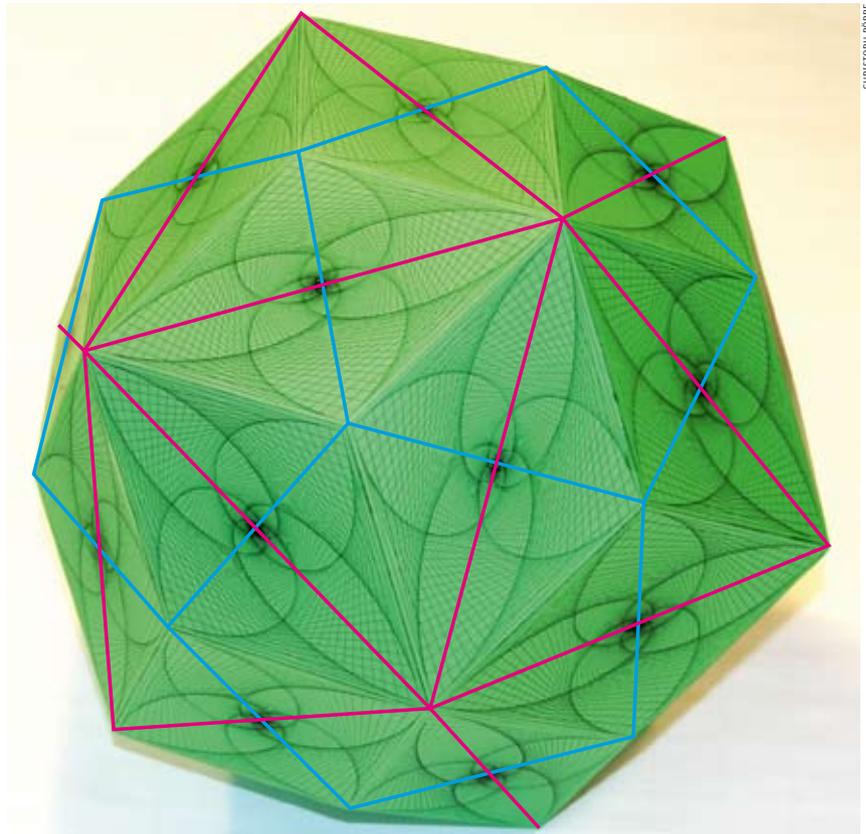


Von Christoph Pöppe

Auf den ersten Blick sieht die Figur nicht besonders spektakulär aus. Es ist eine Raute, deren Diagonalen im Verhältnis des Goldenen Schnitts stehen (Bild oben). Das heißt, die lange Diagonale ist  $\tau$ -mal so lang wie die kurze, wobei  $\tau = (\sqrt{5}+1)/2 = 1,618\dots$  ist.

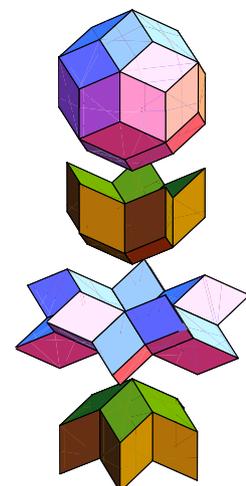
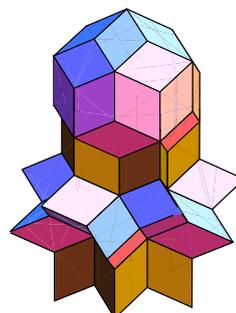
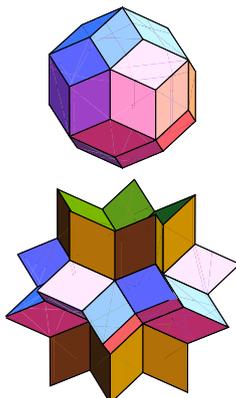
Angeblich gilt ja ein Rechteck mit diesem Seitenverhältnis als besonders schön; aber es ist eine eher einsame Schönheit. Die »Goldene Raute« will sich mit ihresgleichen nicht gern zusammenlegen. Ihr spitzer Winkel beträgt ungefähr 63,435 Grad. Legt man also fünf Goldene Rauten mit den spitzen Winkeln um einen Punkt, so bleibt eine Lücke; aber für eine sechste Raute reicht

Das Rhombentriakontaeder (R30), hier mit dekorativer Musterung. In jeder Ecke treffen sich entweder fünf spitze Winkel oder drei stumpfe. Alle kurzen Diagonalen ergeben zusammen die Kanten eines Dodekaeders, alle langen die Kanten eines Ikosaeders.



CHRISTOPH PÖPPE

Ein Rhombenhexekontaeder (R60) bietet mit seinen obersten fünf Goldenen Rauten eine perfekte Schale für das Rhombentriakontaeder (R30) – kein Wunder, so ist es konstruiert. Das R60 selbst lässt sich in 20 dicke Goldene Rhomboeder zerlegen (rechts).



SÁNDOR KABAI

der Platz nicht. Demnach bleibt den Goldenen Rauten in der Ebene nichts anderes übrig, als sich so zusammenzulegen, wie es jede Raute kann: parallelverschoben, in dem langweiligen Muster, das entsteht, wenn man ein gewöhnliches schachbrettartiges Quadratgitter durch eine geeignete Scherung verzerrt.

In der Ebene ist die Goldene Raute nicht wirklich zu Hause. Vielmehr entfaltet sie ihre wahre Pracht erst im Raum. Da umhüllen 30 Exemplare von ihr präzise einen ziemlich wohlgerundeten Körper, der unter dem Namen »Rhombentriakontaeder« (Rauten-Dreißigflächner) in der Literatur zu finden ist (Bild links). Nennen wir ihn kurz R30, weil der griechische Name so sperrig ist. Schon Johannes Kepler (1571–1630) widmete ihm ausführliche Studien.

Da der Goldene Schnitt gleich dem Verhältnis von Diagonale zu Seite im regelmäßigen Fünfeck ist, erwartet man auch von der Goldenen Raute irgendeine Beziehung zur Fünfersymmetrie. Das R30 macht diese Beziehung offensichtlich. Es entsteht nämlich aus dem Dodekaeder, dem platonischen Körper aus zwölf Fünfecken, indem man auf jede seiner Fünfecksflächen eine Art Indiarzelt aufsetzt: eine Zeltstange in der Mitte und dreieckige Zeltwände, die unten mit den Kanten abschließen. Wählt man für die Zeltstange die richtige Länge, so kommen die beiden Wände benachbarter Zelte, die an dieselbe Kante grenzen, in eine Ebene zu liegen. Dadurch erübrigt sich diese gemeinsame Kante, und aus den beiden Dreiecken wird eine Goldene Raute. Zum selben Ergebnis kommt man, indem man ent-

sprechende, allerdings viel niedrigere Zelte auf die Seitenflächen eines Ikosaeders aufsetzt, des platonischen Körpers aus 20 Dreiecken.

Zum runden Rauten-Dreißigflächner gibt es ein ziemlich stacheliges Gegenstück. Man nehme aus dem R30 fünf Goldene Rauten, die sich mit ihren spitzen Winkeln an einem Punkt treffen, und wende die Innenseite nach außen. Überraschenderweise fügen sich zwölf dieser umgedrehten »Narrenkappen« wieder zu einem geschlossenen Körper. Man nennt ihn das Rhombenhexekontaeder (»Rhomben-Sechzigflächner«); hier soll er im Folgenden R60 heißen (Bild links unten). Vielleicht haben Sie ihn in anderem Zusammenhang schon einmal gesehen: Er ist das Logo der Suchmaschine »Wolfram alpha« und betont dadurch deren enge Beziehung zu dem Softwarepaket »Mathematica«, das seit seiner ersten Version irgendwelche »angespitzten« Dodekaeder im Wappen führt.

### Spiel mit sehr schrägen Klötzchen

Dass ein R30 und ein R60 perfekt ineinanderpassen, ist nicht wirklich verwunderlich; so wurde ja das R60 konstruiert. Auch dass in den zwölf »Schalen« des R60 ebenso viele R30 Platz finden, ist noch nicht sehr bemerkenswert, wohl aber, dass die R30 untereinander Fläche an Fläche liegen und dass die gesamte Zwölfergruppe präzise in ein vergrößertes R30 passt (Bild unten).

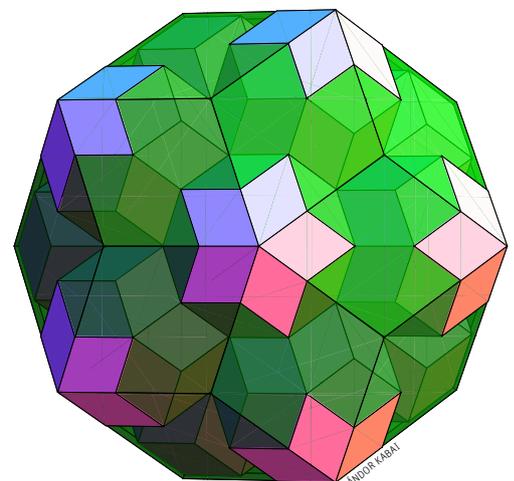
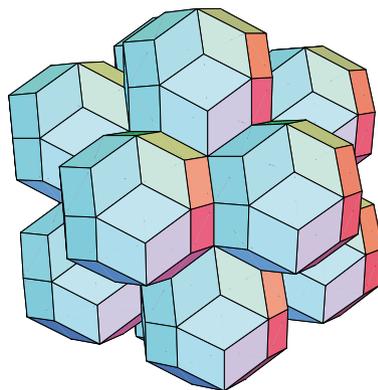
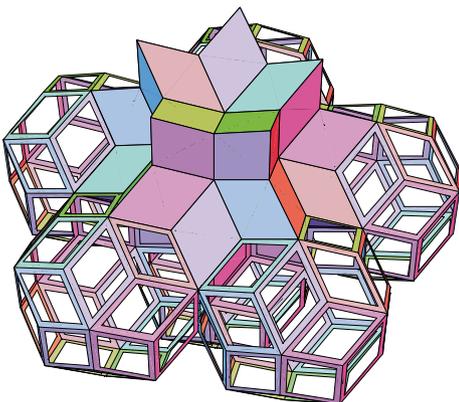
Sándor Kabai, im Hauptberuf technischer Übersetzer in Budapest, hat an den verschiedenen Körpern aus Goldenen Rauten seinen Narren gegessen. Seine Untersuchungen füllen ein ganzes

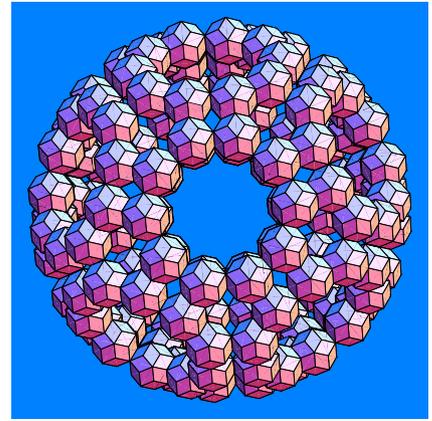
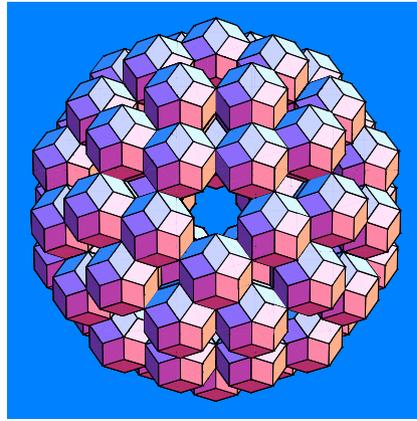
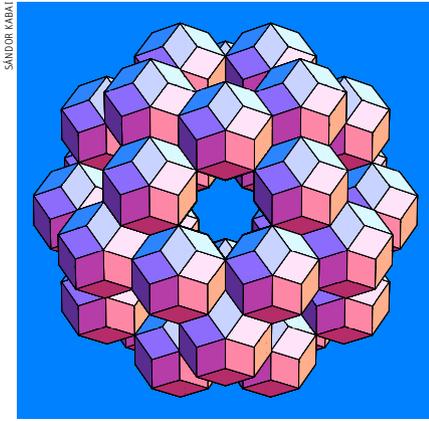
Buch, und von ihnen handelt auch ein gutes Dutzend unter seinen reichlich 400 Beiträgen zu »Wolfram Demonstrations«. Diese Website (<http://demonstrations.wolfram.com>) versammelt lauter Grafiken, an denen der Benutzer diesen oder jenen Parameter nach Belieben verändern darf – woraufhin sich die ganze Grafik mitverändert. Auch dahinter steckt die Software »Mathematica«; die abgespeckte Version, die nur den Konsum vorgefertigter Programme (zum Beispiel aus »Wolfram Demonstrations«) erlaubt, gibt es kostenlos.

Da kann man zum Beispiel Kabais Entdeckung nachvollziehen, dass zehn R30, Fläche an Fläche zusammengefügt, einen geschlossenen Ring bilden. Mehr noch: Es ist möglich, 30 oder 60 Stück R30 so anzuordnen, dass jedes unter ihnen zwei solchen Zehnerringen zugleich angehört, oder sogar zwölf separate Zehnerringe so auf die Flächen eines gedachten Dodekaeders zu setzen, dass jedes R30 aus dem gesamten Gebilde ein weiteres mit einer Fläche berührt (Bilder S. 68 oben). Wie immer, wenn viele fünfzählige Symmetrien im Raum zusammenkommen, haben die beiden platonischen Körper Dodekaeder und Ikosaeder sowie ihre Abkömmlinge ihre Finger im Spiel. In diesem Fall sind es zwei halbregelmäßige (»archimedische«) Körper, auf deren Ecken die R30 zu sitzen kommen: das Ikosidodekaeder aus zwölf Fünfecken und 20 Dreiecken und das kleine Rhombenikosidodekaeder, bei dem zwischen den Drei- und den Fünfecken noch 30 Quadrate sitzen.

Es versteht sich, dass es solche geometrischen Monumentalwerke in der Regel

Ein R60 in der Mitte ruht auf sechs R30 (links) und wird von zwölf R30 vollständig eingehüllt (Mitte). Die konvexe Hülle dieser zwölf R30 zusammen ist ein vergrößertes R30 (rechts).





Mehrere R30 sitzen, zu Zehnerringen angeordnet, in den Ecken eines (archimedischen) Ikosidodekaeders (links), eines kleinen Rhomben-Ikosidodekaeders (Mitte) oder auf den Flächen eines Dodekaeders.

nicht zum Anfassen gibt. Nur von einigen kleineren Körpern hat Kabai Styropormodelle hergestellt; ansonsten muss man sich mit der computergenerierten Version begnügen.

Wie ist es zu erklären, dass ausgerechnet aus der Goldenen Raute ein solcher Reichtum an Strukturen hervorgeht? Nun ja – das R30 hat lauter Paare einander gegenüberliegender paralleler Seiten, und jeweils drei solcher Paare stehen sogar senkrecht aufeinander. Der Körper passt also auf mehrere Arten stramm in eine würfelförmige Kiste geeigneter Größe. Aber das ist nicht das Entscheidende.

Vielmehr kommt man der Sache näher, indem man sich die einfachsten Körper anschaut, die von lauter Goldenen Rauten begrenzt werden. Es handelt sich um die so genannten Rhomboeder

**Zehn dicke und zehn dünne Rhomboeder in allen zugelassenen Farbkombinationen (links) lassen sich unter Einhaltung des Dominoprinzips zu einem R30 zusammensetzen (rechts). Der Aufbau beginnt zwar symmetrisch mit fünf dicken Rhomboedern; dann aber muss die Symmetrie vorübergehend aufgegeben werden.**

eder; in ihnen liegen die Rauten so aneinander wie im Würfel die Quadrate, das heißt insgesamt sechs Stück liegen jeweils zu dritt um jede der acht Ecken.

Stellen Sie sich einen Würfel vor, dessen Kanten alle in der Länge unveränderlich, aber in den Ecken gelenkig miteinander verbunden sind. Ziehen Sie jetzt in Gedanken zwei gegenüberliegende Eckpunkte des Würfels so lange auseinander, bis alle Seitenflächen zu Goldenen Rauten deformiert sind. Das ist das dicke Goldene Rhomboeder. Oder Sie drücken diese beiden Eckpunkte aufeinander zu, bis die Flächen ebenfalls die Form einer Goldenen Raute annehmen; dadurch entsteht das flache Goldene Rhomboeder.

### Rhomboeder und das Dominoprinzip

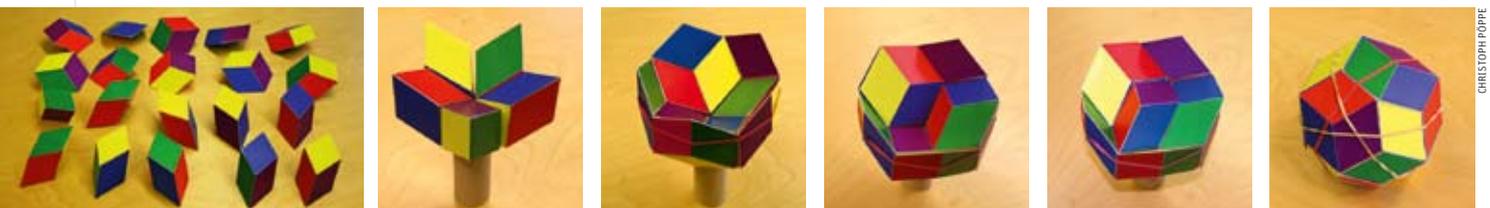
Ein Blick auf das Bild S. 66 unten zeigt, dass das R60 sich in sehr symmetrischer Weise aus 20 dicken Goldenen Rhomboedern zusammensetzt. Alle 20 Teilkörper treffen sich mit einer spitzen Ecke im Mittelpunkt des großen Körpers. Das R30 ist aus zehn dicken und zehn flachen Rhomboedern zusammenzubauen; allerdings geht das alles andere als symmetrisch.

Gerhard Kowalewski (1876–1950), lange Jahre Mathematikprofessor in Dresden, hat nicht nur Lehrbücher über Integralgleichungen geschrieben, sondern sich auch mit der Kunst auseinandergesetzt, ein R30 aus Rhomboedern

zusammenzubauen – unter verschärften Bedingungen: Alle Rhomboeder tragen drei verschiedene Farben, wobei einander gegenüberliegende Flächen gleich gefärbt sind. Es gibt genau fünf Farben, und zu jeder der zehn Möglichkeiten, aus fünf Farben drei auszuwählen, gibt es genau ein dickes und ein flaches Rhomboeder mit diesen drei Farben. Diese 20 Bauklötze sind sodann nach dem »Dominoprinzip« aneinanderzulegen, das heißt, die beiden Flächen, mit denen zwei Bauklötze aneinander zu liegen kommen, müssen die gleiche Farbe haben. Außerdem dürfen in keinem Stadium des Zusammenbaus zwei aneinander grenzende Flächen dieselbe Farbe haben, was darauf hinausläuft, dass an der Außenseite des R30 rund um jede der spitzen (fünffähligen) Ecken jede Farbe genau einmal vorkommt. Darüber hinaus tragen jeweils sechs Flächen, mit denen das R30 den Seitenflächen eines gedachten verpackenden Würfels anliegt, dieselbe Farbe. Der Zusammenbau nach dem Dominoprinzip kann gelingen, wie Kowalewski zeigen konnte, ist allerdings nicht ganz einfach (Bild unten).

Übrigens weiß Kabai auch aus Rhomboedern allein, vor allem den dicken, sehr ausgedehnte und ansehnliche Strukturen zu bauen (Bild rechts oben).

Die Lösung des Rätsels ergibt sich nun, wenn man die ganze Sache von einem höheren Standpunkt aus betrachtet. In diesem Fall ist der Standpunkt so hoch, dass man ihn sich gar nicht mehr vor-

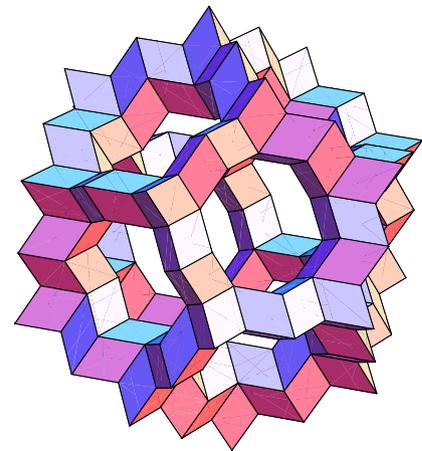
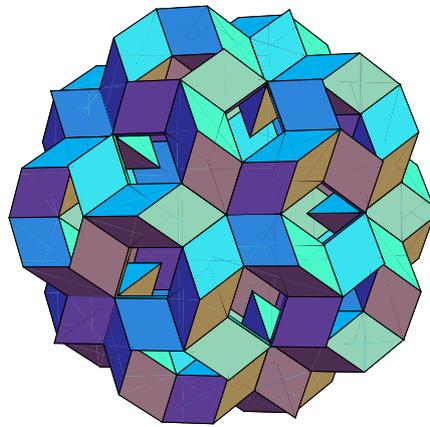


stellen kann. Er liegt im sechsdimensionalen Raum, jenem abstrakten Gebilde, das die Mathematiker  $\mathbb{R}^6$  nennen. Einen ähnlich hohen Standpunkt haben wir bereits für die zweidimensionalen »Strick-Muster« (Spektrum der Wissenschaft 2/2005, S. 106) mit Erfolg eingenommen.

So wie man unseren gewöhnlichen dreidimensionalen Raum (den  $\mathbb{R}^3$ ) mit lauter Würfeln lückenlos vollpacken kann, so liegen im  $\mathbb{R}^6$  die sechsdimensionalen Würfel dicht an dicht. Die gemeinsame »Grenzfläche« zweier solcher Würfel ist ein fünfdimensionaler Würfel, der von vierdimensionalen Würfeln begrenzt wird, die von dreidimensionalen Würfeln begrenzt werden – es ist wirklich nicht ganz einfach, sich das vorzustellen.

Um der Vorstellung etwas aufzuhelfen, projizieren wir den  $\mathbb{R}^6$  in unseren  $\mathbb{R}^3$  herunter, in Parallelprojektion, um genau zu sein. Was das bedeutet, entzieht sich zwar abermals der Vorstellung, ist aber algebraisch ziemlich einfach auszudrücken: Es genügt anzugeben, auf welche Vektoren im  $\mathbb{R}^3$  die sechs Koordinaten-Einheitsvektoren des  $\mathbb{R}^6$  abgebildet werden sollen. Wir setzen ein gewöhnliches platonisches Ikosaeder mit dem Mittelpunkt auf den Nullpunkt unseres Koordinatensystems im  $\mathbb{R}^3$ . Dann soll der erste Einheitsvektor des  $\mathbb{R}^6$  auf den Vektor abgebildet werden, der den Nullpunkt mit einem Eckpunkt des Ikosaeders verbindet, und die restlichen fünf Einheitsvektoren auf die Vektoren, die auf die fünf benachbarten Eckpunkte des Ikosaeders weisen.

Es trifft sich günstig, dass der Winkel zwischen zwei benachbarten dieser Bildvektoren gerade der spitze Winkel der Goldenen Raute ist. Die 20 dicken Rhomboeder, die zusammen das R60 bilden, sind nichts weiter als die Bilder dreidimensionaler Würfel, die im  $\mathbb{R}^6$  als dreidimensionale Grenzflächen von vierdimensionalen Grenzflächen von fünfdimensionalen Grenzflächen der 64 sechsdimensionalen Würfel dienen, die in der lückenlosen Packung eine Ecke, nämlich den Nullpunkt, gemeinsam haben. »Eigentlich« sind diese Rhomboeder (und ihre flachen Kollegen) also nicht deformierte, sondern nur durch die Abbildung perspektivisch verzerrte Würfel. Da die Projektionsbilder der Einheitsvektoren sämtlich gleich lang sind, gilt dies auch für die Kanten der Rhomboeder.



SÁNDOR KABAI

**Vier dicke Rhomboeder passen Fläche an Fläche zu einem ziemlich kompakten Gebilde zusammen. Zwanzig dieser Cluster lassen sich zu einer durchbrochenen Struktur mit der Symmetrie des Ikosaeders zusammensetzen, wobei der vierte Arm jedes Clusters kaum sichtbar nach innen weist (links). Wendet man ihn nach außen, so entsteht eine noch luftigerer Körper mit 300 kongruenten rautenförmigen Grenzflächen (rechts).**

Das Projektionsbild eines ganzen sechsdimensionalen Würfels ist das R30. Kein Wunder, dass diese Gebilde so lückenlos aneinanderpassen. Das tun ihre Urbilder im  $\mathbb{R}^6$  schließlich auch, wie sich das für dicht gepackte Würfel gehört. Im  $\mathbb{R}^6$  gibt es 15 verschiedene Kombinationen von zwei Koordinaten und entsprechend im  $\mathbb{R}^3$  15 verschiedene Ebenen, in denen die Goldenen Rauten liegen können. Da leuchtet es ein, dass man auf diese 15 Orientierungen fünf Farben so verteilen kann, dass Kowalewskis Dominoregeln erfüllbar sind.

Die Projektion von sechs auf drei Dimensionen macht die restlichen drei Dimensionen gewissermaßen zunichte. Ganze Geraden, Ebenen, dreidimensionale Teilräume des  $\mathbb{R}^6$  werden erbarungslos auf einen Punkt zusammengedrückt. Da kommen so viele Strukturen aufeinander zu liegen, dass man gar nichts mehr sieht – es sei denn, man legt durch den  $\mathbb{R}^6$  so etwas wie einen Dünnschnitt senkrecht zur Projektionsrichtung. Dann hält sich die Überlagerung des  $\mathbb{R}^3$  in erträglichen Grenzen.

Wenn man es geschickt anstellt, enthält der Dünnschnitt an jeder Stelle genau einen der dreidimensionalen Teilwürfel, die als »Grenzflächen« in der lückenlosen Füllung des  $\mathbb{R}^6$  vorkommen. Da diese Teilwürfel »von Natur aus« lückenlos aneinanderstoßen, gilt das auch für ihre Projektionsbilder, die Rhomboeder. Also haben wir – unter geeigneten Bedingungen – eine lückenlose, nichtpe-

riodische und fünfersymmetrische Füllung des  $\mathbb{R}^3$  mit lauter Rhomboedern.

Das ist genau der Typ von Struktur, wie ihn die Quasikristalle aufweisen, jene merkwürdigen Festkörper, deren Struktur, ebenso wie die von Kabais Kunstwerken, eine fünfzählige Symmetrie aufweist, womit sie keine gewöhnlichen Kristalle mehr sein können (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 64). So endet eine hübsche geometrische Spielerei unversehens in der modernsten Festkörperphysik. ◁



**Christoph Pöppe** ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

**Kabai, S., Bérczi, S.:** Rhombic Structures. Geometry and Modeling from Crystals to Space Stations / Rombikus Szerkezetek. Geometria és modellezés a kristályoktól az űrállomásokig. Zweisprachig, englisch/ungarisch. Uniconstant, Püspökladány (Ungarn) 2009.

**Katz, A.:** Theory of Matching Rules for the 3-Dimensional Penrose Tiling. In: Communications in Mathematical Physics 118, S. 263–288, 1988.

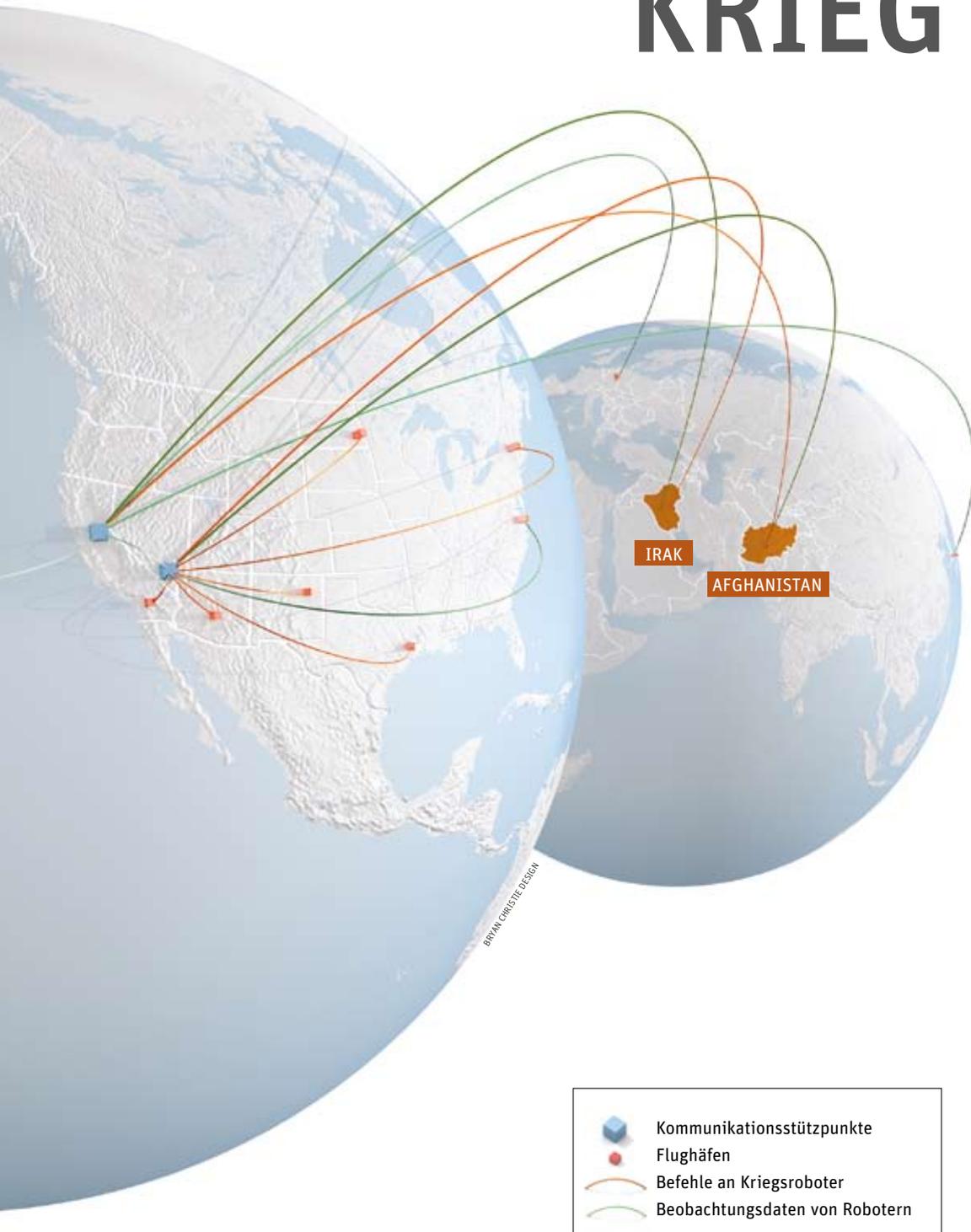
**Kepler, J.:** Harmonices Mundi Liber II. De congruentia figurarum harmonicarum, 1619. In: Max Caspar (Hg.): Johannes Kepler, Gesammelte Werke 6. C.H.Beck, München 1940.

**Kowalewski, G.:** Der Keplersche Körper und andere Bauspiele. Koehler, Leipzig 1938.

**Senechal, M.:** Quasicrystals and Geometry. Cambridge University Press, Cambridge 1995.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050044](http://www.spektrum.de/artikel/1050044).

# DER FERNGESTEUERTE KRIEG



Bei Einsätzen von US-Truppen finden immer mehr Roboter Verwendung. Viele davon werden aus der Ferne gesteuert: US-Soldaten können unbemannte Flugzeuge von Militärstützpunkten aus kontrollieren, die auf amerikanischem Boden liegen. An den Kriegsschauplätzen können die Geräte Raketen abfeuern oder auch nur Informationen von den Fronten zusammentragen. Jeder Stützpunkt ist für die Steuerung (orangefarbene Linien) eines oder mehrerer Flugzeugtypen oder den Empfang (grüne Linien) von Aufklärungsdaten verantwortlich. Die Daten laufen über zwei Kommunikationszentren in den USA (blaue Würfel) in den Irak oder nach Afghanistan und wieder zurück.

Auf und über dem Schlachtfeld sorgen Roboter für den umfassendsten Wandel seit der Entwicklung der Atombombe. Ihre Technik entwickelt sich rasant – und vor allem viel schneller, als wir die drängenden Fragen beantworten können, die mit ihrem Einsatz verbunden sind.

Von P. W. Singer

Sie waren eine Hand voll Wissenschaftler, Ingenieure, Rüstungslieferanten und Offiziere der US-Luftwaffe. Und sie stellten sich damals, in den frühen 1970er Jahren, dieselben Fragen: Wie baut man Maschinen, die selbstständig und ohne menschliche Kontrolle operieren? Und wie überzeugt man sowohl die Öffentlichkeit als auch zögernde Amtsträger im Pentagon davon, dass sich Roboter auch auf dem Schlachtfeld nützlich machen könnten? Es dauerte nicht lange und sie gründeten eine Interessengemeinschaft, deren Einfluss allerdings übersichtlich blieb. Jahrzehntlang traf man sich allenfalls ein- oder zweimal im Jahr, sprach über technische Details und blieb ansonsten unter sich. Dies ist seit einiger Zeit vorbei. Heute gehören der Association for Unmanned Vehicle Systems International über 1500 Firmen und Organisationen aus 55 Ländern an.

Denn auf den Schlachtfeldern dieser Welt findet derzeit eine der tief greifendsten Veränderungen seit der Erfindung des Schießpulvers und des Flugzeugs statt. Sichtbar wird dies an der emporschnellenden Zahl der in Kriegen eingesetzten Roboter. Keine einzige solche Maschine war dabei, als die US-Armee im Jahr 2003 von Kuwait aus auf Bagdad marschierte. Mittlerweile ergänzen 7000 »unbemannte« Fluggeräte und 12000 Bodenfahrzeuge die Ausrüstung der US-Armee. Zu ihren Aufgaben zählt es, Heckenschützen aufzuspüren, aber auch Verstecke von Al-Kaida-Führern in Pakistan zu bombardieren.

Lange Zeit passten Roboter nicht zum Selbstverständnis der US-Streitkräfte. Doch inzwischen haben sie den Krieg der Maschinen für sich entdeckt. Mit ihrer Hilfe bekämpfen sie einen »irregulären Feind«, der kaum zu greifen ist, weil er zum Beispiel Sprengsätze mit Hilfe eines Mobiltelefons ferngesteuert zur Explosion bringt.

Die robotischen Systeme verändern die Art und Weise, wie solche neuartigen Kriege geführt werden, ganz erheblich und sorgen zu-

gleich für anhaltende Diskussionen über die Konsequenzen des kriegerischen Einsatzes zunehmend autonomer und intelligenter Maschinen. Natürlich lassen sich möglicherweise auch Menschenleben retten, wenn man Soldaten aus der Schusslinie nimmt. Doch gleichzeitig wirft der Einsatz solcher Maschinen tief greifende politische, juristische und ethische Fragen auf – vor allem hinsichtlich der grundsätzlichen Natur der Kriegsführung. Wir müssen uns sogar fragen, ob die neue Technik nicht unvermeidlich die Hemmschwelle senkt, einen Krieg zu beginnen.

### Verhindern, dass wir an den Weltuntergang denken

Die frühesten Stränge dieser Entwicklung reichen wohl bis zu dem Theaterstück R.U.R. (Rossumovi Universální Roboti, dt. W.U.R.) von 1921 zurück. Dessen Autor, der tschechische Schriftsteller Karel Čapek, beschrieb seinerzeit mit dem Begriff »Roboter« mechanische Diener, die sich eines Tages gegen ihre menschlichen Herren erheben. Dieses Wort quoll vor Bedeutung geradezu über, war es doch vom tschechischen Wort für »Fronarbeit« und dem altslawischen Begriff für »Sklave« abgeleitet und zudem historisch mit den »Robotniks« verbunden, also mit Bauern, die sich im 19. Jahrhundert gegen reiche Landbesitzer erhoben hatten. Auf der Grundidee des Stücks, dass Roboter tatsächlich jene Arbeiten ausführen, die wir selbst nicht erledigen wollen, schließlich aber selbst die Kontrolle übernehmen, baut längst eine Unzahl von Sciencefictiongeschichten auf. Auch in Spielfilmen jüngerer Datums wie »Terminator« oder »Matrix« spielt sie eine zentrale Rolle. Kein Wunder, dass Roboterwissenschaftler heute lieber von »unbemannten« oder »fern-gesteuerten« Maschinen sprechen, um zu verhindern, dass wir ständig an entsprechende Hollywoodfilme und den drohenden Untergang der Menschheit denken.

Vereinfacht gesagt sind Roboter Maschinen, die nach dem Muster »Wahrnehmen-denken-handeln« agieren. Sie verfügen also

## In Kürze

- ▶ Die Zeiten sind vorbei, in denen das US-Militär sich gegen den **Einsatz von robotischen Systemen auf den Schlachtfeldern** sträubte. Mittlerweile sind Zehntausende von Militärrobotern im Einsatz.
- ▶ Manche dienen als Kundschafter, Lastenträger oder Minensucher. Andere machen **tödliche Jagd auf Kriegsgegner**.
- ▶ Die Einsätze der autonomen oder halbautonomen Systeme, die auch zu Fehlschlägen führen, werfen **völlig neue ethische und juristische Fragen** auf.

über Sensoren, die Informationen über die Welt sammeln. Computer »errechnen« dann auf Basis dieser Daten und mit Hilfe von Softwaresystemen, zum Beispiel künstlicher Intelligenz, angemessene Entscheidungen. Und zu guter Letzt führen mechanische Systeme, auch Effektoren genannt, in der Umgebung entsprechende physische Aktionen aus. Uns Zweibeinern müssen die Geräte keineswegs ähneln, auch wenn Hollywood dies durch den Menschen im Metallanzug gern suggeriert. Tatsächlich variieren Gestalt und Größe der Systeme stark, und nur selten ähnelt eines dem C-3PO aus den Star-Wars-Filmen oder der Figur des Terminators.

Dass sich Roboter auf dem Schlachtfeld nützlich machen können, verdanken sie einer Reihe neuerer Technologien, zu denen unter anderem das satellitengestützte Positionssystem GPS gehört, aber auch Fernbedienungen,

ähnlich wie sie bei Videospielen zum Einsatz kommen. Ihre Fähigkeit, Ziele in feindlicher Umgebung beobachten, identifizieren und anschließend angreifen zu können, ohne dass der sie bedienende Mensch einer Gefahr ausgesetzt ist, wurde nach den Anschlägen vom 11. September 2001 besonders wichtig. Und mit jedem Mal, das sie erfolgreich eingesetzt wurden, erschienen sie unersetzlicher. Während der ersten Monate des Afghanistanfeldzugs 2001 testete man einen Prototypen des so genannten PackBot unter Einsatzbedingungen. Den Soldaten zumindest gefiel das System so sehr, dass sie es gleich gar nicht wieder an den Hersteller iRobot zurückschickten. Von diesem Gerät, das heute meist zum Entschärfen von Bomben verwendet wird, hat iRobot mittlerweile tausende Exemplare verkauft. Auch der leitende Angestellte eines anderen Herstellers berichtet, was sich durch

## ANATOMIE EINES KRIEGSROBOTERS DER NÄCHSTEN GENERATION

**Weder Soldaten noch gewöhnliche Maschinen** erreichen die Fähigkeiten von Militärrobotern, wie sie gegenwärtig entwickelt werden. Der Vierbeiner BigDog der US-Firma Boston Dynamics etwa ähnelt einem Lasttier. Er kann Gelände durchqueren, das

für ketten- oder radgetriebene Fahrzeuge zu steil, zerklüftet, zu felsig, morastig oder zu verschneit ist. Das Wichtigste dabei: Er kann Munition oder anderen Nachschub mit einem Gewicht von rund 200 Kilogramm befördern.

### ORTUNG

Mit Hilfe von GPS-Satellitendaten bestimmt der Roboter seinen Standort (Empfangssystem nicht sichtbar).

### COMPUTER

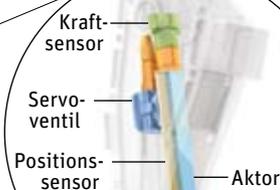
In einem zentralen Prozessor laufen Sensordaten zusammen, aus denen der Computer den aktuellen Zustand des Gesamtsystems ermittelt. Schließlich sendet er entsprechende Befehle an so genannte Aktoren, welche die Beine neu positionieren.

### MOTOR UND HYDRAULIK

Eine motorgetriebene Pumpe befördert Öl durch ein Hydrauliksystem, das die Bewegung der Aktoren ermöglicht.

### ELEKTRONISCHE AUGEN

Ein System namens LIDAR, das einem Radargerät ähnelt, aber auf Laserstrahlen statt auf Radiowellen beruht, sowie ein Sehmodul erfassen die unmittelbare Umgebung.



Kraftsensor  
Servoventil  
Positionssensor  
Aktor

### SENSOREN UND AKTOREN

Sensoren sammeln Daten über die Position der Beine und die auf sie einwirkenden Kräfte. Der Computer des Roboters errechnet aus den Daten ein neues Bewegungskommando. Dann sendet er ein entsprechendes Signal an ein Servoventil, so dass es Öl in einen Aktor (in diesem Fall einen Zylinder mit Kolben) strömen lässt. Weil das Öl unter Druck steht, bewegt sich das Bein an die gewünschte Stelle.

9/11 veränderte: Vorher erhielt er trotz seiner vielen Anfragen nie einen Rückruf des Pentagons – danach hieß es: Baut die Maschinen, so schnell ihr könnt.

Dass die Akzeptanz der Roboter durch das Militär rasant wuchs, wurde offensichtlich, je länger der Irakkrieg dauerte. Als die US-Streitkräfte 2003 in den Irak einmarschierten, taten sie das noch ohne Unterstützung unbemannter Systeme. Ende 2004 waren rund 150 davon vor Ort, und ein Jahr später waren es 2400. Heute verfügen die Bodentruppen des US-Militärs über mehr als 12 000 Systeme.

Derselbe Trend lässt sich bei der US-Luftwaffe nachweisen. Ursprünglich wurden die Einmarschtruppen von gerade einmal einer Hand voll unbemannter Luftfahrzeuge unterstützt. Heute sind es über 7000, und die Entwicklung hat gerade erst begonnen. Ein Drei-Sterne-General der US-Luftwaffe prophezeit, dass der nächste große Konflikt, in den die USA verwickelt sein werden, Zehntausende solcher Roboter beschäftigen wird.

Die Entwicklungen schlagen auch schon auf die Fernsehwerbung durch, mit der Heer, Luftwaffe und Marine junge US-Rekruten anlocken. In einem der Spots rühmt sich die Marine, dass sie »Tag für Tag daran arbeitet, Menschen aus den Kampfgebieten abzuziehen«. Werden die Teenager dann tatsächlich zu den Streitkräften eingezogen, ist es völlig selbstverständlich, dass sie dort auch mit automatisierten Systemen umgehen. Beispielsweise lernen sie mit Hilfe virtueller Systeme bestimmte Waffensysteme zu bedienen. Nach ihrer Ausbildung steuern sie dann möglicherweise einen der rasenmähergroßen PackBots oder einen Talon-Bodenroboter, wie sie im Irak und in Afghanistan bereits Bomben entschärfen, die Gegend auskundschaften oder nach Aufständischen suchen.

Landen die Rekruten bei der Marine, tun sie vielleicht Dienst auf einem Zerstörer der Aegis-Klasse oder einem Küstenkampfschiff. Beide dienen auch als Mutterschiffe etwa für die unbemannten Fire-Scout-Helikopter oder die für den Wachdienst zuständigen Protector-Motorboote. Vielleicht steuern die jungen Soldaten aber auch unbemannte Unterwasserfahrzeuge wie den Remus. Diese torpedoförmigen Roboter-U-Boote wurden einst von der Woods Hole Oceanographic Institution in Massachusetts zu Forschungszwecken entwickelt. Nun spüren sie Minen auf und beobachten feindliche Küsten.

Kommen die Soldaten hingegen zur Luftwaffe, lenken sie vielleicht Drohnen vom Typ Predator oder Global Hawk. Auch wenn diese über Mittelasien im Einsatz sind, müssen sie dafür nicht einmal die USA verlassen.

In einem der Spots, die sich an potenzielle Rekruten wenden, werden die Technologien als Teil des Armeecalltags dargestellt, »auch wenn sie an Sciencefiction erinnern«. Tatsächlich entstammen die Instrumente gerade einmal der ersten technischen Generation. Der PackBot der Gegenwart, der auf den Straßen nach Bomben sucht, und die Predator-Drohne lassen sich am ehesten mit dem Ford Modell T aus der Frühzeit des Automobils und dem Fluggerät der Gebrüder Wright vergleichen. Schon an den Prototypen der nächsten Generation erkennt man indessen, welche ihrer Merkmale das Wesen der Kriegführung verändern werden.

### Der menschenähnliche Roboter ist ein überholtes Konzept

Bislang herrscht die Vorstellung vor, dass ein Roboter nichts anderes ist als ein unbemanntes System – alles ist wie gehabt, nur dass sich im Inneren des Geräts eben kein Mensch befindet, der es steuert. Eine analoge Situation kennen wir aus dem frühen 20. Jahrhundert, als das Auto noch schlicht als »Wagen ohne Pferde« galt. Doch dieses Konzept erwies sich schnell als überholt, als die Designer mit völlig neuen Formen und Größen zu arbeiten begannen.

Heute geschieht ähnliches: In dem Maß, in dem wir unsere bisherigen Vorstellungen von Robotern ad acta legen, nehmen auch die Systeme eine Vielzahl neuer Formen an. Manche Entwickler beziehen ihre Inspirationen erwartungsgemäß aus der Biologie. Der BigDog (»Großer Hund«) des US-Robotikunternehmens Boston Dynamics etwa, dessen Aufgabe es ist, Ausrüstung zu transportieren, wurde als Metallvierbeiner konstruiert. Andere Roboter kommen als Hybriden daher: Der Überwachungsbot der kalifornischen Naval Postgraduate School, einer wissenschaftlichen Militärausbildungsstätte, verfügt sowohl über Beine als auch über Flügel. Wieder andere Systeme, die sich allerdings noch im Entwicklungsstadium befinden, besitzen überhaupt keine feste Form: Der klumpenförmige ChemBot, den die University of Chicago gemeinsam mit dem Unternehmen iRobot entworfen hat, kann seine Gestalt verändern und sich sogar durch ein Mauerloch zwängen.

Sehr unterschiedlich kann auch die Größe der Roboter sein, denn als autonome Instrumente müssen sie sich nicht am Menschen orientieren. Miniaturroboter messen bereits heute nur wenige Millimeter und bringen gerade einmal ein paar Gramm auf die Waage. Das Unternehmen AeroVironment hat für den Häuserkampf einen fliegenden Über-



Stundenlang kann der ScanEagle – das Bild zeigt ihn auf einem militärischen Stützpunkt – über unzugänglichen Gebieten schweben. Von dort versorgt die Drohne »ihre« Truppe mit Aufklärungsfotos.

Der ChemBot kann fast nach Belieben seine Gestalt verändern und sich sogar durch ein Mauerloch zwängen



Ein Soldat wirft einen PackBot durch ein Fenster. Die Videokameras des Überwachungsroboters liefern dann eine Innenansicht der Räumlichkeiten.

wachungsroboter entwickelt, der einem Kolibri ähnelt: Er besitzt etwa dessen Größe und kann ortsfest über einem Ziel schweben.

Einige Forscher sind davon überzeugt, dass in einigen Jahrzehnten auch Nanoroboter alltäglich sein werden. Solche Gebilde, deren Abmessungen im Bereich von millionstel Millimeter liegen, ließen sich im Krieg für allerhand Aufgaben einsetzen. »Smart Dust« (intelligenter Staub) könnte den Feind aufspüren; zellähnliche Maschinen im menschlichen Körper könnten Wunden heilen lassen – oder auch verursachen. Die Größenskala wird auch in entgegengesetzter Richtung erkundet: Ein geplantes unbemanntes Höhenluftschiff von Lockheed Martin mit einer Länge von 150 Metern, das per Radar die Erde erkundet, soll über einen Monat lang ununterbrochen in 19800 Meter Höhe unterwegs sein können.

Künftige Roboter werden sich neben ihrer Variabilität in Größe und Form auch durch ein weiteres Merkmal auszeichnen: ihr erheblich erweitertes Aufgabenspektrum. Ähnlich den frühen Flugzeugen, die im Ersten Weltkrieg Verwendung fanden, wurden auch Roboter zunächst nur zur Beobachtung und Aufklärung eingesetzt. Jetzt bekommen sie immer mehr zu tun. Der Technologieentwickler QinetiQ North America, der auch den Talon produziert, stellte 2007 einen weiteren Roboter vor: Maars. Ausgerüstet mit einem Maschinengewehr und einem Granatwerfer kann Maars Wachdienst versehen, aber auch als Scharfschütze eingesetzt werden. Derweil wurden auch MedBots wie das Robotic Extraction Vehicle (REV) entwickelt. Das drei Meter lange Gefährt soll verwundete Soldaten in Sicherheit bringen und anschließend versorgen können.

Das dritte Merkmal, das künftige Roboter auszeichnen wird, ist ihre stets wachsende In-

telligenz und Autonomie. Heutige Waffensysteme beurteilen Militärs unter anderem danach, wie »smart« sie sind – ein Kriterium, das für die Unterscheidung etwa zwischen einem B-17- und einem B-24-Bomber während des Zweiten Weltkriegs noch keinerlei Rolle spielte. Die unbemannten Predator-Flugzeuge zum Beispiel, die seit 1995 eingesetzt werden, wurden ursprünglich schlicht ferngesteuert betrieben. Mittlerweile haben sie gelernt, selbstständig zu starten und zu landen, sie erfassen zwölf Ziele gleichzeitig und ihre Zielerkennungssoftware vermag sogar, Fußspuren zu deren Ursprung zurückzuverfolgen. Ein Ende der Entwicklung ist nicht abzusehen. Derzeit werden sie durch eine völlig neue Generation mit noch weiter gehenden Fähigkeiten ersetzt.

Doch je intelligenter und selbständiger ein Roboter agiert, desto tiefer reichen auch die dadurch aufgeworfenen Fragen. Welche Aufgaben eignen sich dafür, dass wir sie an Maschinen delegieren können? Wir müssen bei unserer Entscheidung nicht nur abwägen, wie effektiv die Maschinen in einer Schlacht sein könnten. Wir müssen uns auch Klarheit darüber verschaffen, was die damit einhergehende Verschiebung der Verantwortlichkeit nicht nur für ihre direkten menschlichen Befehlshaber bedeutet, sondern welche Konsequenzen dies in einem übergeordneten politischen, ethischen und juristischen Sinn hat.

## Roboter verändern die Regeln des Spiels

Am wahrscheinlichsten scheint es, dass Roboter in der näheren Zukunft die Rolle von »Kampfpartnern« übernehmen werden. In gemischten Teams aus Menschen und Robotern tut dann jeder das, was er am besten kann. Die Rolle des Menschen mag dabei derjenigen ähneln, die ein Mannschaftskapitän im Fußball hat. Einerseits versucht er, das große Ganze im Blick und im Griff zu behalten, andererseits lässt er den Mitspielern ausreichend Autonomie, dass sie auf wechselnde Situationen reagieren können.

Letztlich wissen wir aber trotz aller Vermutungen noch nicht, wie sich die Robotik entwickeln und wohin sie uns führen wird. So wenig sich die weltgeschichtliche Bedeutung des Schießpulvers aus der Feststellung ableiten lässt, dass es Projektile dank bestimmter chemischer Reaktionen besonders weit fliegen lässt, sowenig können wir aus unserem Wissen um die Fähigkeiten von Robotern erschließen, was diese für unsere Welt und die Zukunft der Kriegsführung bedeuten. Eines ist aber sicher: Roboter gehören zu jenen seltenen Erfindungen, die buchstäblich die Spiel-

regeln verändern. Und sie tun das nicht nur auf dem Schlachtfeld, sondern sie beeinflussen auch die damit zusammenhängenden sozialen Strukturen. Der Langbogen zum Beispiel war nicht allein deswegen bemerkenswert, weil er den Engländern im Jahr 1415 während des Hundertjährigen Kriegs in der Schlacht von Azincourt den Sieg über die Franzosen brachte. Vielmehr trug er, indem er organisierte Fußtruppen über Ritter triumphieren ließ, dazu bei, dass Letztere militärisch nach und nach bedeutungslos wurden.

Als geeignete historische Parallele zur gegenwärtigen Zeit könnte sich der Erste Weltkrieg erweisen. Auch damals wurden auf dem Schlachtfeld seltsame neue Technologien eingeführt, wo sie viel Aufmerksamkeit erregten und man sie anschließend in schnell wachsender Zahl einsetzte. Einige davon waren noch wenige Jahre zuvor nur aus der Science-fictionliteratur bekannt gewesen, etwa aus H. G. Wells' Kurzgeschichte »Land Ironclad« aus dem Jahr 1903. Sie hatte mit dazu beigetragen, dass Winston Churchill, während des Ersten Weltkriegs Erster Lord der Admiralität des Vereinigten Königreichs, die Entwicklung des Panzers vorantrieb. A. A. Milne, Schöpfer der Kinderbuchfigur »Pu der Bär«, war einer der Ersten, der den Einsatz von Flugzeugen im Krieg beschrieb. Und für andere Autoren war auch der Einsatz von U-Booten im Krieg schon sehr früh eine Option gewesen: für Jules Verne im Roman »20 000 Meilen unter dem Meer« von 1869 sowie für Arthur Conan Doyle in seiner Kurzgeschichte »Danger!« von 1914.

Eine »revolutionäre« Technologie wie die Robotik, so behaupten manche, verschaffe ihren ersten Anwendern einen permanenten Vorteil. Doch tatsächlich verflüchtigt sich der Vorteil rasch, schließlich kann der Gegner die Technologie einfach übernehmen. Die britische Erfindung des Panzers ist dafür ein gutes Beispiel. Mit ihrer Blitzkriegtaktik zeigten die Deutschen bereits im Zweiten Weltkrieg, dass sie herausgefunden hatten, wie sich die neue Waffe wesentlich effektiver einsetzen lässt.

Trotzdem hat die Einführung von Panzern, Flugzeugen und Unterseebooten zu einschneidenden Folgen geführt: Mit dieser Entwicklung stellten sich neue politische, moralische und juristische Fragen, die schnell auch zu veränderten Strategien der Kriegsgegner führten. Bei Amerikanern und Deutschen etwa herrschten unterschiedliche Ansichten darüber, wie Unterseeboote im Kampf eingesetzt werden dürften (war ihnen gestattet, Handelsschiffe ohne Warnung zu versenken?), was letztlich auch zum Eintritt Amerikas in den

## AUF ALLEN KRIEGSSCHAUPLÄTZEN ZU HAUSE

**Zunehmend komplexer werden die Aufgaben**, die Maschinen im Krieg übernehmen. »Typische« Roboter gibt es nicht, Gestalt und Fähigkeiten richten sich ganz nach den Einsatzgebieten.

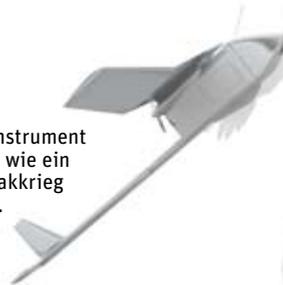


**HÖHENLUFTSCHIFF:** Es soll über einen Monat lang – unerreichbar für die meisten Waffensysteme – in der Luft bleiben können und mit Hilfe seines Radargeräts hochpräzise Aufklärungsdaten liefern.



**KOLIBRIDROHNE:** Der »Vogel« misst lediglich 7,5 Zentimeter und schlägt rasend schnell mit den Flügeln, während seine Kameras die Umgebung beobachten.

**RABE:** Dieses Spionageinstrument ist gerade einmal so groß wie ein Modellflugzeug und im Irakkrieg häufig eingesetzt worden.



**MAARS:** Mit Maschinengewehr und Granatwerfer ist dieser 160 Kilogramm schwere Wachposten und Scharfschütze ausgestattet.



**CHEMBOB:** Die handtellergröße, kloßförmige Maschine soll ihre Gestalt verändern können, um sich durch ein Loch in einer Wand zu zwängen und Informationen von der anderen Seite zu liefern.

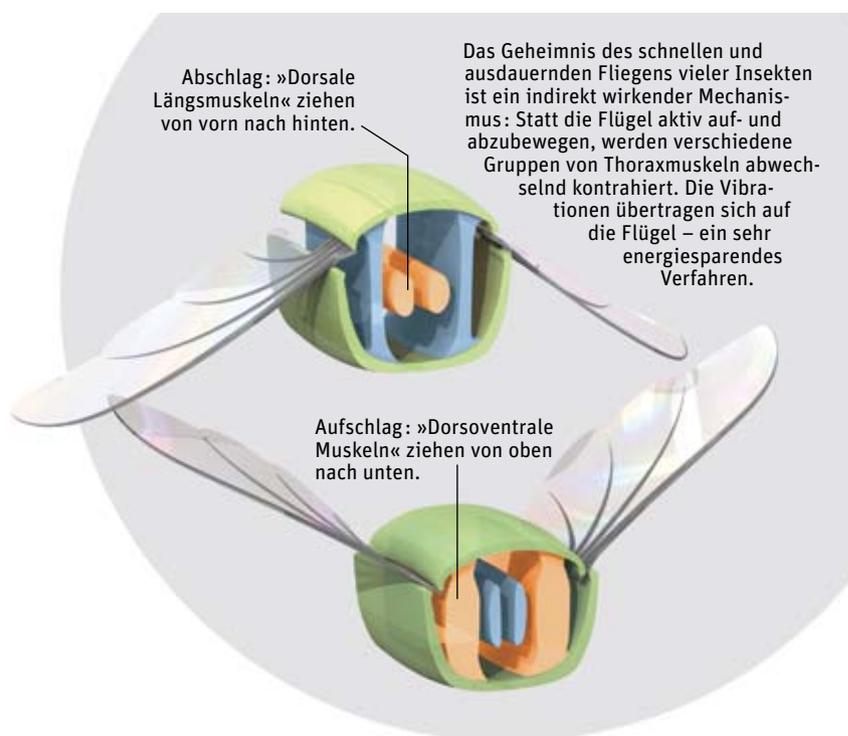
# Und fliegt und fliegt und fliegt

Geht es nach dem Willen der Militärs, werden zu Cyborgs umgerüstete Insekten bald zu Aufklärungsflügen starten.

Eine Drohne, so winzig wie ein Insekt und genauso wendig und schnell, könnte vom Feind unbemerkt in ein Gebäude oder Höhlensystem eindringen und seine Stellungen auskundschaften. Rekordhalter solcher Entwicklungen ist derzeit ein Robotflieger aus dem Harvard Microrobotics Laboratory mit gerade mal 0,06 Gramm Gewicht – er ist nur etwa viermal schwerer als eine Stubenfliege. Doch es gibt keine geeignete Batterie, die ihn länger als ein paar Minuten in der Luft hielte.

Dieses Problem haben Insekten offenbar gelöst. Die Flügel der Stubenfliege schlagen etwa 200-mal pro Sekunde. Sie erzeugt ihre Energie selbst und hat den Verbrauch dank einer komplexen Biomechanik minimiert: Die Flügel werden nicht direkt bewegt, sondern durch rhythmische Kontraktion des Thorax (Brustpanzer) in Schwingung versetzt, vergleichbar dem Anschlagen einer Stimmgabel. Nur für die Feinsteuerung greifen direkte Muskeln an den Flügeln an (Basilarmuskulatur). Der Ingenieurwissenschaftler Michel Maharbiz und der Chemiker Hirotaka Sato von der University of California in Berkeley, beide Spezialisten für Mikrosysteme, wollen deshalb Insekten als biologische Transportplattform für Aufklärungsflüge nutzen.

Die Anregung dazu stammt von der DARPA, einer Forschungsbehörde des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums, die vor fünf Jahren einen Workshop über Cyborg-Drohnen veranstaltete, also über Aufklärungsflieger, die zum Teil Maschine, zum Teil leben-

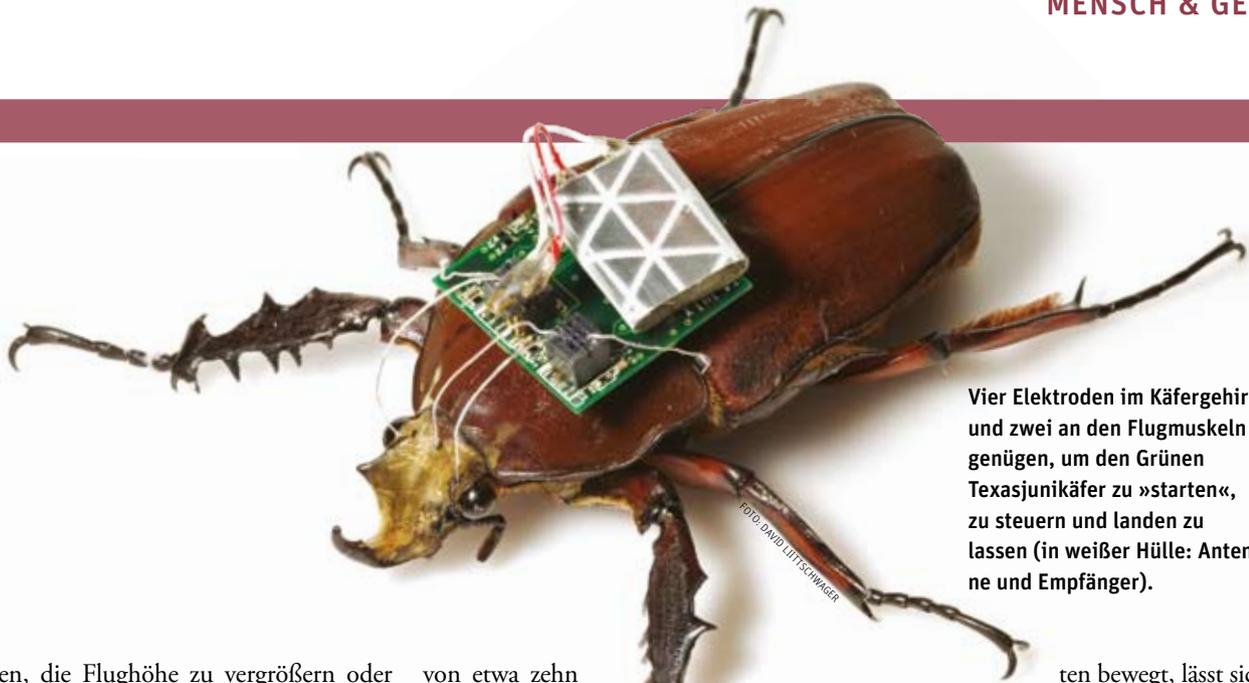


des Wesen sind. Neben dem militärischen Nutzen wurde eine solche Entwicklung auch als Option für die Suche nach Verschütteten gepriesen; außerdem könnten Zoologen das Kommunikations- und Paarungsverhalten der Insekten besser studieren, wenn sie bei ihren Versuchen gesteuerte Tiere einsetzen.

Bis 2005 war der Insektenflug meist an Schmetterlingen oder Fliegen erforscht worden. Erstere bestehen aber zum Großteil aus Flügeln, können also wenig Last tragen; sie sind überdies stark behaart, so dass der nötige Klebstoff

nicht hält. Fliegen sind viel zu klein, um Kabel und Schaltkreise anzubringen. Maharbiz und Sato verlegten sich deshalb auf große Käfer, da diese bis zu 30 Prozent ihres Eigengewichts tragen können, eine glatte Oberfläche haben und wie Fliegen durch rhythmisches Verformen ihres Außenskeletts fliegen. Was sie auch im Hinblick auf ihre militärische – oder zivile – Verwertung interessant macht: Käfer können in nahezu jedem Mikroklima der Erde gedeihen.

Ziel war es, ihren Flügelschlag per Fernsteuerung zu starten oder zu stop-



Vier Elektroden im Käfergehirn und zwei an den Flugmuskeln genügen, um den Grünen Texasjünkäfer zu »starten«, zu steuern und landen zu lassen (in weißer Hülle: Antenne und Empfänger).

pen, die Flughöhe zu vergrößern oder zu verkleinern und einen Links- oder Rechtsschwenk zu erwirken. Feinere Aspekte wie die Ausrichtung gegen den Horizont oder das Ausweichen von Hindernissen sollte das Nervensystem des Tiers selbst kontrollieren.

Als besonders geeignet erwies sich der Grüne Texasjünkäfer (*Cotinis texana*) mit zwei Zentimeter Länge und einem Gewicht von 1,5 Gramm. Das technische System besteht heute aus einem Mikrokontroller mit Funkempfänger, einer Batterie und mehreren Silberkabeln von je 125 Mikrometern Durchmesser. Diese sollen elektrische Ströme unterschiedlicher Frequenz auf die Thoraxmuskeln übertragen. Zudem implantierten die Ingenieure Elektroden in das »Gehirn« (das so genannte Oberschlundganglion im Kopf). Denn es ist bekannt, dass Käfer ohne visuellen Input – beispielsweise in einem dunklen Raum – aufhören zu fliegen. Im Umkehrschluss hofften die Forscher, motorische Reaktionen durch Stimulation optischer Areale auslösen zu können (um nicht die Manövrierfähigkeit des Insekts zu beeinträchtigen, wurden Regionen an der Basis dieser Areale ausgewählt). Wie bei der Muskelreizung zeigte sich auch hier, dass es nicht darauf ankommt, spezielle Neurone gezielt anzusprechen. Ein Glück für das Projekt, denn dergleichen wäre kaum praktikabel.

Es zeigte sich, dass man das Insekt in 97 Prozent der Versuche »starten« konnte, wenn eine Region des Gehirns zwischen dem rechten und dem linken Sehlappen mit elektrischen Impulsen

von etwa zehn Millisekunden Länge (was 100 Hertz entspricht) gereizt wurde. Hielt der Impuls hingegen länger an, stoppte das Tier sofort. Die Forscher vermuten, dass die Neurone dabei quasi übersteuert wurden, was die Weiterleitung sämtlicher elektrischer Signale und damit auch einen Reiz blockierte, der für die Kontraktion der Flugmuskeln erforderlich ist. Gaben sie mehrere solcher An- und Aus-Kommandos in schneller Folge hintereinander, unterbrach das den Flügelschlag nicht, sondern er wurde lediglich schwächer – ein Pendant zur Steuerung eines Flugzeugantriebs über den Gashebel. Das An- und Ausschalten funktionierte überdies unabhängig von der jeweiligen Ausgangssituation. Wurde das Tier beispielsweise auf den Rücken gelegt und »gestartet«, schlugen seine Flügel trotz der Lage. Wurde es mitten im Flug »ausgeschaltet«, fiel der Käfer sofort zu Boden und krabbelte dort weiter. Mikrokabel auf den rechten und linken Basilar-muskeln dienen der Kurvensteuerung. Ein Zehn-Millisekunden-Puls rechts verstärkte dort die Kontraktion und der Käfer drehte nach links ab, und umgekehrt.

Um die Tiere auch durch komplexe, räumliche Strukturen zu dirigieren – zum Beispiel einen Kamin hinab oder ein Rohr hinauf –, wurde ihre Traglast um Minimikrofone erhöht. Ob sich ein Flügel gerade nach oben oder nach un-

ten bewegt, lässt sich anhand des Geräuschpegels grob ermitteln. So kann man das Flugverhalten genau steuern. Inzwischen entwickelt Pieter Abbeel, Spezialist für Robotik und Maschinenlernen an der University of California in Berkeley, mit seiner Gruppe ein Softwaresteuerungssystem, das Kommandos wie »ändere die Flugrichtung um 20 Grad« in Käfersteuerbefehle übersetzt, beispielsweise »Zehn-Millisekunden-Pulse auf den rechten Basilar-muskel für x Sekunden«. Magnetresonanzbilder, anatomische Studien und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen fliegender Käfer liefern die Daten, um verschiedene Muskeln gleichzeitig anzusprechen und so den freien Flug besser zu kontrollieren.

Sicher wird der Grüne Texasjünkäfer noch einiges zu erdulden haben. Denn um der Armee dienen zu können, muss er auch noch Kamera und Sendevorrichtung auf seinem Rücken tragen. Die Forscher betonen aber, dass die Tiere bei alldem keinerlei Schaden nehmen würden. Cyborgkäfer leben so lange wie ihre normalen Artgenossen, und sie fressen oder paaren sich auch genau wie diese. Es sei denn, der Operator hat andere Pläne.



Der Artikel basiert auf »Cyborg Beetles« von **Michel Maharbiz** und **Hiroataka Sato** in »Scientific American« 12/2010, S. 94–99.

## VOLLSTÄNDIG VERBIETEN?

Nicht nur US-Amerikaner beschäftigen sich mit der Frage, ob militärische Roboter auf den Schlachtfeldern eingesetzt werden sollen oder dürfen. Jüngst lud auch das International Committee for Robot Arms Control (Icrac), zu dessen Gründungsmitgliedern der Physiker Jürgen Altmann von der TU Dortmund zählt, zu einer Konferenz in Berlin. Gemeinsam mit Vertretern von Regierungen und Menschenrechtsorganisationen sowie Forschern verschiedener Disziplinen aus zahlreichen Staaten verabschiedete Icrac am 22. September mehrheitlich ein Dokument (<http://www.icrac.co.cc/Expert%20Workshop%20Statement.pdf>), das einen Stopp der Weiterentwicklung bewaffneter autonomer Roboter fordert. Insbesondere sollen robotische Weltraumwaffen sowie die Bestückung von autonomen oder ferngesteuerten Systemen mit Nuklearwaffen verboten werden. Unannehmbar sei, dass Maschinen über den Einsatz von Gewalt entscheiden; stets müsse mindestens ein Mensch die persönliche und rechtliche Verantwortung für Einsätze übernehmen. Könne man sich nicht auf entsprechende Maßnahmen einigen, so drohe die weitere Beschleunigung der Kriegsführung, eine Unterminierung von Waffenkontrollvereinbarungen und eine Erhöhung der Gefahren, die von asymmetrischen Kriegen auf regionale und globale Sicherheit ausgeht.

Ersten Weltkrieg beitrug. Auch Flugzeuge erwiesen sich nicht nur bei der Aufklärung und bei Angriffen aus großer Entfernung als nützlich, sondern ermöglichten, wie man schnell herausfand, zudem Flächenbombardements von Städten. Ab dem Augenblick, als Bomben auf die Zivilbevölkerung herabstürzten, erlangte der Begriff der »Heimatfront« eine völlig neue Bedeutung.

## Automatisierte Angriffe lösen keine Debatten mehr aus

Heute erleben wir angesichts des Einsatzes von Militärrobotern einen ähnlichen Wandel. Man stelle sich nur einmal vor, was es einst hieß, »in den Krieg zu ziehen« und vergleiche dies mit einer Kriegsführung, bei der unbemannte Systeme in großer Entfernung aktiv werden. In dem Maß, in dem der Abstand zwischen menschlichem Kämpfer und Kriegsschauplatz wächst, sinkt möglicherweise die abschreckende Wirkung von Kriegen, so dass es uns leichter fällt, sie zu beginnen. Vielleicht sehen wir sie auch bald mit gänzlich anderen Augen. Über 170 Luftangriffe auf Pakistan haben die USA mit Drohnen der Typen Predator und Reaper geflogen; dies ist ein Mehrfaches der Zahl der bemannten Bomberangriffe, welche die USA in der ersten Phase des Kosovo-Kriegs unternahmen. Ganz anders als die bemannten lösten die unbemannten Angriffe jedoch keine Debatte im US-Kongress aus und fanden auch in den Medien nur relativ geringe Aufmerksamkeit. Wir erleben also, dass ein Staat eine Unternehmung beginnen kann, die früher Krieg genannt worden wäre, dass die öffentliche Auseinandersetzung darüber jedoch ausbleibt. Wir US-Amerikaner betrachten den Konflikt nicht einmal als einen Krieg, weil er keinen US-Amerikaner das Leben kostet.

Einerseits sind diese Luftschläge sehr wirkungsvoll gewesen. Bei ihnen starben über 40 Anführer der Al-Kaida, der Taliban oder verbündeter militanter Gruppen, ohne dass amerikanische Soldaten einer Gefahr ausgesetzt worden wären. Doch andererseits haben wir für die vielen Fragen, die diese Angriffe über ihre direkten Effekte hinaus aufwerfen, noch keine gültigen Antworten gefunden. Das führt zu Missverständnissen, Konflikten und letztlich auch zu Wut. Während die Vereinigten Staaten über »präzise« Schläge und »opferfreies« Vorgehen sprechen, wenn sie diese Technologie in den Massenmedien beschreiben, sind in einer führenden pakistanischen Tageszeitung anlässlich der Luftangriffe hasserfüllte Kommentare zu lesen. Das Wort »drone« (Drohne) ist als umgangssprachlicher Begriff sogar in die pakistanische Nationalsprache

Urdu eingegangen und taucht in Rockmusiktexten auf, die Amerika des unehrenhaften Kampfs beschuldigen.

Noch komplexer wird das Problem, wenn wir uns fragen, wer bei Fehlschlägen zur Verantwortung zu ziehen ist. Derzeit schätzt man die Zahl der von Robotern getöteten Zivilisten auf 200 bis 1000. Viele dieser Zwischenfälle trugen sich nahe jener Orte zu, an denen sich die gefährlichsten Terroristenführer tatsächlich aufhielten. Hätte man besser nicht zuschlagen sollen? Wo ziehen wir die Grenze?

Nicht nur ein moderner Staat führt den Krieg heute anders als früher, sondern auch der einzelne Soldat. Seit Menschengedenken bedeutet »in den Kampf zu ziehen« für ihn, dass er möglicherweise nicht nach Hause zurückkehrt. Solche Wahrheiten hatten 5000 Jahre lang Bestand, doch mittlerweile wird der Krieg ferngesteuert. Eine wachsende Zahl Soldaten wacht morgens auf, fährt zur Arbeit, setzt sich vor einen Computer und steuert damit Roboter, die gegen Widerstandskämpfer in 11 300 Kilometer Entfernung zu Feld ziehen. Am Ende eines solchen Tags »im Krieg« steigt der Soldat in sein Auto, fährt nach Hause und sitzt »20 Minuten später am Abendbrottisch und unterhält sich mit den Kindern«, wie es ein Offizier der US-Luftwaffe formuliert. Gefährlich war an seinem Tag nur die Fahrt mit dem Wagen.

Die Aufhebung des geografischen Zusammenhangs zwischen dem Kämpfenden und dem Schlachtfeld führt im Krieg zu einer neuen Aufgabenverteilung. Mit dieser wiederum gehen neue Fragen nach der Rolle individueller Soldaten (junge Rekruten übernehmen Aufgaben, die früher höheren Dienstgraden vorbehalten waren), nach ihrem Status (Techniker versus Krieger) oder neuen Formen von Kampfstress und Erschöpfung einher. Es mag zwar den Anschein haben, als spielte, wer die Fernsteuerung einer Waffe bedient, lediglich ein Videospiele. Tatsächlich aber stehen diese Soldaten unter starkem psychologischem Druck, denn von ihrem fehlerlosen Agieren auf dem Schlachtfeld hängen Tag für Tag Menschenleben ab. Ihre Befehlshaber berichten, dass es etwas ganz anderes sei, Truppen in einen solchen Fernkampf zu führen als mit regulären Einheiten in eine physische Schlacht zu gehen – manchmal sei die Aufgabe der Kommandeure sogar schwieriger, wenn die Truppen »nur« vor dem Computer sitzen.

Während Roboter immer intelligenter und immer tödlicher werden, verliert die Rolle des einzelnen Soldaten in den Entscheidungsprozessen an Bedeutung. Schon jetzt ist Kriegsführung ein extrem schneller Vorgang. Beispiels-

weise können nur Abwehrsysteme wie C-RAM (*Counter-Rocket Artillery and Mortar*), das über ein 20-Millimeter-Maschinengewehr verfügt, schnell genug reagieren, um anfliegende Raketen oder Marschflugkörper abzuschießen. Zwar bleibt der Mensch Teil des Entscheidungsprozesses, seine Aufgaben nimmt er dabei aber vorrangig nicht im Gefecht, sondern viel früher wahr, nämlich bei der Programmierung des Roboters. Während des tatsächlichen Einsatzes hat der Bediener dann lediglich ein Vetorecht. Will er die Entscheidung des Roboters tatsächlich außer Kraft setzen, muss er diese Entscheidung binnen einer halben Sekunde treffen. Und nur wenige sind bereit, dem Urteil der Maschine, das sie für das bessere halten, zu widersprechen.

### Der Roboter tötete neun Menschen, bevor die Munition ausging

Viele Beobachter glauben, dass dadurch die Zahl irrtümlicher Entscheidungen im Krieg sinken wird. Außerdem werde sichergestellt, dass entsprechendes Kriegsrecht einheitliche Anwendung findet – so als wäre es in Form von Befehlszeilen einer Computersoftware festgeschrieben. Wer das vermutet, ignoriert aber das komplexe Umfeld eines Kriegs. Ein unbemanntes System mag in der Lage sein, aus über einem Kilometer Entfernung einen Mann auszumachen, der mit einer Kalaschnikow bewaffnet ist, und anhand der Wärmeabstrahlung der Waffe zu bestimmen, ob er das Sturmgewehr kürzlich abgefeuert hat oder nicht. Doch kann es herausfinden, ob dieser Mann ein Aufständischer ist oder ein Mitglied einer alliierten Miliz oder vielleicht nur ein einfacher Ladenbesitzer? Das ist und bleibt für die Maschine ebenso schwierig wie für einen Soldaten.

Den uralten »Schleier des Krieges« werden die neuen Technologien ebenfalls nicht lüften, auch wenn der ehemalige US-Verteidigungsminister Donald H. Rumsfeld und weitere Befürworter eines digitalen Schlachtfelds dies glaubten. Das ausgeklügelte C-RAM-System zum Beispiel hat auf Grund eines Programmierfehlers einmal einen US-Hubschrauber als feindliches Ziel ausgemacht; zum Glück wurde niemand verletzt. 2007 hingegen sorgte ein Softwarefehler bei einem ähnlichen Flugabwehrsystem in Südafrika für einen tragischen Ausgang. Mit einer 35-Millimeterkanone ausgerüstet, sollte das System bei einer Übung in den Himmel schießen. Doch es senkte den Lauf, feuerte im Kreis und tötete neun Soldaten, bevor der Waffe die Munition ausging.

Solche Situationen wecken natürlich gewaltige juristische Bedenken. Bei wem liegt welche Verantwortung? Auf welches Rechts-

system können wir uns bei der Beantwortung solcher Fragen überhaupt beziehen? Wieder einmal entwickelt sich die Technik schneller als unsere gesellschaftlichen Institutionen. Wie passen wir also unser aus dem 20. Jahrhundert stammendes Kriegsrecht der neuen Wirklichkeit an?

Unsere Vorstellungen davon, wie Krieg geführt wird und sogar davon, wer ihn führen sollte, befinden sich im Umbruch. Grund dafür ist eine neue Technologie mit ungeheuren Fähigkeiten. Die Menschheit befindet sich allerdings nicht zum ersten Mal in einer vergleichbaren Situation. Wir mühen uns dann ab, die neue Technologie zu verstehen und allmählich mit ihr klarzukommen. Schließlich aber müssen wir schlicht erkennen, dass mit der Zeit völlig normal geworden ist, was einst als seltsam und sogar inakzeptabel galt. Von einem französischen Adligen aus dem 15. Jahrhundert ist überliefert, dass Gewehre für ihn Mordwerkzeuge darstellten, die ein wahrer Soldat nie anrühren würde. Nur Feiglinge, schrieb er, »würden sich nicht trauen, den Männern ins Gesicht zu sehen, die sie aus der Ferne mit ihren erbärmlichen Kugeln fällen«.

Über die Robotik denken viele heute ebenso. Vielleicht stellt sich heraus, dass wir die Technik viel schneller beherrschen werden als wir die Fragen beantworten können, die uns diese Maschinen aufzwingen. Genau aus diesem Grund führen einige Wissenschaftler nicht die Erfindung von Gewehr oder Flugzeug als historische Parallele zur Gegenwart an, sondern verweisen auf die Atombombe. Wieder einmal überschreiten wir heute mit einer neuen Technik die Grenzen der Wissenschaft. Und wieder einmal stellen sich jenseits der wissenschaftlichen Sphäre so drängende Fragen, dass wir die Realisierung unserer Ideen möglicherweise bereuen werden – so wie dies auch einige der Wissenschaftler taten, welche die ersten nuklearen Sprengköpfe entwickelten. Doch genau wie jene Erfinder in den 1940er Jahren fahren auch die heutigen Entwickler von Robotern mit ihrer Arbeit fort, weil sie militärisch nützlich und hoch profitabel ist und wieder einmal die gegenwärtigen Grenzen der Wissenschaft niederreißt.

Die eigentliche Aufgabe besteht darin, die neuesten Entwicklungen in der Militärrobotik auch außerhalb der Verteidigungsministerien ernsthaft zu diskutieren. Denn diese Diskussionen werden beeinflussen, was in der Robotikbranche, in den Forschungslabors und auf dem Schlachtfeld geschieht. Schon jetzt aber ist klar: 5000 Jahre lang besaß die Menschheit das Monopol der Kriegsführung. Nun hat sie es verloren. ◀



**P. W. Singer** leitet die 21st Century Defense Initiative an der Brookings Institution, einem Forschungsinstitut in Washington D. C.

**Singer, P. W.:** *Wired for War: The Robotics Revolution and Conflict in the 21st Century.* Penguin, 2009.

**Singer, P. W.:** *The Regulation of New Warfare.* Brookings Institution, Washington, 2010. Online unter [www.brookings.edu/opinions/2010/0227\\_defense\\_regulations\\_singer.aspx](http://www.brookings.edu/opinions/2010/0227_defense_regulations_singer.aspx)

Bombs Away. *The Economist*, Technology Quarterly, S. 13, 4. März 2010. Online unter: [www.economist.com/node/15582147](http://www.economist.com/node/15582147)

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050008](http://www.spektrum.de/artikel/1050008).

# Welche RECHTE haben TIERE?

Die deutsche Rechtsordnung gewährt Tieren keine subjektiven Rechte. Wie ist die Rechtslage, und welche ethischen Forderungen bestehen? Der Tierethiker Jörg Luy gibt **fünf Antworten** auf die Frage, wie sehr das Recht die Tiere schützt.

Von Jörg Luy

In einem deutschen Zoo wurden unlängst drei gesunde, aber nicht reinrassige Tigerwelpen auf Anordnung der Direktion getötet, weil man die Ressourcen des Zoos zur Aufzucht von rassereinen Tigern verwenden wollte. Die Verantwortlichen wurden angezeigt und wegen Verstoßes gegen das Tierschutzgesetz schuldig gesprochen. Die Frage, welche Rechte Tiere haben, lässt sich anscheinend durch einen Blick ins Tierschutzgesetz beantworten.

Die Angelegenheit ist jedoch komplexer; denn Tiere besitzen bislang keine Rechtsfähigkeit und können daher keine klagebefugten Rechtsgutträger sein. Die Frage nach den Rechten von Tieren ist also mehrdeutig. Ich will darauf fünf Antworten geben. Obwohl es so scheint, als ob das Tierschutzgesetz dazu dient, über die Rechte von Tieren zu wachen, ist das geschützte Rechtsgut vielmehr die sittliche Ordnung in den Beziehungen zwischen Mensch und Tier. Die erste Antwort auf die Frage, welche Rechte Tiere haben, lautet daher: Die gegenwärtige deutsche Rechtsordnung gewährt Tieren überhaupt keine.

Da der Begriff des Rechts aber fassettenreich ist, stellt das Tierschutzrecht in gewisser

Hinsicht durchaus Rechte von Tieren sicher, nur eben bislang keine subjektiven. Insbesondere im 19. und frühen 20. Jahrhundert wurde mit dem Argument für die Einführung von Tierschutzgesetzen geworben, man solle doch die zu diesem Zeitpunkt in einigen Kreisen bereits als unstrittig empfundenen »moralischen Rechte« der Tiere, um wirksam werden zu können, zu »gesetzlich verbürgten Rechten« aufwerten. Legt man der Frage, welche Rechte Tiere haben, den letztgenannten Rechtsbegriff zu Grunde, dann muss der britische »Cruel Treatment of Cattle Act« von 1822 erwähnt werden, der als erstes substantielles Tierschutzgesetz der Welt gilt.

Die gesellschaftliche Debatte über den Tierschutz wurde mehr als 2000 Jahre durch den griechisch-antiken Fehlschluss verhindert, Geben und Nehmen müssten sich auch in Fragen der Moral die Waage halten. Obwohl fremdnütziges Verhalten in aller Regel durch symbiotische Vorteile belohnt wird, gilt heute der Umkehrschluss als unhaltbar, dass moralisches Verhalten stets nur so weit gefordert und gesetzlich vorgeschrieben werden dürfe, wie es Vorteile für den Normadressaten selbst bietet.

Während noch im 17. Jahrhundert beispielsweise der Philosoph Thomas Hobbes

Betroffen von der Debatte um das Tierrecht auf Freiheit sind auch Zoos.



FOTOLIA / BERND LEITNER



(1588–1679) das antike Argument verwendet, er könne sich keinerlei Pflichten im Hinblick auf den Tierschutz vorstellen, da ja die Tiere auch keine Rücksicht auf den Menschen nähmen, gehören die Begründer des Utilitarismus im späten 18. Jahrhundert zu den Ersten, die dieses als Fehler erkannt haben. Sie vertraten die Ansicht, das Ziel moralischer Handlungen liege in der globalen Minimierung unerfreulicher Erlebnisse, weswegen auch Tiere – soweit zu solchen fähig – zu berücksichtigen seien.

### Rücksicht auf Leidensfähigkeit

So stellt der britische Jurist und Philosoph Jeremy Bentham (1748–1832) die viel zitierte und mittlerweile unstrittige These auf, dass Leidensfähigkeit speziesunabhängig menschliche Rücksichtspflichten begründe. Wie zahlreiche Pioniere der Tierethik nimmt auch der Begründer des klassischen Utilitarismus Bentham an, dass eine für das Tier leidensfreie Tötung weiterhin eine moralische Option darstelle. Denn alles Gute und Schlimme beruhe auf Empfindung, welche aber mit dem Tod erlösche (Epikur).

Der australische Ethiker Peter Singer (\* 1946), dessen Buch »Animal Liberation« 1975 Benthams Idee der Gleichwertigkeit

menschlicher und tierischer Schmerzen erstmals ausführlich verteidigt, gilt als Verantwortlicher für das wieder aufflammende, zunehmend auch akademische Interesse an Fragen der Tierethik. In seinem Buch verwendet Singer den Begriff Speziesismus, um ungerechtfertigte Fälle von Ungleichbehandlung verschiedener Tierarten zu benennen – insbesondere wenn *Homo sapiens* und Vertreter einer anderen Spezies mit zweierlei Maß gemessen werden.

Es gelingt ihm zu demonstrieren, dass die Wahrnehmung von Speziesismus das menschliche Empfinden von Ungerechtigkeit ähnlich auslösen kann wie etwa Rassismus. Benthams generelles Einverständnis zu einer angst- und schmerzlosen Tötung von Tieren kann Singer nicht mittragen, weil Bentham kein differenzierendes Merkmal angegeben hat, welches die Tötung von Menschen ausschließt. Denn um den Speziesismus-Vorwurf abzuwehren, benötigt auch das menschliche Recht auf Leben eine Rechtfertigung. Durch Singers Hypothese, das gesuchte Merkmal sei der Wunsch beziehungsweise das Interesse weiterzuleben, gilt das von ihm geforderte Tötungsverbot aber nicht nur für Menschen. Vielmehr betrifft es auch solche Tiere, die auf Grund ihres Entwicklungsniveaus ebenfalls den Wunsch ver-

**Nach dem Prinzip der Verhältnismäßigkeit ist unser derzeitiger Umgang mit Nutztieren, etwa bei Tiertransporten, am wenigsten vertretbar.**

»Niemand darf einem Tier ohne vernünftigen Grund Schmerzen, Leiden oder Schäden zufügen«

spüren könnten, am Leben zu bleiben – und gilt damit möglicherweise auch für Schweine und einige weitere Tiere, die traditionell zum Verzehr genutzt werden. Es verwundert also kaum, dass die weit reichenden Konsequenzen der singerschen Argumente bis heute auf Widerstand stoßen.

In Deutschland gibt es bereits seit über 70 Jahren ein Tierschutzgesetz, dessen konzeptioneller Hintergrund, der so genannte ethische Tierschutz, im Jahr 2002 zum Staatsziel erklärt und über Artikel 20a ins Grundgesetz aufgenommen wurde. Deshalb müssen seitdem die dort verbürgten Grundrechte, insbesondere die Forschungs- und die Religionsfreiheit, mit den Belangen des Tierschutzes abgewogen werden. Nachdem Österreich 1988 im Bürgerlichen Gesetzbuch festgelegt hat, dass Tiere keine Sachen (mehr) sind, wurde dieser Schritt 1990 auch in Deutschland sowie 2003 in der Schweiz vollzogen. 1997 hat sich auch die Europäische Union im Tierschutzprotokoll des Vertrags von Amsterdam verpflichtet, Tiere als fühlende Wesen anzuerkennen und durch Verbesserung des Tierschutzes ihr Wohlergehen stärker als bisher zu berücksichtigen.

Die zweite Antwort auf die Frage, welche Rechte Tiere haben, lautet daher: Vor allem in Europa haben sich im 20. Jahrhundert rechtsverbindliche Vorschriften zum Schutz des individuellen Tieres vor Handlungen oder Unterlassungen von Menschen stark verbreitet.

Diese Gesetze orientieren sich, von seltenen Detailregelungen abgesehen, an dem utilitaristischen Ethikkonzept, das auf die globale Minimierung unerfreulicher Erlebnisse zielt. Das heißt, es wird verboten, empfindungsfähigen Tieren – außerhalb von moralischen Dilemmata – Schmerzen, Leiden oder Schäden zuzufügen. Als empfindungs- beziehungsweise leidensfähig gelten den Gesetzgebern Wirbeltiere einschließlich der Fische sowie unter den Wirbellosen bislang zumindest Vertreter der Kopffüßer, Zehnfüßkrebse und Rundmäuler (siehe den Vorschlag der EU-Kommission vom 10.11.2008 für eine neue EU-Tierversuchsrichtlinie).

Moralische Konflikte, also Situationen, in denen sich das schicksalhafte Eintreten eines Übels nur durch die Herbeiführung oder Inkaufnahme eines anderen Übels verhindern lässt, werden durch Konstruktionen wie »aus vernünftigem Grund« und »mit nicht mehr als unvermeidbaren Schmerzen oder Leiden« vom grundsätzlichen Schädigungsverbot ausgenommen. Dabei wird, wie beispielsweise fast durchgängig bei der konventionellen Agrartierhaltung, nicht selten auch die Steigerung des menschlichen Wohlbefindens – einschließlich der Steigerung desselben durch

günstige Preise – zur Legitimierung der Zufügung von Schmerzen und Leiden akzeptiert, obwohl eine solche Überdehnung der Ausnahmeregelung für moralische Dilemmata in Deutschland theoretisch durch das Prinzip der Verhältnismäßigkeit ausgeschlossen ist.

Denn der zweite Satz der Präambel des Tierschutzgesetzes fordert: »Niemand darf einem Tier ohne vernünftigen Grund Schmerzen, Leiden oder Schäden zufügen.« Sowohl die Rechtsprechung als auch die Kommentare zum Tierschutzrecht sehen in dem »vernünftigen Grund« einhellig eine Ausprägung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit. Die Anwendung dieses Prinzips ermöglicht es, in Situationen, in denen sich das voraussichtliche Eintreten eines Übels nur durch die Inkaufnahme eines anderen Übels verhindern lässt, eine rechtfertigungsfähige Handlungsoption zu finden.

### Wege aus dem moralischen Dilemma in vier Schritten

Im moralischen Konflikt müssen sich alle denkbaren Optionen vier Prüfschritten unterwerfen: Ist der verfolgte Zweck als moralisch verfolgungswürdig, als in diesem Sinn als legitimer Zweck anzusehen? Wenn ja, geht es zu Schritt Nummer zwei; wenn nein, ist die Untersuchung beendet und Unterlassung geboten. So hat der deutsche Gesetzgeber (in Paragraph 7 Absatz 4 des Tierschutzgesetzes) »Tierversuche zur Entwicklung oder Erprobung von Waffen, Munition und dazugehörigem Gerät« verboten.

Der zweite Prüfschritt beleuchtet die Eignung der sich bietenden Handlungsoptionen, den erklärten Zweck zu erreichen oder zumindest zu fördern. Zeigt sich bei kritischer Betrachtung, dass ein geplantes Vorgehen am Ende doch nicht dazu geeignet ist, seinen Zweck zu erreichen – etwa bei Tierversuchen mit einer für die geplante Aussage zu geringen, also statistisch nicht aussagekräftigen Tierzahl –, dann ist die Prüfung der Verhältnismäßigkeit beendet. Eignung (so sind verschiedene Tiermodelle ein und derselben Krankheit des Menschen je nach Fragestellung unterschiedlich geeignet) und Erfolgswahrscheinlichkeit (die Unwägbarkeiten bei einer Methodenentwicklung sind beispielsweise stets größer als bei Routineverfahren) werden bei den verbliebenen Alternativen vermerkt.

Im dritten Prüfschritt stellt sich die Frage nach dem mildesten Mittel zur Erzielung des benannten Zwecks. Im Idealfall bleibt bereits hier nur eine einzige Option übrig, und zwar diejenige, die mit nicht weiter reduzierbaren Schmerzen oder Leiden den beabsichtigten

Beitrag zur künftigen Leidensverhinderung erbringt. Bei Tierversuchen ist hier das für den konkreten Versuchszweck schonendste Tiermodell auszuwählen. Seine genetische Ausstattung soll das Tier so wenig wie möglich belasten, es soll weitgehend sein artgemäßes Verhalten ausleben (das heißt die Bedürfnisse der Tiere dürfen nicht weiter eingeschränkt werden als zur Durchführung des jeweiligen Versuchs erforderlich). Auch sollten Anästhesie und Analgesie auf heutigem tiermedizinischem Niveau liegen sowie eine angst- und schmerzlose Form der Tötung (sofern diese nötig sein sollte) garantiert werden: »Schmerzen, Leiden oder Schäden dürfen den Tieren nur in dem Maße zugefügt werden, als es für den verfolgten Zweck unerlässlich ist; insbesondere dürfen sie nicht aus Gründen der Arbeits-, Zeit- oder Kostenersparnis zugefügt werden« (Paragraf 9 Absatz 2 Nr. 3 Tierschutzgesetz).

Der vierte und letzte Schritt wendet sich – sofern man den Begriff auch losgelöst vom kantischen Verständnis verwenden darf – an die praktische Vernunft des Durchführenden (sein auf Handlungen gerichtetes Urteilsvermögen) beziehungsweise bei stellvertretender Durchführung an »den Standpunkt des gebildeten, für den Gedanken des Tierschutzes aufgeschlossenen und einem ethischen Fortschritt zugänglichen Deutschen« (wie in den Fällen einer juristischen Auslegung des »vernünftigen Grundes« gemäß Paragraf 17 Tierschutzgesetz). Dieser vierte Prüfschritt richtet sich direkt an das Urteilsvermögen, indem er bei jeder noch verbliebenen Handlungsoption die Frage stellt, ob die zugefügten Schmerzen, Leiden und Schäden im Kontext des konkreten Falls als »noch verhältnismäßig« oder schon als »unverhältnismäßig« zu dem in Aussicht gestellten Nutzen empfunden werden.

So ist es mittlerweile unstrittig, dass belastende Tierversuche für Luxusartikel wie dekorative Kosmetika oder Muschelgerichte (Chargentestung auf Algentoxine im Maus-Bioassay) als ethisch nicht vertretbar gelten, weil die meisten Menschen davon überzeugt sind, dass die den Tieren dabei zugefügten Schmerzen und Leiden in keinem Verhältnis zum Nutzen stehen. Durch die vierte Prüfung wird sichergestellt, dass bei der unabwendbaren Entscheidung zwischen zwei Übeln das kleinere gewählt wird (wobei im Allgemeinen der Minderung von Schmerzen oder Leiden deutlich mehr Gewicht zugemessen wird als einer vergleichbaren Steigerung menschlicher Lust). Außerdem findet hier das ethische Mindestmaß Beachtung, wenn man darunter das versteht, was man empfindenden Lebewesen unter keinen Umständen antun darf. Im diesem Schritt werden auch die Eignung und die



Wahrscheinlichkeit der erfolgreichen Durchführung der verbliebenen Optionen berücksichtigt.

Das Bemerkenswerte an dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit ist das Zusammenwirken seiner vier Prüfschritte. Berücksichtigt man das Nicht-aktiv-Werden als Handlungsoption durch alle vier Schritte mit, ergibt sich praktisch immer, dass am Ende genau eine Option – im Zweifelsfall diejenige, nichts zu unternehmen – verbleibt. Sie repräsentiert, was vom Durchführenden im konkreten moralischen Dilemma als »ethisch vertretbar« eingeschätzt wird.

Allerdings ist diesbezüglich heute bei einzelnen Paragrafen des Tierschutzgesetzes – etwa im Bereich der Massentierhaltung – ein erheblicher Anpassungsbedarf zu verzeichnen. Denn die Inkaufnahme von Schmerzen, Leiden und routinemäßigen Amputationen allein zum Zweck des Preisdumpings auf einem übersättigten Lebensmittelmarkt wird wohl mehrheitlich als »unverhältnismäßig« beurteilt werden.

### Problem beim Konflikt der Interessen

Die dritte Antwort auf die Frage, welche Rechte Tiere haben, lautet daher: Ein ethisch-rechtlicher Minimalkonsens besteht darüber, dass es verboten ist, empfindungsfähigen Tieren – außerhalb von moralischen Dilemmata – Schmerzen, Leiden oder Schäden zuzufügen. Darüber, was im Interessenkonflikt als gerechtfertigt anzusehen ist, wurde – auch in Anbetracht starker wirtschaftlicher Kräfte – bislang kein rechtsverbindlicher Konsens erzielt. Das sowohl juristisch als auch politisch hoch angesehene Prinzip der Verhältnismäßigkeit legt jedoch nahe, dass Teile des praktizierten Tierschutzrechts heute nicht mehr zu unseren Moralvorstellungen passen.

**Belastende  
Tierversuche für  
Luxusartikel  
gelten als ethisch  
nicht vertretbar**

Die Anpassung von Rechtsnormen an Moralvorstellungen wäre einfach und vermutlich längst vollzogen, wenn diese einem simplen, verallgemeinerungsfähigen Schema folgen würden. Als während der Aufklärung versucht wurde, die Formel unseres Gerechtigkeitsempfindens zu entdecken und analog zu den Naturgesetzen in Form eines Sittengesetzes zu formulieren, erwiesen sich zwei Regeln als besonders erfolgversprechend:

➤ **Regel 1:** »Was du nicht willst, das man dir tu, das füge keinem andern zu.« Es handelt sich um die goldene Regel, die aus Empathie und Gleichheitsgrundsatz entspringt.

➤ **Regel 2:** Wäge die Konsequenzen deines Tuns und Unterlassens ab.

Der unerwartete Umstand, dass beide Regeln plausibel scheinen, obwohl zahlreiche Situationen denkbar sind, in denen sie sich diametral gegenüberstehen, irritiert bis heute. Es ist oft versucht worden, diese beiden Konzepte zu verknüpfen; aber eine abschließende Formel unseres Gerechtigkeitsempfindens beziehungsweise des Sittengesetzes gibt es bis heute nicht (auch der kategorische Imperativ Immanuel Kants ist es nicht). Infolgedessen konnte eine solche Regel auch nicht rechtsverbindlich umgesetzt werden.

### Grenzen der Abwägung

In der Frage, welche rechtsverbindlichen Vorschriften zum Schutz von individuellen Tieren vor Handlungen oder Unterlassungen von Menschen dem Gerechtigkeitsempfinden am besten entsprechen würden, haben sich – den beiden erwähnten moralischen Regeln folgend – zwei Fraktionen entwickelt: die Tiereschützer sowie die Tierrechtler. Erstere verdanken ihren Namen den von ihnen konzeptionell akzeptierten Tierschutzgesetzen, die bis in die jüngere Vergangenheit fast durchgängig allein der moralischen Regel der Abwägung verpflichtet waren.

Die Tierrechtler hingegen weisen nun darauf hin, dass konsequente Abwägungsregeln das Gerechtigkeitsempfinden verletzen und deswegen im zwischenmenschlichen Bereich um Abwehrrechte des Individuums ergänzt wurden (also Menschenrechte und Grundrechte), welche der goldenen Regel folgen. Analog fordern sie, zumindest für die hoch entwickelten Tiere, eine angemessene, der Abwägung entzogene Schutzzone.

Problematisch am gegenwärtigen deutschen Tierschutzgesetz ist, dass selbst schwerste, qualvoll zum Tod führende tierexperimentelle Eingriffe nicht verboten sind und es keine Vorschriften für das Abbrechen von Experimenten gibt, die so etwas verhindern. Nur in Großbritannien sind bisher sämtliche Spezies

per Gesetz vor schwersten Belastungen geschützt. Außerdem kritisiert die Tierrechtsbewegung generell den Rechtsstatus hoch entwickelter Tiere. So propagiert etwa eine internationale Vereinigung bekannter Persönlichkeiten das Great Ape Project: spezielle Tierrechte für alle Hominiden.

Wenn nicht ein generelles Recht auf Leben anerkannt würde, ließe sich im Prinzip jeder Konflikt um Tierrechte durch Tötung beenden. Daher fordern fast alle Gruppierungen der Tierrechtsbewegung ein Tötungsverbot, während sie aber bei weiteren Schutzbereichen durchaus unterschiedliche Prioritäten setzen. So wird im deutschsprachigen Raum diskutiert, Tieren eine Sonderform der Rechtsfähigkeit zu verschaffen (vergleichbar den etablierten Regelungen für Vormundschaft und Betreuung), um ihre im Tierschutzgesetz niedergelegten Ansprüche bei Bedarf von einem Gericht prüfen lassen zu können.

Solche rechtsstaatlichen Überlegungen sind eine Folge der zahlreichen Vollzugsdefizite im Tierschutz, insbesondere bei volkswirtschaftlich relevanten Formen der Tiernutzung. Die Sicherstellung des Vollzugs liegt gegenwärtig allein in den Händen von Behörden, weil die sittliche Ordnung in den Beziehungen zwischen Mensch und Tier das geschützte Rechtsgut darstellt und Tiere – anders als Kinder – noch nicht als klagebefugte Rechtsgutträger anerkannt sind.

Nicht selten beschränken sich die geforderten Tierrechte auf tierartsspezifische Analogien zu den Menschenrechten in Bezug auf Folter und Freiheit. **Die vierte Antwort** auf die Frage, welche Rechte Tiere haben, lautet daher: Rechte im Sinn der Tierrechtsbewegung werden erst seit Kurzem und noch sehr restriktiv von der Gesetzgebung geschützt. Großbritannien verbietet (seit 1997), Neuseeland (seit 1999), die Niederlande und Schweden (beide seit 2003) sowie Österreich (seit 2006) die invasive Forschung an Menschenaffen per Gesetz. Im Verlauf des Beratungsprozesses für die neue EU-Tierversuchsrichtlinie ist demgegenüber erst unlängst ein entsprechender Normvorschlag fallen gelassen worden.

**Als fünfte und letzte Antwort** auf die Frage, welche Rechte Tiere haben, möchte ich sagen: Es wird wohl so lange Streit um Rechte für Tiere geben, wie diese nicht dem Gerechtigkeitsempfinden der Menschen entsprechen, die sich darüber austauschen. Zwei Wege erscheinen mir in diesem Licht empfehlenswert: die weitere Erforschung der Gesetzmäßigkeiten, die uns Menschen dazu bewegen, Sachverhalte als gerecht beziehungsweise ungerecht zu beurteilen; und das Bemühen, die Kunst gerechten Urteilens zu erlernen. ◀



**Prof. Dr. Jörg Luy** studierte in Gießen und Berlin Tiermedizin sowie Philosophie. Er promovierte an der Freien Universität Berlin 1998 über »Die Tötungsfrage in der Tierschutzethik«. Seit 2004 leitet Luy an der FU Berlin das Institut für Tierschutz und Tierverhalten.

**Borchers, D., Luy, J. (Hg.):** Der ethisch vertretbare Tierversuch – Kriterien und Grenzen. Mentis, Paderborn 2009.

**Caspar, J., Luy, J. (Hg.):** Tierschutz bei der religiösen Schlachtung. Nomos, Baden-Baden 2010.

**Cavalieri, P., Singer, P. (Hg.):** Menschenrechte für die Großen Menschenaffen – Das Great Ape Project. Goldmann, München 1996.

**Clarke, P. B., Linzey, A. (Hg.):** Das Recht der Tiere in der menschlichen Gesellschaft. Guthmann-Peterson, Mülheim 2002.

**Gräßer, E. (Hg.):** Albert Schweizer – Ehrfurcht vor den Tieren. C.H.Beck, München 2006.

**Haynes, R. P.:** Animal Welfare – Competing Conceptions and Their Ethical Implications. Springer, Heidelberg 2008.

**Sandoe, P., Christiansen, S. B.:** Ethics of Animal Use. Blackwell, Oxford 2008.

**Wolf, U. (Hg.):** Texte zur Tierethik. Reclam, Stuttgart 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050010](http://www.spektrum.de/artikel/1050010).

## Warum kommen in vielen Weihnachtsrezepten altmodische Zusätze wie Hirschhornsalz vor?

Stefanie Reinberger fragte den Lebensmittelchemiker Claus Günther.

**H**efe, Hirschhornsalz, Pottasche, Backpulver – sie alle sollen den Teig »aufgehen« lassen. Diese Backtriebmittel setzen dazu in einer (bio-)chemischen Reaktion Kohlendioxid frei, das sich ausbreitet und den Teig mit Gasbläschen durchsetzt; Backen verfestigt dann diese lockere Struktur. »Über die Wahl des Backtriebmittels entscheidet zum Teil der persönliche Geschmack«, erklärt Lebensmittelchemiker Claus Günther. »Aber es gibt auch feine Unterschiede, die dafür sorgen, dass das jeweilige Backwerk gelingt und verträglich ist.«

Beispielsweise setzen Hefepilze – als Bäckerhefe, Sauerteig oder Backferment zugegeben – Stärke in Einfachzucker um und diesen wieder durch Gärung in Alkohol und Kohlendioxid (Ersterer verflüchtigt sich beim Backen). Ein wenig Zucker als Starthilfe darf dabei nicht fehlen, selbst im Pizza- oder Brotteig nicht. Doch zu viel des Guten schadet: Hefen benötigen für ihren Stoffwechsel Wasser, das aber wird vom Zucker gebunden. Für den klassischen italienischen Weihnachtskuchen, den Panettone, sind Hefen also die richtige Wahl, sehr süße Mehlspeisen hingegen erfordern Alternativen.

Die heute wohl bekannteste entwickelte August Oetker 1893 in Bielefeld. »Bis dahin waren Natron, Weinstein, Pottasche und Hirschhornsalz gebräuchlich, allesamt Substanzen, die in der Apotheke erhältlich waren. Doch sie arbeiteten nicht zuverlässig genug und machten das Backen oft zum Glücksspiel.« Oetker, Apotheker und Sohn eines Bäckers, suchte nach einer Lösung und erfand das Backpulver. Es enthält Natron beziehungsweise Natriumhydrogencarbonat, außerdem die sauren Salze Dinatriumhydrogendiphosphat oder Monokalziumorthophosphat. Puderstärke oder Mehl im Tütchen halten die Chemikalien trocken, so dass sie erst im feuchten Teig miteinander reagieren.

Doch damit haben die althergebrachten Triebmittel keineswegs ausgedient. Wen der leicht bittere Beigeschmack des phosphathaltigen Säuerungsmittels stört, verwendet Backpulver mit Zitronen- oder Weinsäure beziehungsweise Weinstein als Ersatz.

Ein weiterer Nachteil dieses Chemiecocktails: Die Reaktion beginnt, sobald Backpulver mit dem feuchten Teig in Kontakt kommt, auch wenn sie sich erst unter Hitze voll entfaltet. Daher gehört der Teig umgehend in den Ofen. Für Weihnachtsgebäck mit hohem Zucker- oder Honiganteil wie Printen und Honigkuchen sollte die Masse aber mehrere Stunden ruhen. Hier greift man deshalb auf Hirschhornsalz und Pottasche beziehungsweise eine Kombination aus beiden zurück.

Ersteres, auch ABC-Trieb genannt, besteht aus Ammoniumhydrogencarbonat, das sich unter Hitzeeinwirkung in Ammoniak, Kohlendioxid und Wasser aufspaltet. Früher gewann man dieses Triebmittel tatsächlich aus Hirschgeweihen, heute wird es auf chemischem Weg hergestellt. Für hohe Kuchen ist Hirschhornsalz nicht geeignet, denn das Ammoniak muss ausgasen können. Reste, die im Gebäck verbleiben, schmecken nicht nur unangenehm, sondern sind auch ungesund.

Hinter der Bezeichnung Pottasche verbirgt sich Kaliumkarbonat, das mit Wasser zu Kaliumhydrogencarbonat und Kalilauge reagiert. »Säuren im Teig oder zugesetzte Säuerungsmittel neutralisieren die Lauge und reagieren mit dem Kaliumhydrogencarbonat. Dabei entsteht Kohlendioxid«, erklärt Günther. Pottasche lässt den Teig eher in die Breite als in die Höhe gehen und sorgt zudem für den typischen, leicht laugigen Geschmack von Lebkuchen.

**Stefanie Reinberger** ist Wissenschaftsjournalistin in Köln.



Ohne Triebmittel wie Backpulver (oben), Hefe, Hirschhornsalz oder Pottasche wären Weihnachtsgebäck und Kuchen ungenießbar hart.



BACKPULVER: FOTOLIA / MAXIM EVGENEVICH; PLÄTZCHEN: FOTOLIA / BIRGIT REITZ-HOFMANN

# HEISSE ZEITEN für die

Die globale Erwärmung lässt nicht nur das Eis an den Polen schmelzen, sondern erfasst auch die Vegetation der hohen Breiten. Die baumlose Tundra ergrünt, während Teile der borealen Wälder durch Austrocknung braun werden.

## In Kürze

- ▶ Detaillierte Luftbilder, die in den 1940er Jahren zur Ölexploration in Nordalaska aufgenommen wurden, belegen eine **zunehmende Verbuschung der Tundra** seither.
- ▶ In **Satellitenaufnahmen** spiegelt sich diese Veränderung als **Ergrünen** wider, während die borealen Wälder südlich der Tundra als Folge von trockeneren Bedingungen, häufigeren Waldbränden und vermehrtem Schädlingsbefall bräunlicher erscheinen.
- ▶ Sowohl die Grün- als auch die Braunfärbung lassen sich der **globalen Erwärmung** zuschreiben. Der Wandel der Ökosysteme dürfte die Erde weiter aufheizen.

Von Matthew Sturm

**M**an schrieb das Jahr 1944. Der Zweite Weltkrieg neigte sich dem Ende zu. Wie es aussah, würde Japan allerdings nicht so schnell kapitulieren. Deshalb fürchteten die Alliierten, ihnen könne der Treibstoff für den weiteren Kampf ausgehen. Und so beschloss die US-Marine, ein 93000 Quadratkilometer großes Erdölfeld in Nordalaska zu erschließen, das ihr gehörte und als sehr ergiebig eingeschätzt wurde. Es gab nur ein Problem: Von dem Gebiet existierten keine Karten. Also ließ die Navy eine Serie außergewöhnlich hoch aufgelöster Luftbilder anfertigen.

Die Vermessungsingenieure starteten mit einer zweimotorigen Beechcraft vom Flugfeld Ladd bei Fairbanks. In die offene Tür hatten sie eine große K-18-Kamera montiert. Während ihres langsamen, tiefen Flugs schossen sie mehrere tausend Fotos von der North Slope, einem flachen Tundragebiet zwischen dem Nordpolarmeer und der Brooks Range, sowie von den Tälern, die sich südlich daran anschließen. Diese liegen in der borealen Waldzone: einem auch Taiga genannten breiten Streifen aus Nadel- und Laubbäumen, der sich quer durch die Arktis zieht (siehe Karte S. 88). Die 23 mal 46 Zentimeter großen Negative lieferten gestochen scharfe Bilder, auf denen sogar die Hufspuren von Elchen zu er-



# ARKTISCHE FLORA

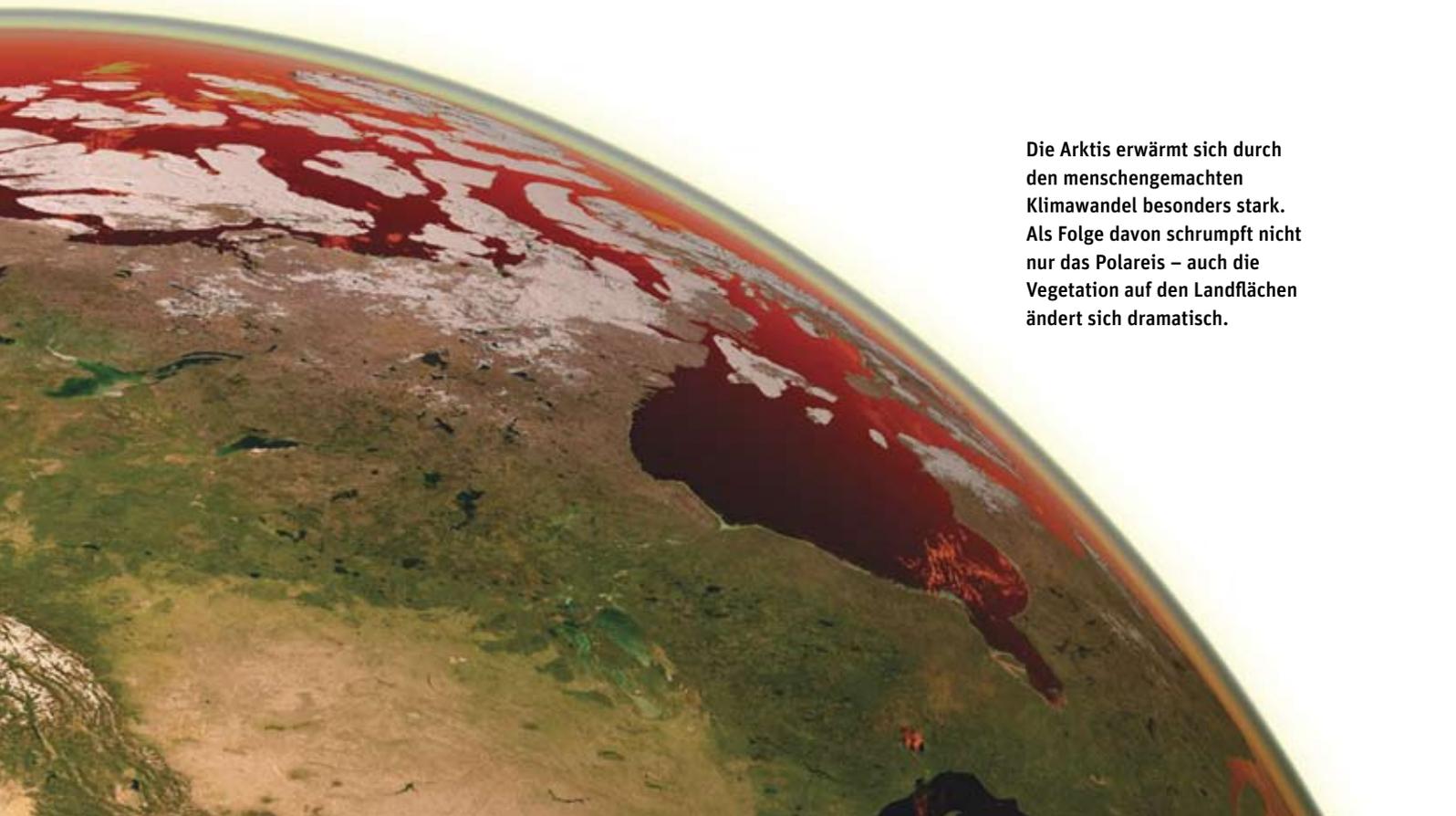
kennen waren. Heute ist die Serie von unschätzbarem Wert für die Klärung der Frage, wie arktische und subarktische Gebiete auf den Klimawandel reagieren.

Das Problem drängt; denn die rund vier Millionen Bewohner der Nordpolarregion benötigen Entscheidungshilfen für Maßnahmen gegen die Folgen des Klimawandels. Die Erderwärmung bedroht die für sie lebensnotwendige Jagd, die kommerzielle Holzfällerei, das Transportwesen und generell die Infrastruktur.

Überdies könnte eine unerwartet rasche Änderung der arktischen Vegetation auch weltweite Auswirkungen haben – indem sie etwa das Tauen des Permafrostbodens beschleunigt. Dabei würde Kohlenstoff in Form

von Methan oder Kohlendioxid aus zuvor gefrorenem Torf in Tundren – baumlosen Gebieten mit permanent vereistem Untergrund – in die Atmosphäre freigesetzt. Diese zusätzlichen Treibhausgase könnten die Temperaturen auf der Erde weiter in die Höhe treiben (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2010, S. 80).

Schon bevor 2006 ein Eisbär auf einer winzigen Eisscholle das Titelbild des Magazins »Time« zierte, war bekannt, dass das arktische Meereis im Rekordtempo schmilzt (Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 26). Spätestens in den 1990er Jahren erwarteten die Klimaforscher auch einen Wandel der Vegetation in der Nordpolarregion. Doch anders als beim Meereis, dessen Ausdehnung leicht von Satel-



Die Arktis erwärmt sich durch den menschengemachten Klimawandel besonders stark. Als Folge davon schrumpft nicht nur das Polareis – auch die Vegetation auf den Landflächen ändert sich dramatisch.

## NEBENPRODUKT DES ZWEITEN WELTKRIEGS

Ein Projekt aus der Zeit des Zweiten Weltkriegs lieferte zufällig Vergleichsmaterial, mit dem sich die Veränderungen der arktischen Vegetation seither dokumentieren ließen. In Sorge um den Treibstoffnachschieb gegen Kriegsende beschloss die Regierung der Vereinigten Staaten, mit der Erschließung eines großen Ölfelds in der North Slope von Alaska (siehe Karte rechts) zu beginnen. Doch es gab keine brauchbaren Karten des Gebiets. Deshalb schossen Vermessungsingenieure der US-Marine aus einer tief fliegenden zweimotorigen Beechcraft (unten links) Tausende hoch aufgelöster Fotos. Sie verwendeten dafür eine großformatige, fast einen Meter lange K-18-Kamera (unten rechts), die in der offenen Tür des Flugzeugs montiert war. Der Autor spürte die fast vergessenen Fotos vor zehn Jahren in einem Archiv auf. Gemeinsam mit Kollegen machte er sich daran, dieselben Stellen noch einmal abzulichten. Durch den Vergleich der Bilder ließen sich tief greifende Veränderungen der Vegetation dokumentieren.



### LEXIKON

► **Albedo:** Ausmaß, in dem ein Objekt oder eine Oberfläche Sonnenlicht reflektiert. Schnee und Eis haben eine hohe Albedo. Sie werfen bis zu 85 Prozent des Sonnenlichts in den Weltraum zurück und hemmen so die Erwärmung der Landoberfläche.

► **Taiga oder borealer Wald:** größtes Ökosystem der Erde, das vorwiegend aus Nadelbäumen besteht und sich in einem Streifen nördlich bis knapp südlich des Nordpolarkreises erstreckt.

► **Tundra:** baumlose Region in der Arktis nördlich der Taiga. Der Unterboden ist ganzjährig gefroren, das Land von dichter, niedriger Vegetation bedeckt.

liten oder Flugzeugen aus messbar ist, weil es sich deutlich vom dunkelblauen Wasser unterscheidet, lassen sich Veränderungen der Landoberfläche nicht ohne Weiteres erkennen. Die Folgen des Klimawandels in Tundren und borealen Wäldern können sehr subtil sein. Manchmal handelt es sich nur um eine leichte Verschiebung in der Häufigkeitsverteilung einzelner Pflanzenarten. Eine Änderung der Vegetation macht sich so unter Umständen erst nach Jahrzehnten bemerkbar.

Als ich vor über zehn Jahren mit meinen Kollegen Chuck Racine und Ken Tape danach zu suchen begann, hatten wir allerdings deutliche Anhaltspunkte, wonach wir Ausschau halten mussten. Diese Hinweise stammten aus Experimenten mit Treibhäusern in der Tundra. Demnach begünstigen Düngung und künstliche Erwärmung des Bodens das Wachstum von Sträuchern auf Kosten von nicht verholzten Tundrapflanzen wie Gräsern oder Moosen. Zum Beispiel wuchsen im Experiment zuvor nur kniehohes Zwergbirken innerhalb weniger Jahre zu Mannshöhe heran. Das legte den Schluss nahe, die Erwärmung der Tundra könnte eine explosionsartige Zunahme der Biomasse zur Folge haben – was vorwiegend mehr und größere

Sträucher bedeutet. Weiter südlich, in der borealen Waldzone, hat sich die Baumgrenze seit Jahrhunderten sowohl nach Norden als auch in größere Höhen verschoben. Die Erderwärmung sollte diesen Vorgang beschleunigen.

Doch Gewissheit gab es seinerzeit nicht. Immerhin versuchten bereits verschiedene Forscherteams, Veränderungen der Vegetation anhand von Luftbildern oder durch detaillierte Untersuchungen auf kleinen Flächen am Boden festzustellen. Meine Kollegen und ich hatten dagegen die Idee, alte Fotografien für Vergleiche heranzuziehen. Das Problem war nur, solche Aufnahmen aufzuspüren. Im Verlauf



unserer Suche schrieben wir verschiedenste Stellen an. Nach vielen negativen Bescheiden antwortete schließlich ein Archivar, in seinem Magazin seien noch Luftbilder der Navy aus den 1940er Jahren, und fragte, ob wir Interesse daran hätten. Er wolle die Fotos aus Platzmangel ohnehin demnächst wegwerfen. Ich wartete gespannt auf seine Probesendung. Als die Aufnahmen aus dem Umschlag auf meinen Schreibtisch glitten, war ich überwältigt. Sofort sah ich, dass sich die Bilder perfekt für unsere Zwecke eigneten. Bald stapelten sich etwa 6000 davon in unseren Regalen.

### Landschaft von immenser Schönheit

Als wir im Sommer 2000 mit unseren Untersuchungen begannen, konzentrierten wir uns zunächst auf die Tundra. Ihre Definition als Landschaft mit niedriger Vegetation und Permafrostboden lässt kaum ihre immense Schönheit und Komplexität erahnen. Meist präsentiert sich dieses Ökosystem, das etwa fünf Prozent der kontinentalen Erdoberfläche bedeckt, als dicker Teppich aus Moosen, Flechten und Seggen (einer Gattung der Sauergräser). Dazwischen eingestreut sind andere Gefäßpflanzen und Zwergsträucher. Aus der Luft erscheint diese niedrige, grüne Decke plüschig und weich. Am Boden erweist sie sich als Mosaik aus schwammartigen, wassergesättigten Pflanzen, über die sich nur mühsam laufen lässt. Ist der Teppich allerdings trocken, kann man herrlich bequem darauf liegen.

Die Tundra ist keineswegs eben. Seggen und andere Pflanzen bilden kleine Horste, die Bütle genannt werden. Sie bringen jeden zur Verzweigung, der versucht, größere Strecken zu Fuß durch die baumlose Landschaft zurückzulegen. Die bis zu einem halben Meter hohen Höcker sind oft oben instabil, so dass sie beim Betreten umkippen und den Wanderer stolpern oder sich gar den Fuß verstauchen lassen. In der Regel verstecken sich Zwergsträucher in den Furchen zwischen den Büteln. In der Nähe von Wasser finden sich oft auch dichte Bestände mit mannshohen Büschen.

Nach Norden hin wird die Tundra immer karger, bis die Sträucher schließlich ganz verschwinden. Irgendwann weichen sogar die Moose und Flechten kahlem Boden: der Polarwüste. Richtung Süden vollzieht sich der Übergang zur Waldtundra, in der zunächst verstreut Fichten stehen. Später entwickelt sich ein Mosaik aus Baumhainen und offenem Gelände. Schließlich verwandelt sich die Tundra in den borealen Wald: die Taiga. Der Übergang zwischen beiden kann abrupt oder auch über Dutzende von Kilometern hinweg erfolgen. In Alaska fällt die Grenze weithin mit dem Südrand der Brooks Range zusammen.

Um die nötigen Vergleichsfotos aufzunehmen, flogen wir, Abzüge der alten Aufnahmen in der Hand, in einem Hubschrauber ohne Türen. Wir kreisten so lange, bis wir die damaligen Bildausschnitte so genau wie möglich trafen. Dabei fanden wir uns oft kaum 15 Meter über dem Boden wieder, was uns zusätzlichen Respekt vor unseren Vorgängern aus dem Zweiten Weltkrieg mit ihrem Starrflügelflugzeug einflößte.

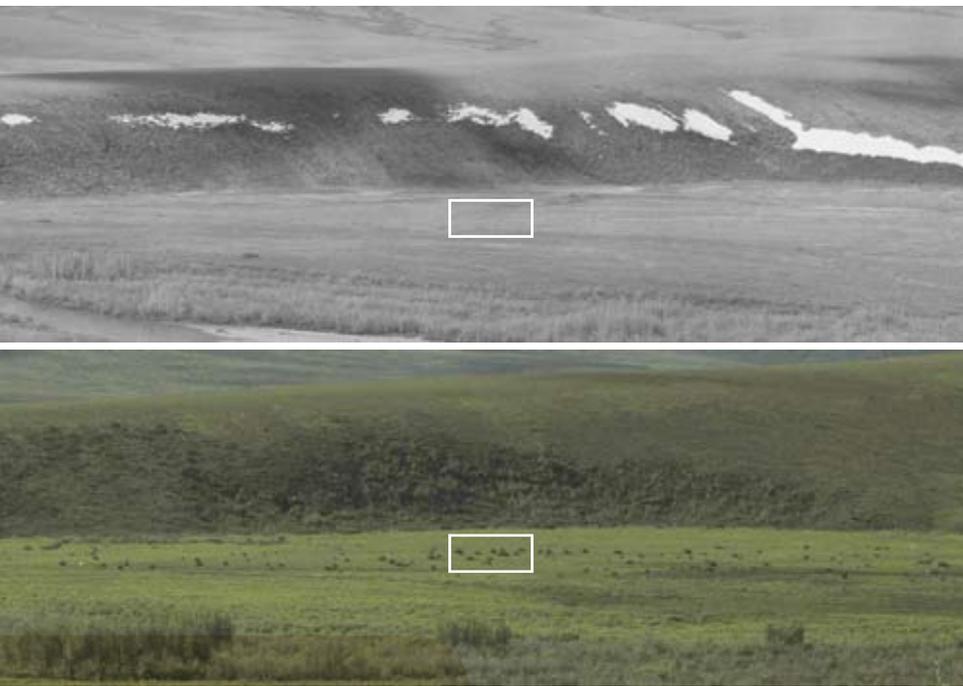
Mit einiger Mühe erzielten wir im Allgemeinen eine recht gute Übereinstimmung. Vier Sommer lang lichteten wir über 200 Stellen abermals ab. Abends verglichen wir die neuen Fotos mit den alten, um zu einer ersten Einschätzung zu gelangen. Dabei erkannten wir vielfach einzelne Sträucher wieder, die immer noch existierten, aber größer waren als vor 50 Jahren. Gebüschgruppen waren dichter geworden und hatten sich in die Tundra hinein ausgebreitet, wo es zuvor nur niederes Gestrüpp gab, das bei einer Höhe unter einem halben Meter die Sichtbarkeitsschwelle auf den Fotos unterschritt. Weide, Birke und Erle, die »großen Drei« unter den arktischen Sträuchern, hatten ihr Verbreitungsgebiet ausgedehnt und waren größer geworden. Besonders beeindruckte uns eine stoßtruppartige Gebüschausbreitung, wie wir es scherzhaft nannten: Sträucher hatten alte Flussterrassen und Tundraflächen besiedelt und dabei innerhalb weniger Jahrzehnte einige Hektar zuvor ge-

### Literaturhinweise

- Forbes, B. C. et al.:** Russian Arctic Warming and »Greening« Are Closely Tracked by Tundra Shrub Willows. In: *Global Climate Change Biology* 16, S. 1542–1554, Mai 2010.
- Lloyd, A. H., Bunn, A. G.:** Responses of the Circumpolar Boreal Forest to 20th Century Climate Variability. In: *Environmental Research Letters* 2, S. 1–13, 26. November 2007.
- Tape, K. et al.:** The Evidence for Shrub Expansion in Northern Alaska and the Pan-Arctic. In: *Global Change Biology* 12, S. 686–702, April 2006.
- Verbyla, D.:** The Greening and Browning of Alaska Based on 1982–2003 Satellite Data. In: *Global Ecology and Biogeography* 17, S. 547–555, Juli 2008.
- Wilkening, M. et al.:** Recent Climate Warming Forces Contrasting Growth Responses of White Spruce at Treeline in Alaska through Temperature Thresholds. In: *Global Change Biology* 10, S. 1724–1736, Oktober 2004.

Das von Ingenieuren der US-Marine in den 1940er Jahren aufgenommene Foto zeigt eine Serie keilförmiger Erosionsrinnen am Ufer des Colville River, die mit verwehtem winterlichem Schnee gefüllt sind.





MIT FOLGEN VON KEN TAPPE  
US NWY

Vergleiche von Fotografien der North Slope in Alaska, die in den 1940er Jahren und zur gleichen Jahreszeit zu Beginn des 21. Jahrhunderts aufgenommen wurden, liefern einen anschaulichen Beweis für die zunehmende Verbuschung der Tundra. Auf dem Farbbild von 2002 fallen mannshohe »Stoßtrupps« von Sträuchern auf, die sich über eine Flussterasse ausbreiten, auf der sie ursprünglich nicht vorkamen.

büschfreier Fläche erobert. Insgesamt dokumentierten die Fotos die Ausbreitung von Sträuchern auf einer über 200 000 Quadratkilometer großen Fläche im Norden Alaskas.

Was das wirklich bedeutet, erfassten wir aber erst, als wir die Aufnahmen mit den tatsächlichen Gegebenheiten im Gelände verglichen. Sträucher, die auf den neuen Bildern als kleine dunkle Kreise erschienen, erwiesen sich als mannshoch. Sie waren oft von kleineren Stauden umringt, die dort gedeihen, weil die größeren Büsche ihnen Schutz vor rauen Winden und Schneeverwehungen bieten. An einigen Stellen wuchsen die Sträucher so kräftig, dass sie ein undurchdringliches Dickicht bildeten. Gegen Ende des zweiten Sommers, nachdem wir uns einen Weg durch Dutzende solcher Dschungel gebahnt hatten, prägten wir für die veränderte Landschaft den Ausdruck »buschige Arktis«.

### Die Tundra ergrünt

Doch wie verhält es sich mit der Tundra außerhalb Alaskas und mit den Taigawäldern weiter im Süden? Um das herauszufinden, nutzten meine Kollegen Scott Goetz, Doug Stow, Skip Walker, Gensuo Jia und Dave Verbyla die Radiometer in den Wettersatelliten der National Oceanic and Atmospheric Administration (dem Nationalen Wetterdienst der USA). Anhand der Daten dieser Strahlungsmesser aus früheren Jahren und heute ermittelten sie jeweils den normierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI), der auf der Reflexion im roten und nahen infraroten Spektralbereich basiert. Wie der Vergleich er-

gab, ist die Tundra grüner geworden. Dahinter steckt eine Zunahme an Biomasse und frischer Vegetation. Meine Kollegen werten das als Zeichen für eine allgemeine Verbuschung dieses Ökosystems.

Besonders ausgeprägt war die Zunahme des NDVI im arktischen Alaska, in Westkanada und Sibirien. Sie ließ sich aber auch in Skandinavien und den übrigen Teilen der Arktis feststellen. Andere Kollegen – Bruce Forbes, Greg Henry und Paul Grogan – kamen bei ihren Feldstudien in Russland sowie in der kanadischen Hoch- und Zentralarktis zu ähnlichen Resultaten. Auch laut den persönlichen Erinnerungen von Bewohnern der Arktis in Alaska, Kanada und Russland haben sich die Sträucher in der Tundra ausgebreitet.

Ein genauer Vergleich zwischen den jüngsten Satellitendaten, die eine Ergrünung dieser Vegetationszone belegen, mit unserer auf Fotos basierenden Karte des Strauchbewuchses liefert ein zusätzliches Detail: Der NDVI nimmt nicht nur dort zu, wo die Aufnahmen vermehrt größere Büsche zeigen, sondern auch da, wo derzeit nur Zwergsträucher gedeihen, die aber wegen ihrer geringen Größe auf Fotos nicht zu erkennen sind. Sie wachsen überall zwischen den Büten und können, wenn sich die Bedingungen verbessern, jederzeit in die Höhe schießen. Mit den auf riesigen Flächen bereits vorhandenen Zwergsträuchern erfüllt die Tundra also alle Voraussetzungen für eine rasche Zunahme der Biomasse.

Ein vergleichbares Phänomen gab es früher bereits. In Sedimentbohrkernen finden sich vor etwa 8000 Jahren plötzlich vermehrt Sträucherpollen. Diese so genannte Birkenexplosion scheint einen Zeitpunkt zu markieren, als in der Warmphase nach dem Ende der Eiszeit die Tundra schon einmal verbuschte.

Die Satellitendaten lieferten eine noch verblüffendere Erkenntnis über die boreale Waldzone. Zwar bestätigten sie das schon bekannte Vordringen der Baumgrenze nach Norden und in größere Höhen. Doch zugleich deuteten sie darauf hin, dass Biomasse und Produktivität der Taiga hinter dieser vorrückenden Front an manchen Stellen zurückgegangen sind. Während die Tundra ergrünte, haben sich die borealen Wälder teils braun verfärbt. Das spricht dafür, dass sie ausgetrocknet und stellenweise abgestorben sind – ein Befund, der im Widerspruch zu den gängigen Erkenntnissen über die Folgen der Erderwärmung für Waldgebiete zu stehen scheint.

Genauere Informationen lieferten Baumringproben, die vor zehn Jahren die Dendrochronologen Glenn Juday und Martin Wilking, damals beide an der University of Alaska in Fairbanks, nahe der Stadt und im Gebiet

südlich der Brooks Range zu sammeln begannen. Üblicherweise führen wärmere Sommer zu besserem Wachstum und breiteren Ringen. Im relativ feuchten Westalaska trifft das auch zu. Doch in trockeneren Gebieten weiter östlich ermittelten die Forscher Standorte, an denen das Gegenteil der Fall war. Höhere Temperaturen ergaben hier schmalere Ringe. Die Bäume wuchsen langsamer, waren erkennbar gestresst und teils in ihrer Existenz bedroht. Die Wissenschaftler entdeckten sogar verschwindende Baumstandorte. Anscheinend waren die wärmeren Sommer in diesem Gebiet einfach zu trocken.

### Trockenheit und Schädlingsplagen

Zwei weitere Dendrochronologen, Andi Lloyd vom Middlebury College (Vermont) und Andy Bonn von der Western Washington University in Bellingham, analysierten alle Baumringdaten, deren sie habhaft werden konnten. Das Ergebnis bestätigte, dass der Produktivitätsrückgang der borealen Wälder ein arktisweites Phänomen ist und bei allen drei vorherrschenden Baumgattungen auftritt, auch wenn er primär die Fichten betrifft. Die genauen Gründe werden derzeit noch erforscht, doch Wassermangel und Wärme dürften hauptverantwortlich sein; denn die Braunfärbung lässt sich öfter in trockenen kontinentalen Bereichen und im Südteil der Verbreitungsgebiete der jeweiligen Gattungen beobachten.

Es gibt zwei weitere belastende Faktoren für die Bäume, die ebenfalls mit der Erderwärmung zusammenhängen dürften: vermehrte Schädlingsplagen und häufigere sowie ausgedehntere Waldbrände. Traten größere Feuersbrünste in Alaska früher etwa alle zehn Jahre auf, scheint sich das Intervall jetzt auf die Hälfte verkürzt zu haben. Auch Insektenbefall häuft sich offenbar; so sind dem Fichtenborkenkäfer schon mehr als 500 000 Hektar Primärwald in dem Staat zum Opfer gefallen.

Tundra und Taiga verändern sich also in entgegengesetzter Richtung. Innerhalb von 50 Jahren hat sich die boreale Waldzone in Alaska um schätzungsweise 11 600 Quadratkilometer nach Norden ausgedehnt. Doch im selben Zeitraum vertrockneten die Bäume hinter der vorrückenden Front, brannten ab und erlitten Schäden durch Insekten. Juday und andere Forscher vermuten als Ergebnis eine Umwandlung von Wald in Grasland. Gleichzeitig verbuschte die Tundra und wurde immer mehr zu einem Dschungel. Kommt es in Zukunft also zu einer Vertauschung der beiden Vegetationszonen? Ähneln die Taiga immer mehr der Tundra, während diese zunehmend wie ein Wald aussieht?

Die Antwort ist schwierig. Da wir die komplex miteinander verwobenen Ursachen der Vegetationsänderung nur ungenügend verstehen, können wir kaum die künftige Entwicklung vorhersagen. Selbst beim arktischen Meereis gelang das nicht, obwohl es sich um ein einfaches System aus Wasser und Eis handelt, das im Prinzip physikalischen Gesetzen gehorcht, die in Computermodelle umgesetzt werden können. Die zugefrorene Fläche ist in den vergangenen Jahren doppelt so schnell geschrumpft wie von den 13 besten Klimamodellen vorhergesagt. Nach heutigen Prognosen wird das Nordpolarmeer in 40 Jahren eisfrei sein; doch diese Vorhersagen beruhen eher auf Hochrechnungen anhand der beobachteten Veränderungen als auf Ergebnissen von Computersimulationen. Für die Tundra und den borealen Wald mit ihrer großen biologischen Vielfalt und den gegenläufigen Rückkopplungsmechanismen – einigen, die das Wachstum dämpfen, und anderen, die es beschleunigen – sind die Voraussetzungen für eine korrekte Prognose noch viel ungünstiger.

Meine Arbeitsgruppe versuchte das Problem, die weitere Entwicklung der Tundra abzuschätzen, jüngst mit einem einfachen Modell für die Zunahme des Strauchbestands anzugehen, das wir mit den alten und neuen Fotos eichten. Zu unserer Überraschung ergab die Simulation, dass die Verbuschung schon gegen Ende der Kleinen Eiszeit vor etwa 150 Jahren begann und nicht erst, wie von uns erwartet, mit der raschen Erwärmung der Arktis seit den 1970er Jahren. Tatsächlich stimmt der frühere Zeitpunkt gut

**Experimente und Beobachtungen im Gelände untermauern die fotografischen Belege für eine Verbuschung der Tundra. In Versuchen mit Treibhäusern, die den Boden künstlich erwärmten (oben; die Abdeckung des Treibhauses wurde entfernt), wuchsen Sträucher, die unter normalen Bedingungen etwa kniehoch blieben, zu Mannshöhe heran. In der freien Natur (unten) ist zu sehen, wie größere Stauden in einem so genannten Halo-Effekt kleinere Büsche vor den Elementen schützen und so in konzentrischen Ringen (durch Linien markiert) um sich herum das Wachstum von Gestrüpp fördern – was die Tundra ergrünen lässt.**



MARINE BIOLOGICAL LABORATORY, GASLIUS R. SHAVER

MIT FRDL. GEN. VON KEN TAPE



mit dem erstmaligen Auftreten von Elchen, die sich von Sträuchern ernähren, in der North Slope von Alaska überein. Er fällt auch mit dem Beginn des Vorrückens der Baumgrenze zusammen.

Nach den Ergebnissen unserer Simulation ist das Gebüsch zum Teil also schon als Reaktion auf einen natürlichen Erwärmungszyklus gewachsen, der vor der industriellen Revolution begann. Andere Indizien legen jedoch nahe, dass sich seine Ausbreitung wegen des vom Menschen verursachten Treibhauseffekts fortgesetzt und beschleunigt hat. Dort, wo die Sträucher vordringen, sind in den vergangenen vier Jahrzehnten auch die Gletscher deutlich geschrumpft. Außerdem hat sich der Permafrostboden immer schneller erwärmt und der Frühling stetig früher eingesetzt, wie der Zeitpunkt des Tauens und Aufbrechens der Eisdecke von Flüssen und Seen belegt. All das wird gemeinhin dem vom Menschen verursachten Klimawandel zugeschrieben. Leider dürften wir kaum eine Serie von Fotos aus den 1900er Jahren finden, die nötig wären, um festzustellen, ob sich die Sträucher zwischen 1900 und 1950 wirklich langsamer ausgebreitet haben als danach.

Unser einfaches Modell liefert außerdem die Prognose, dass frühestens in 150 Jahren gebüschreiche Gebiete vollständig mit Gerstrüpp bedeckt sein werden. Auf heute noch strauchfreien Flächen sollte es sogar um einiges länger dauern. Allerdings ist unklar, inwieweit man dieser Vorhersage trauen kann. Das Modell berücksichtigt nämlich keine Katastrophen wie etwa Brände, durch die sich die Vegetation abrupt ändern könnte

(Sträucher siedeln sich bevorzugt in gestörten Bereichen an). Auch beinhaltet es keine Rückkopplungen, die den Vorgang eventuell beschleunigen. Gefühlsmäßig halte ich unsere Prognose deshalb für zu konservativ. Wahrscheinlich wird sich die Tundralandschaft schneller verändern, als unser grobes Modell das erwarten lässt.

Grund zu dieser Annahme liefern die Nachwirkungen aktueller Brände. Von Juli bis September 2007 versengte bei außergewöhnlich trockenem Wetter ein durch Blitzschlag entfachtes Feuer – das größte jemals in der Tundra registrierte – eine Fläche von mehr als 1000 Quadratkilometern auf der North Slope. Als mein Kollege Chuck Racine das Gebiet im Juli 2009 besuchte, begannen die Sträucher an vielen Stellen schon wieder zu sprießen. Auf früher abgebrannten Gebieten in der Tundra Westalaskas hat sich die von Gebüsch bedeckte Fläche innerhalb von 30 Jahren um das Achtfache vergrößert. Häufigere Blitzschläge und Trockenheit könnten vermehrt Brände auslösen. Außerdem erhöhen die Sträucher mit ihrer größeren Biomasse und stärkeren Verzweigung die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Feuer, was einen positiven Rückkopplungseffekt ergibt.

**Saisonale Waldbrände scheinen in Alaska jetzt häufiger aufzutreten und größere Flächen zu erfassen als früher. Feuer und Insektenschäden haben bewirkt, dass der zuvor grüne boreale Wald aus dem Weltraum zunehmend braun erscheint. Auf den versengten Flächen breiten sich Sträucher aus, die mit ihrer größeren Biomasse und stärkeren Verzweigung die Wahrscheinlichkeit künftiger Brände erhöhen.**

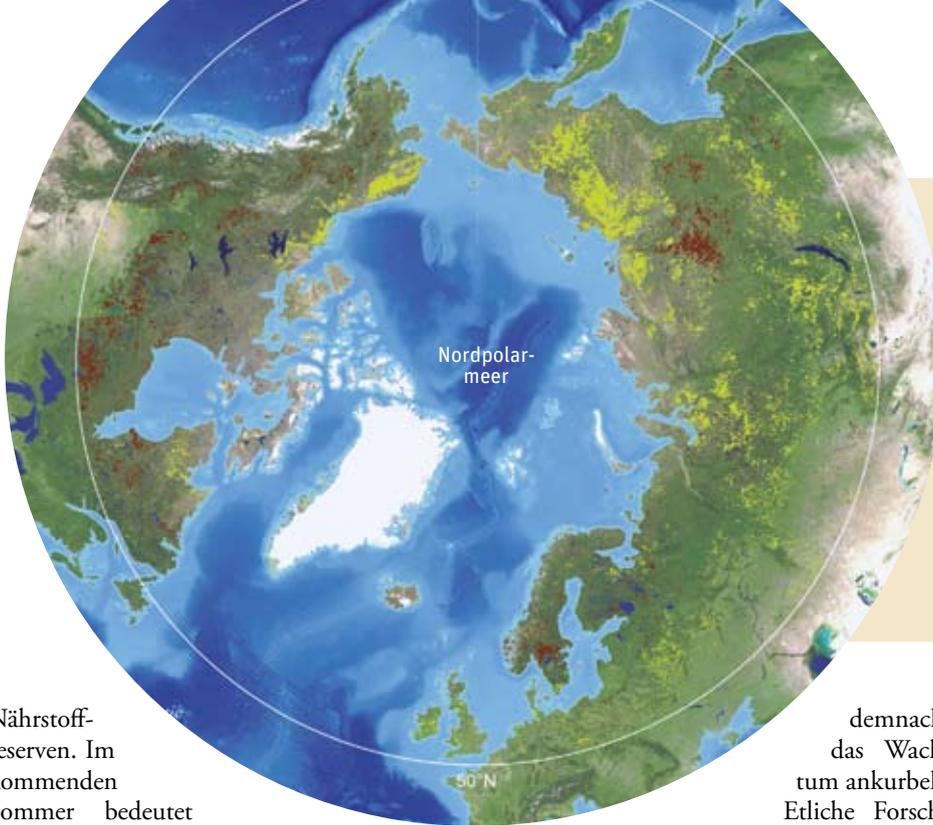
### Wärmende Schneedecke

Von den anderen potenziellen Feedbacks, die in der Tundra zu erwarten sind, hängen zwei mit der winterlichen Schneedecke zusammen. Das mag seltsam erscheinen, weil die Sträucher ja nur im Sommer wachsen. Doch die Bedingungen im Winter bestimmen die Boden- und Wasserverhältnisse für die folgende Wuchssaison. Die Bedeutung der kalten Jahreszeit für die arktischen Pflanzen liegt in ihrer langen Dauer. Neun Monate im Jahr ist die Tundra mit Schnee bedeckt, die Taiga immerhin sieben Monate. So dominiert in diesen Regionen im Mittel die Farbe Weiß, nicht Grün.

Eine der beiden Rückkopplungen funktioniert folgendermaßen: Wo Sträucher es schaffen, die nahe gelegenen Bütle zu überragen, fangen sie im Winter Schnee auf, der sich dort in Wehen sammelt. Schnee isoliert hervorragend, fast so gut wie eine Daunendecke, weil er zu bis zu 75 Prozent aus Luft besteht. Wo er als dicke Schicht den Untergrund besser dämmt, kühlt der Boden nicht so stark aus. Bei einigen Strauchgruppen haben wir unter der Schneedecke bis zu zehn Grad Celsius höhere Temperaturen festgestellt als in angrenzenden Bereichen mit Büteln. Unter den wärmeren Verhältnissen bleiben Mikroorganismen im Boden länger in die kalte Jahreszeit hinein aktiv und erzeugen daher größere



ALASKA STOCK



Diese Karte der Arktis zeigt Veränderungen der Vegetation zwischen 1982 und 2005. Sie beruht auf Satellitendaten, die Scott Goetz und Kollegen am Woods Hole Research Center in Falmouth (Massachusetts) gesammelt und analysiert haben. Man erkennt eine Zunahme von Sträuchern in der Tundra (hellgrüne Bereiche) sowie eine Austrocknung des borealen Waldes (braune Bereiche).

Nährstoffreserven. Im kommenden Sommer bedeutet das günstigere Bedingungen für Sträucher. Dank des Düngers wachsen sie kräftiger und werden höher, weshalb sie in den nachfolgenden Wintern noch mehr Schnee einfangen – ein sich selbst verstärkender Effekt.

Die andere positive Rückkopplung, die mit dem Schnee zusammenhängt, ergibt sich aus dessen Albedo: Er strahlt Sonnenlicht fast vollständig zurück. Die dunklen Zweige hoher Sträucher ragen im Winter und speziell im Frühjahr über die Schneedecke hinaus. Sie absorbieren Sonnenenergie um ein Vielfaches besser als der weiße Schnee. Die resultierende lokale Erwärmung beschleunigt das Tauen im Frühjahr. So beginnt die Wachstumsphase dort früher, und die Sträucher können noch mehr an Höhe zulegen.

Für sich betrachtet sind die winterlichen Rückkopplungen leicht einzusehen. Doch sie funktionieren nicht unabhängig voneinander oder von den Vorgängen im Sommer, von denen man einige gut versteht, andere aber nicht. So ist der Nettoeffekt ungewiss. Beispielsweise sollten die Verwehungen bei Sträuchern im Frühjahr langsamer abtauen als die dünnere Schneedecke in der Umgebung. Überwiegt der Albedo-Effekt diesen Nachteil oder kann er ihn nicht ausgleichen? Im Sommer sind Beschattung und Laubfall zwei potenzielle, nicht völlig verstandene Rückkopplungen. Je größer die Sträucher, desto mehr Schatten werfen sie, was den Boden kühlt und so möglicherweise der gesteigerten mikrobiellen Aktivität in winterlichen Schneeverwehungen entgegenwirkt. Vom Gebüsch abgeworfenes Laub erhöht dagegen die Nährstoffreserven im Erdreich und sollte

demnach das Wachstum ankurbeln. Etliche Forscher versuchen, diese vielfältigen, teils gegensätzlichen Effekte in Computermodellen zu erfassen und sie bei der Vorhersage des Wandels in Tundra und Taiga zu berücksichtigen. Eine der größten Unbekannten ist allerdings, ob das künftige Klima überhaupt mehr oder weniger Schnee mit sich bringen wird. Gilt für die Veränderungen an Land dasselbe wie für das Abschmelzen des Meereises, dann sind direkte Beobachtungen auch in diesem Fall wichtiger als Modellierungen. Dazu passt unser Ansatz, Fotopaare aus Alaska zur Evaluierung unseres Modells heranzuziehen.

Sicher hatten wir Glück, dass die US-Marine einst so exzellente Aufnahmen von der North Slope in Alaska anfertigte – und sie in unseren Besitz gelangten. Glückliche Zufälle aber sind in der Wissenschaft ebenso wichtig wie in anderen Lebensbereichen. Ohne die Fotos hätten wir wohl nicht so schnell erkannt, dass sich das Landschaftsbild in den hohen Breiten ebenso dramatisch verändert wie die Meereisdecke. Die Aufnahmen liefern den unmittelbarsten und anschaulichsten Beweis dafür, auch wenn uns ohne Satellitendaten und die sorgfältige Arbeit von Dendrochronologen andere Aspekte der Geschichte verborgen geblieben wären.

Jetzt muss es darum gehen, eine Vorhersagemethode für Art und Geschwindigkeit der Veränderungen in der kontinentalen Arktis auszuarbeiten. Die Komplexität biologischer Systeme macht diese Aufgabe schwierig. Wenn wir sie aber nicht rasch lösen, ist Vorsorge nicht mehr möglich. Dann werden uns die Veränderungen überrumpeln, und wir können nur noch reagieren. ◀



**Matthew Sturm** nahm nach der Promotion an der University of Alaska in Fairbanks 1987 eine Stelle als Forscher beim U.S. Army Corps of Engineers an. Kürzlich leitete er eine 4000 Kilometer lange Durchquerung von Alaska und der kanadischen Arktis im Schneemobil. Sein Interesse an Sträuchern und Bäumen entwickelte sich bei einer früheren Expedition, als er in tiefem Schnee in einem Weidenbüsch stecken blieb. Nach stundenlangem Schneeschaukeln und Zerren an den Schneemobilen kam ihm die Idee, dass die Sträucher vielleicht die Höhe der Schneedecke in ihrer Umgebung beeinflussen – was schließlich zu den in diesem Artikel vorgestellten Untersuchungen führte.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050012](http://www.spektrum.de/artikel/1050012).

# Wikipedia: Wissen für die KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Wenn ein Computer sich Allgemeinwissen aneignen soll, ist die Online-Enzyklopädie Wikipedia eine überaus reichhaltige Quelle – vorausgesetzt, sie wird mit geeigneten Verfahren der Computerlinguistik aufbereitet.

## In Kürze

- ▶ Für Zwecke der **Künstlichen Intelligenz** mangelt es den Computern immer noch an Wissen über (für Menschen) selbstverständliche Dinge.
- ▶ Dieses **Weltwissen** manuell zusammenzutragen ist überaus mühsam, die automatische Gewinnung aus großen Textmengen ist fehlerträchtig.
- ▶ Aus der Online-Enzyklopädie **Wikipedia** lässt sich Weltwissen mit weit gehend automatisierten Verfahren extrahieren.
- ▶ Die Ergebnisse sind bereits zum Abgleich von Wikipedia-Artikeln in **verschiedenen Sprachen** einsetzbar.

Von Michael Strube

**C**omputer können viel: Aufgaben, für die ein Mensch seine ganze Intelligenz und viel Zeit einsetzen muss, erledigen sie in Sekundenbruchteilen; sie speichern Mengen an Informationen, die unser Gedächtnis weit überfordern würden, und stellen sie auf Anforderung bereit. Nur mit einigen Dingen, die uns so leicht fallen, dass wir unsere geistige Aktivität kaum bemerken, tun sie sich nach wie vor schwer. Dazu zählt ganz besonders die Aufgabe, natürliche Sprache zu verstehen.

Dem Ziel, diesem Defizit abzuhelpfen, widmet sich die Computerlinguistik, ein Zweig des Forschungsgebiets, das allgemein als »Künstliche Intelligenz« (KI) bezeichnet wird. Hier hat es in den letzten Jahren einen großen Sprung nach vorne gegeben, von dem ich im Folgenden berichten will.

Was tun wir, wenn wir einen gewöhnlichen deutschen Satz lesen, und was hindert den Computer daran, es uns gleichzutun? Ein Beispiel:

Zu Beginn des Ersten Weltkrieges meldete sich Kirchner als Freiwilliger und wurde Fahrer bei einem Artillerieregiment.

Um diesen Satz zu verstehen, müssen wir erschließen, wer mit Kirchner bezeichnet wird. Dass es sich nicht um die argentinische Präsidentin Cristina Fernández de Kirchner han-

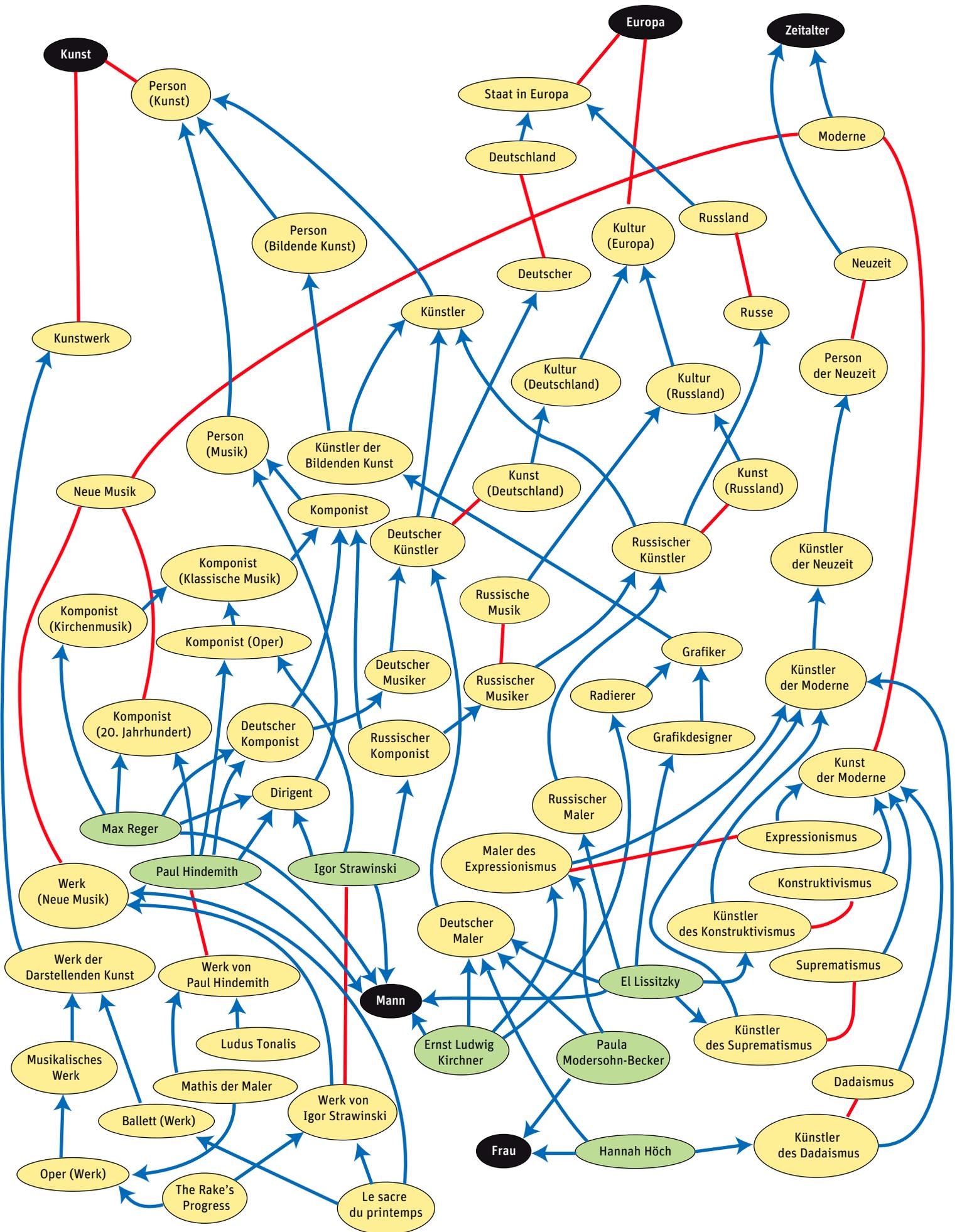
delt, geht bereits aus der Grammatik des Satzes hervor: Freiwilliger und Fahrer beziehen sich auf eine männliche Person. Es ist nicht besonders schwer, die zugehörigen Regeln in ein Computerprogramm zu fassen. Um dagegen auszuschließen, dass mit Kirchner ihr kürzlich verstorbener Mann, der ehemalige argentinische Präsident Néstor Kirchner, gemeint ist, müssen wir Weltwissen einsetzen, in diesem Fall, dass ein 1950 geborener Mann nicht an einem Ereignis, das am Anfang des 20. Jahrhunderts stattfand, dem Ersten Weltkrieg, teilgenommen haben kann.

Lesen wir weiter: Im Frühjahr 1915 kam der Künstler nach Halle an der Saale. Wir erfahren nun, dass Kirchner als Künstler bezeichnet wird. Unser Weltwissen verhilft uns zu der Vermutung, dass es sich um den Maler Ernst Ludwig Kirchner handelt, der in der Tat zur fraglichen Zeit gelebt hat und als Künstler aktiv war.

An diesem einfachen Beispiel können wir sehen, dass Sprache zu verstehen Wissen er-

**Dieser kleine Ausschnitt aus dem Kategoriennetz der deutschen Wikipedia konzentriert sich auf die nähere Umgebung der Einträge zu einigen Künstlern vom Beginn des 20. Jahrhunderts. Relationen vom Typ isa (Kasten S. 96) sind blau und mit Pfeil eingezeichnet, solche vom Typ notisa rot.**

# TECHNIK & COMPUTER



## WISSENSREPRÄSENTATION – DIE FACHAUSDRÜCKE

**Ein Konzept** ist grob gesprochen alles, worüber man sinnvollerweise einen Lexikonartikel schreiben kann. Genauer gesagt, verweist ein Konzept

- auf ein konkretes Objekt: **Angela Merkel, Wildschwein, Erdbeere, Holzschraube, Künstler, ...**
- auf ein abstraktes Objekt: **Exponentialfunktion, Vektorraum, Gesetz, Sprache, Gattung, ...;**
- auf einen Zustand: **Armut, Ruhe, Gleichgewicht, ...;**
- auf ein Ereignis: **Krieg, Mondlandung, Hochzeit, ...**

Ein »Objekt« in diesem Sprachgebrauch kann eine Abstraktionsstufe höher liegen als ein Objekt im umgangssprachlichen Sinn. Letzteres ist dann typischerweise eine **Instanz** des ersten: **Wildsau Susi aus dem Gehege der Ketscher Rheininsel** ist eine Instanz von **Wildschwein**. Allgemein ist eine Instanz ein Individuum, das heißt ein Objekt, das mit einem Eigennamen bezeichnet wird.

Eine **Kategorie** ist ein Konzept, das Konzepte zusammenfasst, die gemeinsame Eigenschaften haben.

Aussagen werden mit Hilfe von Relationen ausgedrückt. Eine **Relation** ist eine Beziehung zwischen zwei Konzepten; sie darf unspezifisch sein, muss also keine Aussage darüber enthalten, welcher Art diese Beziehung ist. Alle Konzepte einer Wissensbasis zusammen mit ihren Relationen bilden einen mathema-

tischen Graphen namens **semantisches Netz**. Die Knoten des Graphen sind die Konzepte, die Kanten die Relationen.

Unspezifische Relationen können stark oder schwach sein. Die stärkste Relation ist **Synonymie** (die beiden Konzepte sind gleichbedeutend), die schwächste **Assoziation** (die beiden Konzepte haben irgendetwas miteinander zu tun).

Die wichtigste spezifische Relation ist **isa** (zu lesen als englisch *is a*, »ist ein«). Sie drückt die Beziehung zwischen Begriff und Oberbegriff aus und ist daher asymmetrisch. Die entsprechende Kante im semantischen Netz trägt gewissermaßen einen Pfeil, der von einem Konzept zu einer ihm übergeordneten Kategorie weist.

Eine **Taxonomie** ist ein semantisches Netz, dessen Kanten sämtlich die Relation **isa** ausdrücken und das als Graph eine Baumstruktur hat, das heißt, alle Wege in Richtung der Pfeile enden an einem ausgezeichneten Knoten, der »Wurzel« des Baums, und es gibt (unter Einhaltung der Pfeilrichtung) keine Rundwege im Graphen.

Eine **Ontologie** ist ein semantisches Netz, dessen Gerüst durch eine Taxonomie gebildet wird, dessen Konzepte aber zusätzlich durch weitere Relationen verbunden sind, etwa **has-part** (»hat als Teil«), **is-located** (»liegt in«), **has-property** (»hat die Eigenschaft«).

fordert, über Objekte in der Welt und deren Relationen zueinander, über Ereignisse, Handlungen, Situationen. Dieses Wissen ist für die Künstliche Intelligenz heute nur sehr bruchstückhaft verfügbar.

Nicht dass es nicht vorhanden wäre: Natürlich kann man beliebig viele deutsche Sätze in einem Computer abspeichern. Aber das Wissen muss in einer solchen Form vorliegen, dass ein Programm daraus automatisch Schlüsse ziehen kann. Auch das Schlussfolgern selbst ist kein großes Problem. Schon die Philosophen der Antike, namentlich Aristoteles, haben dafür formale Regeln aufgestellt, und die mathematische Logik hat im 19. und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts diesen Formalismus in aller wünschenswerten Tiefe ausgearbeitet. Auf dieser Grundlage konnte die KI bereits in den 1950er Jahren Methoden und Systeme entwickeln, die rationale Schlüsse ziehen können.

Diese Fähigkeit ist jedoch für Intelligenz noch nicht ausreichend, wie John McCarthy, einer der Gründerväter der KI, schon 1959 feststellte. McCarthy beschrieb am Beispiel der Aufgabe, mit dem Auto zum Flughafen zu fahren, welche Arten von Wissen benötigt werden:

- über Objekte in der Welt und ihre Beziehungen zueinander: Zum Auto gehören Motor und Räder;

- über Situationen: Wenn die Ampel rot ist, darf man die Kreuzung nicht überqueren;

- über Ereignisse und Handlungen: Wenn man am Flughafen angekommen ist, muss man einen Parkplatz suchen.

McCarthy forderte darüber hinaus eine klare Trennung zwischen Schlussregeln und der Repräsentation von Wissen.

In der Folge gelang es in den 1970er und 1980er Jahren, aus verfeinerten Schlussverfahren zusammen mit einer überschaubaren Menge von Fakten aus begrenzten Wissensbereichen (»Domänen«) eine Reihe intelligenter Systeme aufzubauen. Allerdings musste das zugehörige Wissen manuell erstellt werden: Ein Mensch hatte jedes einzelne Wissenselement (»ein Auto hat Räder«) in die Datenbank einzutippen, in einer Form, die ein Computerprogramm verarbeiten kann.

Wie bringt man dem Computer bei, was ein Auto ist? In welchem Sinn kann er überhaupt die »Bedeutung« des Wortes **Auto** erfassen? Typischerweise nur, indem er Beziehungen des Konzepts **Auto** zu anderen Konzepten wie **Rad** auswertet. Eine Wissensbasis (ein »semantisches Netz«, siehe Kasten oben) besteht also aus (möglichst vielen) Konzepten und Relationen zwischen ihnen. Auf dieser Grundidee beruht auch der groß angelegte Versuch, über das ganze Internet ein semantisches Netz, das *semantic web*, zu spannen (Spek-

trum der Wissenschaft 8/2001, S. 42, und 11/2008, S. 92).

Für große Domänen ist das manuelle Anlegen einer Wissensbasis nicht nur überaus aufwändig, sondern stößt auch an prinzipielle Grenzen. Eine Formalisierung, die für ein begrenztes Gebiet, sagen wir die Systematik der Blütenpflanzen, gut funktioniert, lässt sich in der Regel nicht über ihr Gebiet hinaus verallgemeinern. Aus demselben Grund stieß auch der Versuch, verschiedene Domänenwissensbasen miteinander zu verknüpfen, auf unüberwindliche Schwierigkeiten.

### **Handverlesenes Wissen: Cyc und WordNet**

Nur zwei Großprojekte haben diesen Schwierigkeiten zum Trotz überlebt: Cyc und WordNet. Beide stammen aus den 1980er Jahren. Cyc, entworfen von dem KI-Forscher Douglas Lenat in Austin (Texas), stellt neben Konzepten und Relationen auch umfangreiche Software als Schnittstelle zu sprachverarbeitenden Systemen zur Verfügung und bringt einen eigenen Mechanismus zum logischen Schließen mit. WordNet, ins Leben gerufen durch den Kognitionspsychologen George A. Miller in Princeton (New Jersey), verwendet Erkenntnisse der Kognitionspsychologie und statistische Analysen von Texten. WordNet ist eine der am meisten genutzten Ressourcen in der automatischen Sprachverarbeitung und liegt im Gegensatz zu Cyc mittlerweile für viele Sprachen vor, für das Deutsche als GermaNet.

Wozu verwendet man das viele Wissen, das in einer großen Wissensbasis dieser Art niedergelegt ist? Eine wesentliche Anwendung ist die Textanalyse. Ein entsprechendes Programm soll einem vorgelegten Text ungefähr die gleiche Interpretation zuweisen wie ein Mensch. Insbesondere soll es einen gesprochenen Text korrekt niederschreiben, Wortarten erkennen (»Ist dieses Wort ein Substantiv oder ein Adjektiv?«) und die Grammatik eines geschriebenen Textes erfassen (»Wo beginnt der Nebensatz?«, »Was ist das Subjekt?«). Wissen kommt ins Spiel beim Erkennen von Eigennamen, dem Auflösen von mehrdeutigen Wörtern, der so genannten Disambiguierung (»Ist mit Bank ein Sitzmöbel oder ein Kreditinstitut gemeint?«). Eine der zentralen Aufgaben bei der Textanalyse, für deren Lösung Wissen benötigt wird, ist die Koreferenzresolution: Auf welchen bereits genannten Begriff bezieht sich dieses Pronomen? Oder allgemeiner: Welche (verschiedenen) Ausdrücke im Dokument, zum Beispiel Pronomina und umschreibende Phrasen, verweisen auf dasselbe Objekt in der Welt?

Sowohl Cyc als auch WordNet werden seit etwa 25 Jahren kontinuierlich betrieben und setzen qualitätssichernde Maßnahmen ein. Dennoch haben sie weder quantitativ noch qualitativ einen zufrieden stellenden Stand erreicht. Beide Wissensbasen enthalten Bereiche, die vor mehr als einem Jahrzehnt modelliert wurden. Niemand weiß, ob dieses Wissen noch aktuell ist und sich mit später hinzugefügtem Wissen verträgt. Teilbereiche beider Wissensbasen wurden von Einzelpersonen modelliert. Es ist nicht klar, ob ein anderer Modellierer das Wissen auf die gleiche Art strukturiert hätte. WordNet weist (absichtlich) große Lücken bei Instanzen auf, also Konzepten, die durch Eigennamen bezeichnet werden, und muss deshalb in diesem Bereich durch automatische Verfahren ergänzt werden. So findet man zwar, wenn man nach Kirchner sucht, den Eintrag über Ernst Ludwig Kirchner. Die Suche nach der aktuellen Präsidentin Argentiniens bleibt jedoch ohne Erfolg. Cyc hat in diesem Bereich mehr zu bieten, trifft jedoch unter den Instanzen eine recht willkürliche Auswahl.

Zu Beginn der 1990er Jahre kam der manuelle Aufbau von Wissensquellen aus der Mode. Statistische Verfahren hielten Einzug in die Computerlinguistik, nachdem sich herausstellte, dass mit ihren Mitteln die einfacheren Fragen der Textanalyse viel effizienter zu beantworten waren als durch die klassische, auf Schlussverfahren beruhende Analyse. Auch die automatischen Übersetzungsprogramme kommerzieller Suchmaschinen arbeiten mit Material, das durch statistische Auswertung sehr großer Datenmengen gewonnen wurde.

Erst in jüngster Zeit werden die Grenzen der statistischen Verfahren immer deutlicher sichtbar, und man besinnt sich auf linguistisches und Weltwissen zurück. Allerdings ist der manuelle Aufbau von Wissensbasen keine realistische Option mehr, schon wegen der extrem hohen Kosten. Der Aufbau von Cyc soll weit mehr als 1000 Personenjahre in Anspruch genommen haben. Inzwischen war jedoch das World Wide Web zu gewaltiger Größe herangewachsen. Da keimte bei den KI-Forschern die Hoffnung, man könnte aus den dort bequem verfügbaren großen Textmengen automatisch und deshalb kostengünstig Wissen extrahieren.

Das daraufhin entwickelte Verfahren heißt »Ontologielernen aus Texten« und verwendet in erster Linie sprachliche Muster, das sind Textschablonen mit Leerstellen, in die beliebige Wörter oder Wortteile eingesetzt werden können. Ein Beispiel ist das Muster \* wie \* und \* (die Sterne stehen für die Leerstellen).

**Es ist überaus mühsam, Weltwissen, das jeder kennt, manuell in eine Datenbank einzuspeisen**

## Ontologielernen aus Texten nimmt die Formulierung **Anwälte und andere Katastrophen** wörtlich – und hält daraufhin einen Anwalt für so etwas wie ein Erdbeben

Ein Programm, das mit diesem Muster Text durchsucht, findet zum Beispiel die Wortfolge Expressionisten wie Kirchner und Nolde. Daraus kann es ableiten, dass Kirchner und Nolde Expressionisten sind. Mit Hilfe des Musters \* und andere \* wird die Wortfolge Kirchner und andere Expressionisten gefunden; auch sie erlaubt den Schluss, dass Kirchner ein Expressionist ist. Durch \* des \*s findet man etwa Werke des Zeichners und daraus Relationen der Art »A gehört zu B«, »B besitzt A« oder »B hat A geschaffen«. Diese Muster kann man ohne großen Aufwand für viele Sprachen erstellen oder sogar ein Programm schreiben, das diese automatisch lernt. Daher ist der Ansatz auch für Sprachen geeignet, für die es nur wenige oder gar keine computerlinguistischen Vorarbeiten gibt.

Allerdings ist das Ontologielernen aus Texten der sprachlichen Kreativität der Schreiber relativ schutzlos ausgesetzt. Da findet das Programm neben Zecken und andere Blutsauger auch die Wortfolge Verwertungsgesellschaften und andere Blutsauger und erschließt daraus, dass Zecken und Verwertungsgesellschaften semantisch ähnlich und Unterbegriffe von Blutsauger sind. Das gleiche gilt für Erdbeben und andere Katastrophen und Anwälte und andere Katastrophen, woraufhin das System Anwälte ebenso wie Erdbeben unter Katastrophen einsortiert. Die Forscher verwenden große Mühe darauf, die Genauigkeit ihrer Ergebnisse zu erhöhen – leider mit mäßigem Erfolg, da die Textquellen auf der einen Seite zu viel irrelevante Informationen enthalten, auf der anderen Seite zu wenig Information, die für KI-Anwendungen relevant wäre.

Wir kennen also bisher zwei Wege, an die Schätze des Weltwissens zu kommen: Man fertigt sie einzeln in mühsamer Handarbeit und bekommt nie genug zusammen; oder

man fischt sie mit Netzen aus dem großen Datenstrom und hat mit großen Mengen Unrat bei magerer Ausbeute zu kämpfen. Gibt es einen Mittelweg zwischen beiden Extremen? Gibt es einen Datenstrom, der einerseits handgefertigt und gut strukturiert, andererseits groß genug und ohne zusätzlichen Kostenaufwand verfügbar ist? Die Antwort ist ja. Es handelt sich um die Wikipedia, die seit 2001 bestehende und seitdem ins Gigantische wachsende Internet-Enzyklopädie.

### Ordnung durch Kategorien

Ein genauer Blick zeigt, dass die Wikipedia bereits ein semantisches Netz in geeigneter formalisierter Gestalt enthält, nämlich das Netz ihrer Kategorien. Fast jeder Artikel ist in eine oder mehrere Kategorien eingeordnet; jede Kategorie ist wiederum selbst kategorisiert. Zum Beispiel ist Ernst Ludwig Kirchner kategorisiert als Maler des Expressionismus, Radierer, Holzschneider, Künstler (documenta), Berliner Secession, Deutscher Maler, Künstler (Aschaffenburg), Geboren 1880, Gestorben 1938, Mann. Das Bild auf S. 95 zeigt einen kleinen Ausschnitt des aus den Kategorien gebildeten semantischen Netzes.

Ein solcher Kategorien-Eintrag stellt eine Relation her, zum Beispiel zwischen den Konzepten Ernst Ludwig Kirchner und Maler des Expressionismus. In diesem Fall sagt die Relation »Ernst Ludwig Kirchner ist ein Maler des Expressionismus«, ist also die Relation *isa* (»ist ein«), die Begriff und Oberbegriff verbindet (Kasten S. 96).

In anderen Fällen, wie zum Beispiel Künstler (Aschaffenburg), versammelt eine Kategorie nur Konzepte, die in irgendeinem Zusammenhang zueinander stehen. Wikipedia-Kategorien sollen in erster Linie dem Leser helfen, verwandte Informationen und Themen leicht zu finden. Die schlichte Tatsache, dass ein Artikel einer Kategorie zugewiesen ist, sagt also noch nicht viel.

Trotzdem kann man aus der Gesamtheit der durch Kategorien definierten Relationen bereits Schlüsse auf die Verwandtschaft zweier Konzepte ziehen. Das haben mein Kollege Simone Paolo Ponzetto und ich 2006 aufgezeigt. Nach Analyse des Wikipedia-Kategoriennetzes konnte unser Programm Fragen der Art »Wie verwandt sind die Konzepte Ernst Ludwig Kirchner und Igor Strawinsky?« (oder »Wie verwandt sind Suprematismus und russische Musik?«) mit einer Maßzahl zwischen 1 (»nicht verwandt«) und 10 (»gleichbedeutend«) beantworten. Überraschenderweise traf es dabei die semantische Verwandtschaft der entsprechenden Konzepte, wie sie durch Befragung menschlicher Versuchspersonen er-



mittelt wird, ungefähr so gut oder sogar besser als das viel aufwändiger erstellte WordNet.

Es gibt allerdings nur relativ wenige Wortpaare, deren Verwandtschaftsgrad durch Befragung von Versuchspersonen ermittelt worden ist. Entsprechend schmal ist die Vergleichsbasis. Daher haben wir unser semantisches Netz noch einem härteren Test unterzogen: Wir machten es zur Arbeitsgrundlage eines Textanalyse-Systems. Um einen längeren Text in dem oben genannten Sinn zu verstehen, muss ein solches Programm häufig mehrere 100 000 Wortpaare auf ihren Verwandtschaftsgrad testen.

Hierbei zeigte sich, dass das aus Wikipedia abgeleitete Wissen nicht nur qualitativ hochwertig ist, sondern auch eine größere Abdeckung aufweist als WordNet. Da WordNet die meisten Eigennamen nicht kennt, ist unser Programm bei derartigen Konzepten schon deshalb besser, weil es überhaupt eine Antwort liefert. Dieser Vorsprung wird sich noch vergrößern, weil die Wikipedia gegenwärtig vorwiegend in diesem Bereich wächst. Heutige Textanalyse-Systeme werden in erster Linie auf Zeitungstexte angewendet, und dafür ist es wichtiger, über die argentinische Präsidentin Cristina Fernández de Kirchner Bescheid zu wissen als über den Maler Ernst Ludwig Kirchner.

### Taxonomie mit 100 000 Relationen

Noch wesentlich mehr Ausdruckskraft – und damit Nützlichkeit für KI-Anwendungen – gewinnt man, wenn man nicht, wie oben dargestellt, alle Relationen gleichbehandelt, sondern sie nach ihrer Art unterscheidet. Dabei kommt es vor allem darauf an, zu erkennen, ob eine Kategorie die Relation *isa*, die Beziehung zwischen Begriff und Oberbegriff (Kasten S. 96) ausdrückt. Denn mit deren Hilfe lässt sich eine Taxonomie aufstellen, das heißt eine hierarchische Einteilung der Konzepte, ähnlich wie die Biologen die Arten nach Gattungen, Familien, Ordnungen und so weiter zu gruppieren pflegen. Eine Taxonomie wiederum erlaubt viele Schlussfolgerungen.

Die englische Wikipedia im Zustand vom 25. September 2006, mit der wir gearbeitet haben, enthält 127 325 Kategorien, nicht gerechnet diejenigen, die Wartungszwecken dienen. Da ist an eine manuelle Sortierung der zugehörigen Relationen in *isa* und andere nicht zu denken. Vielmehr haben Ponzetto und ich ein Verfahren entwickelt, das automatisch in mehreren Schritten die Relationen in *isa*, *notisa* (das heißt sicher nicht *isa*) und einen unklassifizierten Rest aufteilt.

Im ersten Schritt verarbeitet das Verfahren den Namen der Kategorie. Viele dieser Na-

## TEXTVERWANDTSCHAFT

**Bibliothekssysteme, Fachinformationsdienste und Internet-Suchmaschinen** haben, um die Anforderungen ihrer Nutzer zu erfüllen, millionenfach die Frage zu beantworten: »Wie (bedeutungs)ähnlich sind sich zwei vorgelegte Texte?«

Ein automatisches Verfahren liefert eine gute Näherung an eine Antwort. Im Prinzip zählt man aus, wie häufig welche Wörter in beiden Texten vorkommen, multipliziert die Häufigkeit eines Worts in Text *A* mit der Häufigkeit desselben Worts in Text *B* und addiert alle Produkte zusammen (Skalarprodukt der beiden Vektoren, die den Texten entsprechen). Je größer das Ergebnis, desto näher sind die beiden Texte verwandt. Das Prinzip muss noch verfeinert werden: Je exotischer ein Wort ist, das heißt, je seltener es im ganzen Textkorpus vorkommt, desto mehr zählt es mit (sonst würden Allerweltswörter wie »der«, »es« oder »und« eine Rolle spielen); und statt der absoluten Häufigkeiten sind relative zu verwenden (man teilt durch die Textlänge).

Das Ergebnis lässt sich geometrisch als Winkel in einem abstrakten Raum interpretieren: Sehr ähnliche Texte haben sehr kleine Winkel (ihre Vektoren zeigen fast in dieselbe Richtung), sehr unterschiedliche Texte stehen praktisch senkrecht aufeinander.

men haben den syntaktischen Kopf gemeinsam: *Künstler des Suprematismus* ist als *Künstler der Moderne* kategorisiert, *Künstler der Moderne* (über einige Zwischenschritte) als *Künstler*. Alle diese Kategorien haben den gleichen syntaktischen Kopf *Künstler*, deshalb kann geschlossen werden: *Künstler des Suprematismus isa Künstler der Moderne* und *Künstler der Moderne isa Künstler*. Wenn dagegen ein Wort einmal als syntaktischer Kopf, das andere Mal aber an anderer Position erscheint, können die beiden Konzepte nicht durch *isa* verbunden sein: *Maler des Expressionismus notisa Expressionismus*.

Wenn der Name der Kategorie im Plural steht (*Präsidenten der USA*), dann spricht viel dafür, dass die Kategorie alle Träger dieser Eigenschaft aufzählt. Mit einigen Zusatzbedingungen lässt sich die zugehörige Relation mit großer Genauigkeit als *isa* erkennen.

Im zweiten Schritt erzeugt das Verfahren aus bekannten *isa*-Relationen neue. Aus *Ernst Ludwig Kirchner isa Künstler der Moderne* und *Künstler der Moderne isa Künstler* folgt *Ernst Ludwig Kirchner isa Künstler*.

Im dritten Schritt versucht das Verfahren die verbleibenden Relationen mit Hilfe sprachlicher Muster in *isa* und *notisa* zu klassifizieren. Das verläuft so wie beim oben beschriebenen Ontologielernen aus Texten, aber ohne dessen Schwächen, weil schon vor dem Test bekannt ist, dass die beiden Konzepte in einer semantischen Relation stehen. Die Frage, ob ein *Anwalt* eine *Katastrophe* ist, wird gar nicht erst gestellt.

Insgesamt hat unser Verfahren anhand der Wikipedia reichlich 100 000 *isa*-Relationen ausfindig gemacht. Die dadurch induzierte

WIKIPEDIA Die freie Enzyklopädie

Ernst Ludwig Kirchner

Ernst Ludwig Kirchner (\* 5. Mai 1890 in Aschaffenburg; † 15. Juni 1935 in Frauenkirch-Wülbeden bei Davos (Schweiz)) war ein deutscher Maler und Grafiker des Expressionismus. Kirchner war ein Gründungsmitglied der Künstlergruppe Brücke.

**Leben und Werk** (bearbeiten)

**Ausbildung** (bearbeiten)

Kirchner wurde als Sohn des Papierhändlers Ernst Kirchner und dessen Frau Maria Ellen, geborene Franke, in Aschaffenburg geboren. Nach seinem Studienjahr, die er 1907 mit einem Architekturdiplom an die **Technische Hochschule Braunschweig** begann und 1908 mit der Diplomarbeit *Entwurf einer Friedhofsanlage* erfolgreich beendet gleichzeitig auch Studium an der Technischen Hochschule München, besonders aber an der **Debschitz-Schule**, einer reformorientierten Kunstschule in München, entschied er sich gegen den Beruf des Architekten.

**Die Künstlergruppe Brücke** (bearbeiten)

Am 7. Juni 1905 schloss er sich mit Erich Heckel, Fritz Böhm und Karl Schmidt-Rottluff – Ausreißern wie er – zur Dresdner Künstlergemeinschaft Brücke zusammen. In dieser Zeit entwickelte er sich von einem impressionistisch beeinflussten Maler zum Expressionisten. Zu seinen bevorzugten Themen gehören neben Akten und Porträts auch Landschaften, Stadtansichten und die Welt des Varietés.

Er lebte bis 1911 in Dresden und zog dann nach Berlin. Ausschlaggebend für diese Entscheidung war der mangelnde Erfolg seiner Kunst. In Berlin besaßte sich seine Lage zunächst nur wenig. Dort lernte er seine neue Lebensgefährtin Erna Schilling kennen. In seinen Bildern war jedoch eine Veränderung bemerkbar. So wurden seine runden Formen nun zackiger, die Brücke erschienen räumloser (Kontrast von Landschaft und Großstadt), seine Farben ließen in der Leuchtkraft nach. Straßenszenen tauchten in seinem Werk auf. Es sind in der heutigen Kirchner-Rezeption die oftzitierten Bilder des Künstlers. Kirchner hielt sich zudem auf der israeli **Tel Aviv**, auf, wo er viele Bilder schuf, die die Küstenstraße **Fahrräder**, so beispielsweise **Stadtbahn**, darstellen.

1912 gründete er zusammen mit Max Pechstein eine Malerschule namens MUM-Institut (Moderne Unterricht in Malerei), die aber keinen Erfolg hatte. Nach der Teilnahme an der Ausstellung des Sonderbunds in Köln verfasste Kirchner 1913 eine Chronik über die Brücke, in der er seine Bedeutung für die Künstlergruppe stark überbetonte. Daraufhin kam es zum Bruch mit den anderen verbliebenen Mitgliedern, in dessen Folge Kirchner austrat. Das Ende zur endgültigen Auflösung der Gruppe. In diesem Jahr lernte er seine langjährige Lebensgefährtin Erna Schilling (1884-1945) kennen.

Seit 1914 erreichte Kirchner durch die von **Bothe Graf** und **Eberhard Glasbach** betreuten Werk-Ausstellungen des **Jahres Kunstvereins** die Öffentlichkeit. 1917 schenkte Kirchner 34 Federzeichnungen, 83 Holzschnitte und 125 Lithographien als **Bothe Graf** Gedächtnis-Stiftung nach **Jena** und begründete damit seine nach dem Ersten Weltkrieg einsetzende **Nähe**.

**Erster Weltkrieg** (bearbeiten)

Zu Beginn des Ersten Weltkrieges meldete sich Kirchner als Freiwilliger und wurde Fahrer bei einem Artillerieregiment. Im Frühjahr 1915 kam der Künstler als **Rekruit** nach Halle an der Saale. Nur wenige Monate erlag er der **Diphterie**, zum erlittige seine **Beurteilung** und ein **neurotischer Zusammenbruch**. Kirchner genoss in **Abhängigkeit** von **Medikamenten** (antipsycho **Verfahren**) später **Wieder**. Er wurde in Deutschland im Sanatorium Dr. **Oskar Kohlenstein** behandelt, wo er im Sommer 1916 einen Zyklus von fünf im Verfahren der **Enkapsulierung** erstellten Wandgemälden schuf. Finanziert wurden die ersten Sanatoriumsaufenthalte des mittellosen Künstlers von wesporen Museenbesuchern und Kunstsammlern, die auf sein Werk aufmerksam geworden waren: **Ernst Godebski**, **Karl Ernst Osthaus**, **Bothe Graf**, **Carl Hagemann**.

Der deutsche (links) und der französische (rechts) Artikel über Ernst Ludwig Kirchner erzählen dieselbe Lebensgeschichte in sehr unterschiedlicher Form und Ausführlichkeit. Während seine Ausbildungsstätte (gelb unterlegt) im jeweils anderen Text noch durch schlichtes Übersetzen

des Expressionismus isa Künstler und russischer Maler isa Maler.

Ein Verfahren dieser Art haben wir auf die gesamte Wikipedia angewandt. Das Ergebnis ist ein dicht geknüpftes Netz namens Wiki-Net aus einfachen, grundlegenden Konzepten und einem reichhaltigen Inventar semantischer Relationen. Die häufigsten Relationen sind neben isa solche, die räumliche Beziehungen beschreiben; es folgen Relationen zur Nationalität der beschriebenen Personen sowie zu Gegenstand und Genre eines künstlerischen Werks.

Alternativ zu unserem Ansatz kann man die aus Wikipedia abgeleiteten Konzepte und Teilwissensbasen in die bereits existierende Taxonomie einer Wissensbasis wie WordNet einhängen. Damit ergänzen sich beide Quellen in idealer Weise: WordNet liefert die sorgfältig manuell aufgebaute Grundstruktur, die der Wikipedia fehlt, und Wikipedia das Wissen zu aktuellen Ereignissen und zu Eigennamen, die dem WordNet fehlen. Gjergji Kasneci und seine Kollegen in der Arbeitsgruppe von Gerhard Weikum am Max-Planck-Institut für Informatik in Saarbrücken haben diese Idee erfolgreich realisiert.

Bereits aus dem Kategoriensystem der Wikipedia lässt sich also eine Fülle an maschinenverwertbarem Wissen extrahieren. Darüber hinaus enthält die Wikipedia eine große Menge nutzbarer Materials:

► **Infoboxen:** Viele Artikel enthalten eine so genannte Infobox, die standardisierte Information über den Gegenstand enthält. So enthält jeder Artikel über eine deutsche Stadt Felder für Bundesland, Regierungsbezirk, Höhe über dem Meeresspiegel, Fläche, Einwohnerzahl und mehr. Viele Artikel über Personen enthalten eine Infobox, die je nach Beruf unterschiedlich gestaltet ist.

Die Infoboxen enthalten Information so strukturiert wie in einer Datenbank. Diese sind leicht in das Schema Konzept – Relation – Konzept zu überführen; für deutsche Städte wären dann die Relationen **liegt-in-Bundesland**, **liegt-in-Regierungsbezirk**, **hat-Höhe** und so weiter zu definieren. Die so aus den Infoboxen extrahierte Information ist besser strukturiert als die im Kategoriennetz enthaltene, allerdings weit weniger umfangreich. Jedenfalls kann die eine Sorte Informa-

Taxonomie namens WikiTaxonomy ist in ihrer Leistungsfähigkeit den Wissensbasen WordNet und Cyc vergleichbar; darüber hinaus ergänzt sie diese genau dort, wo sie ihre großen, nur durch sehr mühsame Handarbeit zu stopfenden Lücken haben.

Weitere, reichhaltigere Relationen konnten wir ebenfalls durch linguistische Analyse der Kategoriennamen finden. Aus Ernst Ludwig Kirchner isa Maler des Expressionismus und Expressionismus isa Kunststil kann man Ernst Ludwig Kirchner kunststil Expressionismus erschließen, mit der neu definierten Relation kunststil, die einem Künstler einen Stil (von möglicherweise mehreren) zuordnet.

Aus El Lissitzky isa russischer Maler folgt El Lissitzky nationalität Russland. Damit das funktioniert, muss die Analyse die Bestandteile des Expressionismus und russisch als einschränkende Attribute erkannt haben. Das gelingt mit Hilfe der Relationen Maler

wiederzufinden ist, schreiben beide Artikel über Kirchners Schicksal im Ersten Weltkrieg (rot unterlegt) mit völlig verschiedenen Worten. Gleichwohl kann die in diesem Artikel beschriebene semantische Analyse die beiden Textabschnitte einander zuordnen.

tion dazu dienen, die andere zu überprüfen und gegebenenfalls nachzubessern.

► **Hyperlinks:** Wikipedia-Artikel sind in ihrem Text reichlich mit Verweisen auf andere Artikel ausgestattet. Das Netz dieser Hyperlinks kann man auf dieselbe Weise analysieren, wie das beispielsweise die Suchmaschine Google mit ihrem PageRank-Algorithmus für das ganze World Wide Web tut und damit die wichtigen von den unwichtigen Fundstellen unterscheidet. Angewandt auf die Konzepte der Wikipedia arbeitet die Analyse heraus, welche von ihnen zentral und welche peripher sind. Mit dieser Information lässt sich abermals ein semantisches Netz aufbauen. In ihm sind zwei Konzepte durch eine Kante verbunden, wenn irgendeine Assoziation zwischen ihnen besteht. Wieder kann man ihre semantische Verwandtschaft auf einer Skala von 1 bis 10 berechnen und kommt damit zu Ergebnissen vergleichbarer Qualität wie mit dem Kategoriennetz. Allerdings ist auf diesem Weg über die Art der gefundenen Relationen nichts herauszufinden.

► **Vielsprachigkeit:** Gegenwärtig liegt Wikipedia in mehr als 250 Sprachen vor. Die größte Version ist die englische mit mehr als drei Millionen Artikeln, gefolgt von der deutschen mit einer reichlichen Million. In zehn Sprachen gibt es mehr als 500 000 Artikel, in 32 Sprachen mehr als 100 000. Alle oben angesprochenen Methoden sind nicht an eine spezielle Sprache gebunden. In der Tat haben Ponzetto und ich semantische Netze für die englische, die deutsche, die französische und die italienische Wikipedia aufgebaut. Die aus den Kategorien abgeleitete Taxonomie liegt sowohl für Englisch als auch für Deutsch vor. Dafür mussten wir lediglich die computerlinguistischen Vorverarbeitungs-komponenten austauschen oder anpassen.

Zudem verweisen die meisten Wikipedia-Artikel auf Artikel zum selben Thema in anderen Sprachen. Man könnte das Prinzip dieser *interlanguage links* auf die Taxonomien anwenden mit dem Effekt, dass die Begriffsbäume verschiedener Sprachversionen miteinander verknüpft würden, oder gar alle Sprachen gemeinsam an der Strukturbildung beteiligen. Das letztere Vorgehen ist allerdings so anspruchsvoll, dass es bisher noch nicht realisiert wurde.

The screenshot shows the German Wikipedia article for Ernst Ludwig Kirchner. The page layout includes a navigation menu on the left with options like 'WIKIPEDIA', 'Anmelden', and 'Hilfe'. The main content area features the article title 'Ernst Ludwig Kirchner' and a summary. The text describes his birth in 1897, his involvement in the Die Brücke movement, and his role in the Weimarer Republik. A section titled 'Œuvres (sélection)' lists several of his artworks, including 'Frauen in der Straße' and 'Die Toilette'. There are also several small images of his paintings and a portrait of him.

Stattdessen haben wir die englische Wikipedia als die größte und am reichhaltigsten strukturierte gewissermaßen als Rückgrat unserer Wissensbasis verwendet. Die anderen Sprachen übernehmen diese Struktur und füllen sie durch Konzepte, wenn und insoweit es Interlanguage-Links zur englischen Wikipedia gibt. Dieses Vorgehen ist praktikabel und bietet eine reichhaltige und einheitliche Struktur für alle Sprachen.

Allerdings gehen gewisse kulturelle Differenzen dabei unter: Für Europäer gehören Kartoffeln, Nudeln und Reis demselben Oberbegriff an, für Asiaten hat Reis eine andere Stellung; für Europäer ist Tomate ein Gemüse, für Asiaten eine Frucht.

► **Text:** Die reichste und für den Benutzer wichtigste Wissensquelle der Wikipedia, der Text, ist der linguistischen Analyse am schwersten zugänglich. Evgenij Gabrilovich und Shaul Markovitch vom Technion in Haifa (Israel) haben jedoch eine Methode gefunden,



**Michael Strube**, Jahrgang 1965, wurde 1996 an der Universität Freiburg mit einer Dissertation in Computerlinguistik promoviert. Nach einer Postdoktorandenzeit an der University of Pennsylvania in Philadelphia kam er 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter zur EML Research gGmbH in Heidelberg. Ein Jahr später wurde er Leiter der Natural Language Processing Group des Instituts, das mittlerweile »Heidelberger Institut für Theoretische Studien« heißt. Er ist Honorarprofessor an der Universität Heidelberg im Fach Computerlinguistik.

#### **Gabrilovich, E., Markovitch, S.:**

Computing Semantic Relatedness Using Wikipedia-Based Explicit Semantic Analysis. In: Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Hyderabad, 6–12 January 2007. AAAI Press, Menlo Park (California) 2007, S. 1606–1611. Online unter [www.ijcai.org/papers07/Papers/IJCAI07-259.pdf](http://www.ijcai.org/papers07/Papers/IJCAI07-259.pdf)

**Kasnci, G. et al.:** The YAGO-NAGA Approach to Knowledge Discovery. In: SIGMOD Record 37(4), S. 41–47, 2008.

#### **Ponzetto, S. P., Strube, M.:**

Knowledge Derived from Wikipedia for Computing Semantic Relatedness. In: Journal of Artificial Intelligence Research 30, S. 181–212, 2007. Online unter [www.jair.org/media/2308/live-2308-3485-jair.pdf](http://www.jair.org/media/2308/live-2308-3485-jair.pdf)

#### **Ponzetto, S. P., Strube, M.:**

Deriving a Large Scale Taxonomy from Wikipedia. In: Proceedings of the 22nd Conference on the Advancement of Artificial Intelligence, Vancouver, 22–26 July 2007, S. 1440–1445, 2007. Online unter [www.aaai.org/Papers/AAAI/2007/AAAI07-228.pdf](http://www.aaai.org/Papers/AAAI/2007/AAAI07-228.pdf)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1050013](http://www.spektrum.de/artikel/1050013).

auch aus dem Text eines Wikipedia-Artikels in einem automatisierten Verfahren wertvolle Information zu extrahieren.

Ein Standardverfahren der Informationsererschließung (*Information Retrieval*) weist Texten einen Verwandtschaftsgrad zu (Kasten S. 99). Gabrilovich und Markovitch trafen nun die Zusatzannahme, dass ein Wikipedia-Artikel eine hinreichend getreue Wiedergabe des zugehörigen Konzepts ist, und schlossen aus der nach dem Verfahren berechneten Bedeutungsverwandtschaft zweier Artikel auf diejenige der zugehörigen Konzepte.

### **Erkennung der Inhaltsgleichheit**

Wie kann die von uns aufgebaute Wissensbasis dazu dienen, in natürlicher Sprache geschriebene Texte zu verstehen? Kommen wir auf das Eingangsbeispiel zurück, das dem deutschen Wikipedia-Artikel über Ernst Ludwig Kirchner entnommen ist.

Zu Beginn des Ersten Weltkrieges meldete sich Kirchner als Freiwilliger und wurde Fahrer bei einem Artillerieregiment. Im Frühjahr 1915 kam der Künstler nach Halle an der Saale. Nur wenige Monate ertrug er den Drill, dann erfolgte seine Beurlaubung und ein nervlicher Zusammenbruch.

Dass sich der Verfasser im zweiten Satz mit Hilfe der Nominalphrase der Künstler auf Kirchner bezieht, kann ein Programm mit Hilfe der aus Wikipedia abgeleiteten Taxonomie überprüfen, denn diese enthält, über Zwischenstufen herleitbar, die Aussage Ernst Ludwig Kirchner *isa* Künstler. Künstler ist also allgemeiner als Kirchner. Dies entspricht dem Aufbau von koreferenten (sich auf denselben Gegenstand beziehenden) Phrasen im Text: Üblicherweise wird zuerst der speziellere Begriff genannt und dann der allgemeinere.

Im dritten Satz werden zwei Pronomina verwendet, zunächst das Personalpronomen *er*, dann das Possessivpronomen *seine*. Auch das System kann, wie der lesende Mensch, die Gewissheit gewinnen, dass beide nur auf Ernst Ludwig Kirchner verweisen können. Ernst Ludwig Kirchner *isa* Mann; also ist es zumindest möglich, dass *er* und *seine* auf Ernst Ludwig Kirchner verweisen (dass Kirchner und der Künstler identisch sind, weiß das System zu diesem Zeitpunkt schon). Die Möglichkeit wird zur Gewissheit, denn das einzige andere männliche Substantiv, der Erste Weltkrieg, steht erstens viel weiter entfernt, als es für das Bezugswort eines Pronomens üblich ist, und ist zweitens dem System als Ereignis bekannt und damit als etwas, das weder etwas erträgt noch beurlaubt wird.

Eine weitere große Anwendung erarbeiten wir zurzeit im Rahmen des von der Europä-

ischen Union geförderten Projekts CoSyne (*Multilingual Content Synchronization with Wikis*). Ein Wiki ist ein von vielen Benutzern kooperativ erstellter Inhalt. Häufig existieren Versionen desselben Wikis in mehreren Sprachen nebeneinander her. Prominentestes Beispiel sind die verschiedenen Sprachversionen der Wikipedia; aber auch international agierende Großfirmen dokumentieren ihr internes Wissen, indem alle Beteiligten ohne zentralisierte Arbeitsabläufe in ein und dasselbe Dokument Inhalte einschreiben und dort bearbeiten.

Die dezentrale Arbeitsweise bringt es mit sich, dass häufig die verschiedenen Sprachversionen eines Artikels denselben Gegenstand in sehr unterschiedlicher Weise behandeln. Durch einen automatischen Abgleich dieser Versionen können beide sehr gewinnen, indem Fehlendes eingefügt und möglicherweise Falsches eliminiert wird.

Im Projekt CoSyne sollen Methoden und Computerprogramme entwickelt werden, die erkennen, welche Teile in mehrsprachigen Wikis den gleichen Inhalt haben, feststellen, welche Inhalte in anderen Sprachen fehlen, diese automatisch mit Hilfe eines statistikbasierten Übersetzungsprogramms in die andere Sprache übertragen und an der richtigen Stelle einfügen. Im Allgemeinen wird ein menschlicher Benutzer an diesen Änderungen etwas zu korrigieren haben. Anhand dieser Korrekturen soll das System einen Lernprozess vollführen und so das automatische Übersetzungsprogramm verbessern.

Bereits zur Erkennung der Inhaltsgleichheit ist Wissen erforderlich, das über den Inhalt eines gewöhnlichen Lexikons hinausgeht. Die Wissensbasis kann helfen, Ausdrücke miteinander zu verbinden, die nicht einfach Übersetzungen voneinander, aber gleichwohl semantisch miteinander verwandt sind (Bild S. 100/101). So lässt sich feststellen, welche Abschnitte, Sätze und Teilsätze in welcher Sprache fehlen. Diese Teile soll das System einem statistikbasierten Übersetzungsprogramm anvertrauen und das Ergebnis an der richtigen Stelle einfügen, die es wiederum durch eine strukturelle Analyse der Dokumente bestimmt.

Wir hoffen, dass die Erschließung der Wissensquelle Wikipedia über die genannten Anwendungen hinaus viele weitere Verfahren der Computerlinguistik entscheidend voranbringen kann. Nebenbei haben die hier vorgestellten Arbeiten ein weiteres Mal gezeigt, dass Wikipedia eine Wissensquelle von sehr hoher Qualität ist, die den Vergleich mit manuell erzeugten Wissensquellen und anderen Enzyklopädien nicht zu scheuen braucht. <

# Wie bringt man Teflon dazu, an der Pfanne zu haften?

Manuela Kuhar recherchierte bei Beschichtungsunternehmen.



**Pfannen, Raumanzüge, Kabel und Brillen haben etwas gemeinsam: Bei ihnen allen kommt das Material Teflon (Polytetrafluorethen) zum Einsatz.**

**Teflon wurde 1943 bei der Entwicklung der Atombombe eingesetzt, um Chemikalienbehälter vor Korrosion zu schützen.**



ASTRONAUT: NASA; BRILLE: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; PFANNE UND TEFLON-LOGO: DUPONT; WARNSYMBOL FÜR RADIOAKTIVITÄT: GARY BASS; ATOMBOMBE: US DEPT. OF DEFENSE

Selbst Königswasser, eine überaus aggressive Mischung aus Salz- und Salpetersäure, lässt den unter dem Markennamen Teflon bekannten Kunststoff völlig kalt. Denn Polytetrafluorethen (PTFE) besteht aus Kohlenstoffketten, die von Fluoratomen umgeben sind. Die Bindung zwischen einem Fluor- und einem Kohlenstoffatom ist die stabilste Einfachbindung, die Kohlenstoff überhaupt eingehen kann. Seine Weigerung, mit anderen Stoffen chemisch zu reagieren, ist beispielsweise überall dort nützlich, wo Korrosion durch aggressive Chemikalien verhindert werden soll.

PTFE ist aber nicht nur reaktionsträge, es haftet zudem nur ungern an anderen Oberflächen. Daher wird es als Schmiermittel verwendet, für die Beschichtung von Implantaten und seit 1954 auch für Pfannen (es ist also kein Spin-off der amerikanischen Weltraumfahrt, wurde dort lediglich intensiv genutzt).

Diese Antihafteigenschaften rühren zum einen daher, dass das Molekül insgesamt unipolar ist und deshalb auch keine auf elektrostatische Anziehung beruhende Bindung eingehen kann; auch Wasserstoffbrücken zu anderen Stoffen bilden sich nicht aus. Somit wirken an der Grenzfläche zu anderen Materialien nur die sehr schwachen Van-der-Waals-Kräfte. Deshalb also ist die Adhäsion gering und Angebranntes lässt sich leicht vom Pfannenboden entfernen. Zum anderen ist die Oberfläche einer Teflonbeschichtung extrem glatt, was die mechanische Verankerung erschwert. Dazu kommt, dass die Oberflächenspannung von Öl und anderen Flüssigkeiten größer ist als die einer PTFE-Schicht. Tropfen ziehen sich daher zusammen, ohne die Oberfläche zu benetzen, und in der Flüssigkeit gelöste Feststoffe können sich letztlich nicht auf der Oberfläche ablagern.

Wie aber gelingt es, eine derart ungesellige Substanz auf Edelstahl oder Aluminium zu fixieren? Nur durch einen Trick: Zuerst wird die Metalloberfläche durch Sandstrahlen stark aufgeraut, um die Kontaktfläche zwischen Metall und Beschichtung zu vergrößern, dann wird ein Grundierungslack aufgesprüht, die in kleinste Erhebungen eindringt. Er trocknet bei rund 140 Grad Celsius, bevor zwei weitere Lackschichten nass in nass aufgesprüht werden (Billigprodukte erhalten nur eine oder zwei Schichten). Dieser Lack besteht bei allen drei Schichten aus wasserbasiertem Lösungsmittel, einem Kunstharz als Bindemittel sowie darin verteilten PTFE-Partikeln. Deren Anteil steigt von der ersten zur dritten Schicht an.

Schließlich wird das Ganze innerhalb von 30 Minuten langsam auf 400 Grad Celsius erhitzt. Dabei verdampft das Lösungsmittel, während das Harz mit dem der darunterliegenden Schicht verklebt und aushärtet. Die Teflonpartikel sammeln sich bevorzugt an der Oberfläche der Beschichtung. Um diese noch kratzfester zu machen, setzen die Hersteller der zweiten Schicht auch noch Hartminerale zu.

Schließlich wird das Ganze innerhalb von 30 Minuten langsam auf 400 Grad Celsius erhitzt. Dabei verdampft das Lösungsmittel, während das Harz mit dem der darunterliegenden Schicht verklebt und aushärtet. Die Teflonpartikel sammeln sich bevorzugt an der Oberfläche der Beschichtung. Um diese noch kratzfester zu machen, setzen die Hersteller der zweiten Schicht auch noch Hartminerale zu.

**Manuela Kuhar** ist Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

BILDBAND

## Wissenschaftliche Bilderbücher

Systematik der Sterne, der Insekten und der Vögel ist sicher sehr verdienstvoll; aber die Objekte lebhaftig in erstklassigen Fotos sind einfach noch schöner.



**T**WAN («The World at Night») ist ein elitärer Kreis von prominenten Astrofotografen aus aller Welt, die sich höchster Qualität und einem speziellen Reinheitsgebot verpflichtet haben: keine Nachbearbeitung der Digitalfotos am Computer.

Manche Bilder kann man trotzdem kaum glauben: Dass die Gebäudefassade oder der einzeln stehende Baum sein auffälliges Licht von einer Taschenlampe erhalten hat, ist ja noch vorstellbar; aber ein ganzer Gebirgszug? Da muss der Fotograf die ersten Strahlen der Morgensonne gerade richtig abgepasst haben. Markante Werke der Architektur wie die Akropolis, die Ruinen von Persepolis oder die Schah-Moschee von Isfahan dienen als wirkungsvolle Vordergründe. Generell haben die TWAN-Fotografen immer ein Stück Erdoberfläche in ihre Bilder einbezogen.

Man sieht eine eindrucksvolle rosa Wolke – und es kann gar nicht anders sein, als

dass sie von dem Blitz erleuchtet wird, der ihr entspringt. Der südafrikanische Köcherbaum hat seine außerirdisch wirkende Farbe nur von einer Taschenlampe, während die Wölkchen am Himmel wirklich außerirdisch sind: Es handelt sich um die große und die kleine Magellansche Wolke. Der Kaktus vor der imposanten Vollmondscheibe gibt fast eine bessere Westernkulisse ab als die genreübliche Sonne (Bild unten).

Die Seiten mit dem weißen Hintergrund können Sie getrost überblättern. Völkerverständigung und alle anderen edlen Ziele, die dort propagiert werden, sind ja lobenswert, gehören aber eigentlich nicht zum Thema. Nur die Bildbeschreibungen hinten sind äußerst ergiebig; manche Einzelheit hätte man lieber am Bild selbst gelesen. Neun Seiten technische Hinweise für den Nachahmer runden das Buch ab.

Eine Sammlung von Bildern, wie man sie so noch nicht gesehen hat!

**R**ichard Jones, in der Entomologenszene als Autor zahlreicher einschlägiger Texte bekannt, ist ein Extremophiler im Wortsinn. Das größte, kleinste, seltenste, schönste, schleimigste, giftigste, stromlinienförmigste Insekt, der eindrucksvollste Blutsucker, die hässlichste Larve, die haarigsten Beine, die elegantesten Eier, der beste Musiker und viele andere haben es ihm angetan. Offensichtlich hat Jones zuerst alles zusammengetragen, was es an Extremen im Insektenreich zu finden gibt, und im zweiten Schritt die prachtvollen Bilder zusammengesucht, die sofort den Blick des Betrachters fangen. Beim Bildersuchen war er sehr gründlich; nur in wenigen Fällen sieht man, dass er qualitative Kompromisse schließen musste.

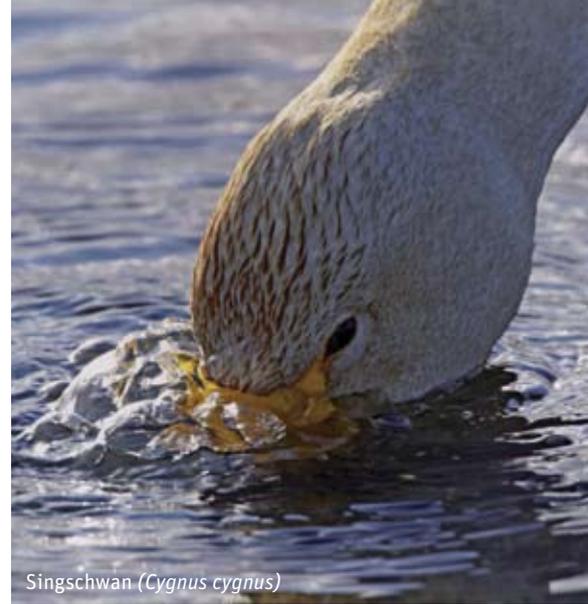
Die Larve einer Schwebfliege der Gattung *Microdon* ist von vier verschiedenen Naturforschern mit einer Nacktschnecke verwechselt worden. In der Tat bewegt sie sich sehr langsam und schmiegt sich mit ih-



Vollmond über dem Kakteenwald des Saguaro-Nationalparks in Arizona (USA)



Bartkauz (*Strix nebulosa*)



Singschwan (*Cygnus cygnus*)



Baumhopper  
(*Dryococelus australis*)



Holz-Schlupfwespe  
(*Ryssa spec.*)

rem glatten Körper so dicht an den Untergrund, dass die Ameisen, deren Larven sie verzehrt, keinen Angriffspunkt zum Zubeißen finden. Honigtropfameisen füllen mit Nektar und Honigtau, den die Nestgenossinnen anliefern, ihren Unterleib, bis er im Extremfall auf das Vierhundertfache der ursprünglichen Größe anschwillt. Mit diesem Vorrat übersteht die Ameisenkolonie lange Hungerzeiten.

So hässlich finde ich die »hässlichste Insektenlarve« gar nicht. Die Larve des Buchen-Zahnspinners sitzt die meiste Zeit regungslos herum; durch Fuchteln mit den grotesk verlängerten Vorderbeinen kann sie sogar Vögeln den Appetit verderben.

Der Baumhopper (Bild links) galt bereits 1930 als ausgestorben. Aber im Jahr 2001 entdeckte man auf dem einzigen Strauch einer ansonsten baumlosen Felsenklippe 24 Exemplare dieser Art, die auf der benachbarten Hauptinsel längst den Ratten zum Opfer gefallen war.

Bei der Holz-Schlupfwespe hat die Lege- röhre die Gestalt einer Injektionsnadel und ist länger als der übrige Körper (Bild links unten).

Die Bilder sind so eindrucksvoll und die Texte so kurzweilig, dass man (»einer geht doch noch«) das Buch gar nicht mehr aus der Hand legen mag.

Anscheinend ist im hohen Norden die Luft irgendwie klarer und das Licht besser als hier zu Lande. Die regionalen Verhältnisse geben dem Vogelbilderbuch der vier Finnen – das überwiegend Bilder aus deren Heimat enthält – einen ganz eigenen Reiz. Die Fotos umspannen den kompletten Lebenszyklus der Vögel; ihre Qualität ist über jeden Zweifel erhaben, und die Fotografen haben sich sichtlich Mühe gegeben, nicht die immer wieder gleichen Motive zu reproduzieren.

Ungewöhnlich ist der Schwan, der seinen Kopf zum Blubbern unter Wasser steckt (Bild oben), groß und bedrohlich der Bartkauz auf der Jagd, Auge in Auge mit dem Fotografen (Bild links oben). Grünlinge im Kampf wirken wie ein japanischer Holzschnitt. Und den Storch hat der Bildkünstler just in dem Moment erwischt, wo er mit dem großen roten Schnabel einen Barsch aufspießt.

Mit dem Vorrang für die künstlerische Wirkung der Bilder hat es der Verlag ein bisschen übertrieben. Schon recht, wenn auch lästig, dass man die ausführlichen Erläuterungen in ein Verzeichnis am Schluss verbannt; aber warum muss man zum Wiedererkennen statt der vollständigen Bilder Ausschnitte verwenden und dann auch noch die Seitenzahlen weglassen?

Alice Krüßmann

Die Rezensentin leitet die Bildredaktion von »Spektrum der Wissenschaft«.

Stefan Seip, Gernot Meiser, Babak A. Tafreshi (Hg.)

**Zauber der Sterne**

The World at Night

Die Wunder des Firmaments über den schönsten Landschaften der Erde

Franckh-Kosmos, Stuttgart 2010. 208 Seiten, € 49,90

Richard Jones

**Rekorde der Insektenwelt**

130 Extreme

Aus dem Englischen von Monika Niehaus und Coralie Wink. Haupt, Bern 2010. 288 Seiten, € 39,90

Arto Juvonen, Tomi Muukkonen, Jari Peltomäki, Markus Varesvuo

**Vogelwild**

Aus dem Finnischen von Gabriele Schrey-Vasara. Frederking & Thaler, München 2010. 192 Seiten, € 39,90



PHYSIK

## Hannas Welt

Jörg Hüfner und Rudolf Löhken führen den Leser auf eine humorvoll-anekdotische Reise durch das Gebäude der Physik.

»Darf ich Sie etwas Persönliches fragen? Verstehen Physiker eigentlich die Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik?« Hanna, die junge Besucherin auf der Reise durch das Gebäude der Physik, hat soeben gemeinsam mit ihrem Großvater vom Doppelspaltexperiment erfahren, vom Welle-Teilchen-Dualismus und der radioaktiven Strahlung. Die Physiker, die sie auf ihrem Weg begleiten, bemühen sich, ihre vielen kritischen und meist etwas altklugen Fragen verständlich und trotzdem nichttrivial zu beantworten. Ob man die Quantenphysik verstehe, so erklärt man ihr, hänge davon ab, ob man nur den Formalismus beherrschen oder eine Anschauung gewinnen will.

»Physik ohne Ende« erinnert an das Philosophie-Kultbuch »Sofies Welt« von Jostein Gaarder, ist allerdings nicht ganz so romanhaft geschrieben. Hanna und ihr Großvater besuchen ein Museum und beginnen mit den Räumen, in denen sich die »Moderne Physik« befindet. Erst im zweiten Teil des Buchs werden sie auch Newton, Kopernikus und Faraday kennen lernen.

Mit Einsteins spezieller und allgemeiner Relativitätstheorie geht es los – fast ohne Formeln, anschaulich geschildert und mit schwarz-weißen Bildern unterlegt. Zwischendurch darf Hanna immer gerade die Fragen stellen, die einem interessierten Laien auf den Lippen brennen würden.

In einzelnen Zimmern des Gebäudes können die Besucher – teilweise anhand von Experimenten – die Gesetze der Elementarteilchenwelt und der Quantenphysik, das Funktionsprinzip von Atombomben, den Sonnenzyklus und den Urknall nachvollziehen. Theoretischere Abschnitte gibt es ebenfalls, allerdings kleiner gedruckt, um das Überspringen zu erleichtern. Das Niveau des Rundgangs entspricht dem der »Vorlesung für Nichtphysiker«, welche die Autoren mehrfach an der Universität Heidelberg gehalten haben.

Einen wesentlichen Teil des Leseerlebnisses bieten die anekdotischen Anmerkungen des Großvaters und die Geschichten aus dem Leben der »Menschen hinter den Gleichungen«. Die zahlreichen Details erwecken die gesichtslosen Namen unvergesslich zum Leben. Wer hätte erraten, dass hinter



**Richard Feynman (1918–1988): »Physik ist wie Sex. Beide können interessante Ergebnisse hervorbringen, aber das ist nicht der Grund, weshalb wir Spaß daran haben.«**

der brieflichen Auskunft »Ich bin hier ein ehrwürdiger eidgenössischer Tintenscheißer mit ordentlichem Gehalt« niemand anders steckte als Albert Einstein? Und macht es Wilhelm Conrad Röntgen nicht außerordentlich sympathisch, wenn man lernt, dass er mit 17 der Schule verwiesen wurde, weil er eine Karikatur von einem Lehrer angefertigt haben sollte? Röntgen hat den wahren Urheber, einen Schulfreund, nicht verraten.

Der Physikprofessor Jörg Hüfner und der Gymnasiallehrer Rudolf Löhken, beide mittlerweile im Ruhestand, gestalten ihre Reise

durch die Physik knapp, dennoch gehaltvoll und dabei unterhaltsam. Fast immer gelingt es ihnen, auf wenigen Seiten die Essenz eines physikalischen Problems darzustellen. Nur an manchen Stellen fällt die Tiefe der Darstellung der Knappheit zum Opfer; so fehlt bei der Darstellung des Einstein-Podolski-Rosen-Paradoxons der Vergleich mit der Alltagsphysik, der das Paradoxe erst richtig herausgearbeitet hätte. Umso mehr habe ich mich gefreut, dass eine von einer Konzertbühne geworfene Rose den Kollaps der quantenmechanischen Wellenfunktion verdeutlichen durfte.

Auf gerade einmal 330 Seiten besprechen Hüfner und Löhken sogar die Verletzung der Spiegelsymmetrie in der Elementarteilchenwelt, erläutern grob den LHC und seine Ziele und führen Diskussionen über Licht und Zeit; da darf man sich über mangelnde Ausführlichkeit nicht zu sehr beschweren. Umso mehr wird der interessierte Leser in den Literaturhinweisen am Ende jedes Kapitels stöbern wollen.

Nach vergnüglicher Lektüre möchte ich das Buch den vorgebildeten und interessierten Laien ebenso wie den Physikern empfehlen. Am Ende ist der Leser mit Hanna und dem Großvater durch ein großes Museum gewandert, dessen Zimmer (fast) alle erhellt worden sind.

Vera Spillner

Die Rezensentin ist Physikerin und promovierte Philosophin. Sie arbeitet als freie Journalistin in Paris.

Jörg Hüfner und Rudolf Löhken

### Physik ohne Ende

Eine geführte Tour von Kopernikus bis Hawking

Wiley-VCH, Weinheim 2010.  
342 Seiten, € 24,90



MEDIZIN

## Gesundheit ist machbar

Jörg Blech verurteilt den genetischen Determinismus und ruft zu mehr Eigenverantwortung auf.

Jörg Blech ist Molekularbiologe und Journalist. Mit Bestsellern wie »Die Krankheitserfinder«, »Heillose Medizin« und »Heilen mit Bewegung« kritisierte er vor allem Ärzte und Pharmaindustrie. Seit 1999 arbeitet er in der Wissenschaftsredaktion des »Spiegel«.

Der Klappentext seines neuen Buchs verspricht revolutionäre Schlussfolgerungen und Auswirkungen auf unsere persönliche und gesellschaftliche Lebensweise. Sein Gesundheitsrezept bringt allerdings nichts weiter als die bekannten Ratschläge: Führe ein gesundes und möglichst optimistisches

# Mit den Meeren leben

Leben, gehe täglich flott spazieren, meditiere und ernähre dich gesund. Blechs Hauptanliegen ist wohl eher, dem Hype um die Gene und die personalisierte Medizin ein Ende zu setzen. Nicht die Gene sind für unsere Gesundheit verantwortlich, sondern wir selbst – das ist seine Botschaft.

Tatsächlich gibt es nur wenige Erkrankungen, die durch ein einzelnes Gen verursacht werden. Bei allen anderen Krankheiten liegt höchstens eine genetische Anfälligkeit vor, die sich aber nicht bemerkbar machen muss. Je mehr Gene an einer Erkrankung beteiligt sind, desto geringer ist ihre Bedeutung, und desto größer wird der Umwelteinfluss. Blech spricht von zahllosen »unverdauten genetischen Assoziationen«, welche die Forscher einfach dadurch hervorbringen, dass sie mit großen Datenmengen lange genug herumrechnen. Ihrer Bedeutungslosigkeit zum Trotz würden sie in den Medien als »Gen der Woche« hochgespielt, mit dem Effekt, dass deren Konsument Gene nicht nur für viele Krankheiten, sondern auch für Stimmung und Verhalten verantwortlich mache. Blech zeigt, dass die meisten wissenschaftlichen Entdeckungen »neuer« Gene (»Depressionsgen«, »Mathegen«, »Kriegergen«) entweder nicht replizierbare Zufallsbefunde oder eher auf kulturelle Einflüsse denn auf genetische Ursachen zurückzuführen waren.

Die Schuld an dieser Sensationsmache sieht Blech bei den Wissenschaftlern, die unter enormem Publikationsdruck ihre Ergebnisse mit statistischen Methoden wichtiger machen, als sie sind. Er scheint dabei zu übersehen, dass es primär Journalisten sind, die wissenschaftliche Veröffentlichungen zu publikumswirksamen Schlagzeilen verarbeiten. Schließlich stehen auch sie unter einem gewissen Publikationsdruck.

Liest man nicht nur Überschrift und Zusammenfassung eines wissenschaftlichen Artikels, sondern den ganzen Text, insbesondere die Diskussion, so stellt man fest, dass die Wissenschaftler ihre eigenen Ergebnisse in der Regel durchaus kritisch bewerten und die in der Überschrift zu findende Aussage dadurch relativieren, dass sie ihre Befunde in den Gesamtkontext einordnen. Außerdem sollte man berücksichtigen, dass die Schwerpunkte in der medizinischen Forschung meist nicht durch die Wissenschaftler bestimmt werden, sondern politisch gewollt sind und durch die Vergabe von Forschungsmitteln gelenkt werden.

Nachdem Blech den Genen den Garaus gemacht hat, liefert er anschließend sehr eindrucksvolle Beispiele aus der epigene-



Der „World Ocean Review“ ist eine einzigartige Publikation über den Zustand unserer Meere und spiegelt den aktuellen Stand der Wissenschaft wider. Analysiert werden der Zusammenhang zwischen Klimawandel und marinen Ökosystemen und die konkreten Folgen für Küsten- und Meeresbewohner. Die Probleme der Überfischung und Verschmutzung unserer Ozeane werden untersucht, aber auch Chancen und Risiken aufgezeigt, die die Meere bei der Behandlung von Krankheiten oder bei der Sicherung unserer Energieversorgung spielen können.

Nähere Infos und wie Sie den „WOR“ kostenfrei bestellen können finden Sie unter: [www.worldoceanreview.com](http://www.worldoceanreview.com)

tischen Forschung, wonach die Steuerung der Gene für unsere Gesundheit und unser Wohlbefinden viel wichtiger ist als die Gene selbst. Die Steuerung steht damit im wahren Sinn des Wortes »über« den Genen. Die Epigenetik beschäftigt sich mit den äußeren Einflüssen, die – über eine chemische Änderung, die so genannte Methylierung – bestimmen, welche Gene wann und wie häufig abgelesen werden (Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2010 »Zufall und Chaos«, S. 32). Blech zitiert zahlreiche namhafte Wissenschaftler und belegt mit überprüf- baren Quellen, dass nicht nur Umweltfak- toren wie Luftverschmutzung oder Ernäh- rung, sondern auch Erfahrungen, Gedanken und Gefühle diese genetische Steuerung und sogar die Anatomie unseres Körpers beeinflussen.

Millionen von Steuergeldern werden da- für ausgegeben, Gene für Stressresistenz, Depression, Übergewicht oder Krebs zu fin- den. Genomanalysen sollen eine personali- sierte Medizin, genetische Risikoprofile und maßgeschneiderte Medikamente ermögli- chen. Alles nur Wunschdenken, sagt Blech. Er scheint sich darüber zu wundern, dass alle Welt für alle möglichen Dinge ein Gen

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869

verantwortlich machen möchte, gibt sich aber im Epilog selbst die Antwort: »Die Ge- netik erscheint vielen Menschen wie eine neue Religion. Ihr Schicksal, so denken sie, habe sich in ihren Genen bereits entschie- den. Der Glaube an die Allmacht der Biolo- gie spendet Trost und schenkt Entlastung«, das, was früher der Glaube an Gott leistete. Wenn es an den Genen liegt, dass man krank wird, dann ist man auch nicht dafür ver- antwortlich. Mit diesem Trugschluss räumt Blech in seinem Buch gründlich auf.

Allerdings verspricht der Titel des Buchs mehr, als er letztlich halten kann. Über die altbekannten Ratschläge zur gesunden Le- bensführung hinaus gibt der Autor seinen Lesern keine Anleitungen, wie sie ihre Gene steuern können. Wahrscheinlich kann es solche Rezepte gar nicht geben. Auch Men- schen, die einen gesunden Lebensstil pfe- gen, werden manchmal krank. Über viele

äußere Faktoren haben wir eben weder die Macht noch die Kontrolle. Vielleicht ist es – Epigenetik hin oder her – letztlich auch eine Gnade, gesund zu sein.

Blech schafft es immer wieder, wissen- schaftliche Inhalte ansprechend und lesbar darzustellen und den Leser mit interes- santen Einstiegen und kleinen Geschichten rund um seine Recherchen zu fesseln. Das Buch dürfte vom interessierten Laien bis zum habilitierten Neurowissenschaftler ei- nen weiten Kreis von Lesern ansprechen. Lesenswert trotz einiger Kritikpunkte, vor allem wegen der ausführlichen Zusammen- stellung wissenschaftlicher Belege für epi- genetische Einflüsse auf die Gesundheit.

Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschafts- journalistin in Ladenburg.

Jörg Blech

### Gene sind kein Schicksal

Wie wir unsere Erbanlagen und unser Leben steuern können

S. Fischer, Frankfurt am Main 2010.  
288 Seiten, € 18,95



## ZOOLOGIE

### Tierischer Sex

Amüsante Geschichten über das bizarre Paarungs- verhalten geschlechtsreifer Naturbewohner – in zweifacher Ausführung

»Vorsicht! Dieses Buch ist für Jugendliche unter 16 Jahren nicht geeignet. Es ent- hält explizite Darstellungen sexueller Hand- lungen und einschlägiges Vokabular«, warnt der Text auf dem Rückendeckel und fährt fort: »Zur Nachahmung nur bedingt empfo- len«. In der Tat: Ein Doppelpenis zur Einfüh- rung in eine doppelte Vagina und die über- lange Version, mit welcher der Jüngling an der halben Familie vorbei die alte Dame be- gatten kann, klingen eher nach schlüpfriger Internetwerbung als nach Wissenschaft.

Ganz so schlimm ist die Sache nicht: To- bias Niemann schildert in »Kamasutra kopf- über« das originelle Fortpflanzungsverhalten

**Damit auch jeder ihren schönen Kehllappen zur Kenntnis nimmt, machen Anolimännchen Liegestütze, bevor sie ihn ausklappen.**

diverser Tierarten – vom Nordopossum, bei dem Männlein wie Weiblein über besagte doppelte Geschlechtsorgane verfügen, über Fledermäuse, die es kopfüber hängend von hinten tun, bis hin zum Maulwurf, der seine Geschlechtspartnerin nach der Begattung mit einer Art Keuschheitspfropf zustöpselt, damit auch ja kein anderer mehr zum Zuge kommt. Reine Naturbetrachtungen also.

Der Autor ist selbst Biologe und als Ge- schäftsführer eines interdisziplinären For- schungszentrums für Neurowissenschaften eher mit anderen Themen befasst. Aber die Vielfalt der Fortpflanzungsrituale auf un- serem Planeten hat es ihm ganz offensicht- lich angetan. Und er hat Spaß daran, seine tierischen Protagonisten in herrlichster Weise menscheln zu lassen. Der amüsant- schlüpfrige Unterton garantiert lautes La- chen während der Lektüre.



Ganze Familien der Pantoffelschnecke – unter Austernzüchtern besser als Austernpest bekannt – verbacken sich zu einer Art Turm. Ganz zuoberst sitzt der jüngste Vertreter der Sippe, ein Männchen, das aber schon mit der nächsten Generation langsam, aber sicher verweiblichen wird. In den Schichten darunter stecken Schnecken, die beide Geschlechter tragen, aber unfruchtbar sind. Ganz unten dann als Familienälteste das fruchtbare Weibchen, das es nun zu begatten gilt – und zwar an sämtlichen anderen Generationen vorbei, mit dem eingangs erwähnten Riesenpenis.

»Zur Nachahmung nur bedingt empfohlen« ist auch das Leben des Riesenanglers. Ein männlicher Vertreter dieses Tiefseefischs lässt von einem einmal gefundenen Weibchen nie mehr ab; er verwächst für den Rest seines Daseins mit ihr, und seine Organe verkümmern – bis auf das eine.

Insgesamt 77 der originellsten Paarungsmethoden im Tierreich hat Niemann in seinem Buch zusammengetragen. Viele davon sind mit lustigen Illustrationen des österreichischen Grafikers Günther Mattei geschmückt. Bei durchschnittlich eineinhalb Seiten pro Tier bleibt allerdings kein Raum für große Erklärungen. »Kamasutra kopfüber.« Die 77 originellsten Formen der Fortpflanzung eignet sich eher als kurzweilige Gute-nacht- oder Zwischendurchlektüre denn als Werk zur Wissenserweiterung.

Wer mehr erfahren möchte, wird bei Markus Bennemanns »Evolution im Liebesrausch« fündig. Auch Bennemann hat (unter anderem) Biologie studiert und als freier Autor bereits einen Band veröffentlicht, in dem er Tötungsdelikte im Tierreich aufdeckt (»Im Fadenkreuz des Schützenfisches. Die raffiniertesten Morde im Tierreich«).

Anders als Niemann beschränkt er sich nicht auf das schlichte Beschreiben, sondern bemüht auch wissenschaftliche Untersuchungen. So erfahren wir etwa, dass die Leipziger Primatologen Gottfried Hohmann und Barbara Furth das gängige Bild von den Bonobos hinterfragen. Ihrer Ansicht nach verdanken die berühmten Zwergschimpan-

**Der korkenzieherartige Penis der Argentinischen Schwarzkopfruderente *Oxyura vittata* ist im erigierten Zustand länger als der restliche Körper; an der Spitze ist er weich und bürstenähnlich geformt.**

Bei Bonobos herrschen in Fortpflanzungsfragen stets chronisch ungeklärte Verhältnisse.



sen ihr entspannt-paradiesisches Leben, bestimmt durch »Love, Peace and Happiness«, schlicht der Tatsache, dass sie es sich leisten können. Sie leben in einer Umgebung, in der es Nahrung in Hülle und Fülle gibt. Herrscht dagegen Mangel, so halten sie es wie ihr größerer Verwandter, der Gemeine Schimpanse: Sie werden gemein! Plötzlich steigt auch hier der Aggressionspegel, und mit dem Kopulieren in allen (Lebens-)Lagen ist es schnell vorbei. Auch wenn ein Weibchen fruchtbar ist und es nicht mehr allein um nette Liebesspiele geht, sondern um die Weitergabe der Gene, verstehen die Bonobos keinen Spaß mehr.

Dem wissenschaftlichen Anspruch entsprechend ist Bennemanns Buch etwas anders aufgebaut. Statt einzelne Tierarten und ihre Praktiken abzuklappern, gliedert sich »Die Evolution im Liebesrausch« nach sexuellen Vorlieben mit Kapitelüberschriften wie »Ewige Jungfrauen«, »Transvestiten« oder »Samenräuber« und behandelt im jeweiligen Kapitel gleich mehrere Vertreter, die dazu etwas beizutragen haben.

Auch Bennemann fehlt es nicht an Wortwitz und dem Hang zu zweideutigen Formulierungen, so dass der Leser auch hier genug zu lachen hat. Kleine Kostprobe gefällig? Die männlichen Strauße

gehören zu den wenigen Vögeln (wer hat eigentlich den bescheuerten Begriff »vögel« erfunden?), die eine Art Penis ihr Eigen nennen können. Den lässt er dann auch »während der Balzdarbietungen stolz vor- und zurückwippen«. Kommt der Riesenvogel dann endlich zur Sache, »macht er zunächst noch seine rhythmischen Seitwärtsbewegungen, geht jedoch bald dazu über, dermaßen erregt die weißen Endfedern seiner schwarzen Flügel zu schütteln, dass bald auch noch das dümmste Gnu kapiert, was die beiden Strauße dort treiben.« Und was tut die Henne so lange? Sie hackt mit dem Schnabel einen Halbkreis aus kleinen Einkerbungen in den Boden! Mit diesem Wissen, so meint Bennemann, könne man sogar bei der nächsten Safari prahlen.

Wenn Sie mehr über tierischen Sex erfahren wollen, dann schmökern Sie am besten in beiden Büchern. Keines vermag das andere wirklich zu ersetzen, und lustig sind sie beide allemal.

Stefanie Reinberger

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

Tobias Niemann

**Kamasutra kopfüber**

Die 77 originellsten Formen der Fortpflanzung

C.H.Beck, München 2010.

176 Seiten, € 17,95

Markus Bennemann

**Die Evolution im Liebesrausch**

Das bizarre Paarungsverhalten der Tiere

Eichborn, Frankfurt am Main 2010.

304 Seiten, € 19,95



# CAREERS

**TURNING POINT** Punk rocker seeks to make an impact in evolutionary biology **p.1143**

**EUROPE** The red tape loosens on scientific research grants **p.1143**

**NATUREJOBS** For the latest career listings and advice [www.naturejobs.com](http://www.naturejobs.com)



D. AUSSERHOFER

The Philological Library at the Free University of Berlin was built in 2005 as part of a continuing renovation of the campus.

## REGIONS

# Science city chic

*Berlin is an international hotspot for young scientists. Now it has to provide the incentives to help them stay long term.*

BY QUIRIN SCHIERMEIER

Francesca Spagnoli, a native of Italy, spent seven years as a postdoc at Rockefeller University in New York. Two years ago, looking for an opportunity to start her own research group, she moved to Berlin, where she has since secured a group-leader position at the Max Delbrück Centre for Molecular Medicine (MDC). In a sense, the 40-year-old stem-cell researcher is a typical Berlin scientist. Although she enjoys the city's charms, and benefits from its science strengths, she is aware that the scarcity of permanent positions here will sooner or later force her to move on. "Berlin is definitely one of the best places for science in Europe now," she says. "But as tenure is rare

here, I will probably have to move again."

Berlin's international flair and relatively cheap living — unlike in London, Munich or Paris, a decent two-room apartment can be leased for about €400 (US\$550) per month — appeals to artists, hipsters and scientists alike. Young scientists come in search of career springboards at the numerous labs in and around the capital. The sheer density of science in the region is impressive: Berlin and nearby Potsdam host four large research universities, eight Max Planck institutes, three national research centres, a well-established biotechnology industry and the headquarters of several internationally operating pharmaceutical companies.

"In terms of potential and creativity, Berlin need not fear comparison with emerging

science cities such as Singapore or Shanghai," says Detlev Ganten, founding director of the MDC. The region's strong points, he says, are its strengths across many fields, from innovative research in astrophysics and cosmology at the Albert Einstein Institute in Potsdam to strong polymer and materials research centres, and the MDC's research on cells, tissues, organisms and individual diseases.

In general, scientists in Berlin benefit from the country's good funding opportunities. Germany's science budget has grown faster than those of most other countries in and outside Europe (see *Nature* **467**, 499–500; 2010), and it is complemented by European funding. Just one year into her job at the MDC, for example, Spagnoli was awarded one of the prestigious — and, at €1.65 million, generous — starting grants by the European Research Council (ERC).

Yet, despite the city's science assets, its continued emergence as a science powerhouse is not a given. Berlin hosts no research institution in the same league as the top-ranked academic institutions in Britain and the United States. Ranked 178 in the *Times Higher Education (THE)* magazine's annual list of the world's top 200 universities in October, Humboldt University lags far behind the Harvards, Cambridges ▶

► and Oxfords of the global science community. So does the Free University of Berlin — one of nine German ‘elite’ universities, which each receive €50 million a year in extra support from the federal science ministry’s ‘excellence initiative’. It did not even make the *THE* list.

And there are few tenure-track positions, meaning little long-term security for researchers. Until recently, Germany had no tenure-track system at all. It has become an option in the past decade, but remains rare. Advancement in German universities often comes by a complicated procedure that lacks transparency.

Meanwhile, public debts and budget constraints continue to plague Berlin. Perhaps the biggest challenge is the precarious institutional funding situation in medical science. On the basis of the government’s own funding standards for medical science, Berlin has not fared well. The Charité, a multi-campus medical school for both Humboldt and the Free University, had to cut almost €250 million from its budget for 2005–10. This means that overdue investments in building and renovation had to be repeatedly postponed. It hasn’t yet hampered the science much, says Ganten, who’s also the former head of the Charité, but he fears it might in the long term. To make the most of its strong points and to continue to attract talent, Berlin will have to sustain financial support, overcome some political wrangling and create more tenure-track positions to convince more young scientists to stay in the city.

#### POLITICAL SUPPORT

Members of several political parties in Berlin’s senate, including the Christian Democrats, the Greens and the Free Democrats, are keen to establish Berlin as a major force in the European science landscape. This year, the Berlin senate eventually approved €330 million for the Charité, but renovations of the rundown main Charité clinic in Berlin–Mitte alone would cost some €600 million. The main issue is whether the city can afford to maintain all three Charité sites. In June, Jürgen Zöllner, the Social Democrat science senator, said that all three campuses will remain open. But the number of patient beds in the main clinic in Berlin–Mitte will be cut by 500, starting in 2012.

Nonetheless, Berlin policy-makers and university administrators understand how important science is for its future development, says Ganten. “What’s lacking here,” he says, “is a smart one-stop science marketing scheme of the kind that our Asian competitors master so well.” Ganten would like to see lasting financial support, including a targeted programme to attract high-profile foreign scientists to Berlin — something akin to the success at Singapore’s Biopolis. One problem, he says, is that the Max Planck institutes, Berlin’s universities and the Helmholtz centres rarely collaborate.

The Einstein Foundation, established in 2009, could help to remedy that lack of cross-talk. As a sort of umbrella organization for

Berlin science, it aims to support the state’s research both financially and structurally. But the foundation is already troubled by political infighting. In July, Berlin’s senate criticized its managers’ high salaries. The foundation is to provide more than €40 million for selected science projects in Berlin, but it is not yet clear where the money will come from.

#### EARLY-CAREER ASPIRATIONS

Like Spagnoli, Berlin’s many young scientists enjoy the capital’s lifestyle and reasonable cost of living, and are so far unhampered by the political disputes in the state’s science ministry over budgets and priorities. “Berlin makes it easy for newcomers,” says Spagnoli. “Language is no barrier, my husband has found a nice job, and renting an apartment was no problem at all.”

“Attracting foreign talent to Berlin has become easy,” says Leif Schröder, a group leader at the Leibniz Institute for Molecular Pharmacology. Schröder, who this year also received a €1.5-million ERC starting grant, is developing magnetic resonance imaging techniques for biomarkers in different diseases. His new group comprises Australian, Italian and German postdocs and PhD students. “People started approaching me and suggesting research ideas and collaborations as soon as I arrived. It’s pleasing to see what’s happening here.”

“Berlin hosts a huge pool of scientists from which to choose potential collaborators,” says Ingrid Hotz, an expert on data analysis and visualization at the state-funded Zuse Institute Berlin, which provides advanced computing services for many scientific applications. Hotz leads an independent junior research group funded by the DFG, Germany’s main grant-giving agency. She came to Berlin in 2006, after a three-year stint at the University of California, Davis, and maintains collaborations with groups in hydrodynamics, medicine, geology and gravitational physics at local institutions such as the Max Planck Institute for Gravitational Physics and the Charité. “I am turning other people’s data and experiments into images, so teaming up is everything for me,” she says. “Not all collaborations bear fruit, but fortunately there are more than enough potential research partners around here.”

This is equally true in Potsdam, located less than an hour’s train ride from Berlin Zoo. Potsdam complements the capital’s science base. With around 6,000 academic scientists working at Potsdam’s universities, along with the Max

Planck, Helmholtz and Fraunhofer institutes and the Potsdam Institute for Climate Impact Research, Potsdam has the highest density of researchers anywhere in Germany.

#### FUTURE GROWTH

Despite some funding problems, notably the case of the Charité, there are signs that the Berlin–Brandenburg research base will continue to grow in the next few years. The Berlin Institute for Medical Systems Biology, now on the MDC’s Berlin–Buch campus, will relocate in 2015 to the Humboldt University’s main campus in Berlin–Mitte. The move will substantially expand the MDC’s — and Berlin’s — systems-biology capacities. More than 20 new research groups totalling about 100 scientists, jointly funded by Berlin and the federal government, are to be recruited over the next few years.

The MDC will also become the hub of the planned German centre for cardiovascular research, a mostly federal-government-funded programme involving universities and research institutes across the country. The Berlin School of Public Health, a joint programme by Berlin’s universities aimed at midcareer health professionals, mainly focuses on master’s students with degrees in public health and epidemiology. Students often go on to leadership positions in government, research and non-profit agencies. Ganten hopes that the city can build a reputation as a global ‘public-health capital’.

Growth is less certain within the Berlin–Brandenburg biotech cluster, which, with 82 biotech companies, is the largest in Germany. The sector is in a consolidation phase. In 2009, for example, the US laboratory giant Thermo Fisher acquired the diagnostics firm Brahms in Hennigsdorf near Berlin for €330 million.

Although the climate for new jobs in the biopharmaceutical field has cooled down, some biotechs are still offering attractive jobs, says Steffen Goletz, chief executive and founder of Glycotope, a biotech company based in Berlin and Heidelberg. Glycotope, which specializes in therapeutic antibodies and non-antibody proteins, has hired more than 100 researchers, engineers and technicians in the past few years, many from Berlin research institutes, says Goletz.

Spagnoli is mindful of such local opportunities, but has not decided what her next career step will be. “I will probably move, but who knows?” she says, adding that she hopes excelling in her science will open multiple doors. ■

**Quirin Schiermeier** is Nature’s Germany correspondent.

#### CORRECTION

In the ‘By The Numbers’ on Belgium (*Nature* **467**, 876; 2010), the Catholic University of Louvain was wrongly depicted as being in Flanders. It is actually in Wallonia.



**“Berlin need not fear comparison with emerging science cities such as Singapore or Shanghai.”**

Detlev Ganten

# Campus der Ideen – mitten in der deutschen Hauptstadt

Ideen verändern die Welt – die Technische Universität in Berlin ist ein ausgewiesener und traditionsreicher Ort dafür. Mit ihren 7 Fakultäten, rund 100 Studiengängen und 29.200 Studierenden ist sie die drittgrößte Technische Universität Deutschlands. Leistungsstarke Kernbereiche wie Mathematik und Naturwissenschaften sind untereinander und mit denen der Ingenieurwissenschaften verzahnt. Sie stehen in enger Wechselwirkung mit den technikorientierten Wirtschafts-, Geistes- und Sozialwissenschaften der TU Berlin. Flexible Rahmenbedingungen befördern kreatives, problemorientiertes Arbeiten quer zu den Disziplinen und Institutionen. Transdisziplinäre Forschung und die Entwicklung neuer Wissenschaftsfelder prägen so die Universität auf dem Campus Charlottenburg im Herzen der deutschen Hauptstadt.

Die TU Berlin ist durch eine Vielzahl von weltweiten Kooperationen und einen besonders hohen Anteil an ausländischen Studierenden eine Universität mit ausgeprägtem internationalen Charakter. Auf ihrem Campus trifft sich die Welt: Studierende aus 130 Staaten wählen die TU Berlin zu ihrem Studienort und zahlreiche Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem Ausland lehren und forschen an der TU Berlin.

Durch ihre Erfolge in der Exzellenzinitiative ist die TU Berlin Sprecherhochschule von „Unifying Concepts of Catalysis“, des einzigen naturwissenschaftlichen Exzellenzclusters der Region und – gemeinsam mit der Humboldt-Universität und der

Freien Universität Berlin – Sprecherin der Graduiertenschule Berlin Mathematical School. An zwei weiteren Exzellenzclustern und zwei Graduiertenschulen ist sie beteiligt. Mit dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungszentrum Matheon und dem Kompetenzzentrum NanOp – Anwendungen von Nanostrukturen in der Optoelektronik – des Bundesforschungsministeriums verfügt die TU Berlin über zwei weitere international sichtbare Leuchttürme. Diese Netzwerke bieten hervorragende und grenzüberschreitende Forschungsmöglichkeiten, den Zugang zu einer modernen Infrastruktur und zu exzellenten Bibliotheken. Der Wissenschaftsstandort Berlin mit seiner Größe, seiner Vielfalt und seinen Stärken schafft damit beste Bedingungen für anspruchsvolle Karrieren in der Forschung.

Zur Förderung von jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern existieren an der TU Berlin eine Vielzahl an Programmen und Angeboten. So sind in den Innovationszentren der Universität interdisziplinäre und Fakultäten übergreifende Nachwuchs-Netzwerke entstanden. Ein wichtiges Förderinstrument sind die Juniorprofessuren, die alle an der TU Berlin – und das ist bundesweit eine Besonderheit – mit eigenem wissenschaftlichem Personal ausgestattet sind.

Aufbauend auf diesen innovativen Strukturen, den Spitzenleistungen in der Forschung und ihrer hohen internationalen Verflechtung ist die TU Berlin eine der attraktivsten und zukunftsweisenden Adressen in der deutschen Hauptstadt.

Technische Universität Berlin · Straße des 17. Juni 135 · 10623 Berlin · [www.tu-berlin.de](http://www.tu-berlin.de)



Wir haben einen Campus der kurzen Wege und bringen junge Forscherinnen und Forscher aus vielen Nationen und Disziplinen zusammen. Lernen Sie uns kennen!

Wir haben die Ideen für die Zukunft.



Prof. Dr.-Ing. Jörg Steinbach · Präsident der TU Berlin





## FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

### »Europa wird christlich«

Das Christentum begann als kleine jüdische Sekte in Palästina. 1000 Jahre später hatte die neue Religion ganz Europa durchdrungen. Doch wann und wie der Glaube in den einzelnen Regionen des Kontinents tatsächlich Fuß fasste, ist umstritten

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

[www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de)

## FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Sterne und Weltraum** und **Gehirn&Geist** kostenlos online lesen

### »Zusammenstoß im All«

Der Himmelskörper P/2010 A2 ist offenbar tatsächlich das Resultat einer Kollision von zwei Asteroiden im Gürtel zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter, wie Untersuchungen mit dem Weltraumteleskop Hubble und der Kometensonde Rosetta zeigen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

[www.astronomie-heute.de/artikel/1053884](http://www.astronomie-heute.de/artikel/1053884)

### »Bonobos bauen keine Kathedralen«

Der Karlsruher Philosoph Klaus Peter Rippe stellt die gängige Praxis der Tierversuche radikal in Frage: Zwischen Mensch und Tier existiere ethisch betrachtet kein grundlegender Unterschied. Der Frankfurter Hirnforscher Wolf Singer hält Laborexperimente mit Tieren dagegen für gerechtfertigt und mehr noch: für unverzichtbar

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1052993](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1052993)

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

[www.spektrum.com](http://www.spektrum.com)  
[service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
 Telefon 06221 9126-743

## Videos aus der Wissenschaft

Hier zeigt **Spektrum** Kurzbeiträge zu neu erschienenen Publikationen im wissenschaftlichen Fachmagazin **nature**. Darunter: Wie identifizieren Fledermäuse Wasser? Und: Wie lässt sich die Proteinfaltung optimieren? Tauchen Sie ein in die Welt der Wissenschaft in bewegten Bildern unter

[www.spektrum.de/videos](http://www.spektrum.de/videos)

## spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

### Fortschritte an den Polen

Die beiden Polargebiete gehören zu den Schlüsselstellen des Weltklimas: Von hier erreichen uns Nachrichten über schmelzende Gletscher ebenso wie über Löcher im Ozonschutzschild der Erde. Noch beklagen Forscher zwar viele Wissenslücken, doch jüngst sind einige geschlossen worden. Lesen Sie mehr dazu im **spektrumdirekt**-Dossier zur Polarforschung

[www.spektrumdirekt.de/polarforschung](http://www.spektrumdirekt.de/polarforschung)

## WissensLogs

Die Wissenschaftsblogs

### Nichts verpassen!

Die Blogger der WissensLogs sind nah dran am Geschehen: Sie berichten über die Eruptionen des Mount Merapi ebenso wie über das EU-Heilpflanzenverbot, über Atommüll als Energiequelle und über die Forschungsflugzeuge des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Außerdem lesen Sie hier zum Beispiel, ob es »Neues von der Sonne« gibt und wie es um die »Dürre am Amazonas« steht

[www.wissenslogs.de](http://www.wissenslogs.de)

## Spektrum in den sozialen Netzwerken



[www.spektrum.de/studivz](http://www.spektrum.de/studivz)



[www.spektrum.de/facebook](http://www.spektrum.de/facebook)



[www.spektrum.de/twitter](http://www.spektrum.de/twitter)



[www.spektrum.de/youtube](http://www.spektrum.de/youtube)

## Die dunkle Seite des Kosmos

Das Universum muss riesige Mengen einer lichtscheuen Substanz bergen, die sich nur durch ihre Schwerkraft verrät. Nun spekulieren Physiker über die exotischen Teilchen, die hinter dieser Dunklen Materie stecken.

MIT FROL. GEN. VON VOLKER SPRINGEL / MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK UND HEIDELBERGER INSTITUT FÜR THEORETISCHE STUDIEN

### WEITERE THEMEN IM JANUAR

#### Daten speichern mit Memristoren

Neuartige Nanoschaltelemente, so genannte Memristoren, sollen Datenspeicher und Logikschaltungen weiter schrumpfen lassen

#### Genome und individualisierte Medizin

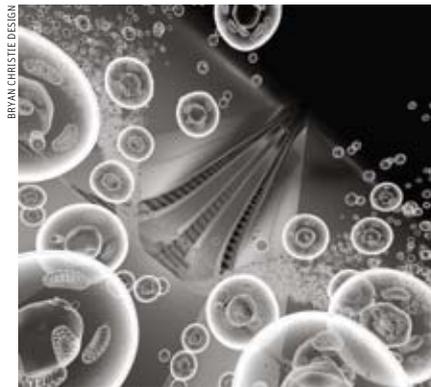
Ein Streitgespräch zwischen dem Genetiker Hans Lehrach und dem Medizinethiker Urban Wiesing

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

[www.spektrum.com/newsletter](http://www.spektrum.com/newsletter)



#### Bilder des Unsichtbaren in 4-D

Eine neue Art der Mikroskopie liefert erstmals bewegte Bilder von Vorgängen im Innern einer Zelle oder zeigt Nanomaschinen in Aktion.

#### Kriegskunst der Bakterien

Mediziner möchten die vielen Tricks von pathogenen Keimen ausnutzen, um die Erreger mit deren eigenen Waffen zu schlagen