

Spektrum

DER WISSENSCHAFT



ERDE 3.0

Wie Wolken
das Klima
beeinflussen

JULI 2011

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

7/11

PHYSIK

Pulsare als Gravitations-
wellendetektoren

PHILOSOPHIE

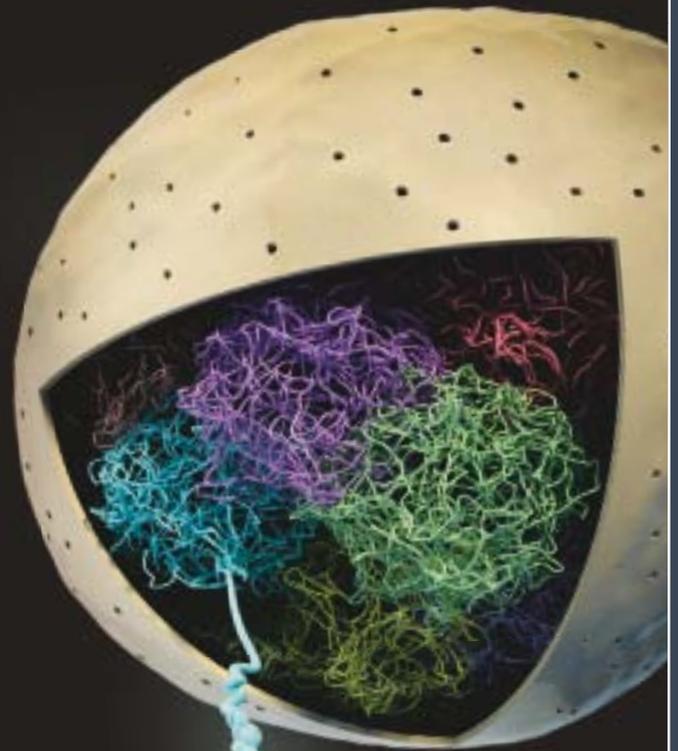
Recht und
Gerechtigkeit

SCHIZOPHRENIE

Vorboten
im Gehirn

Die neue Architektur des Genoms

Wie aktiv ein Gen ist,
hängt von seinem Ort
im Zellkern ab



7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.

D6179E

07



4 194058 407907



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Revolutionen im Innersten der Zelle

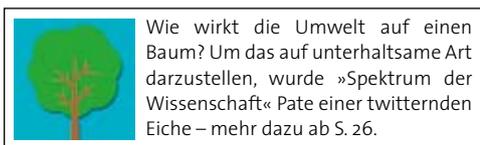
Haben Sie jemals versucht, sich in einem großen Raum mit vielen Menschen Gehör zu verschaffen – etwa bei einem Empfang, wo zahlreiche Gruppen zusammenstehen und miteinander tuscheln? Ob es Ihnen glückt, hängt unter anderem von Ihrem Standort ab: In einem großen Saal machen Sie sich von der Mitte aus leichter bemerkbar als von der Wand her. Unvermutet haben Wissenschaftler jetzt ein ganz ähnliches Phänomen in einem der kleinsten »Lebens-Räume« überhaupt ausgemacht – dem Zellkern. Darin sind freilich keine Personen versammelt, sondern Gene, und sie stehen nicht in Grüppchen beisammen, sondern sind auf die 46 Chromosomen des Menschen verteilt.

Alles, was im Körper geschieht, beruht auf zellulären Abläufen – Entwicklungs- und Alterungsprozesse ebenso wie das Entstehen von Krankheiten wie Krebs. Als Forscher vor zehn Jahren das menschliche Genom entzifferten, dachten anfangs viele, damit den entscheidenden Schlüssel zum Verständnis dieser höchst komplexen Vorgänge in den Händen zu halten. Schnell wurde jedoch klar, dass es auf die Gensequenz als solche weit weniger ankommt als auf die von ihr kodierten Proteine. Diese sind bei jedem Menschen von Zelltyp zu Zelltyp verschieden, ja unterliegen sogar einem permanenten Wandel – während die DNA-Sequenz der Gene in jedem Zellkern eines Individuums praktisch identisch ist.

Jetzt aber fanden Biologen heraus, dass das Bild der statischen Gene nicht zutrifft. Das Genom verändert sich doch: in seiner räumlichen Anordnung! Dort ereignen sich im wahrsten Sinn des Wortes Revolutionen – Umwälzungen. Wie Tom Misteli vom amerikanischen National Cancer Institute in Bethesda, Maryland, ab S. 28 berichtet, gelangen Erbfaktoren zu neuen Orten im Zellkern und werden dabei ein- und ausgeschaltet. Hierbei gilt die Regel: Je weiter im Zentrum sich ein Gen befindet, desto aktiver ist es. Mitunter verändert sich der innere Bauplan eines Kerns geradezu dramatisch, etwa wenn sich eine embryonale Stammzelle in eine Haut-, Leber- oder sonstige Zelle ausdifferenziert und dabei viele Gene stummgeschaltet werden. Und auch wenn Zellen entarten, ändert sich die Position einzelner DNA-Abschnitte. Dieses neue Wissen ist ein möglicher Ansatzpunkt für bessere, frühere Diagnosen von Krebserkrankungen. Doch was veranlasst die Gene zu ihren Positionsverschiebungen innerhalb des Zellkerns? Darüber rätseln die Forscher bislang noch. Misteli vermutet dahinter einen sich selbst organisierenden Prozess.

Spannende Einsichten in das dynamische Innere des Genoms wünscht Ihnen
Ihr

Caro Köhnel



AUTOREN IN DIESEM HEFT



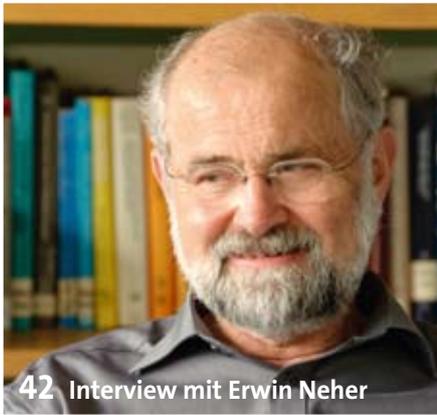
Der Radioastronom **Michael Kramer** (links) und der theoretische Astrophysiker **Norbert Wex** vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn vermessen die extrem regelmäßigen elektromagnetischen Signale, die von Pulsaren ausgehen. Die schnell rotierenden Neutronensterne könnten helfen, Gravitationswellen aufzuspüren (S. 48).



2500 Jahre nach Platon ist die Diskussion über Gerechtigkeit in der Welt aktueller denn je. Der Philosoph **Julian Nida-Rümelin** von der Ludwig-Maximilians-Universität München gibt ab S. 62 einen Überblick über die Theorien.



Auf die Wolken kommt es an! **Jost Heintzenberg**, der frühere Direktor des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung in Leipzig, und **Julia Lupp**, die Programmdirektorin des Ernst-Strüngmann-Forums, erklären ab S. 80, warum die Bewölkung die große Unbekannte in allen Klimaprognosen darstellt.



42 Interview mit Erwin Neher



48 Suche nach Raumzeitwellen



62 Gerechtigkeit



80 Wolken erschweren Klimaprognose

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

TITELTHEMA

- ▶ 28 **Das Innenleben des Genoms**
Tom Misteli

Chromosomen wie auch einzelne Gene wechseln immer wieder ihren Ort im Zellkern – etwa beim Ausdifferenzieren embryonaler Stammzellen, aber auch bei Krebs

- ▶ 36 **Vorboten des Ich-Verlusts**
David Dobbs

Schizophrenie beruht möglicherweise auf fehlerhaften Umbauten im Gehirn während der Pubertät. Dies würde eine frühere Diagnose der Krankheit als bisher erlauben

INTERVIEW

- 42 **»Eins zu eins lässt sich Forschung nicht umsetzen«**

Nobelpreisträger Erwin Neher über Forschungsförderung und Wissenschaftskommunikation

- ▶ 48 **Mit Pulsaren auf der Jagd nach Gravitationswellen**

Michael Kramer und Norbert Wex
Mit Hilfe schnell rotierender Neutronensterne, die als extrem genaue kosmische Uhren dienen, könnte Astronomen der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen gelingen

SCHLICHTING!

- 58 **Der schwingende Weihrauchkessel**

H. Joachim Schlichting
Wird ein pendelnder Körper periodisch angehoben und abgesenkt, gewinnt er Energie. Warum?

▶ SERIE PHILOSOPHIE

- 62 **Was ist gerecht?**

Julian Nida-Rümelin
Schon Platon sah Gerechtigkeit als höchste Tugend an. Heute gilt sie als Basis unseres Gemeinwesens



- 70 **Streitpunkt Menschenrechte**

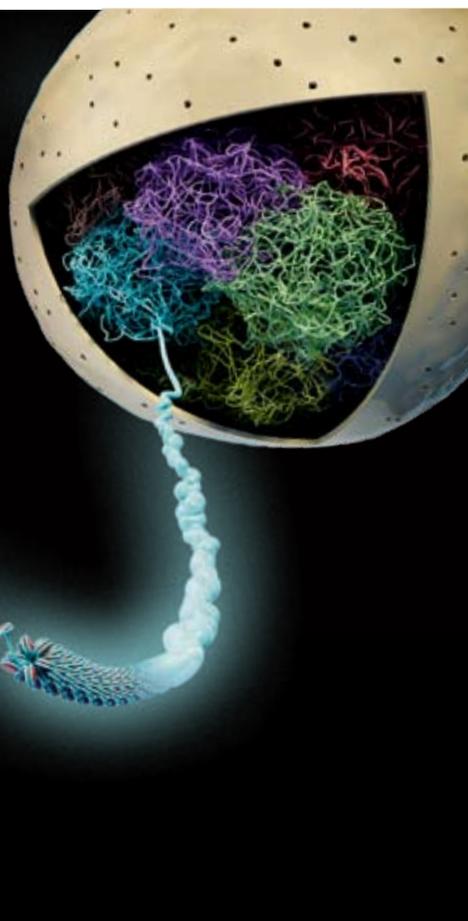
Wilfried Hinsch
Die theoretische Basis der Menschenrechtsidee bleibt trotz ihres politischen Erfolgs unsicher

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

- 76 **Das Rätselkabinett des Heinrich Hemme**

Christoph Pöppe
Ein Besuch beim deutschen Meister der Unterhaltungsmathematik

Die neue Architektur des Genoms



ERDE & UMWELT



► 80 Wolken im Klimawandel

Jost Heintzenberg und Julia Lupp

Prognosen der globalen Erwärmung sind immer noch relativ unsicher. Das liegt vor allem an mangelnden Kenntnissen über das schwer fassbare Verhalten der Wolken. Neue Satelliten und spezielle Wolkenlabors sollen die Wissenslücken schließen helfen

TECHNIK & COMPUTER

88 Cornelis Drebbel: Ein vergessener Pionier der Moderne

Achim Clausing

Er baute das erste Unterseeboot, den ersten Thermostat und eines der ersten Mikroskope. Wer war dieser rastlose Erfinder, den im 17. Jahrhundert ganz Europa kannte, aber heute kein Schulbuch mehr nennt?

Titelmotiv: *Anatomy Blue*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

- 10 Exoplaneten, die gegen den Strom schwimmen • Geburt des Grand Canyon • Riesennameisen durchquerten einst die Arktis • Viren verbessern Effizienz von Solarzellen • Fangseil an den Füßen • Rotierende Moleküle mit Dopplereffekt

BILD DES MONATS

- 13 Silbersterne aus dem Reagenzglas

FORSCHUNG AKTUELL

- 14 **Umzug der Winde**
Über den Meeren nimmt der Wind zu – und flaut über Land ab
- 16 **Augen aus der Retorte**
Im Labor entsteht eine komplette Netzhaut
- 19 **Mysteriöse Bremskräfte aufgedeckt**
Pioneer-»Anomalie« ist Folge von Wärmeabstrahlung
- 22 **Das Lachen der Ratten**
Fiepende Nagetiere in der Autismusforschung
- 24 **Springers Einwürfe**
Gehorcht Literatur darwischen Gesetzen?
- 26 **Der vernetzte Baum**
Stieleiche mit Twitter-Account

WEITERE RUBRIKEN

- 5 Editorial
- 8 Leserbrief/Impressum
- 96 Wissenschaft im Rückblick
Vom Bohnenkäse zur Tauchkapsel
- 97 Exponat des Monats
Philipp Lenards Entladungsröhre
- 98 Rezensionen
Ulrich Eberl: Zukunft 2050
Rita Lüder: Nature-Lexicon Bäume und Sträucher (App)
Nicholas A. Christakis, James H. Fowler: Connected! u. a.
- 106 Vorschau

Zusätzliche Streckung

Wie wir verzerrte Bilder mit Hilfe spezieller Spiegel erkennen können, erklärte der Physikdidaktiker Norbert Treitz. (»Bezaubernde Bildnisse II«, März 2011, S. 50)



Jürgen Newig, Flintbek: Beim Entzerren des Totenkopfs aus Holbeins Bild »Die Gesandten« sollte man zusätzlich noch mit dem Faktor 2,5 in der Höhe strecken, dann erhält man eine noch überzeugendere Annäherung (siehe Bild).

Pro und kontra Skeptizismus

Die Philosophin Elke Brendel diskutierte, ob wir unserer Wahrnehmung von der Wirklichkeit trauen können. (»Was können wir von der Welt wissen?«, Mai 2011, S. 68)

Martin Piehslinger, Wien: »Alles Chimäre, aber mich unterhält's«, sagte Johann Nestroy. Oder, moderner: »Das Leben ist ein Sch...spiel, aber die Grafik ist geil.«

Warum wollen wir das skeptische Argument überhaupt anfechten und zurückweisen? Wenn wir in einer Scheinwelt der Illusionen leben, so leben wir ganz gut in ihr; und die Illusionen folgen den Gesetzen, die wir über sie herausgefunden haben. Ich sehe auch keinen Grund, dem Verursacher der Illusionen von vornherein unlautere Motive zu unterstellen. Sofern wir benutzt werden (und der Benutzer unserer Logik folgt), ist unser Nutzen wahrscheinlich die Ursache unserer Existenz – wie bei einem Nutztier.

Wenn wir das skeptische Argument aus unserem Denken verbannen, berauben wir uns selbst jeglicher Möglichkeit, eine eventuelle Täuschung zu durchschauen. Also: Ich bekomme soeben die Illusion vorgespiegelt, einen Leserbrief zu schreiben, und kann mich der Illusion hingeben, dass Sie ihn lesen. Ist doch nicht schlecht!

PS: Sollten die Verursacher der Illusion hier mitlesen, hätte ich eine Bitte: Wäre es möglich, den Bug in der Matrix zu beheben, der mir immer wieder einzelne Socken vorgaukelt? Danke.

Jörg Michael, Hannover: Die Sichtweise des Skeptizismus (»Möglicherweise gaukelt uns ein Computer oder auch ein böser Geist die reale Welt nur vor«) ist im praktischen Leben nicht einmal von theoretischem Interesse. Als wissenschaftliches Prinzip taugt sie nicht, denn dieses verlangt, dass Hypothesen prinzipiell falsifizierbar sind.

Da könnte man genauso gut, wie es die Vertreter der satirisch gemeinten »Church of the Flying Spaghetti Monster« tun, behaupten, dass die Welt von einem fliegenden Spagetti-Monster erschaffen wurde – und dann hinzufügen: »Keiner kann mich widerlegen.«

Niemand, der einigermaßen bei Verstand ist, wird auch nur darüber nachdenken, ob Glatteis auch heute Morgen noch genauso glatt ist wie all die Jahre vorher. Und wer doch versucht, alles zu überprüfen, wird (weil ja immer wieder alles zu überprüfen ist) nie mit irgendetwas fertig werden.

Im normalen Leben kommen wir ganz gut damit klar, Heuristiken anwenden zu müssen, die sich bewährt haben. Da ich davon ausgehe, dass auch die Vertreter des Skeptizismus im täglichen Leben den gesunden Menschenverstand benutzen oder benutzt haben, bedeutet dies streng genommen, dass sie selbst nicht wirklich daran glauben.

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Jan Osterkamp (Spektrumgramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke
 E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
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 wirkte mit: Dr. Markus Fischer.
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)/sfr. 14.–; 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 Portomehrkosten 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 Döhl; 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: Matthias O. Hüttköper, 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. 32 vom 01.01.2011.
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: © 2011 (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.



BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe
Sigrid Spies
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter www.spektrum.de/leserbriefe

Kontinuität der kognitiven Fähigkeiten

Ist der Mensch wirklich das einzige Lebewesen mit Verstand?, fragte der Philosoph Albert Newen. (»Das Verhältnis von Mensch und Tier«, April 2011, S. 70)

Georg Heike, Blankenheim: Obwohl mehrmals die bekannte Tatsache erwähnt wird, dass Tiere keine Opern komponieren können, zieht der Autor auf Grund seines Materials einen wohl etwas voreiligen Schluss: »Aber zugleich lassen sich für alle Kompetenzen des Menschen rudimentäre Entsprechungen im Tierreich aufspüren: Es gibt offenbar eine Kontinuität der kognitiven Fähigkeiten zwischen Menschen und Tieren.« Wo sind die rudimentären Entsprechungen für das Komponieren von Opern? Die Vorstellung einer Kontinuität der Entwicklung hin zu den Fähigkeiten des Menschen ist naheliegend, kann aber nicht bedeuten, dass sämtliche Fähigkeiten bereits im Tierreich angelegt sind. Gerade Kunst, Wissenschaft und Philosophie muss man als für den Menschen typische Eigenschaftsbereiche ansehen, die während der Entwicklungsgeschichte des Menschen, als er schon Mensch war, entstanden waren. Sicherlich kann man Erklärungsversuche, wie sie die Begriffe der Emergenz beziehungsweise Fulguration anbieten, in Betracht ziehen.

Kommentar von Prof. Newen:

Opern zu komponieren, ist eine hoch entwickelte menschliche Fähigkeit im

Bereich der Musik und wirft für die Diskussion des Verhältnisses von Mensch und Tier die Frage auf: In welchem Maß sind Tiere musikalisch? Kann man hier auch von wesentlichen Vorformen sprechen? Dazu finden wir eine intensive Diskussion über die Strukturen von Wal- und Vogelgesang im Vergleich zu menschlicher Musik: Rhythmus und Muster beim Vogelgesang weisen ähnliche Strukturen auf wie von Menschen gemachte Musik. Daher haben Gray und Kollegen (Science 2001) die These vorgetragen, dass es einen universalen Sinn für Musik im Tierreich geben könnte. Dadurch wurde eine Reihe von Studien zur Sensitivität von Tieren für Musik gestartet.

Zunächst beobachteten McDermott und Hauser (2007) bei manchen Affen (Tamarine), dass sie mit menschlicher Musik nichts anfangen können. Doch dabei hatte man vernachlässigt, dass die Stimmen dieser Affen bei normaler Vokalisation achtmal schneller sind und drei Oktaven höher liegen als beim Menschen.

Snowdon und Tele (2010) haben daraufhin eigens Musik für Tamarine komponiert, die der natürlichen Vokalisation der Affen Rechnung trägt, und siehe da: Wir beobachten ein klares Interesse und deutliche Gefühlsreaktionen auf die für Affen gemachte Musik, wobei diese bei manchen Stücken systematisch entspannt und bei anderen systematisch aufgeregt reagieren. Das spricht dafür, dass es einen universalen Sinn für »Musik« gibt, wobei diese Musik an den Eigenschaften der Vokalisation der jeweiligen Gattung orientiert sein muss.

Resistenz gegen menschliche Antikörper

Forschern gelang es, Plasmodien in den Stechmücken mit Hilfe eines genmanipulierten Pilzes zu reduzieren. (»Pilze bekämpfen Malaria«, Spektrum, Mai 2011, S. 10)

Detlef Haarbrücker, Hamburg: Das Reservoir des Genpools der Plasmodien befindet sich hauptsächlich in den

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

Menschen und den Mücken. 25 Prozent der Erreger in der Mücke überleben die durch die Pilze eingebrachten Stoffe. Es wird ein Selektionsdruck erzeugt, durch den vor allem jene Erreger ihre Gene weitergeben werden, die weniger empfindlich gegen die Antikörper und die weiteren Gifte sind.

Die Folge: Im Genpool werden die Gene, die zu einer Resistenz gegen die eingesetzten Gifte und Antikörper beitragen, zunehmen. Bei einem solchen Vorgehen dürfen aus meiner Sicht auf keinen Fall Stoffgruppen eingesetzt werden, die der Körper selbst gegen den Malariaerreger einsetzt beziehungsweise bei der Behandlung der Malaria wichtig sind. Sonst besteht die Gefahr, dass immer gefährlichere Plasmodien entstehen werden. Darüber, dass der Forscher den Pilz menschliche Antikörper erzeugen lässt, bin ich sehr besorgt!

Erratum

»Der Geist sitzt links«, Wissenschaft im Rückblick, Juni 2011, S. 100

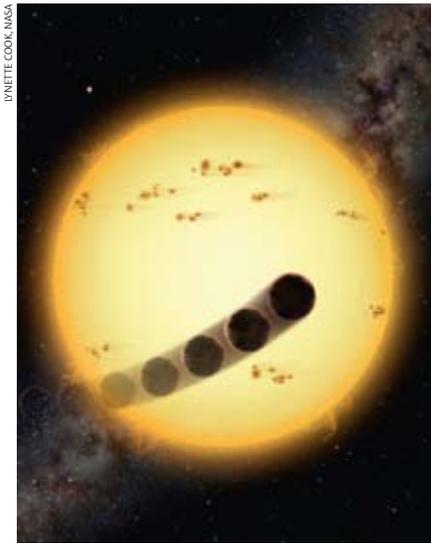
Das rechte der drei Bilder wurde leider falsch abgedruckt; hier ist die korrekte Version.



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DES DEUTSCHEN MUSEUMS

ASTRONOMIE

Exoplaneten, die gegen den Strom schwimmen



Die Illustration zeigt einen Riesenplaneten, der seinen Mutterstern verkehrt herum umkreist. Der Gravitationseinfluss eines anderen, weit entfernten Planeten (kleiner, heller Punkt links oben) könnte dafür verantwortlich sein.

Unter den mehr als 500 bisher entdeckten extrasolaren Planeten umkreisen einige ihren Stern entgegen seiner Rotationsrichtung. Das passt nicht zum heutigen Verständnis der Planetenbildung, denn alle Begleiter sollten aus derselben Gaswolke entstanden sein wie ihr Stern und denselben »Drehsinn« besitzen. Solche rückläufigen Bahnen ließen sich bislang nur in Computermodellen von Mehrfachsternsystemen nachbilden, in denen die Gravitationskraft eines der Sterne die Planetenbahn so stark beeinflusst, dass sie sich umkehrt. Jetzt kann eine neue Computersimulation diesen Effekt auch in Einfachsternsystemen erklären: durch einen weiteren, weit außen kreisenden Planeten oder Braunen Zwerg.

Astronomen kennen bereits eine größere Zahl jupiterähnlicher Exoplaneten, die ihre Sonne eng umrunden. Rund ein Viertel dieser »Heißen Jupi-

ter« weisen rückläufige Umlaufbahnen auf. Smadar Naoz und ihre Kollegen von der Northwestern University in Evanston, USA, stellten nun im Computer nach, wie solche Planeten ihrem Stern derart nahekommen.

Demnach gibt der Gasriese allmählich Drehimpuls an den äußeren Planeten oder Braunen Zwerg ab und nimmt dadurch im Lauf von Millionen Jahren eine gekippte und exzentrische Umlaufbahn ein. Hierbei verliert der Planet weitere Energie durch starke Gezeitenkräfte – dank der Gravitation des zeitweise sehr nahen Zentralgestirns. Die Folge: Sein Orbit schrumpft weiter. Irgendwann entkoppeln sich die beiden Planeten, worauf der innere nach vergleichsweise kurzer Zeit einer engen kreisförmigen Bahn folgt. Und die kann so stark gekippt sein, dass sie entgegen der Anfangsrichtung verläuft.

Nature 473, S. 187–189, 2011

GEOLOGIE

Die Geburt des Grand Canyon

Amerikanische Forscher haben eine Erklärung dafür gefunden, wie sich der Grand Canyon gebildet hat. Seit mehr als einem Jahrhundert rätseln Geologen über die Ursache der sehr ruhig und ohne große Verwerfungen ablaufenden Hebung des Colorado-Plateaus, in das sich der Colorado River dann einschneidet. Ein Team um Alan Levander von der Rice University in Houston führt dies nun darauf zurück, dass schweres, dichtes Gestein von der Unterseite der Erdkruste abgerissen ist. Bei seismischen Untersuchungen des Untergrunds fanden die Forscher in

70 bis 200 Kilometer Tiefe unter dem Grand Canyon eine senkrecht in den heißen Erdmantel hineintauchende Region, die Erdbebenwellen besser leitet als das umliegende Gestein, was auf kühleres und dichteres Material hindeutet.

Laut ihrer Hypothese sind das Colorado-Plateau und der Grand Canyon Erbe der ozeanischen Farallon-Platte. Diese begann beim Auseinanderbrechen des Superkontinents Pangäa unter den Westrand Nordamerikas abzutauchen. Bis heute existiert sie als seismische Anomalie tief im

Erdmantel unter der Ostküste der USA. Auf ihrem Weg schnitt die abgetauchte Platte den Kontinent von der Wärme aus dem Erdinneren ab, so dass die Kruste darüber abkühlte. Zusätzlich beeinflusste das aus dem früheren Ozeanboden austretende Wasser die Chemie der Gesteine: Eisenreiche Schmelzen drangen in die Unterseite des Kontinents ein.

Der obere Mantel unter dem Colorado-Plateau wurde auf diese Weise dichter und schwerer und verlor dadurch seinen Auftrieb, bis er schließlich von der Kruste abbrach. In die entstehende Lücke strömte heißes Gesteinsmaterial aus der so genannten Asthenosphäre (einem Teil des oberen Erdmantels) – und die vom Gewicht des Mantels befreite Kruste begann sich zu heben.

Nature 472, S. 461–465, 2011



Komplexe geologische Vorgänge unter der Erdkruste hoben das Colorado-Plateau im Südwesten der USA allmählich an – und ließen damit den berühmten Grand Canyon entstehen.

FOSSILIEN

Riesenameisen durchquerten einst die Arktis

In der berühmten Grube Messel bei Darmstadt fanden Forscher schon vor Jahrzehnten Fossilien von geflügelten Riesenameisen der Gattung *Titanomyrma*, die bis zu sieben Zentimeter Körperlänge erreichten. Jetzt entdeckten Bruce Archibald von der Simon Fraser University in Burnaby (British Columbia, Kanada) und seine Kollegen eine enge amerikanische Verwandte: *Titanomyrma lubei*, eine etwa 49,5 Millionen Jahre alte Ameisenkönigin aus Wyoming, die es auf gut fünf Zentimeter bringt.

Doch wie kommt es, dass sich Vertreter derselben Gattung auf beiden Seiten des damals allerdings noch schmalen Atlantiks finden? Zwar war es im Eozän deutlich wärmer als heute, doch nicht warm genug, um

diesen Ameisen den Weg über die Arktis zu ermöglichen. Schließlich bevorzugten die Rieseninsekten ihren Fundorten zufolge Regionen, in denen die Jahresmitteltemperatur über 20 Grad Celsius lag. Auch heute noch leben die größten Ameisenarten in den Tropen.

Des Rätsels Lösung: Es gab zu dieser Zeit mehrere Episoden, in denen die Temperaturen wohl auf Grund von Treibhausgasen aus Sedimenten kurzfristig um fünf bis zehn Grad Celsius anstiegen – und so auch die damals existierenden arktischen Landbrücken zwischen Europa und Nordamerika für die Wärme liebenden Sechsheiner passierbar machten.

Proc. R. Soc. B 10.1098/rspb.2011.0729, 2011



BRUCE ARCHIBALD, SIMON FRASER UNIVERSITY

Mit gut fünf Zentimeter Länge ist das in Wyoming gefundene Fossil einer Ameisenkönigin fast so groß wie ein Kolibri.

FOTOVOLTAIK

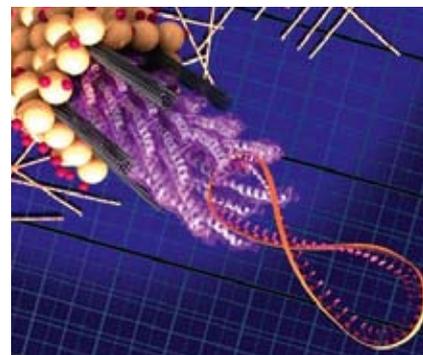
Viren verbessern Effizienz von Solarzellen

Solarzellen funktionieren stets nach demselben Prinzip: Sonnenlicht setzt in einem Material Elektronen frei, die einen elektrischen Strom erzeugen können. Entscheidend dabei ist, wie effizient die Elektronen verwertet werden. Durch eine neuartige Kombination aus Viren und Kohlenstoffnanoröhrchen konnten Xiangnan Dang und seine Kollegen vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (Massachusetts) den Wirkungsgrad von Solarzellen nun um fast ein Drittel steigern.

Die Idee, winzige Kohlenstoffzylinder in fotovoltaische Elemente einzubauen, ist nicht neu, da sich freigesetzte Elektronen damit sehr gut einsammeln lassen. Es erwies sich jedoch als schwierig, die Nanoröhrchen nutzbringend in die Zellen zu integrieren, da sie schnell verklumpen und damit an

Wirkung verlieren. Mit Hilfe einer gentechnisch veränderten Version des Virus M13, das normalerweise Bakterien infiziert, gelang es den amerikanischen Forschern jedoch, die Zylinder zu fixieren und voneinander zu trennen. Ein einzelnes Virus kann dabei fünf bis zehn Kohlenstoffröhrchen festhalten.

In ihren Versuchen gingen die Wissenschaftler von Solarzellen aus, in denen die fotovoltaisch aktive Schicht aus mit Farbstoffen versetztem Titanoxid besteht, und versahen sie mit den Komplexen aus Viren und Nanoröhrchen. Siehe da: Die durch das Sonnenlicht freigesetzten Elektronen gelangten nun deutlich effizienter zum Stromabnehmer. Der Wirkungsgrad konnte auf diese Weise von acht auf fast elf Prozent angehoben werden. Laut den beteiligten Forschern lässt



MATTHIAS KLUG, BIOMOLECULARE MATERIALS GROUP, MIT

Der M13-Virus besteht aus einem DNA-Strang (unten rechts), an dem ein Bündel aus Hüllproteinen haftet (violette Spiralen). Hieran kleben die Kohlenstoffnanoröhrchen (graue Zylinder) fest. Das gesamte Bündel ist mit Titanoxid (gelbe Kugeln) beschichtet, an dem sich Farbstoffmoleküle (rote Kugeln) anheften.

sich die neue Technik auch auf andere Solarzellentypen anwenden.

Nature Nanotechnology 10.1038/nnano.2011.50, 2011

ZOOLOGIE

Fangseil an den Füßen

Spinnen haben normalerweise kaum Probleme damit, auf einer senkrechten Glaswand zu sitzen. Das gilt sogar für die vergleichsweise schweren Vogelspinnen: Verlieren sie den Halt, sichern sie sich schnell mit einem Spinnfaden. Doch dieser stammt nicht aus den bekannten Spinnwarzen am Hinterleib, sondern aus Drüsen an den Füßen.

Erste Hinweise auf eine solche »Tarsenseide« stellte Stanislav Gorb,

heute an der Universität Kiel, bereits 2006 vor. Auf den Glaswänden von Vogelspinnenterrarien hatten seine Mitarbeiter und er Fußabdrücke in Form von winzigen kurzen Spinnfäden entdeckt. Doch blieben ihre Ergebnisse umstritten, da eine spanische Arbeitsgruppe sie nicht reproduzieren konnte: Als die Forscher den Tieren die normalen Spinnrüden am Hinterleib mit Wachs versiegelten, konnten sie keine Seidenreste auf

Aktuelle Meldungen und
Hintergründe finden Sie auf
spektrumdirekt.de

dem Untergrund mehr nachweisen. Sie schlossen daraus, dass die Spinnenseide nicht an den Füßen entsteht, sondern nur von den Beinen an den Spinnwarzen abgewischt wird.

Jetzt bekam Gorb Unterstützung aus Großbritannien. Claire Rind von der University of Newcastle und ihre Mitarbeiter hatten drei Vogelspinnen auf senkrecht stehenden Glasplättchen mit einem leichten Schubs ins Rutschen gebracht. Unter dem Mikroskop entdeckten die Forscher anschließend winzige Überreste von Spinnfäden auf der Unterlage. Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Spinnenhäuten offenbarten zudem über den ganzen Fuß verteilte winzige drüsenartige Strukturen, aus denen die Spinnenseide offenbar stammt.

Da die untersuchten Arten nur entfernt miteinander verwandt sind, vermuten die Wissenschaftler, dass womöglich alle Vogelspinnen solche Spinnrüden an den Füßen besitzen.

J. Exp. Biol. 214, S. 1874–1879, 2011



Goldknie-Vogelspinne
»Fluffy« lieferte mit ihren
alten Häuten geeignetes
Anschauungsmaterial für
die Suche nach Spinn-
rüden an den Füßen.

MOLEKÜLPHYSIK

Rotierende Moleküle mit Dopplereffekt

Wenn ein Krankenwagen vorbeifährt, erlebt man den so genannten Dopplereffekt live: Das näher kommende Sirengeräusch klingt erst hoch, mit Passieren des Wagens sinkt die Tonhöhe je nach dessen Geschwindigkeit mehr oder weniger stark ab. Der Grund: Die Schallwellen werden beim Herankommen gestaucht und beim Wegfahren gedehnt.

Einen analogen Effekt gibt es auch bei Lichtwellen. Astronomen nutzen ihn etwa, um zu bestimmen, wie schnell sich ein Stern von der Erde entfernt oder ihr nähert, und um die Drehgeschwindigkeit von rotierenden Himmelskörpern zu ermitteln. Nun hat ein internationales Forscherteam erstmals nachgewiesen, dass auch bei

Objekten am anderen Ende des Größenspektrums ein Rotationsdopplereffekt auftritt: bei Molekülen.

Die Drehung von Molekülen hat sogar ähnlich starke Auswirkungen wie ihre Bewegung durch den Raum, berichten die Wissenschaftler um Darrah Thomas von der Oregon State University in Corvallis. Dies ist wichtig für die so genannte Spektralanalyse, bei der die von Molekülen ausgesandte Strahlung Informationen über den Aufbau und die chemischen Eigenschaften der Teilchen liefert.

Der Dopplereffekt führt dazu, dass sich die Emissionslinien der Moleküle verbreitern, da diese sich zum Teil vom Detektor entfernen und zum Teil ihm nähern. Folge: Das Auflösungsvermö-

gen der Spektralanalyse sinkt. Zwar wurde bereits theoretisch vorhergesagt, dass mit der Molekülrotation ein Dopplereffekt verbunden ist, doch die experimentelle Bestimmung erwies sich als sehr schwierig. Gelungen ist sie den Forschern um Thomas nun beim Untersuchen der Fotoemissionsspektren von Stickstoffmolekülen.

Dabei maßen sie die – durch den Dopplereffekt beeinflusste – Energie von Elektronen, die mittels Röntgenstrahlung aus den Molekülen herausgeschlagen werden. Ist der Rotationsdopplereffekt bekannt, lässt er sich bei der Auswertung von Emissionslinien berücksichtigen, was die Präzision der Spektralanalyse verbessert.

Phys. Rev. Lett. 106, 193009, 2011

SILBERSTERNE AUS DEM REAGENZGLAS



Nur wenige Mikrometer messen diese filigranen Sterne, die ein Team um den Chemiker Stanislav Emilianov von der University of Austin in Texas mit einer neuen Methode hergestellt hat. Die fein strukturierten Blätter und Strahlen bestehen aus reinem Silber, das die Forscher unter UV-Licht aus einer Silbernitratlösung abgeschieden haben. Als Kristallisationskeim diente etwa 150 Nanometer große Kügelchen aus einem Kopolymer von Milchsäure und Hydroxyessigsäure.

Mit Hilfe unterschiedlicher Zusatzstoffe und Wachstumsbedingungen lassen sich die Sterne auch in anderen Formen und Größen erzeugen. Sie könnten als Substrat für die Raman-Spektroskopie oder auch als Katalysatoren in chemischen Reaktionen dienen.

Adv. Funct. Mater. 21,
S. 1673–1680, 2011

KLIMAWANDEL

Umzug der Winde

Im Lauf der letzten Jahrzehnte nahm der Wind über den Meeren zu, während er über Land abflaute. Neben veränderten großräumigen Luftströmungen scheint auch vermehrte Aufforstung eine Rolle dabei zu spielen – nicht jedoch die globale Erwärmung.

VON SVEN TITZ

Temperaturen sind nicht alles beim Klima, auch wenn sie oft die Aufmerksamkeit auf sich ziehen – man denke nur an das Schlagwort von der globalen Erwärmung. Eine ebenso wichtige Rolle spielen die Häufigkeit und Intensität von Regenfällen oder die Wolkenbedeckung. Auch den Wind sollte man nicht vergessen. Orkane wie Wiebke, Lothar und Xynthia dürften noch manchen in unguter Erinnerung sein. Nun sind zwei Forscherteams der Frage nachgegangen, was sich bei den Luftbewegungen in den letzten Jahrzehnten getan hat. Wie sie herausfanden, ist der Wind auf den Meeren stärker geworden und an Land schwächer – ein scheinbar widersprüchliches Ergebnis, für das es jedoch plausible Erklärungen gibt.

Die Windstärke über Wasser wurde anfangs nur von Schiffen aus bestimmt. Das war, wie man sich vorstellen kann, nicht sonderlich genau: Nur zu leicht konnten die Eigengeschwindigkeit und die Abschattung im Lee der Schiffe die Messungen verfälschen. Später dienten auch Bojen als Windmesser; doch sie lieferten nur punktuelle Daten. Ein homogenes, erdumspannendes Messnetz war damit nicht zu realisieren.

Erst erdumkreisende Satelliten schufen ab den 1980er Jahren die Voraussetzung für globale Datensätze. Aber wie können sie Windstärken messen? Die Antwort heißt: indirekt. Bestimmte Instrumente, so genannte Radarhöhenmesser, registrieren die Zeit, die abgestrahlte Mikrowellensignale benötigen, um zur Meeresoberfläche und wieder zurück zum Satelliten zu gelangen.

Zunächst einmal lassen sich auf diese Weise Schwankungen des Meeresspiegels bis auf einige Zentimeter ge-

nau feststellen. Allerdings wirft die Meeresoberfläche die Radarsignale nicht nur zurück, sondern modifiziert sie auch je nach ihrem Feinrelief. Aus diesen subtilen Veränderungen kann man die Wellenhöhe und die Windstärke berechnen.

Ein Team um den Ozeanografen Ian Young – er ist heute Vizekanzler der Australian National University in Canberra – hat solche Radardaten von sieben verschiedenen Satelliten analysiert, die zwischen 1985 und 2008 im Einsatz waren (Science 332, S. 451–455). Daraus ergab sich unter anderem ein Trend für die Wellenhöhe: Im Durchschnitt ist sie zwar fast gleich geblieben; der maximale Wellengang hat aber deutlich zugenommen (siehe Grafik rechts). Zum Beispiel erreichen vor der Südküste Australiens jene Wogen, die zum höchstens einen Prozent gehören, inzwischen sechs statt fünf Meter Höhe.

Aufgefrischte Meeresbrise

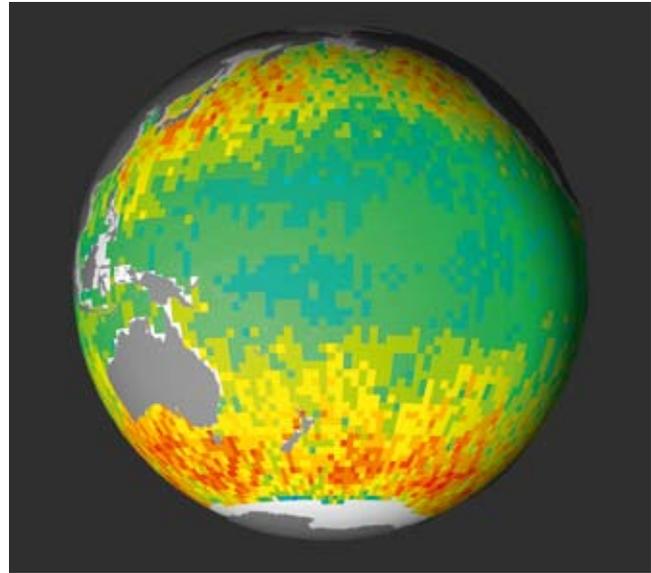
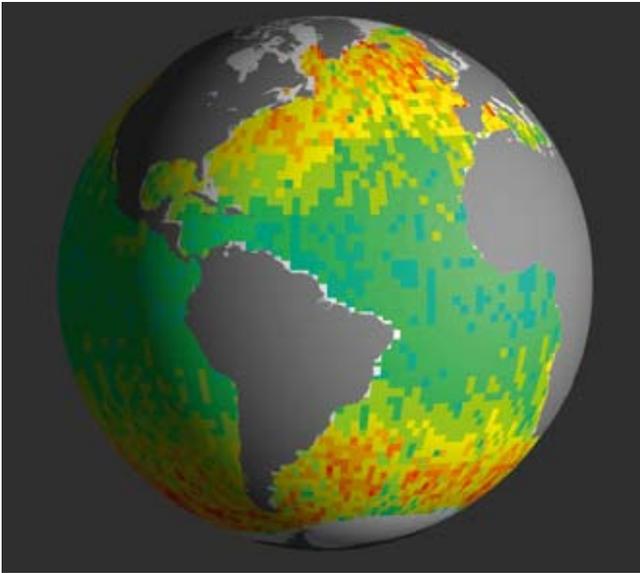
Die Daten von Geosat, der als erster Satellit mit Radarhöhenmesser von 1985 bis 1990 in Betrieb war, erlaubten wegen ihrer begrenzten Genauigkeit allerdings nicht, auch die Windgeschwindigkeit zu ermitteln. Diese Größe konnten Young und seine Gruppe deshalb erst ab 1991 aus den Radarsignalen ableiten. Das Resultat: Die Geschwindigkeit der Luftbewegungen über der offenen See ist seither um durchschnittlich 5 bis 15 Prozent gestiegen. Besonders in den mittleren und hohen Breiten auf beiden Halbkugeln frische die Meeresbrise auf. Wiederum war der Zuwachs an der Spitze am ausgeprägtesten: Die kräftigsten Winde verstärkten sich am meisten.

Stichprobenartige Messungen mit Bojen bestätigten die per Satellit bestimmten Trends. Aber warum Windstärke und Wellenhöhe zugenommen haben, wissen die Forscher noch nicht genau. Natürlich liegt es nahe, an die globale Erwärmung als Ursache zu denken. Ausschließen lässt sich aber nicht, dass hinter dem Trend natürliche Zyklen stecken.

In diesem Zusammenhang bieten sich vor allem zwei Luftdruckschwingungen an, die sich in ringförmigen Mustern an den beiden Polen der Erde äußern: der Northern und der Southern Annular Mode. Was dabei oszilliert, ist der jeweilige Luftdruckgegensatz zwischen Pol und mittleren Breiten. Der aber bestimmt die Stärke der Westwindzonen mit den darin eingebetteten Tiefdruckgebieten.

Wie aus historischen Aufzeichnungen und paläoklimatologischen Daten hervorgeht, variiert der Northern Annular Mode stark mit einer Periodendauer von einigen Jahrzehnten. Der in den vergangenen 20 Jahren gemessene Anstieg der Windgeschwindigkeit kehrt sich also vielleicht aus natürlichen Gründen wieder um, sobald das Luftdruckmuster in die andere Richtung pendelt. Gleiches gilt für den Einfluss von El Niño und La Niña – einer Klimaschaukel im pazifischen Raum, die in Abständen von mehreren Jahren kippt.

Weit reichende Schlüsse wären also verfrüht. Das betrifft nicht nur die Gründe für die auffrischenden Winde auf See. Auch wer von den Beobachtungen zu Wasser auf einen analogen Trend an Land schließt, muss sich eines Besseren belehren lassen. Denn so paradox es anmutet: Über den Kontinenten



YOUNG, ZIEGER & BARANIN / SCIENCE/AAAS

herrscht zunehmend Flaute. Das haben französische und britische Forscher herausgefunden (Nature Geoscience 3, S. 756–761, 2010).

Robert Vautard vom Institut Pierre Simon Laplace in Gif-sur-Yvette bei Paris und sein Team werteten die Daten von 822 Wetterstationen aus den Jahren 1979 bis 2008 aus. Fast alle befinden sich in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel, also auf den dominierenden Landflächen der Erde. Drei Viertel dieser Stationen registrierten ein Abflauen des Winds seit 1979. Insgesamt betrachtet sank die Windgeschwindigkeit in Europa, Nordamerika und Ostasien um 10, in Zentralasien sogar um 20 Prozent. Das passt zu anderen Befunden, wonach die – vom Wind noch stärker als von hohen Temperaturen verursachte – Verdunstung in vielen geografischen Becken der Erde zurückgegangen ist.

Auch die zunehmende Flaute an Land kann – zumindest teilweise – von veränderten großräumigen Zirkulationsmustern herrühren. Unter Umständen sind es sogar die gleichen, die für eine kräftigere Brise auf See gesorgt haben. Vautard und seine Kollegen überprüften diesen möglichen Zusammenhang anhand realitätsnaher Computersimulationen, welche die natürlichen Oszillationen des Luftdrucks reproduzieren. Auch sie ergaben teils etwas geringere Windgeschwindigkeiten an Land. Allerdings war der Effekt

deutlich schwächer als der tatsächlich beobachtete Rückgang.

Diese Diskrepanz deutet auf eine weitere Ursache für die zunehmende Flaute über den Kontinenten hin. Offenbar spielen dabei kleinräumige Prozesse eine Rolle, die von den Computermodellen nicht erfasst werden. Vautard und seine Kollegen vermuten, dass die Erdoberfläche rauer geworden ist. Das könnte den Wind ausgebremst haben. Gründe für die größere Rauigkeit gibt es durchaus – beispielsweise eine veränderte landwirtschaftliche Nutzung des Bodens, durch die sich sein Relief erhöht hat. »Die Windgeschwindigkeit ist dort am stärksten zurückgegangen, wo Wälder aufgeforstet wurden«, erläutert Vautards Kollege Pascal Yiou. Für eine rauere Oberfläche könnten aber auch Hochhäuser gesorgt haben, die in immer größerer Zahl in den Himmel wachsen und kantige Skylines bilden.

Der gegenläufige Windtrend auf den Meeren und an Land lässt sich so zumindest teilweise erklären. Yiou sieht den Grund aber auch in einem grundsätzlichen Unterschied zwischen Kontinenten und Ozeanen. Wind sei über Landflächen eine stark lokal geprägte Variable; über den Meeren dagegen herrsche Gleichförmigkeit. Die Trends müssten also nicht zwangsläufig in die gleiche Richtung weisen.

Derselben Meinung ist Sara Pryor, Geografin an der Indiana University in

Aus Radardaten von Satelliten berechnete Änderungen in der Höhe des stärksten Wellengangs. In den orangefarbenen und roten Bereichen gab es in den vergangenen 20 Jahren die größte Zunahme. Dort dürfte auch die Windgeschwindigkeit am stärksten gestiegen sein.

Bloomington, die an den beiden genannten Untersuchungen nicht beteiligt war. Sie hat schon 2009 ein Abflauen des Winds auf der Landfläche der USA dokumentiert. Auf dem Meer wüchsen eben keine Wälder, kommentiert sie den gegenläufigen Trend lakonisch. Generell müsse man berücksichtigen, dass die Windstärke regional schwanke – von Jahr zu Jahr und von Jahrzehnt zu Jahrzehnt. In Zukunft werde die globale Erwärmung vielleicht bewirken, dass die Luftbewegung in einzelnen Gebieten zu- oder abnehme. Zum Beispiel dürften die beiden Westwindzonen in den gemäßigten Breiten der Süd- und Nordhalbkugel ein Stück zu den Polen hinwandern. Einheitliche Veränderungen über ganze Kontinente oder den gesamten Globus hinweg hält Pryor hingegen für unwahrscheinlich. Auch in Zukunft werden sich die Winde über dem Meer und dem Land also wohl nicht im Gleichtakt ändern.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Augen aus der Retorte

Komplexe Organe im Labor zu züchten, ist bislang weit gehend ein Wunschtraum. Doch nun schufen japanische Forscher eine komplette Netzhaut – mit Hilfe embryonaler Stammzellen von Mäusen.

VON ROBIN R. ALI UND JANE C. SOWDEN

Japanische Forscher lieferten zu einer jüngst in der Fachzeitschrift »Nature« erschienenen Publikation höchst bemerkenswerte Filme (Nature 472, S. 51, 7. April 2011; im Internet: doi:10.1038/nature09941). Erstmals können wir darauf die frühen Entwicklungsstadien des Säugetierauges im Zeitraffer verfolgen (siehe Bilder S. 18).

Das eigentlich Aufregende an dieser Arbeit unter Leitung von Mototsugu Eiraku und Yoshiki Sasai vom Riken-Zentrum für Entwicklungsbiologie in Kobe ist aber, dass die Aufnahmen nicht von

lebenden Tieren stammen. Vielmehr entwickeln sich hier Gewebekulturen von embryonalen Stammzellen und organisieren sich von allein zu einem räumlichen Gebilde: zu einem Augenbecher mitsamt mehrschichtiger Netzhaut (Retina).

Im Prinzip kennen Biologen den Ablauf des Entwicklungsprozesses wie auch die Herkunft der einzelnen Teile des Auges aus embryonalen Geweben (Kasten unten). Beim menschlichen Embryo ist das spätere Auge in der sechsten Woche schon ganz gut erkenn-

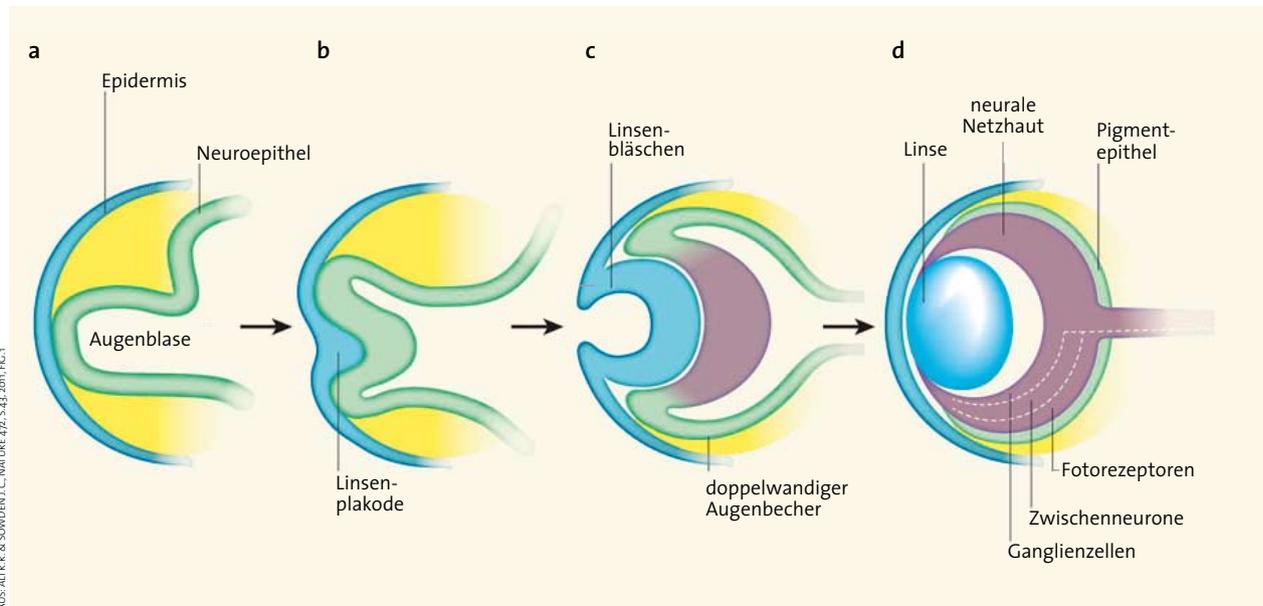
bar (siehe Kasten unten, Bild c). In diesem Stadium hat sich bereits der doppelwandige Augenbecher gebildet, dessen innere Wand später die Netzhaut sein wird. Dieser Becher rührt von einer Ausstülpung des Gehirns her, der so genannten Augenblase, und umfängt das Linsenbläschen, das sich aus der Außenhaut (Oberhaut, Epidermis) eingestülpt hat.

Eine fertige Netzhaut weist neben einer Pigmentschicht mehrere komplex miteinander verschaltete neurale Schichten auf – für die Sehzellen (Foto-

Entwicklung des Auges im Organismus

Ein Wirbeltierauge entsteht aus Bereichen der Außenhaut (Epidermis) und des Gehirns (dem Neuroepithel). Erstere bildet die Linse, Letzteres die Netzhaut. Vom Gehirn her stülpt sich eine Augenblase aus (a). Wo sie die Außenhaut berührt, verdickt sich diese zur Linsenplakode, und beide dellen sich ein (b).

Nun entwickelt sich das Linsenbläschen, und das neurale Gewebe formt sich zum doppelwandigen Augenbecher (c). Des- sen innere Wand wird zur mehrschichtigen neuralen Netzhaut mit Ganglien- und Sinneszellen; die Außenwand ergibt das Pigmentepithel (d).



rezeptoren), Interneurone und retinalen Ganglienzellen, deren Ausläufer den Sehnerv bilden.

Experimente zur Augenbildung er-sannen Forscher schon vor über 100 Jahren. Der deutsche Zoologe Hans Spemann (1869–1941), ein Begründer der Entwicklungsbiologie, der zuletzt in Freiburg wirkte, entdeckte damals an Amphibien: Wenn man die Augenblase entfernt, also die Struktur, aus der sich der Augenbecher formt, entsteht keine Linse. Die Linsenbildung wird demnach durch Wechselwirkungen zwischen dem Augenbläschen und der Epidermis angeregt. In der Embryologie gilt das als ein klassisches Beispiel für eine so genannte Induktion. Von dieser sprechen Biologen, wenn eine Zellgruppe einer anderen Signale schickt und damit deren weiteres Schicksal beeinflusst.

Was nun speziell die Entwicklung des Augenbechers betrifft, so kennen Forscher heute bereits eine Reihe von Genen für Transkriptions- und Wach-

tumsfaktoren, die dafür notwendig sind. 2003 zeigten Forscher um Michael E. Zuber von der State University of New York, dass einem Krallenfrosch an ungewöhnlichen Körperstellen Augen wachsen, wenn man dort Gene für bestimmte Transkriptionsfaktoren des Augenfelds aktiviert. In den Jahren darauf gelang es anderen Forschergruppen, menschliche embryonale Stammzellen dazu zu bringen, sich zu ebender Zelllinie zu differenzieren, aus der sich Netzhautzellen entwickeln. Sie brachten damit auch tatsächlich Pigmentepithel und Neurone der Netzhaut hervor.

Selbstorganisation eines komplexen Gewebes

Bisherige Studien zielten meist darauf ab, möglichst viele Zellen eines speziellen Typs zu gewinnen. Die Hoffnung dahinter war, sie eines Tages Patienten mit Netzhautschäden zu transplantieren. Retinale Pigmentzellen, die auf die-

sem Weg aus embryonalen Stammzellen gewonnen werden, bilden in Kulturgefäßen von allein typische, einfache, einschichtige Zellschichten.

Dagegen galt bislang als abwegig, dass sich auch eine neurale Retina mit ihrem komplexen und genau abgestimmten mehrschichtigen Aufbau von Sinnes- und Ganglienzellen unter künstlichen Bedingungen selbst organisiert. Immerhin deuteten neuere Studien auf ein gewisses Potenzial dafür hin, Augen künstlich zu züchten zu können. So produzierte ein Team um C. Yang vom Albert Einstein College of Medicine in New York in Kulturen embryonaler Stammzellen Strukturen, die an Augenlinsen erinnern. Und Forscher um J.S. Meyer von der University of Wisconsin in Madison konnten schon recht weit differenzierte Vorläuferzellen der Retina züchten.

Nun zeigen Eiraku, Sasai und ihre Mitarbeiter in bemerkenswert deutlichen, wunderschönen Aufnahmen, wie

ANZEIGE

Gedächtnisprobleme?*

Jetzt was tun.

Zuerst ist es mehr lästig als schlimm, wenn einem die richtigen Worte nicht einfallen und man sich Neues schlechter merken kann. Wenn die Probleme zunehmen, Dinge verlegt oder vergessen werden, sollte man etwas tun.

Neuerdings wissen wir: Selbst leichte Gedächtnisprobleme sind Warnzeichen. Wenn die Verbindungen zwischen den Gehirnzellen abgebaut werden, kann das der Anfang einer dauerhaften Verschlimmerung sein. Je früher man etwas für den Schutz der Gehirnzellen tut, umso besser. Der patentierte Wirkstoff-Extrakt von **Tebonin**® zeigt genau hier,

direkt an den sensiblen Gehirnzellen, seine Wirkung: Er regt sie an, wieder neue Verbindungen aufzubauen. Das Netz der Gehirnzellen wird dichter und die Gedächtnisleistung wird gestärkt. **Tebonin**® aktiviert zudem den Energiestoffwechsel der Gehirnzellen und macht sie leistungsfähiger. **Tebonin**® kann die Gehirnzellen also auf zweifache Weise unterstützen.

Schon nach wenigen Wochen ist die Wirkung von **Tebonin**® in der Regel spürbar: Konzentrations- und Gedächtnisprobleme bessern sich. Sie meistern die Anforderungen des Alltags wieder leichter und sind **ausgeglichener, belastbarer und konzentrierter**.



Tebonin®

stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.*

- Exklusiver pflanzlicher Spezialextrakt
- Gut verträglich

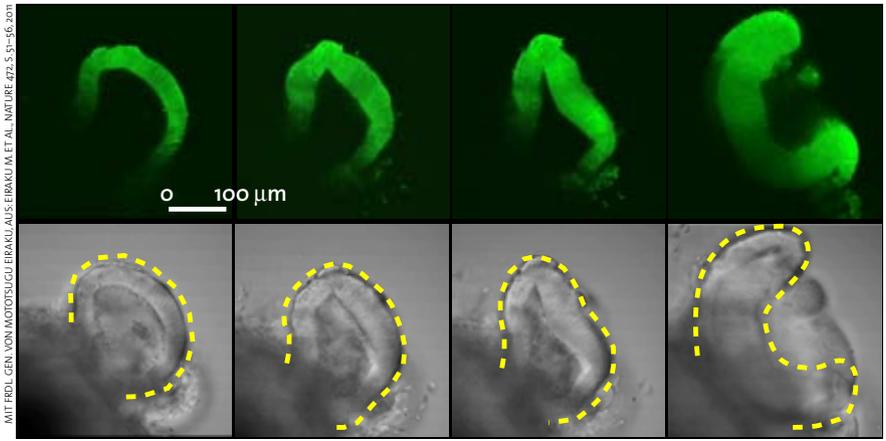


Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG
www.tebonin.de

* Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei leichten bis mittelschweren hirngorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (dementielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu **Risiken und Nebenwirkungen** lesen Sie die **Packungsbeilage** und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe
Stand: Januar 2011 T/01/11/12



Embryonale Stammzellen von Mäusen brachten in Kulturschalen von selbst Augenbecher hervor. Zunächst bildeten sich Augenbläschen (linke Bilder), die sich dann eindellten (rechte Bilder). Oben Bilder mit einem fluoreszierenden Netzhautprotein, unten mit einem speziellen lichtmikroskopischen Verfahren. Eingebledeter Maßstab: 100 Mikrometer (μm)

sich in Zellkulturen spontan Augenbläschen vorwölben, die sich dann – noch verblüffender – von selbst zu einem doppelwandigen Augenbecher einstülpen. Ausgangspunkt dafür waren gleichartige pluripotente Stammzellen, also embryonale Zellen, die alle Zelltypen des Körpers hervorbringen können.

Für den Erfolg war unter anderem entscheidend, dass die Forscher zu den Kulturen eine Matrigel genannte Substanz hinzugaben, die Komponenten der extrazellulären Matrix enthält. Denn normalerweise sind Zellen von einer solchen Interzellulärsubstanz umgeben, einem Netzwerk aus Proteinen und Kohlenhydraten. Nur dann können sie in drei Dimensionen wachsen. Um das Verhalten der Zellen verfolgen zu können, bauten die Wissenschaftler noch ein Gen für ein grün fluoreszierendes Protein ein, das dann im Augenfeld und in der Netzhaut auftritt.

Unter diesen Bedingungen beobachteten sie, wie sich seitlich an hohlen Bällen aus embryonalen Stammzellen grün schimmernde Bläschen formten. Der Vorgang erinnerte an sich ausstülpende Augenblasen. Diese Gebilde dellten sich später spontan zu Augenbechern ein. Mit spezifischen molekularen Markern ließ sich nachweisen, dass tatsächlich eine Art Netzhaut entstanden war – mitsamt neuronalen Schichten und Pigmentschicht.

Als wäre dies nicht schon erstaunlich genug, entwickelten sich die gezüchteten Augenbecher noch weiter. Die retinalen Vorläuferzellen brachten letztlich sämtliche wesentlichen Nervenzelltypen einer echten Netzhaut hervor, einschließlich der verschiedenen Ganglienzellen und Fotorezeptoren. Zudem lief all das offenbar in der natürlichen Reihenfolge ab. Selbst die Anordnung der verschiedenen Zelllagen entsprach dem regulären Vorbild.

Schlummerndes inneres Regelwerk

Die Mechanismen hinter dieser Entwicklung verstehen wir jedoch noch nicht vollständig. Es erstaunt zum Beispiel, dass ein Augenbecher ohne jeden Austausch mit einer Epidermis entstehen kann und ebenso ohne das lockere embryonale Bildungsgewebe (Mesenchym), das ihn im Embryo umgibt (siehe Kasten S. 16, Bild a). Die japanischen Forscher vermuten, dass die gezüchteten Netzhautzellen einem schlummernden inneren Regelwerk folgen können. Unter günstigen Umständen wird dieses in solchen bereits halb ausdifferenzierten Zellansammlungen wach, und nun entwickeln und sortieren sich die Zellen nach diesen Regeln weiter, kombiniert mit Einflüssen der nahen Umgebung.

Wozu ist das Ganze gut? An solchen Laborkulturen ließen sich die moleku-

laren Wechselwirkungen während der Augenentwicklung vermutlich vorzüglich experimentell erforschen. Sollte gar die Zucht von Systemen gelingen, bei denen die Sinneszellen tatsächlich auf Licht reagieren, wäre das von unschätzbarem Wert, um die Details der Arbeitsweise der Netzhaut weiter zu ergründen.

Und falls eines Tages ähnliche Ansätze mit menschlichen Zellen möglich würden, könnten solche Kulturen sogar als individuelle Krankheitsmodelle erhalten, um daran beispielsweise therapeutische Wirkstoffe zu testen. Die Zellen würden von den Patienten selbst stammen und im Labor zunächst in pluripotente Stammzellen umgewandelt (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 22).

Auch ein direkter therapeutischer Nutzen ist denkbar. Die meisten nicht behandelbaren Formen von Blindheit gehen auf den Verlust von Lichtsinneszellen zurück. Andere Neurone der Retina sind gewöhnlich nicht beschädigt. Bei Mäusen gelang es vor einigen Jahren, Vorläufer von Lichtsinneszellen, die aus der Netzhaut von Mäuseembryos stammten, erwachsenen Tieren zu übertragen und so Netzhautschäden zu reparieren.

Eine größere Schwierigkeit für die medizinische Umsetzung solch einer Maßnahme besteht bisher darin, überhaupt genügend geeignete Vorläuferzellen für die Zucht neuer Netzhautzellen zu gewinnen. Denn dazu braucht es eine ergiebige Quelle. Der hier beschriebene Ansatz könnte solch ein Reservoir zur Verfügung stellen – eine synthetische Netzhaut gerade im jeweils erforderlichen Entwicklungsstadium, der sich genau die richtigen Vorläuferzellen zur Transplantation entnehmen lassen.

Robin R. Ali und **Jane C. Sowden** arbeiten am University College London, Ali im Institute of Ophthalmology, Snowden im Institute of Child Health.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature 472, S. 42–43, 7. April 2011

Mysteriöse Bremskräfte aufgedeckt

Die altgedienten Raumsonden Pioneer 10 und 11 werden von einer Kraft verlangsamt, über die Wissenschaftler lange gerätselt haben. Nun hat das Spekulieren über eine mögliche »Neue Physik« ein Ende: Die Raumsonden strahlen lediglich ihre Wärme ungleichmäßig ab.

THORSTEN DAMBECK

Allenfalls Experten und Raumfahrt-enthusiasten erinnern sich heute noch an die Pioniertaten der Raumsonden Pioneer 10 und 11. Die NASA hatte die baugleichen, nur 260 Kilogramm schweren Sonden 1972 und 1973 gestartet, um erstmals Jupiter und Saturn aus der Nähe zu erforschen. Nach erfolgreichen Vorbeiflügen an den beiden Riesenplaneten wurden sie auf Bahnen gelenkt, die sie aus dem Sonnensystem herausführten. Seit nunmehr 8 beziehungsweise 16 Jahren ist

der Funkkontakt zu diesen Oldtimern des Weltraumzeitalters abgerissen, und längst meldeten spätere Missionen zu den Gasplaneten weitaus spektakulärere Entdeckungen. Doch Wissenschaftler brüten immer noch über den alten Daten.

Denn die Zwillinge hatten einen weiteren Auftrag: Sie sollten nach dem ominösen »Planet X« suchen, der jenseits der Bahn des Neptuns vermutet wurde. Der hypothetische Planet sollte sich durch seine Gravitationswirkung

verraten. Um seine vermutlich schwache Anziehung aufzuspüren, mussten die Pioneer-Sonden sehr genau navigiert werden. Doch die Bodenstationen erhielten rätselhafte Navigationsdaten: Ab 1979 registrierte die NASA eine merkwürdige Abbremsung der Sonden. Zwar ist der Effekt winzig, rund zehn Milliarden Mal kleiner als die Erdbeschleunigung. Und doch führt er zu merklichen Abweichungen. Nach Ablauf ihrer Missionen waren die fernen Kundschafter fast eine Million Kilome-

ANZEIGE

Welt der Gründe

XXII. Deutscher Kongress für Philosophie

vom 11. bis 15. September 2011 in München

Mit über 20 Kolloquien und Sektionen sowie Hauptvorträgen von Seyla Benhabib, Lorraine Daston, Peter Gärdenfors, Jürgen Habermas, Franz von Kutschera, Susan Neiman und Robert Pippin

Weitere Informationen sowie die online-Anmeldung zum Kongress finden Sie auf

www.dgphil2011.lmu.de



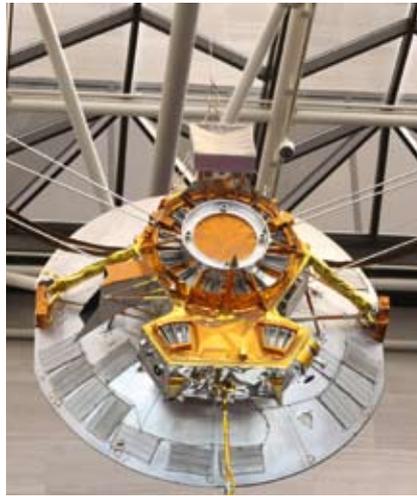
Veranstaltet vom Präsidenten der Deutschen Gesellschaft für Philosophie Julian Nida-Rümelin



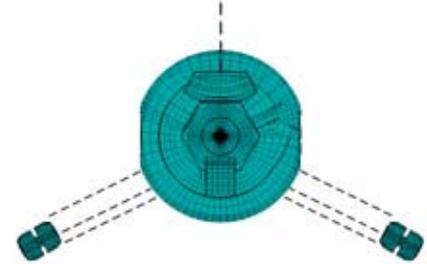
ter von den vorausgerechneten Positionen entfernt.

Bis jetzt widersetzte sich diese so genannte Pioneer-Anomalie hartnäckig jeder Erklärung, obwohl sich Physiker weltweit ein Jahrzehnt lang darüber die Köpfe zerbrachen. Kleine Störkräfte, die von den Sonden selbst ausgehen und bei Bahnberechnungen üblicherweise vernachlässigt werden, wurden als Erklärung geprüft und nach und nach verworfen. Dazu gehören Effekte durch Treibstoffverluste oder der Rückstoß des aus den Atombatterien austretenden Heliums, das beim radioaktiven Zerfall entsteht. Hinzu kam, dass anscheinend auch die jüngeren Raumsonden Galileo und Ulysses, die ebenfalls im äußeren Planetensystem operierten, von den vorausgesagten Bahnen abwichen, auch wenn dies nur ungenau gemessen werden konnte. Daher begannen manche Forscher, exotische Theorien wie ein modifiziertes Gravitationsgesetz oder die mysteriöse Dunkle Energie ins Spiel zu bringen. Einigen Physikern war zudem aufgefallen, dass der Betrag der Anomalie dem Produkt aus Lichtgeschwindigkeit und Hubble-Konstante ähnelt, welche die kosmische Expansion beschreibt. War der seltsame Effekt also ein Indiz für »Neue Physik« oder gar die Folge der Ausdehnung des Universums, die sich unerwarteterweise auch auf viel kleineren räumlichen Skalen zeigte?

In der Juni-Ausgabe der Zeitschrift »Annalen der Physik« geben Wissenschaftler des Bremer Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mik-



Pioneer 10 und 11 sind baugleich mit der nie gestarteten Pioneer-H-Sonde im National Air and Space Museum in Washington (links). Bremer Forscher modellierten die Sonden nun im Computer (unten), um die Pioneer-Anomalie aufzuklären.



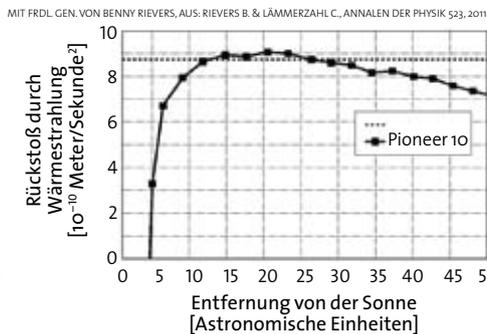
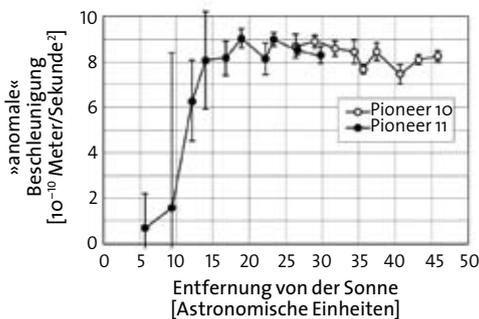
GRAFIK: MIT FRODL, GEN. VON BENNY RIEVERS, AUS: RIEVERS B. & LÄMMERZAHLC., ANNALEN DER PHYSIK 523, 2011; FOTO: CANWOW / PUBLIC DOMAIN

rogravitation (ZARM) nun Entwarnung: Nach ihrer Analyse wurde der Rückstoß, der von der ungleichmäßigen Wärmeabstrahlung der Sonden stammt, bislang unterschätzt. Ein solcher Rückstoß entsteht, weil auch elektromagnetische Wellen Impuls transportieren. Mit Hilfe der im Ingenieurwesen verbreiteten Methode der finiten Elemente bildeten die Forscher die Sonden im Computer nach. »Unser Modell der Pioneer-Sonde umfasst rund 50 000 Bausteine«, erklärt Benny Rievers vom ZARM, der Erstautor der Publikation. »Allein die Oberfläche ist in 17 000 Teilflächen untergliedert.« Schrittweise kalkulierten die Forscher die Temperaturen auf allen Oberflächen und die resultierenden thermischen Rückstoßkräfte für die gesamte Missionsdauer von drei Jahrzehnten.

Wichtig für die Modellierung waren vor allem die zwei starken Wärmequellen an Bord. Die Atombatterien wandel-

ten die Zerfallswärme des radioaktiven Plutonium-238 in Elektrizität um. Anfangs produzierten sie zusammen eine Wärmeleistung von 2580 Watt, die im Lauf der Zeit abnahm. Weitere wichtige, im Modell erfasste Bauteile sind die knapp drei Meter große schüsselförmige Antenne für die Funkverbindung mit der Erde sowie die hauptsächlich hinter dieser angeordneten elektrischen Bordgeräte. Zwei drei Meter lange Masten, welche die beiden Atombatterien tragen, und einen langen Ausleger für ein Magnetometer vernachlässigten die Forscher wegen ihres geringen Beitrags zum Gesamtrückstoß.

Rievers fasst die Ergebnisse zusammen: »Mit unseren Simulationen können wir alle wichtigen Messdaten der Pioneer-10-Sonde mit hoher Genauigkeit reproduzieren – praktisch von Missionsbeginn an.« Das gelte insbesondere für die gemessene Beschleunigungskurve. Rund 70 Prozent der Rückstoßkraft stammen Rievers zufolge von Wärmestrahlung, die von den Atombatterien ausgeht und an der Antenne reflektiert wird. Dies stört die Symmetrie der Anordnung, und eine Nettokraft entsteht. Zu etwa 30 Prozent trage Wärmestrahlung bei, die vom Körper der Sonde selbst ausgeht.



Die Pioneer-Sonden werden entgegen ihrer Flugrichtung durch eine Kraft beschleunigt (Messdaten im Diagramm links), deren Ursprung bis vor Kurzem niemand kannte. Nun stellte sich heraus: Der Rückstoß, den Pioneer 10 durch Abgabe von Wärmestrahlung erfährt (Simulationsdaten rechts), erklärt die vermeintliche Anomalie vollständig.

Nächste Anomalie, bitte!

Forscher um Frederico Francisco von der Technischen Universität in Lissabon waren im Frühjahr einen anderen Weg gegangen, um dasselbe Phänomen zu erklären. Sie verwendeten ein für die

Computergrafik entwickeltes Verfahren aus den 1970er Jahren. Dieses nach seinem Erfinder benannte »Phong shading« erlaubt die Darstellung dreidimensionaler Körper, wobei insbesondere auf die Beleuchtung der Oberflächen großer Wert gelegt wird. Da sowohl das sichtbare Licht als auch die Wärmestrahlung elektromagnetische Wellen sind, standen der Übertragung des Modells auf die Pioneer-Sonden keine prinzipiellen Hürden im Weg. Die Physiker aus Portugal erstellten also ein Computermodell aus den wichtigsten Bauteilen der Sonde und berechneten die direkte und die diffuse Reflexion und den Austausch von Strahlung zwischen den Bauteilen der Sonde. Das einfachere portugiesische Modell bestätigt die Ergebnisse aus Bremen.

Die Ursachenforschung scheint damit am Ziel: Es war die thermische Abstrahlung, welche die Pioneer-Sonden mit sanftem Druck aus ihren Bahnen lenkte. Zwar offenbarte sich damit kei-

ne Neue Physik, ebenso wenig wie den Pionieren »Planet X« ins Netz ging. Dafür können Raumfahrtingenieure nun aber das Wärmeverhalten und die Bahnbewegung von Sonden viel genauer berechnen. Ist die Welt an den Steuerknüppeln der Bodenstationen also wieder in Ordnung? Nicht ganz. Das liegt an einer weiteren Anomalie, die bei Vorbeifügen an Planeten gemessen wird. Diese Fly-by-Manöver werden seit 1974 immer wieder durchgeführt. Sonden nutzten dabei die Schwerkraft der Planeten aus, um – auf oft komplizierten Wegen – ihre Ziele zu erreichen. Der Vorteil: Beim Start kommen sie mit relativ wenig Treibstoff aus. Auch hierbei werden immer wieder seltsame Abweichungen von den zuvor berechneten Bahnen gemessen – insbesondere, wenn die Sonden an der Erde Schwung holen oder in ihrem Gravitationsfeld abbremsen. Rekordhalter in dieser Disziplin ist die US-Sonde Near Shoemaker. Bei einer Erdpassage im Jahr 1998 betrug ihr

unerklärter Geschwindigkeitszuwachs 13,5 Millimeter pro Sekunde.

Auch bei der Steuerung der Sonde Rosetta der Europäischen Weltraumbehörde ESA wurde der Effekt gemessen. Damit sie 2014 ihren Zielkometen erreicht, musste Rosetta unterwegs viermal Planeten anfliegen – dreimal die Erde und einmal den Mars. Beim Erd-Fly-by im März 2005 maß die Bodenkontrolle ein um 1,8 Millimeter pro Sekunde höheres Tempo als vorausberechnet. Ist die »Flyby-Anomalie« ebenfalls mit dem Rückstoß durch Wärmeabstrahlung zu erklären? ZARM-Physiker Claus Lämmerzahl verneint. »Unsere Rechnungen ergeben, dass die Wärmestrahlung für eine Abbremsung um 2,5 Millimeter pro Sekunde gesorgt hat. Das höhere Tempo, das Rosetta beim Vorbeiflug erreichte, lässt sich damit nicht erklären.«

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und arbeitet als Wissenschaftsautor in Heidelberg.

ANZEIGE

iconicSky

ENTDECKEN SIE MIT DER *ICONICSKY*-APP SPIELERISCH DEN KOSMOS:

Das Erkennungsquiz mit den besten Aufnahmen von ESA, ESO und NASA präsentiert über 200 bekannte Objekte des Kosmos in farbigen Großaufnahmen und Beschreibungen. 16 thematisch gegliederte Alben bringen dabei Ordnung in die Bandbreite der kosmischen Phänomene.

Und wenn Sie einmal nicht weiter wissen, unterstützt die »Frag' den Astronomen-Funktion« die Wiedererkennung der *iconicSky*-Objekte. Bewundern Sie deren Schönheit, lesen Sie die Zusammenfassungen, die Ihnen beim Spielen helfen, und gehen Sie mit den angegebenen Weblinks noch mehr in die Tiefe. Zudem besitzt jedes der Alben eine ausführliche Einleitung aus der Feder eines Experten.

IconicSky ist in englischer oder deutscher Version (mit kostenlosen Upgrades) für nur € 2,99 erhältlich.

www.spektrum.com/iconic



Erhältlich im
App Store

Presented by:

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

**STERNE UND
WELTRAUM**

Das Lachen der Ratten

Hochfrequente Lautäußerungen von Nagetieren offenbaren nicht nur deren Stimmung, sondern helfen auch, autistische Menschen besser zu verstehen.

VON MORITZ BORCHERS

Wer zusammen mit Markus Wöhr seine lachenden Ratten im Keller des Fachbereichs Psychologie an der Universität Marburg besucht, hört zunächst einmal nicht viel. In einem abgedunkelten Raum des Labors steht ein Plexiglasbehälter mit zwei jungen Ratten, darüber ist ein Mikrofon installiert. Die beiden Nagetiere tollern herum: Sie verfolgen sich, werfen sich gegenseitig auf den Rücken, krabbeln wild übereinander. Dann schaltet der Psychologe einen speziellen Verstärker an – und nun lassen sich Töne vernehmen, die an das Gefiepe einer Spielkonsole erinnern. Das soll Lachen sein?

»Es gibt Forscher, die diese Geräusche tatsächlich als Lachen bezeichnen«, erläutert Professor Rainer Schwarting, Leiter der bipsychologischen Arbeitsgruppe. »Zumindest kann man sie als akustische Signale verstehen, die einen positiven Gefühlszustand des Tiers anzeigen.« Es handelt sich dabei um so genannte Vokalisationen, die ohne technische Hilfsmittel für das menschliche Ohr nicht hörbar sind, weil sie im

Ultraschallbereich liegen. Dass Tiere wie Ratten oder Mäuse solche hohen Rufe ausstoßen, ist schon jahrzehntelang bekannt. »Doch erst seit ein paar Jahren wird in der Forschung immer deutlicher, dass die Ultraschallvokalisationen etwas über die Gemütslage des Tiers verraten«, so Markus Wöhr.

Dabei scheint der genaue Frequenzbereich der Laute eine wichtige Rolle zu spielen. Besonders hohe Töne im Bereich von 50 Kilohertz (kHz) werden mit positiven Gefühlen des Tiers in Verbindung gebracht, tiefere um 22 kHz mit negativen. Diese Bedeutungen erschlossen die Forscher in Verhaltensexperimenten: 50-kHz-Vokalisationen lassen sich häufig in Situationen aufzeichnen, die nach allgemeiner Ansicht angenehm für das Tier sind. Dazu zählt die Belohnung mit Futter, das Spielen mit Artgenossen oder die Paarung. 22-kHz-

Rufe werden dagegen vor allem dann beobachtet, wenn die Nager miteinander kämpfen oder unangenehmen Reizen wie lauten Geräuschen oder schwachen Elektroschocks ausgesetzt sind.

Kitzeln lässt Neurone wachsen

Ausgerechnet von solchen für uns unhörbaren Lauten erhoffen sich Psychologen nun auch Erkenntnisse über menschliche Verhaltensweisen. »Neurobiologisch betrachtet haben Menschen und Ratten zahlreiche Gemeinsamkeiten. Wenn wir besser verstehen, wie sich die Tiere verhalten und welche Hirnstrukturen dabei beteiligt sind, lernen wir immer auch etwas über das menschliche Gehirn und menschliches Verhalten«, erläutert Schwarting.

Seine Arbeitsgruppe hat zum Beispiel an Ratten untersucht, wie sich positive Emotionen auf die Neubildung von Ner-

Mit speziellen Lautsprechern (links und rechts im Bild) und dem achtarmigen Radiallabyrinth lässt sich die Bedeutung der Ultraschallrufe untersuchen. Dazu wird ausgewertet, wo die Tiere sich wie lange aufhalten, wenn Rufe oder Rauschen abgespielt werden.



TANIA WÖHR MIT FREDL GEN. VON MARKUS WÖHR, UNIVERSITÄT MARBURG



Erleben junge Ratten positive Emotionen, etwa bei ausgelassenem Spielen, stoßen sie sehr hohe Laute im Bereich um 50 Kilohertz aus. Je mehr solche Rufe die Tiere produzieren, desto mehr neue Nervenzellen bilden sich in ihrem Hippocampus.

venzellen in einem bestimmten Hirnareal, dem Hippocampus, auswirken. Dafür haben die Experimentatoren die Ratten sogar gekitzelt. »Diese Methode ist besonders zuverlässig, um positive 50-kHz-Rufe hervorzurufen, da sie einfach das ausgelassene Spielverhalten der Jungtiere nachahmt«, so Schwarting. »Wir konnten in unserem Versuch zeigen, dass ein Zusammenhang zwischen Rufanzahl und neu gebildeten Nervenzellen in Teilen des Hippocampus besteht.« Vereinfacht gesagt: Je mehr Rufe, desto besser die Stimmung des Tiers und desto mehr neu gebildete Zellen (Neuroscience 163, S. 1024–1030).

Die Erkenntnis ist besonders interessant für die Erforschung und Therapie von psychischen Erkrankungen. Zum Beispiel scheinen Auffälligkeiten im Hippocampus und Depressionen miteinander zusammenzuhängen: Ein Mangel an funktionsfähigen Hippocampuszellen könnte dazu führen, dass diese Hirnregion ihre normalerweise mäßige Wirkung auf das Stresssystem des Menschen nicht richtig ausüben kann (Molecular Psychiatry doi:10.1038/mp.2011.48). Daraus würde ein permanenter Alarm- und Überforderungszustand resultieren, der schließlich in einer Depression mündet.

Doch die Ultraschallvokalisationen scheinen nicht nur etwas über den Gefühlszustand eines Tiers zu verraten, sondern dienen auch der Verständigung mit Artgenossen: Bei Playback-Versuchen, in denen Ratten Aufnahmen mit verschiedenen Geräuschen vorgespielt wurden, nähern sich die Tiere dem Lautsprecher häufiger, wenn die positiv besetzten 50-kHz-Rufe abgespielt werden. Bei 22-kHz-Lauten ist das Gegenteil der Fall. Markus Wöhr erläutert: »Wir gehen davon aus, dass die

Rufe eine soziale Bedeutung haben: 50-kHz-Rufe dienen der sozialen Kontaktaufnahme, wohingegen 22-kHz-Rufe eine Alarmfunktion besitzen.«

Diese Aufgabe der Ultraschallvokalisationen macht man sich nun auch bei der Erforschung von Autismus zu Nutze. Die Hauptsymptome der Erkrankung beziehen sich auf drei Bereiche: Betroffene haben Schwierigkeiten beim Erlernen und Anwenden von Sprache, soziale Kommunikation fällt ihnen schwer, und sie zeigen häufig sich wiederholende, starre Verhaltensweisen oder ausgeprägte Sonderinteressen. Vor allem auf Grund der Kommunikations- und Sprachdefizite galt es bislang als wenig wahrscheinlich, ein geeignetes Tiermodell für Autismus zu finden.

Autistische Mäuse?

Das könnte sich nun bald ändern: So zeichnen sich zum Beispiel bestimmte Mäusestämme dadurch aus, dass sie deutlich weniger mittels Ultraschallrufen kommunizieren als andere. Bei einigen davon lassen sich darüber hinaus ungewöhnlich starre Verhaltensweisen beobachten, etwa bei der Fellpflege. Laut anderen Forschungsarbeiten produzieren Mäuse, die auf Grund genetischer Manipulation ähnliche Veränderungen im Erbgut aufweisen wie auch manche Autisten, auffällige Ultraschallvokalisationen. Kann man hier womöglich von »autistischen Mäusen« sprechen?

Experten wie die amerikanische Verhaltensforscherin Jacqueline Crawley vom National Institute of Mental Health in Bethesda (Maryland) sind da zurückhaltend. Kein Tiermodell könne eine komplexe menschliche Erkrankung wie Autismus vollständig nachbilden. Bestenfalls ähneln sich Symptome und Ursachen der Erkrankung bei Mensch und



1. Summer School

WISSENSCHAFT KOMMUNIZIEREN!

für Nachwuchswissenschaftler

Wie kann ich als Wissenschaftler meine Themen und Ergebnisse in die Medien einbringen? Welche davon sind überhaupt für die Medien interessant? Und welche Möglichkeiten habe ich, selbst durch einen Blog oder Facebook direkt mit der Öffentlichkeit zu kommunizieren?

Antworten gibt die erste Summer School *Wissenschaft kommunizieren* von TU Braunschweig und Haus der Wissenschaft.

24.–26. August 2011
im Haus der Wissenschaft
Braunschweig

Mehr Informationen und
Anmeldung unter

www.hausderwissenschaft.org

Gehorchen Erzählungen darwinschen Gesetzen?

Umriss einer soziobiologischen Literaturanalyse

Im Darwinjahr 2009 haben wir den Schöpfer der Evolutionslehre gebührend gefeiert. Außer hartnäckigen Kreationisten bestreitet wohl niemand mehr, dass die Entfaltung des Reichtums an Lebensformen keinem zielgerichtet agierenden Züchter zu verdanken ist, sondern auf dem Wechselspiel von zufälliger Mutation und Selektion beruht.

Nicht nur das: Das Paradigma der Evolution wirkt heute weit über den biologischen Bereich hinaus. Kosmologen spekulieren über ein Multiversum, in dem sich immerfort Universumsvarianten entwickeln. Die spezielle Beschaffenheit unseres Weltalls erklärt sich durch kosmische Fitness: Gemäß dem so genannten anthropischen Prinzip passen wir rein zufällig zu unserem Kosmos – und er zu uns.

Wie im Großen, so auch im Kleinen. Theoretiker sprechen von Quantendarwinismus und erklären den Übergang von vieldeutig überlagerten Mikrozuständen zu eindeutigen Messwerten als Auslesevorgang. Die vertraute Alltagswelt entsteht demnach aus dem *survival of the fittest* unter den Quantensuperpositionen.

Da Selektionsvorgänge allgegenwärtig sind, tauchte nun die Frage auf, ob nicht auch ein Kulturphänomen wie das Erzählen erfundener Geschichten darwinschen Regeln gehorcht. Gemeint ist nicht etwa, dass die Erfolgsaussichten des Versuchs, einen Roman zu veröffentlichen, den Überlebenschancen einer Kaulquappe in einem überfüllten Tümpel gleichen. Vielmehr sind einige Literaturwissenschaftler in den USA auf die Idee verfallen, Kunstwerke biologisch zu erklären; ihr Ziel ist demnach eine Soziobiologie der Epen und Romane (Science 332, S. 654, 2011).

So führt Jonathan Gottschall vom Washington & Jefferson College in Washington (Pennsylvania) die Gewalttätigkeit der männlichen Helden in Homers »Ilias« und »Odyssee« auf den akuten Mangel an jungen Frauen zurück, die zur Fortpflanzung zur Verfügung standen. Professor Joseph Carroll von der University of Missouri in St. Louis wiederum versucht das seltsame Verhalten von Hamlet in Shakespeares gleichnamigem Drama neurowissenschaftlich als Depression zu erklären.

Den Grund für die von diesen Forschern empirisch festgestellte Tatsache, dass Leser eine herrschsüchtige Romanfigur meist moralisch tiefer stehend einstufen als einen selbstlosen Altruisten, finden Literaturdarwinisten in grauer Vorzeit. Damals konnten kleine Jäger- und Sammlerverbände dem Verhungern nur entgehen, indem sie kooperierten. Altruismus etablierte sich als Überlebensvorteil und wirkt deshalb, so Carroll und Gottschall, noch heute in fiktionalen Erzählungen beispielhaft. Der soziobiologische Nutzen von erfundenen Geschichten liegt auf der Hand: Sie verfestigten die dem Fortbestand der Gattung förderliche Moral.

Der Evolutionsbiologe Geoffrey Miller von der University of New Mexico in Albuquerque sieht den tieferen Sinn der Literatur ein wenig anders. Ein talentierter Erzähler verspreche dem paarungswilligen Weibchen, auch andere Fertigkeiten zu besitzen, und erziele damit einen individuellen Vorteil bei der sexuellen Selektion – wie der Pfau mit dem Spreizen der prächtigen Schwanzfedern.

Solche Biologisierung der Kunst ist nicht jedem geheuer. So hält der Harvard-Psychologe Steven Pinker, sonst sehr aufgeschlossen für die Betonung unserer biologischen Determinanten, die Kunst für ein evolutionäres Nebenprodukt ohne selektiven Vorteil. Wie dem auch sei – wer gerade in eine packende Erzählung versunken ist, dem kommt die Debatte über biologische Determinanten des fiktiven Geschehens bestimmt unerheblich vor.



Michael Springer

Tier stark, und Therapien, die sich beim Menschen bewährt haben, wirken auch im Tiermodell – und umgekehrt.

Ähnlich sind die reduzierten Ultraschallvokalisationen einzuordnen, die autistischen Kommunikationsdefiziten entsprechen. Weitere Beobachtungen stützen dieses Ergebnis. Mäuse kommunizieren nämlich auch durch Geruchsspuren, die sie mit dem Urin ausscheiden. Wenn sich hinter den ausbleibenden Rufen ein generelles Kommunikationsproblem verbirgt, müsste folgerichtig diese zweite Form des Austauschs ebenfalls eingeschränkt sein.

Leerer Käfig ist auch gut

Genau das scheint zuzutreffen: Normalerweise reagieren andere Mäuse auf die Geruchsspuren, indem sie selbst in unmittelbarer Nähe Duftmarken hinterlassen oder Ultraschallrufe ausstoßen. Tiere des so genannten BTBR-Stamms, der bereits zuvor mit autismusähnlichen Symptomen in Verbindung gebracht wurde, zeigen beide Verhaltensweisen jedoch deutlich seltener als andere Mäusestämme (Genes, Brain and Behavior 10, S. 35–43). Zudem: Können solche Mäuse zwischen zwei Kammern wählen, wobei sich in der einen Kammer eine weitere Maus in einem Käfig und in der anderen nur ein leerer Käfig befindet, so verbringen sie in beiden Kammern etwa gleich viel Zeit. Auch das spricht für Auffälligkeiten in der sozialen Kommunikation, denn normalerweise bevorzugen Mäuse die Nähe von Artgenossen.

Weitere Forschungsarbeiten haben inzwischen gezeigt, dass sich das eingeschränkte Sozialverhalten der BTBR-Nager verbessern lässt, wenn sie mit kontaktfreudigen Mäusen anderer Stämme gemeinsam aufgezogen werden (Autism Research 4, S. 17–27). Möglicherweise werden aus solchen Beobachtungen an Tiermodellen eines Tages Therapien für den Menschen entstehen. Doch bis dahin sind die jungen Ratten im Marburger Institut für Psychologie schon längst ausgewachsen.

Moritz Borchers arbeitete von 2006 bis 2009 in der Arbeitsgruppe für Basalganglienfunktionen und -dysfunktionen an der Universität Marburg.

Der vernetzte Baum

Eine 150 Jahre alte Eiche in Erlangen hat eine »Stimme« bekommen: Sie wurde mit modernsten Messgeräten ausgestattet, die über ihr Dasein berichten – und gleichzeitig wertvolle Daten für das Forschungsprojekt »Bäume im Klimawandel« liefern.

Von Daniel Lingenhöhl

Ein Baum steht jahrein, jahraus stumm an seinem Ort. Er erduldet Stürme und Trockenperioden, leidet vielleicht unter Luftverschmutzung, wird von Tieren als Wohnstätte genutzt – und kann nicht darüber berichten. Das soll nun ein Projekt ändern, das »Spektrum der Wissenschaft« zusammen mit dem Institut für Geografie der Universität Erlangen-Nürnberg durchführt und einer 150 Jahre alten Stieleiche im Botanischen Garten von Erlangen eine Stimme verleiht. Hierfür zeichnen Messgeräte auf, was um den Baum herum und in ihm geschieht. Eine spezielle Software »übersetzt« dann diese Daten in kurze Textbotschaften für das Internet: Sie sollen einen Eindruck davon vermitteln, was das Leben eines Baums alles beeinflusst.

Herzstück des »witternden Baums« ist die so genannte Black Box – quasi der Flugschreiber der Eiche. Sie fasst die von den verschiedensten Messgeräten aufgezeichneten Umwelteinflüsse und Baumparameter zusammen und übermittelt sie an eine zentrale Rechneinheit. Die Daten stammen unter anderem von einer Wetterstation, die ebenfalls an der

Zu den sensibelsten Messgeräten der Eiche 2.0 gehört der Saftflussensor, der hier gerade mit Hilfe eines Gleitmittels installiert wird. Über die minimalen Temperaturunterschiede zwischen den beiden Sensorspitzen lässt sich mit Hilfe einer speziellen Formel errechnen, wie viel Wasser der Baum von den Wurzeln zur Spitze transportiert.

Eiche angebracht wurde. Ein Anemometer misst beispielsweise die Windgeschwindigkeit und -richtung, ein Pluviograf die Menge an Regen, Tau oder Schnee, die im Umfeld des Baums niedergeht. Dazu kommen ein Thermometer für die Lufttemperaturen sowie fotoelektrische Sensoren, die die Sonnenscheindauer und damit auch den Bewölkungsgrad des Himmels über Erlangen aufzeichnen. Diese Geräte wurden mit Hilfe eines Gestänges knapp außerhalb des eigentlichen Kronenraums der Eiche montiert, um die Bedingungen im Freiland abzubilden – so, wie sie ungefiltert auf die äußere Laubschicht treffen.

Auf das Wetter reagiert der Baum durch physiologische Änderungen – die zwei weitere, technisch ausgefeilte Sensoren überwachen. Ein Saftflussmesser registriert kontinuierlich, wie viel Wasser die Eiche im Boden aufnimmt und von seinen Wurzeln aus zu den Blättern transportiert. Dazu wurden zwei dünne Messnadeln übereinander angeordnet durch die Rinde ins Holz der Eiche gestochen. Sie erfassen die Temperaturdifferenzen, die zwischen den Spitzen der beiden Sensoren auftreten. Über diesen Unterschied lässt sich dann mit einer Formel der tatsächliche Wasserfluss berechnen. Wie stark der Baum durch Fotosynthese im Jahresverlauf wächst, nimmt wiederum ein Dendrometer auf: ein Gerät, das den Dickenzuwachs der Eiche aufzeichnet. Es dokumentiert zeitlich hoch aufgelöst die Reaktionen der Pflanzen auf ihre Umwelt und erlaubt die genaue Zuordnung der Wachstumsphasen zu den jeweiligen Umweltfaktoren.



BEIDE FOTOS: RICHARD ZINZEN

Um das Bild abzurunden, fließen Umweltdaten zur Feinstaub- und Ozonbelastung von einer Messstation des Bayerischen Landesamts für Umwelt an den Zentralcomputer des Twitterbaums. Der erfasst alle Messungen, wertet sie aus und übersetzt sie in kurze Textbotschaften. Die Eiche teilt dann über ihre Homepage und Twitterseite im Internet mit, dass beispielsweise ein eisiger Wind an ihr zerrt, die Blütezeit bevorsteht oder bodennahes Ozon ihre Blätter reizt und die Fotosynthese beeinträchtigt. Eine Kamera rundet das Angebot ab: So kann jeder Besucher der Website beobachten, wie sich die Eiche im Lauf des Jahres wandelt.

Der ganze Aufwand ist nicht nur eine Spielerei, die Ökologie und neue Medien verknüpft: Er dient auch handfester Wissenschaft. Denn die gesammelten Daten werden vom Institut für Geografie in Erlangen ausgewertet und fließen in verschiedene Forschungsprojekte ein – etwa zum Thema »Stadtklima und Stadtvegetation«.

Erlanger Wissenschaftler sind zudem an einem Projekt des bayerischen Forschungsverbunds FORKAST beteiligt, das die Auswirkungen klimatischer Extremereignisse auf Wälder an Trockenstandorten untersucht. Im Fokus stehen vor allem die Zukunftschancen von Eichen und Rotbuchen, die ökologisch wie ökonomisch besonders wertvolle Baumbestände bilden. Die Forscher bearbeiten Fragestellungen wie: Wann und wie wächst eigentlich ein Baum? Wie unterscheidet sich ein Baum in der Stadt von einem im Wald? Leidet er im Sommer unter Dürre und Schadstoffen und stellt gar teilweise sein Wachstum ein? Lassen sich hieraus Schlussfolgerungen ableiten, wie Waldbäume künftig reagieren werden, wenn im Zuge des Klimawandels die Sommer zunehmend heißer und trockener werden und somit immer mehr dem heutigen Stadtklima ähneln?

Vorbild für den Erlanger Baum ist eine Buche in Brüssel, die bereits seit mehr als einem halben Jahr entsprechend ausgerüstet ist und über das Internet mit einer wachsenden Fangemeinde kommuniziert. Sie dient allerdings nicht gleichzeitig der Wissenschaft. Möglicherweise wächst weltweit gesehen bald ein ganzer twitternder Wald, denn in naher Zukunft sollen weitere Bäume ihre Botschaften funken. In New York steht schon einer in den Startlöchern. Passend wäre es – haben doch die Vereinten Nationen für 2011 das Jahr des Waldes ausgerufen. ~

Daniel Lingenhöhl ist promovierter Geograf und Redaktionsleiter Online bei »Spektrum der Wissenschaft«.

WEBLINKS

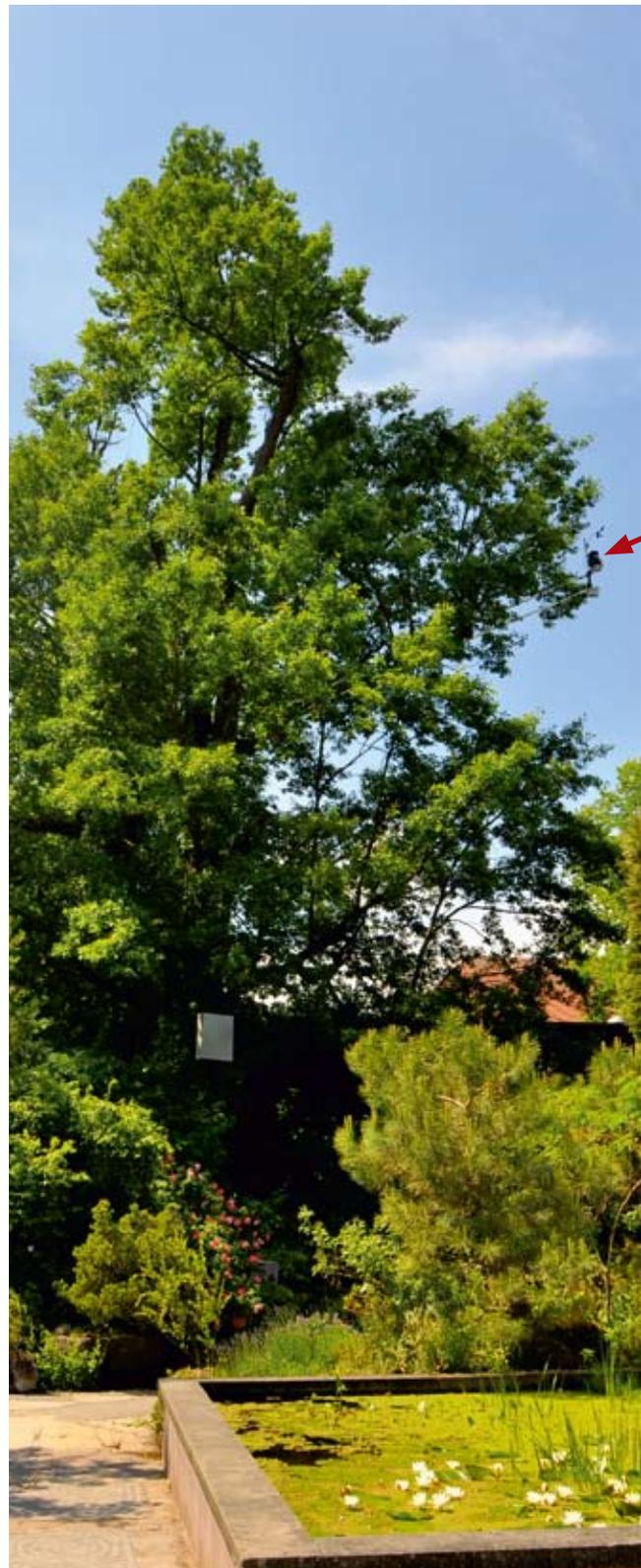
Mehr aus dem Leben der Erlanger Eiche erfahren kann man auf der baumeigenen Seite, bei Twitter, Youtube und Flickr – und sehen, wie der vernetzte Baum sich in den nächsten Monaten entwickelt.

Homepage: www.talking-tree.de

Blog: www.wissenslogs.de/wblogs/blog/talkingtree

Youtube: www.youtube.com/talkingtreede

Twitter: www.twitter.com/talkingtree_de



Diese Stieleiche aus dem Botanischen Garten von Erlangen wurde zum twitternden Baum auserkoren. Der weiße Kasten an ihrem Stamm beinhaltet die Black Box, in der alle Messdaten der Wetterstation und weiterer Sensoren einlaufen. Die Wetterstation selbst ist am rechten Rand der Krone, ungefähr in der Mitte, angebracht (Pfeil).

Das Innenleben des Genoms

Im Zellkern geht es drunter und drüber: Chromosomen wie auch einzelne Gene wechseln immer wieder ihren Ort – mit erstaunlichen Auswirkungen. Die variable Architektur ist an der Ausdifferenzierung embryonaler Stammzellen ebenso beteiligt wie am Entstehen von Krankheiten wie Krebs.

Von Tom Misteli

Vor zehn Jahren enträtselten Molekularbiologen die DNA-Sequenz des menschlichen Genoms – gewissermaßen den Bauplan unseres Körpers. Jedoch: Die Auflistung der einzelnen Teile eines Motors erklärt noch nicht, wie er funktioniert. Genauso wenig lässt sich aus der Abfolge der DNA-Buchstaben aller Chromosomen in den menschlichen Zellen ablesen, wie das Genom die Vorgänge in den Zellen steuert und ermöglicht, dass aus einer befruchteten Eizelle ein selbstständiges Individuum entsteht.

Wie dirigiert das Erbgut die Sinfonie der biologischen Aktivitäten in lebenden Organismen? Ein wichtiger, bislang wenig beachteter Faktor dabei ist, wie sich die Chromosomen im dreidimensionalen Raum des Zellkerns anordnen – und mit ihnen die Gene.

Neuartige Verfahren zur räumlichen Bildgebung erlauben uns, das Innere lebender Zellen genauer als je zuvor zu betrachten. Mit ihrer Hilfe haben wir im Zellkern ein pulsierendes »Ökosystem« entdeckt: Benachbarte Chromosomen wechselwirken physikalisch miteinander; Gene innerhalb

AUF EINEN BLICK

GESTALTER DES LEBENS

1 Die Erbsubstanz **DNA** ist im Zellkern in **Chromosomen** organisiert. Während der Zellteilung sind diese dicht gepackt und unter dem Mikroskop als typische X-Formen sichtbar. Die übrige Zeit nehmen sie jedoch eine wesentlich aufgelockertere Gestalt an – was ihre Erforschung lange erschwerte.

2 Neue Untersuchungsmethoden zeigen, dass jedes Chromosom auch im losen Zustand einen klar definierten Ort im Zellkern einnimmt. Forscher sprechen von **Territorien**.

3 Je weiter Chromosomen oder Teile davon an der Peripherie des Zellkerns liegen, desto weniger aktiv sind die dortigen Gene. Die **räumliche Anordnung des Erbguts** spiegelt also seinen Funktionszustand wider – und damit, welche Aufgaben die Zelle zu einem konkreten Zeitpunkt erfüllt. Auch bei **Krebs** und anderen Erkrankungen ändert sich die **Position bestimmter Gene**, was sich etwa für eine frühe Diagnose nutzen lässt.

4 Der genaue Mechanismus, wie die Gene im Zellkern hin und her wandern, ist noch unklar. Es könnte ein sich **selbst organisierender Vorgang** zu Grunde liegen, der keine molekularen Maschinen oder Ähnliches benötigt.



Während der Zellteilung sind Chromosomen kompakte, verdichtete Strukturen (links). Die übrige Zeit liegen sie wesentlich aufgelockerter im Zellkern (unten). Das *chromosome painting* erlaubt es heute, jedes Chromosom zur besseren Unterscheidung mit einer anderen Farbe zu markieren.



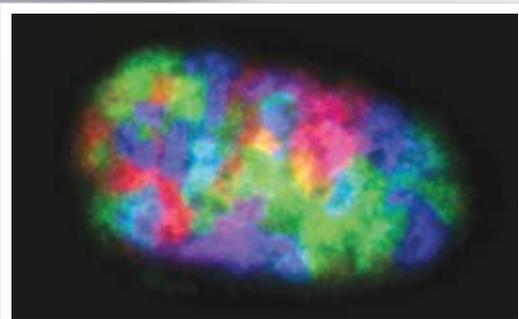
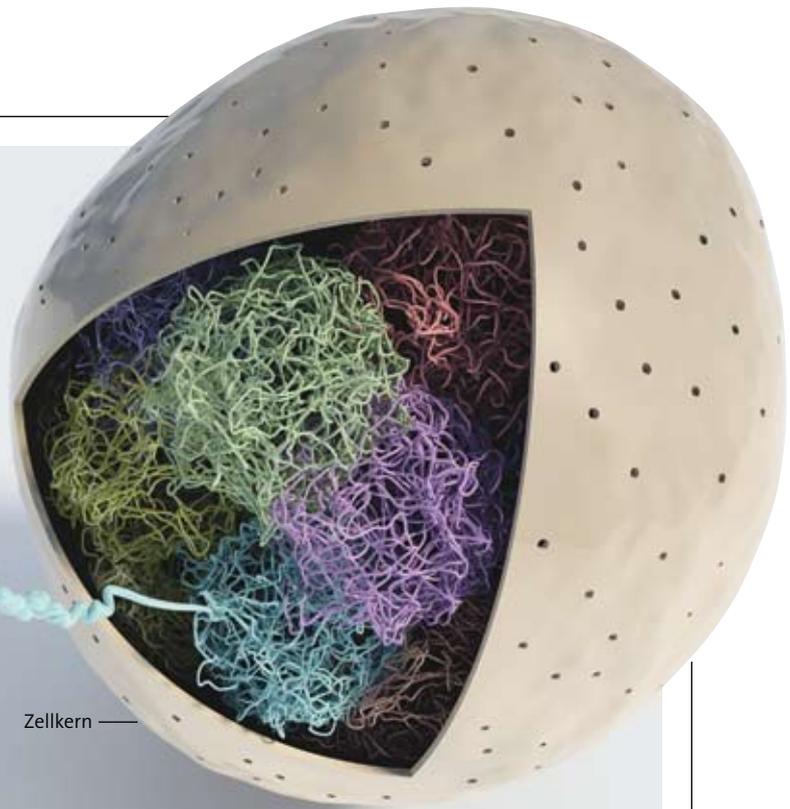
ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: ANATOMY BLUE

Organisation im Zellkern

Schon lange ist bekannt, wie sich die DNA in Chromosomen höchst komplex zusammenfaltet (siehe Grafik). Jetzt fanden Forscher zudem heraus, dass die einzelnen Chromosomen unterschiedliche Territorien im Zellkern besetzen (mikroskopische Aufnahme unten rechts). Einige bevorzugen hierbei die Peripherie des Kerns, während andere sich mehr im Innern aufhalten. Wo sich die einzelnen Chromosomen befinden und welche von ihnen nebeneinanderliegen, kann die Funktion der Zelle entscheidend beeinflussen.

AUFBAU EINES CHROMOSOMS

Die DNA ist in allen 46 menschlichen Chromosomen abschnittsweise um »Spulen« gewickelt, die aus Histonen bestehen. Die Perlenketten aus diesen Proteinen und aufgewickelter DNA sind in noch dichter gepackte Strukturen gefaltet. Diese Komplexe aus DNA und Protein im Zellkern bezeichnet man als Chromatin. Knüpfte man die DNA aller Zellen eines menschlichen Körpers im abgewickelten Zustand aneinander, so würde der entstandene Strang 100-mal von der Erde bis zur Sonne und zurück reichen.



BUNTER FLICKENTEPPICH

In den vergangenen 15 Jahren gelang es mit neuen mikroskopischen Techniken, die lange vorherrschende Ansicht zu widerlegen, dass die Chromosomen im Zellkern ein völlig ungeordnetes Durcheinander wie Spagetti in einer Schüssel bilden. Das Bild zeigt den Kern einer menschlichen Bindegewebszelle. Darin ist jedes Chromosom mit einer eigenen Farbe markiert.

MULTICOLOR COBRA-FISH-COMBINED BINARY-RATIO LABELING (COBRA) OF NUCLEIC ACID PROBES FOR MULTI-COLOR FLUORESCENCE IN SITU HYBRIDIZATION (FISH). MITTEL: GEN. JONWANGYI, SEHRAI UND HANSTANKE, LONIC

der Chromosomen ändern je nach ihren anstehenden Aufgaben den Ort im Zellkern; und Moleküle, welche die Genaktivität regulieren, sammeln sich in geschäftigen Zentren. Diese Entdeckungen bringen auch neue Einsichten darüber, wie das Genom uns gesund erhält und wie andererseits manche Krankheiten entstehen, zum Beispiel Krebs.

Die gewaltigen Fortschritte der letzten Jahre auf diesem Gebiet beruhen auf Entdeckungen aus den 1980er Jahren. Damals war bereits bekannt, dass sich die Chromosomen während der Zellteilung stark verdichten und die charakteristische x-förmige Gestalt annehmen (siehe Bild S. 29). Dagegen lockert sich ihre Struktur deutlich auf, wenn eine Zelle ihren alltäglichen Pflichten nachgeht und sich nicht gerade

teilt. In diesem losen Zustand lassen sich die einzelnen Chromosomen auch mit den besten Mikroskopen kaum unterscheiden und bildeten nach damaliger Auffassung ein unübersichtliches Durcheinander – ähnlich gekochten Spagetti nach dem Umrühren in der Schüssel.

Doch gab es auch Hinweise auf geordnetere Verhältnisse. Bereits Anfang des 20. Jahrhunderts hatte der deutsche Zellforscher Theodor Boveri (1862–1915) das »Spagettimodell« der chromosomalen Organisation angezweifelt. Auf Grund von Untersuchungen an Pferdespulwürmern (*Ascaris megalocephala*) postulierte er, dass ein Chromosom seine Form und Größe zwar verändert, aber sich dennoch stets in einem klar umgrenzten Gebiet des Zellkerns befindet. Diese Regio-

nen bezeichnete er als Chromosomenterritorien. Da jedoch die aufgelockerten Chromosomen nur schwer sichtbar zu machen sind und Boveri mit den Spulwürmern ein recht ungewöhnliches Modellsystem benutzte, beachteten Forscherkollegen sein Konzept lange Zeit nicht weiter.

Chromosomenmalerei mit Fluoreszenzpinsel

Erst in den frühen 1980er Jahren gelang es dem Mediziner Thomas Cremer (heute Professor an der Ludwig-Maximilians-Universität München) zusammen mit seinem Bruder Christoph Cremer (Physikprofessor an der Universität Heidelberg), Chromosomenterritorien experimentell nachzuweisen. Sie nutzten dazu eine neue Methode, die gezielt die DNA in eng umgrenzten Bereichen sichtbar macht: Eine Laserbestrahlung von kleinen Teilregionen des Zellkerns markierte nur einige wenige Chromosomen. Wäre die DNA jedoch tatsächlich so chaotisch durchmischt wie bis dahin geglaubt, hätte jeder Laserpuls gleichzeitig viel mehr Chromosomen treffen müssen.

Einige Jahre darauf entwickelten andere Forscher eine gezieltere Methode zur Visualisierung ganzer Chromosomen. Bei diesem *chromosome painting* (»Chromosomenmalerei«) lagern sich mit Fluoreszenzfarbstoffen bestückte Sonden an jeweils typische DNA-Sequenzen der einzelnen Chromosomen an. So lässt sich jedes Chromosom mit einer eigenen Farbe markieren und verrät dadurch seinen Aufenthaltsort. Diese Untersuchungen zeigten eindeutig, dass jedes Chromosom einen klar abgegrenzten Bereich des Zellkerns einnimmt (siehe Mikroskopaufnahme links).

Diese Entdeckung warf viele Fragen auf: Sind die Territorien im Kern zufällig verteilt? Oder bekommt jedes Chromosom seinen Platz im Zellkern zugewiesen? Und – noch wichtiger – beeinflusst die Position eines Chromosoms im Zellkern die Aktivität seiner Gene?

Wie wir heute wissen, nehmen die verschiedenen Chromosomen bevorzugt bestimmte Plätze im Zellkern ein. In menschlichen weißen Blutkörperchen (Leukozyten) zum Beispiel liegt Chromosom 18 stets außen nahe der Zellkernwand, während sich Chromosom 19 im Zentrum aufhält und Chromosom 7 eine Position dazwischen bevorzugt. Dies hat zur Folge, dass der Zellkern kein homogenes Milieu bietet. So hat ein Chromosom in einem bestimmten Zelltyp in der Regel die gleichen Nachbarn. In Mäuseleukozyten zum Beispiel liegt Chromosom 12 oft neben Nummer 14 und 15.

Doch ist diese Ortsverteilung nicht in Stein gemeißelt. Meine Arbeitsgruppe fand heraus, dass die Chromosomen in verschiedenen Zelltypen oft ganz unterschiedlich angeordnet sind, und andere Wissenschaftler stellten fest, dass sich dieses Arrangement während der Entwicklung des Organismus sowie bei Erkrankungen verändert.

Zudem bestimmt der Ort eines Chromosoms im Zellkern offenbar auch, ob die Gene, die es trägt, ein- oder ausgeschaltet werden. Einen ersten Hinweis darauf liefert die Beobach-

tung, dass Gene ihre Position wechseln, wenn sich ihre Aktivität verändert. Ein Beispiel ist das Gen für ein Faserprotein namens *GFAP*. In den sternförmigen Astrozyten des Gehirns ist normalerweise eine Kopie des Gens aktiv – die Zelle nutzt sie also als Bauanleitung, um die entsprechenden Proteine herzustellen –, und die andere Kopie bleibt stumm.

Takumi Takizawa aus meiner Arbeitsgruppe entdeckte, dass die abgeschaltete Version des *GFAP*-Gens meist an der Peripherie des Astrozytenzellkerns liegt, die aktive Kopie hingegen weiter im Innern. Andere Forscher beobachteten eine ähnliche Anordnung bei den Genen, die Immunglobuline – Antikörper – kodieren. Diese Abwehrproteine werden von einem bestimmten Typ weißer Blutkörperchen, den B-Lymphozyten, produziert, wenn diese durch die Gegenwart fremder Zellen alarmiert werden. Dann wandert die Region des Chromosoms, die das Gen für die Immunglobulinkomponente IGH trägt, in Richtung Kernzentrum. Solche Erkenntnisse deuten auf eine einfache Regel über den Zusammenhang zwischen Genposition und -funktion hin: Am äußeren Rand des Zellkerns liegende Gene sind demnach oft inaktiv.

Möglicherweise gibt es dort Faktoren, die das Verstummten von Genen begünstigen, wie bereits eine Beobachtung aus den 1930er Jahren nahelegt: An der Peripherie des Zellkerns findet man so genanntes Heterochromatin – sehr dicht gepacktes chromosomales Material. Dazu muss man wissen: Im Innern der Chromosomen ist die DNA perlenkettenartig auf eine Art Spulen aus Histonproteinen aufgewickelt, die dann ihrerseits zu dicken Chromatinfasern zusammengelegt sind (siehe Grafik links). Diese wiederum falten sich weiter zu übergeordneten Strukturen, was sie zusätzlich komprimiert. Heterochromatin ist nun eine besonders dichte Form von Chromatin. Dadurch kommen hier die Proteine, die Gensequenzen ablesen sollen, praktisch nicht an die DNA heran und können damit ihre Aufgabe nicht erfüllen.

Stummgeschaltete Gene an der Zellkernperipherie

Damals war jedoch noch nicht klar, ob die Kernperipherie die Gene stilllegt oder ob sich verdichtetes Chromatin dort einfach besonders gern anreichert. Die Ergebnisse einer Serie eleganter Experimente, die verschiedene Arbeitsgruppen 2008 durchführten, sprechen für die erste Vermutung. Dabei entfernten die Forscher aktive Gene aus ihrer normalen Umgebung im Zentrum des Zellkerns und befestigten sie an der Innenseite der Kernhüllmembran. Die Folge: Ihre Aktivität reduzierte sich deutlich. Das Milieu in der Peripherie des Zellkerns trägt also offenbar dazu bei, zumindest manche Gene stummzuschalten.

Umgekehrt bietet das Zentrum des Kerns einen großen Vorteil für chromosomale Regionen mit Genen, die schnell oder häufig angeworfen werden müssen: Hier finden sich größere Mengen an bestimmten Proteinkomplexen, die man

Verschiedene Zelltypen ordnen die Chromosomen anders an

als Transkriptionsfabriken bezeichnet. Sie bestehen aus Enzymen und weiteren Zellkomponenten, die bei der Genaktivierung benötigt werden. RNA-Polymerasen stellen dort im Rahmen der so genannten Transkription RNA-Kopien der Gen-DNA her, die wiederum später als Vorlage zur Proteinsynthese dienen. Andere Proteine, »Transkriptionsfaktoren«, binden an regulierende Bereiche der Gene und setzen damit die Transkription in Gang.

Dass es solche Transkriptionsfabriken gibt, schlug als Erster der Molekularbiologe Peter Cook von der University of Oxford 1993 vor. Er hatte beobachtet, dass die Anzahl der aktiven Gene zu einem gegebenen Zeitpunkt viel größer ist als die zur gleichen Zeit im Zellkern nachweisbaren Orte, an denen Polymerasen ihrer Arbeit nachgehen. Dies ließe sich leicht dadurch erklären, dass sich aktive Gene in Transkriptionszentren sammeln, wo sie Polymerasen und Transkriptionsfaktoren gemeinsam nutzen (siehe Kasten rechts). Ganz neu war die Idee allerdings nicht: Die vielen hundert Gene für die so genannte ribosomale RNA werden gemeinsam im Nukleolus transkribiert – einer Struktur des Zellkerns, die so groß ist, dass man sie unter dem Lichtmikroskop erkennen kann.

In embryonalen Stammzellen sind noch alle Gene aktiv – wenn auch nur schwach

Wo einzelne Gene sich im Zellkern aufhalten, spielt also eine wichtige Rolle für die normale Entwicklung und die Gesundheit eines Organismus. Besonders augenfällige Veränderungen der Genorganisation zeigten sich bei Studien an embryonalen Stammzellen. Diese Zellen sind Generalisten, die sich in jeden der rund 220 unterschiedlichen Zelltypen des Körpers differenzieren können – etwa in Nerven-, Blut- oder Muskelzellen. Und siehe da: Im Gegensatz zu voll differenzierten Zellen fehlen in den embryonalen Stammzellen die ausgedehnten Regionen von Heterochromatin, in denen zahlreiche Gene stummgeschaltet sind. Auch enthalten sie keine Lamine; das sind Proteine, die inaktive DNA in der Kernperipherie verankern helfen. Daher ist in einer embryo-

nal Stammzelle praktisch jedes Gen aktiv, wenn auch nur auf geringem Niveau.

Sobald eine embryonale Stammzelle das Signal zur Differenzierung – zum Beispiel in eine Knochenzelle oder ein Neuron – erhält, verändert sich die Architektur ihres Zellkerns dramatisch. Laminproteine verweben sich zu einer festen Matte, der Lamina, die unter der Kernmembran liegt. Diese Stützschicht stabilisiert offenbar die Form des Zell-

kerns und schützt die Chromosomen vor mechanischen Einwirkungen. Darüber hinaus scheint sie auch eine wichtige Rolle bei der normalen Genregulation zu spielen: Ein dort vorkommendes Strukturprotein komprimiert Chromosomenabschnitte mit nur wenigen aktiven Genen zu Heterochromatin – und befestigt sie an den Laminproteinen an der Peripherie des Zellkerns. Die aktiveren chromosomalen Regionen bleiben in der Nähe des Kernzentrums und damit der Transkriptionsfabriken. Lamine treten also in der Embryonalentwicklung auf, damit Zellen Gene abschalten können, die sie für ihre jeweilige Differenzierung nicht benötigen.

Das reife Zellen bestimmte Teile ihres Erbguts wegpacken, ist für ihre korrekte Funktion entscheidend. Das zeigen die Auswirkungen von fehlerhaften Laminproteinen, die so genannten Laminopathien. Ihr Spektrum ist ungewöhnlich breit: Im Gegensatz zu anderen genetisch bedingten Erkrankungen, bei denen verschiedene Mutationen in einem bestimmten Gen meist die gleiche Störung hervorrufen, verursachen Laminmutationen zahlreiche sehr unterschiedliche Krankheiten, darunter Muskeldystrophien, neurologische Erkrankungen und vorzeitiges Altern. Warum, weiß bis heute niemand. Möglicherweise beeinträchtigen sie die Stabilität der Lamina und damit den Schutz des Zellkerns vor mechanischen Schäden. Eine interessantere Erklärung wäre allerdings, dass defekte Lamine das Genom im Zellkern räumlich verkehrt organisieren, so dass wichtige Gene in falsche Positionen geraten und daher ihre Aufgabe nicht ordnungsgemäß erfüllen können.

Dass reife Zellen bestimmte Teile ihres Erbguts wegpacken, ist für ihre korrekte Funktion entscheidend. Das zeigen die Auswirkungen von fehlerhaften Laminproteinen, die so genannten Laminopathien. Ihr Spektrum ist ungewöhnlich breit: Im Gegensatz zu anderen genetisch bedingten Erkrankungen, bei denen verschiedene Mutationen in einem bestimmten Gen meist die gleiche Störung hervorrufen, verursachen Laminmutationen zahlreiche sehr unterschiedliche Krankheiten, darunter Muskeldystrophien, neurologische Erkrankungen und vorzeitiges Altern. Warum, weiß bis heute niemand. Möglicherweise beeinträchtigen sie die Stabilität der Lamina und damit den Schutz des Zellkerns vor mechanischen Schäden. Eine interessantere Erklärung wäre allerdings, dass defekte Lamine das Genom im Zellkern räumlich verkehrt organisieren, so dass wichtige Gene in falsche Positionen geraten und daher ihre Aufgabe nicht ordnungsgemäß erfüllen können.

Tatsächlich sprechen Untersuchungen, bei denen Forscher chromosomale Regionen in Zellkernen von Laminopathiepatienten kartierten, eher für die zweite Hypothese. Zum Beispiel beobachteten sie, dass sich die Chromosomen 13 und 18 bei bestimmten Laminmutationen von der Peripherie ins Innere des Kerns verlagerten. Noch lässt sich jedoch die Frage nicht beantworten, ob es sich dabei um eine Ursache oder eine Folge der Erkrankung handelt.

Recht klar ist dagegen, dass die Position der Chromosomen im Zellkern eine zentrale Rolle bei einigen Krebserkrankungen spielt. In bösartigen Tumoren finden sich häufig so genannte Translokationen, bei denen ein Abschnitt eines Chromosoms abgebrochen ist und sich an ein anderes geheftet hat (siehe Kasten S. 34). Solche Translokationen können Krebs verursachen, wenn an einer neu gebildeten Nahtstelle ein verändertes Gen entsteht, das die Zellvermehrung stark

Lamine sorgen für die richtigen Positionen der Gene im Zellkern

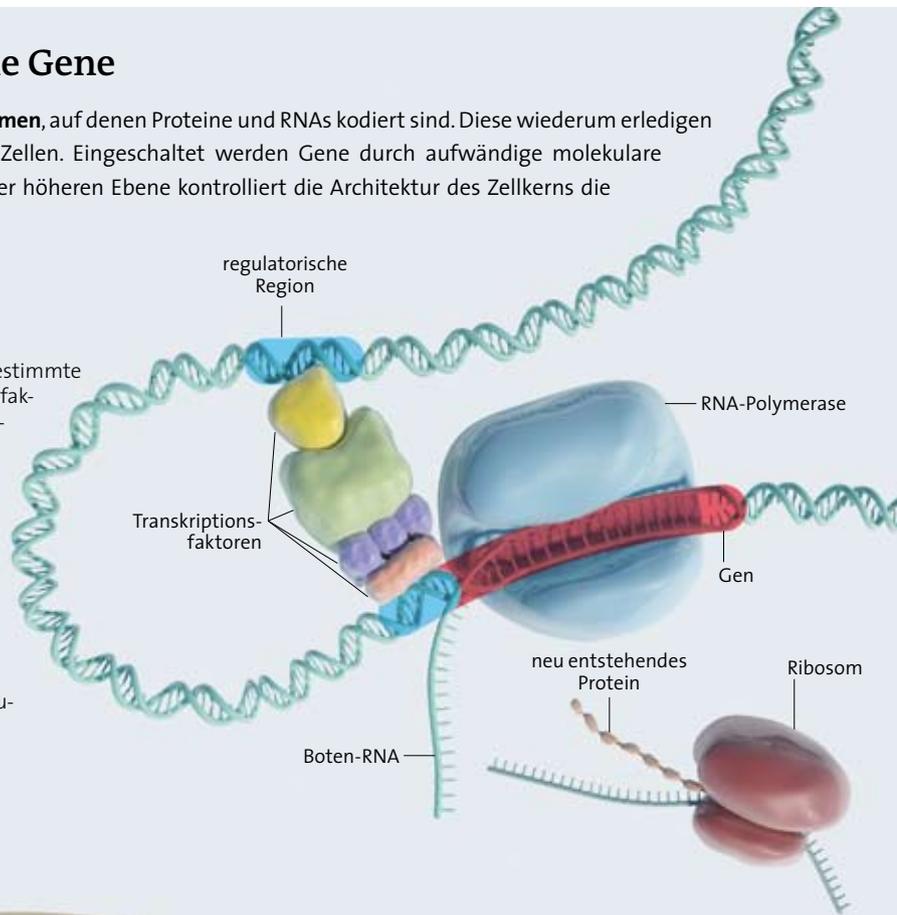


So aktiviert die Zelle Gene

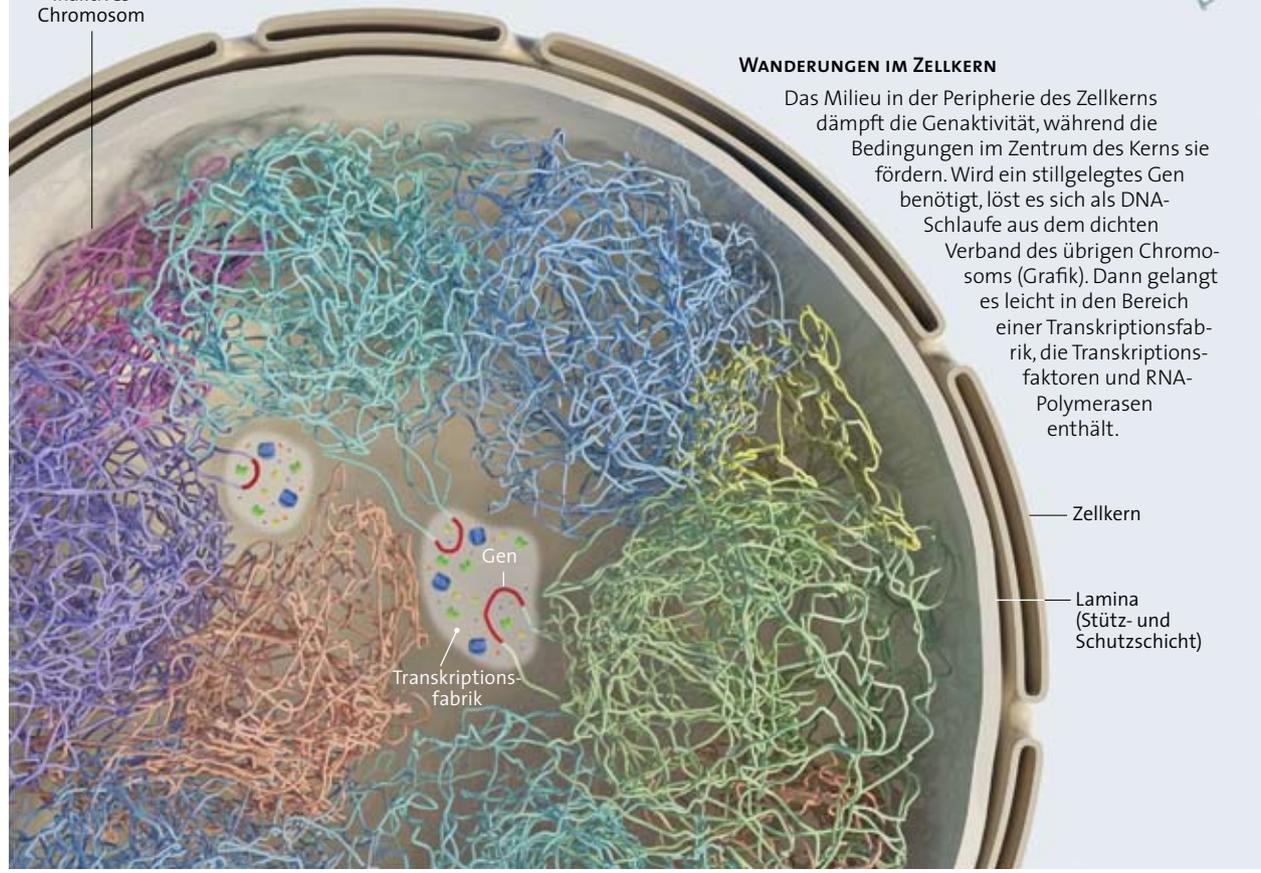
Gene sind die Teile der Chromosomen, auf denen Proteine und RNAs kodiert sind. Diese wiederum erledigen den Großteil der Arbeit in den Zellen. Eingeschaltet werden Gene durch aufwändige molekulare Maschinen (oberes Bild). Auf einer höheren Ebene kontrolliert die Architektur des Zellkerns die Genaktivität (unten).

VON DER DNA ZUM PROTEIN

Ein Gen wird aktiviert, wenn sich bestimmte Proteine, die man als Transkriptionsfaktoren bezeichnet, an seine regulatorischen Regionen binden. Sie ermöglichen den RNA-Polymerasen, die Buchstabenabfolge (Nukleotidsequenz) der DNA abzulesen und in Form von RNA zu vervielfältigen. Wenn es sich um ein proteinkodierendes Gen handelt, wandern die RNA-Moleküle (Boten-RNAs) aus dem Zellkern ins Zellplasma, wo die Ribosomen gemäß den auf ihnen kodierten Bauplänen die Proteine herstellen.



inaktives Chromosom



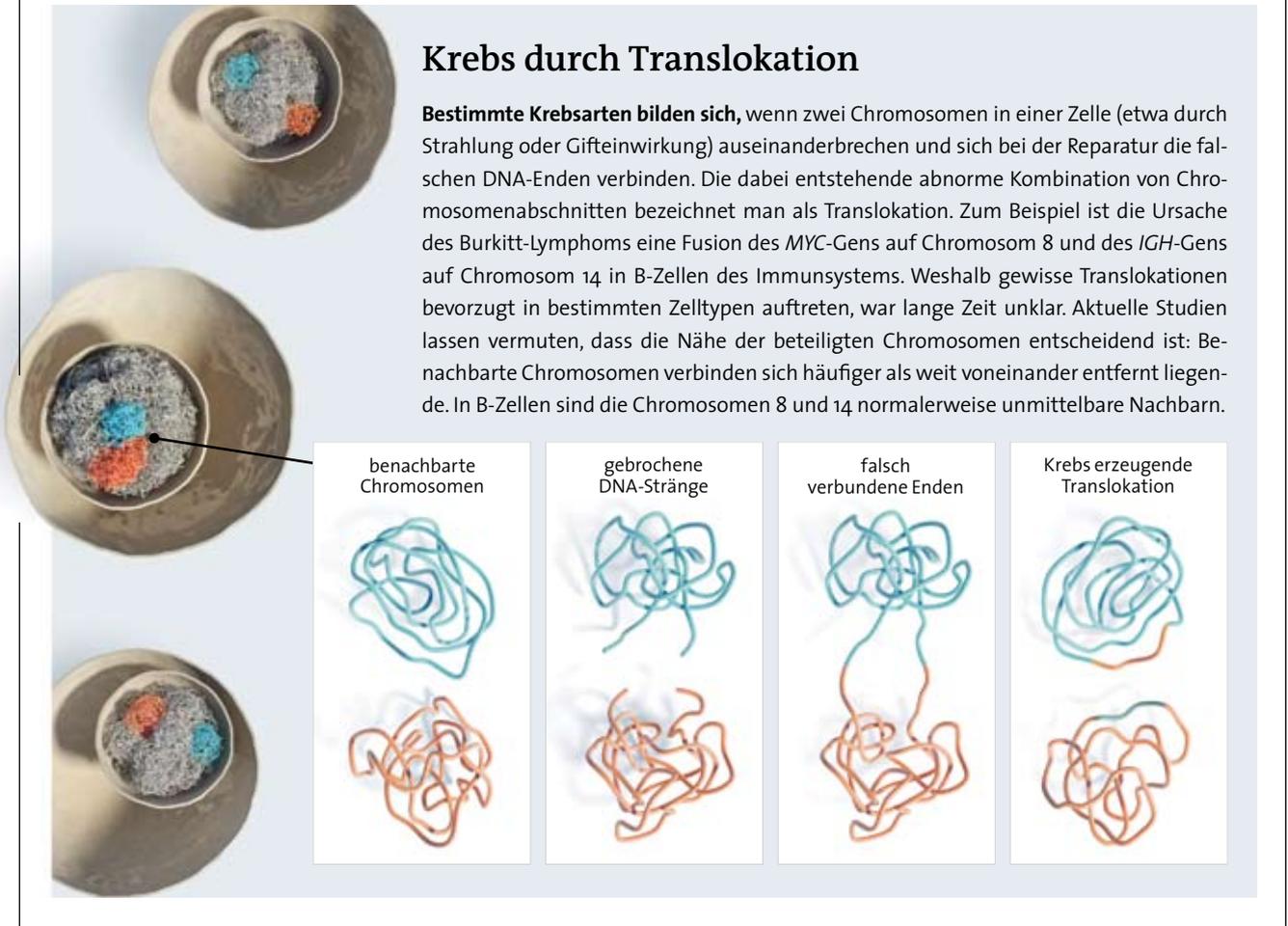
WANDERUNGEN IM ZELLKERN

Das Milieu in der Peripherie des Zellkerns dämpft die Genaktivität, während die Bedingungen im Zentrum des Kerns sie fördern. Wird ein stillgelegtes Gen benötigt, löst es sich als DNA-Schleife aus dem dichten Verband des übrigen Chromosoms (Grafik). Dann gelangt es leicht in den Bereich einer Transkriptionsfabrik, die Transkriptionsfaktoren und RNA-Polymerasen enthält.

Zellkern
Lamina (Stütz- und Schutzschicht)

Krebs durch Translokation

Bestimmte Krebsarten bilden sich, wenn zwei Chromosomen in einer Zelle (etwa durch Strahlung oder Gifteinwirkung) auseinanderbrechen und sich bei der Reparatur die falschen DNA-Enden verbinden. Die dabei entstehende abnorme Kombination von Chromosomenabschnitten bezeichnet man als Translokation. Zum Beispiel ist die Ursache des Burkitt-Lymphoms eine Fusion des *MYC*-Gens auf Chromosom 8 und des *IGH*-Gens auf Chromosom 14 in B-Zellen des Immunsystems. Weshalb gewisse Translokationen bevorzugt in bestimmten Zelltypen auftreten, war lange Zeit unklar. Aktuelle Studien lassen vermuten, dass die Nähe der beteiligten Chromosomen entscheidend ist: Benachbarte Chromosomen verbinden sich häufiger als weit voneinander entfernte liegende. In B-Zellen sind die Chromosomen 8 und 14 normalerweise unmittelbare Nachbarn.



erhöht. Manchmal handelt es sich dabei aber auch nur um Begleiteffekte des Krankheitsgeschehens.

Welche Chromosomen sich neu kombinieren und ob dadurch Krebs entsteht, hängt von ihrem Ort innerhalb des Kerns ab: Direkt benachbarte Chromosomen sind besonders häufig Partner bei Translokationen, so etwa beim Burkitt-Lymphom. Viele Patienten mit dieser Erkrankung weisen eine Translokation zwischen dem *MYC*-Gen auf Chromosom 8 und dem *IGH*-Gen auf Chromosom 14 auf. In seltenen Fällen verknüpft sich *MYC* mit anderen Immunglobulinen: mit *IGK* auf Chromosom 2 beziehungsweise – noch seltener – mit *IgL* auf Chromosom 22. Im Jahr 2003 entdeckte Jeffrey Roix in meinem Labor, dass die Häufigkeit einer Translokation umgekehrt proportional zum mittleren Abstand zwischen *MYC* und seinen drei möglichen Partnern ist. Vermutlich hängen die Entfernung zweier Genorte und ihre Translokationswahrscheinlichkeit unmittelbar miteinander zusammen. Ähnlich verhält es sich auch bei anderen Krebsarten.

Laut weiteren Untersuchungen meiner Arbeitsgruppe verbleiben die freien DNA-Enden nach einem Chromosomenbruch in der Nähe ihres vorigen Orts. Dies erklärt, weshalb Translokationen zwischen benachbarten Chromosomen häufiger vorkommen als zwischen weiter voneinander ent-

fernten. Und es wird auch klar, warum spezifische Translokationen charakteristisch sind für Tumoren, die nur in einem bestimmten Gewebe auftreten: weil das Erbgut in verschiedenen Geweben unterschiedlich angeordnet ist. Manche Chromosomen, die in Nierenzellen eng benachbart sind, liegen zum Beispiel in weißen Blutkörperchen weiter voneinander entfernt.

Eine der aufregendsten Entwicklungen auf diesem Gebiet besteht in neuen Möglichkeiten zur Entdeckung von Krebszellen. Vorläufigen Experimenten zufolge lässt sich aus der Position von DNA-Abschnitten im Zellkern ablesen, ob eine Zelle entartet ist. Im Rahmen einer Pilotstudie über Brustkrebs identifizierte Karen Meaburn in meinem Labor verschiedene Gene, die bei Tumorzellen an anderen Orten im Kern liegen als bei normalem Drüsengewebe. Diese Erbinformationen erwiesen sich als geeignete Indikatoren für Brustkrebs, anhand deren wir mit sehr hoher Treffsicherheit Tumorgewebe identifizieren konnten. Zudem verändern einige Gene in Krebszellen ihre Lage schon, bevor die Zellen ein aggressives Verhalten zeigen. Mit ihrer Hilfe könnte sich eines Tages Krebs bereits in sehr frühen Stadien diagnostizieren lassen.

Aber welche Faktoren bestimmen eigentlich darüber, wo einzelne Gene oder Chromosomen im Zellkern hingehören?

Und wie gelangen sie dorthin, wenn sich die Zellen im Zuge der Entwicklung in die verschiedenen spezialisierten Typen differenzieren? Eine Möglichkeit wäre, dass eine zelluläre Maschinerie sie zum Bestimmungsort bringt: Ein Adapterprotein heftet sich an einen bestimmten DNA-Abschnitt und zieht diesen Teil des Chromosoms mit Hilfe von Motorproteinen an die richtige Stelle im Kern. Solch ein System wurde jedoch bisher nicht gefunden. Und es ist auch kaum vorstellbar, dass ein Stück DNA irgendwie die korrekten Ortskoordinaten übermittelt bekommt.

Meiner Ansicht nach könnte sich die räumliche Verteilung von Genen und Chromosomen im Zellkern selbst organisieren – etwa wie Teenager Cliques bilden, deren Zusammensetzungen auf jeweils gemeinsamen Interessen beruhen und nicht etwa auf den Weisungen von Eltern oder Lehrern. Ort und Aktivität der Gene würden sich demnach gegenseitig beeinflussen.

Wie könnte diese Selbstorganisation funktionieren? Betrachten wir beispielsweise, was geschehen würde, wenn ein externes Signal – etwa ein Hormon – ein Gen einschaltet. Davor ist das Gen inaktiv und wahrscheinlich in dichtem Chromatin weggepackt, vielleicht sogar in einem hoch komprimierten Block aus Heterochromatin in der Kernperipherie. Sobald das Signal eintrifft, entfalten bestimmte Proteine – die so genannten Chromatin-Remodeling-Komplexe – die DNA im Bereich des Zielgens und ermöglichen so der Transkriptionsmaschinerie den Zutritt. Die entpackte Chromatinschleife könnte nun frei umherschwingen und trafe mit etwas Glück dabei auch auf eine Transkriptionsfabrik. In diesem Modell verlagert sich das Gen also von den Randbezirken des Kerns ins Zentrum ohne Eingriffe einer spezialisierten Transportmaschinerie, nur auf Grund seines eigenen Verhaltens. Seine Lage im Zellkern ist demnach ein völlig selbstbestimmter Prozess.

Gene streuen im Zellkern umher, aber immer an der Leine des Chromosoms

Viele Experimente zur Ortsbestimmung von Genen stützen das Konzept der räumlichen Selbstorganisation. Sie zeigen, wie die Erbfaktoren den dichten Verband des Chromosoms in Form langer DNA-Schleifen verlassen und quasi an der Leine im Zellkern umherstreuen. Wenn bestimmte Signalstoffe des Immunsystems – Zytokine – auf weiße Blutkörperchen treffen, entfernen sich die Gene für wichtige Immunproteine (die MHC-Klasse-II-Moleküle) sogar extrem weit von ihrem Chromosom – manchmal um den halben Durchmesser des Zellkerns.

Das gleiche Prinzip könnte auch für die Lage ganzer Chromosomen gelten. Denn jedes Gen beeinflusst durch sein Verhalten den Ort des Gesamtchromosoms im Kern, auch wenn der Bewegungsradius der meisten Gene nicht besonders groß ist. Chromosomen mit vielen inaktiven Genen werden demnach in die Peripherie gezogen, während solche, die überwiegend aktive Gene tragen, ins Innere des Zellkerns gelangen.

Diese Vorhersage testeten Mark Goudine und seine Kollegen vom Fred Hutchinson Cancer Center an Blutvorläuferzellen, die sie in Kulturschalen reifen ließen. Währenddessen entnahmen die Forscher zu verschiedenen Zeitpunkten einen Teil der Zellen, bestimmten die Aktivität einiger tausend Gene und gleichzeitig ihre Position im Zellkern. Ergebnis: Am stärksten bewegten sich jene Chromosomen, bei denen die meisten Gene im Verlauf der Reifung ihre Aktivität ändern.

Solche Experimente sind ein guter Anfang – den Ort vieler Genomregionen unter dem Mikroskop gleichzeitig zu bestimmen, erweist sich jedoch als sehr langwierig. Eine geradezu revolutionäre Methode namens High-C, die Job Dekker von der University of Massachusetts Medical School entwickelt hat, könnte diese Hürde beseitigen. Dieses Verfahren verknüpft Chromosomenregionen, die sich berühren, chemisch miteinander und ermöglicht so Schnappschussaufnahmen der gesamten dreidimensionalen Architektur des Genoms.

Mit Hilfe der High-C-Methode sollten sich die Chromosomen in den Zellkernen von vielen verschiedenen Geweben zu verschiedenen Zeitpunkten unter verschiedenen Bedingungen lokalisieren lassen. Wenn man dann diese Daten mit den entsprechenden Genaktivitätsmustern vergleicht, könnten wir völlig neue Erkenntnisse darüber erhalten, wie die räumliche Organisation des Zellkerns biologische Funktionen beeinflusst – und bei Störungen zu Krankheiten führt. ~

DER AUTOR



Tom Misteli ist Forschungsgruppenleiter am National Cancer Institute in Bethesda, Maryland, USA. Mit den von ihm entwickelten bildgebenden Verfahren erforscht seine Arbeitsgruppe die dreidimensionale Organisation des Genoms in den Kernen lebender Zellen und versucht, die gewonnenen Erkenntnisse auf Strategien gegen Krebs und Altern anzuwenden.

QUELLEN

- Lancôt, C. et al.:** Dynamic Genome Architecture in the Nuclear Space: Regulation of Gene Expression in Three Dimensions. In: *Nature Reviews Genetics* 8, S. 104–115, 2007
- Lieberman-Aiden, E. et al.:** Comprehensive Mapping of Long-Range Interactions Reveals Folding Principles of the Human Genome. In: *Science* 326, S. 289–293, 2009
- Meaburn, K.J., Misteli, T.:** Cell Biology: Chromosome Territories. In: *Nature* 445, S. 379–381, 2007
- Misteli, T., Spector, D.L. (Hg.):** *The Nucleus*. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2010

WEBLINKS

<http://bcove.me/owo1gomu>
Englischsprachiges Videointerview mit dem Autor über sein Buch »The Nucleus« sowie seine Forschungsarbeiten zum dynamischen Verhalten von Chromosomen und dem Zusammenhang mit Krebs

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072098

Vorboten des Ich-Verlusts

Die ersten Symptome von Schizophrenie treten in vielen Fällen kurz nach der Pubertät oder bei jungen Erwachsenen auf. Einiges deutet darauf hin, dass es schon frühere Anhaltspunkte für die Erkrankung gibt. Ist es daher sinnvoll, potenzielle Vorstadien zu diagnostizieren und vorbeugend zu therapieren? Darüber streiten die Experten noch.

Von David Dobbs

Nach der Geburt ihres dritten Kindes konnte die 28-jährige Rachel den Geräuschpegel auf der Entbindungsstation nicht aushalten. Zudem zeigte sie heftigsten Argwohn gegen ihre Schwester. Bald darauf erlitt sie ihren ersten schizophrenen Schub – scheinbar aus heiterem Himmel. Wirklich?

Rachel war ein aufgewecktes Kind gewesen, allerdings tollpatschig und im sozialen Umgang unbeholfen. Sie zog sich schnell zurück und spielte am liebsten allein. Wenn sie malte, überhäufte sie die Bilder mit vielen kleinen Details, ähnlich wie es psychotische Künstler oft tun. Im Teenageralter verstärkten sich einige ihrer Schwierigkeiten. Das Mädchen war nun auffallend lärmempfindlich, konnte etwa die Kühl-schrankgeräusche nicht ausblenden, auch nicht den Trittschall von der Nachbarwohnung oder Verkehrslärm. Erst in der Rückschau wurde allerdings klar, dass es sich dabei um Vorboten einer schweren psychischen Erkrankung handelte.

Von dieser Patientin berichtet der Psychiater Robert Freedman in seinem 2009 erschienenen Buch »The Madness

Within Us« (Die Verrücktheit in uns). Der Schizophrenie-experte hat einen Lehrstuhl für Psychiatrie an der University of Colorado in Denver inne und ist Herausgeber des »American Journal of Psychiatry«. Eine Schizophrenie, schreibt er, könne sich durchaus auf solche Art ankündigen. Oft würden frühe Anzeichen von Verfolgungswahn, Verwirrtheit, Überempfindlichkeit oder Halluzinationen in der Adoleszenz auf-flackern, also zwischen Pubertät und frühem Erwachsenenalter. Sie treten somit gerade in der Lebensphase auf, in der Körper und Gehirn entwicklungsbedingt quasi Achterbahn fahren, wo sich auch manches im Gehirn völlig umstrukturiert. Die Krankheit selbst manifestiere sich dagegen häufig erst Jahre später. Freedman erläutert aber auch die Problematik einer Früherkennung: Die ersten Symptome einer späteren Schizophrenie seien wenig spezifisch. Es sei darum gar nicht so einfach, sie von normalen Erscheinungen in jenem Alter abzugrenzen, in dem Denken, Gefühle und Verhalten ja auch sonst hin- und hergeschüttelt würden.

Eben die Überlappung mit der Norm macht diesen Entwicklungsabschnitt aber für Schizophrenieforscher interessant. Wie sich in den letzten 20 Jahren erwies, finden in der Adoleszenz im Gehirn umfangreiche Umbauten statt. Auf der einen Seite werden dann, wie schon während der Kindheit, zahllose Nervenzellkontakte zur Signalübertragung – Synapsen – gekappt. An sich ist das ein ganz normaler Reifungsprozess, doch scheint er bei später schizophrenen Menschen länger anzuhalten und auch massiver auszufallen. Auf der anderen Seite werden in der Adoleszenz die neuronalen Netze für Urteilsfähigkeit, logisches Denken und Verhaltenskontrolle erheblich überarbeitet und verbessert. Bei diesen Umbauten modelliert das Gehirn nicht nur vorhandene Schaltkreise um, sondern legt auch neue an und verwirft alte.

Rührt eine Schizophrenie vielleicht von unsauberen oder gar falschen Umbauprozessen in den Hirnverschaltungen während der Jugend her? Mit diesem Verdacht befassen sich derzeit sehr viele Wissenschaftler. Laborforscher suchen in

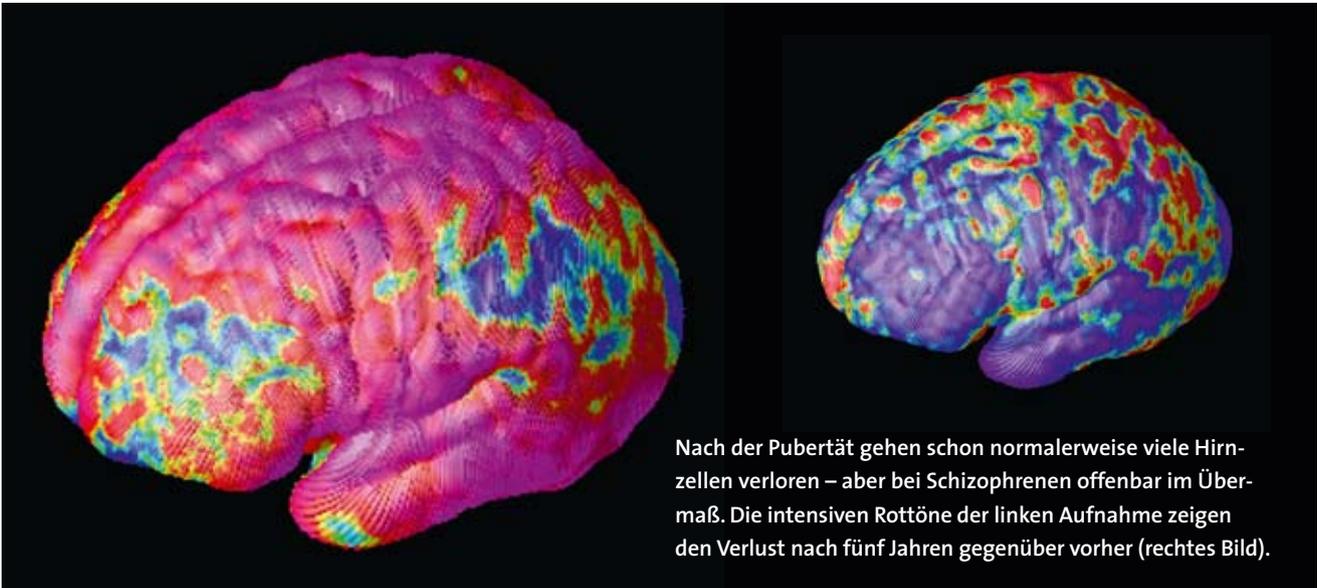
AUF EINEN BLICK

DER SCHIZOPHRENIE AUF DER SPUR

1 Oft tritt Schizophrenie erstmals in der späten Jugend oder **im jungen Erwachsenenalter** auf. Im Nachhinein lassen sich dann bei vielen Betroffenen **typische Vorzeichen** erkennen.

2 Als Hintergrund der Krankheitsentwicklung verdächtigen Forscher die gravierenden **Umbau- und Rückbauprozesse im vorderen Gehirn** während der Pubertät und weiteren Adoleszenz. Sie ermittelten bereits eine Reihe von feinen molekularen, physiologischen und anatomischen Abweichungen, die sich auf neuronale Funktionen auswirken könnten.

3 Die Experten sind jedoch uneins, ob es richtig wäre, ein **Syndrom** zu definieren, welches das **Risiko für Schizophrenie** angibt. Möglicherweise gelänge die Frühdiagnose nicht zuverlässig und brächte mehr Schaden als Nutzen.



Nach der Pubertät gehen schon normalerweise viele Hirnzellen verloren – aber bei Schizophrenen offenbar im Übermaß. Die intensiven Rottöne der linken Aufnahme zeigen den Verlust nach fünf Jahren gegenüber vorher (rechtes Bild).

MIT FOLGEN VON PAUL THOMPSON, LAB OF NEURO IMAGING, UCLA

dem Zusammenhang nach Fehlern in den Genen und Zellfunktionen, im Bereich der neuronalen Netze und des Nervensystems im Ganzen. Und von Seiten der Psychiater heißt es mitunter, bei Adoleszenten seien bestimmte leichte Frühsymptome durchaus vom Normalbild unterscheidbar. Nicht nur das: Solche Anzeichen würden auch erlauben, eine spätere Erkrankung zu prognostizieren – und möglicherweise vorbeugend zu behandeln.

Forscher auf zahlreichen Fährten

Hinter die letzten Ursachen dieser furchtbaren und enorm komplexen Krankheit sind die Experten trotz allen Bemühens leider immer noch nicht gekommen. David A. Lewis von der University of Pittsburgh in Pennsylvania beispielsweise, ein führender Schizophrenieforscher, befasst sich seit 20 Jahren mit Entwicklungsprozessen in der Jugend, die als Wurzeln des Leidens denkbar sind. Ihm zufolge lässt sich nicht sagen, ob eine der heutigen Fährten in der Forschung zum Kern der Krankheit führen wird – falls es die eine Hauptursache überhaupt gibt. Selbst bei den derzeit vielversprechendsten Studien sei das bisher völlig offen.

»Eher versteht jeder Forscher seinen Teil vom Elefanten immer besser«, kommentiert Lewis in Anspielung auf die Fabel von den Blinden, die dasselbe Riesentier befühlen, nur jeder an einer anderen Stelle. »Das funktioniert meiner Meinung nach sogar. Denn in Gesprächen mit Kollegen, die selbst anderen Spuren nachgehen, gewinne ich durchaus den Eindruck, meinerseits eine wichtige Fährte zu verfolgen. Mir scheint auch, so allmählich bekommen wir den Koloss rundum zu fassen.«

Lewis interessiert sich für einen bestimmten Schaltkreis im dorsolateralen präfrontalen Kortex, abgekürzt DLPFK, dem oberen seitlichen Bereich der vorderen Stirnhirnrinde. Dieses Hirngebiet sorgt entscheidend dafür, Erfahrungen,

Gedächtnisinhalte, Gedanken und Gefühle zu einem zusammenhängenden, in sich stimmigen Abbild der Welt zu verweben. Der DLPFK erstellt und verfeinert seine komplizierten Schaltkreise größtenteils während der Kindheit und Jugend. Einfluss darauf haben sowohl genetische Voraussetzungen wie auch Erfahrungen.

Die Hirnrinde besteht aus mehreren – in der Regel sechs – Schichten unterschiedlicher Zelltypen, die jeweils charakteristisch untereinander und mit anderen Hirnteilen verschaltet sind. Ein Hauptaugenmerk von Lewis gilt der Beziehung zwischen zwei der Nervenzelltypen: der Pyramidenzellen und der Kandelaberzellen (siehe Kasten S. 38). Die Pyramidenzellen tragen ihren Namen wegen der »dreieckigen« Form ihres Zellkörpers. Sie herrschen in der Hirnrinde vor und sitzen in mehreren der Schichten. Auch ist dies der einzige Zelltyp, der zu anderen Hirnregionen Kontakte unterhält. Die Kandelaber- oder Armeleuchterzellen zählen hingegen zu den Zwischen- oder Interneuronen, die nur in einem nahen Umfeld wirken. Sie befinden sich nahe der Basis von Pyramidenzellen.

Im DLPFK wie im übrigen präfrontalen Kortex leisten die Pyramidenzellen einen Großteil der komplexen neuronalen Nachrichtenübermittlung. Wie gut sie das können, hängt stark mit den reichen Verzweigungen ihrer langen Ausläufer zusammen, über die sie Nachrichten aufnehmen beziehungsweise abgeben. Lewis und eine Anzahl anderer Forscher wiesen an Gehirnen Verstorbener nach, dass die Pyramidenzellen der betreffenden Hirnregion bei schizophrenen Erwachsenen kleinere Zellkörper aufweisen als üblicherweise. Auch tragen die verästelten Dendriten, über die Neurone Signale empfangen, weniger »Dornen«, an denen die Kontaktstellen anderer Neurone andocken. Nach Studien von Lewis besitzen im DLPFK die Pyramidenzellen der so genannten Schicht 3 rund ein Viertel weniger Dornen.

»Allmählich bekommen wir den Koloss rundum zu fassen«

David A. Lewin

Gerade diese Schicht aber tauscht sich intensiv mit anderen Regionen der Hirnrinde aus. Zudem übernimmt sie beim so genannten Arbeitsgedächtnis, das bei Schizophrenen oft nur unzureichend funktioniert, eine Schlüsselfunktion. Als Arbeitsgedächtnis bezeichnen Forscher einen Kurzzeitspeicher im Gehirn, der zur Bewältigung aktueller Aufgaben notwendig ist.

Bisher dachten viele Wissenschaftler, die spärliche neuronale Ausstattung bei Schizophrenie ginge auf Fehler beim Kappen von Nervenzellverbindungen in der Adoleszenz zurück. Nach dieser Auffassung stellte jenes Beschneiden von Kontakten eine Art Säuberungsprozess dar, um schwache Synapsen zu eliminieren. Im Fall von Schizophrenie bestand der Verdacht, dass auch manche der starken Kontakte verloren gingen.

An Gehirnen normaler Rhesusaffen beobachtete Lewis' Forscherteam 2008 jedoch Vorgänge, die dem widersprechen. Der präfrontale Kortex der Affen entwickelt sich nach einem ähnlichen Schema wie beim Menschen. Wie sich herausstellte, sind bei den Tieren die allermeisten Pyramidenzellen der Schicht 3 schon ausgereift und voll funktional, wenn das Kappen von Synapsen beginnt. Schwache und unreife Kontakte existieren zu dem Zeitpunkt somit kaum noch. Auf Grund dieses Befundes überlegte Lewis: Vorausgesetzt die Verhältnisse sehen bei Menschen ähnlich aus, kön-

ne Schizophrenie nicht daher rühren, dass fälschlicherweise auch starke Synapsen ausgemerzt werden? Denn allzu kümmerliche Verbindungen gäbe es dann wohl kaum. Der Forscher unterbreitet nun eine alternative Hypothese, wobei er auch weitere Befunde hinzuzieht: Die Pyramidenzellen von zukünftigen Schizophrenen könnten, so postuliert er, schon vorher schwächere Verbindungen besessen haben als normal.

Bisher äußert Lewis diesen Gedanken sehr vorsichtig. Er hat den Verdacht, dass eine schlechte Synapsenqualität in früher Jugend zunächst nicht unbedingt auffällt, einfach weil synaptische Kontakte dann noch im Überfluß existieren. Deswegen komme der junge Mensch so lange ganz gut zurecht. Wenn aber später das Beseitigen von Synapsen losgehe, gingen die Reserven langsam verloren, und was übrig bleibe, genüge den Anforderungen irgendwann nicht mehr. Deswegen würden sich nun allmählich Schwierigkeiten einstellen.

Was aber könnte die Reifung von Pyramidenzellen vorweg behindern? Hier kommen die Kandelaberzellen ins Spiel. Lewis hat sie schon seit Jahren im Visier, und mittlerweile trugen seine und andere Arbeitsgruppen eine gehörige Beweislast gegen sie zusammen. Die Kandelaberzellen kommunizieren anscheinend nur mit Pyramidenzellen direkt, und nach neueren Erkenntnissen sieht es tatsächlich so aus, als seien sie im Fall von Schizophrenie erheblich beeinträchtigt. Beispielsweise liegt der Gehalt bestimmter Proteine in ihren Synapsen um bis zu 40 Prozent unter der Norm. Vermutlich funktionieren solche Synapsen nicht ordnungsgemäß.

Lange schrieben Forscher den Kandelaberzellen ausschließlich hemmende Eigenschaften zu. Ihre einzige Aufgabe schien zu sein, die Pyramidenzellen zu dämpfen. Erst vor etwa fünf Jahren entdeckte eine Gruppe um Gábor Tamás von der Universität Szegedin in Ungarn, dass sie auch das Gegenteil können, nämlich Pyramidenzellen anregen. Mitunter bringen sie sie sogar zum »Feuern«, lösen also elektrische Signale aus.

Nach verschiedenen Studien unter anderem der Teams von Tamás und Lewis dürfte den Kandelaberzellen tatsächlich eine Schlüsselfunktion beim komplexen Verhalten der Pyramidenzellen zukommen. So gelang es kürzlich Karl Deisseroth von der Stanford University (Kalifornien) und seinen Mitarbeitern mittels gentechnischer Tricks, bei lebenden Mäusen gezielt eine bestimmte Neuronenklasse an- und abzuschalten, zu der auch die Kandelaberzellen zählen. Hiermit konnten sie die geregelte Aktivität im präfrontalen Kortex der Tiere tatsächlich zu einem Großteil ankurbeln beziehungsweise unterbinden.

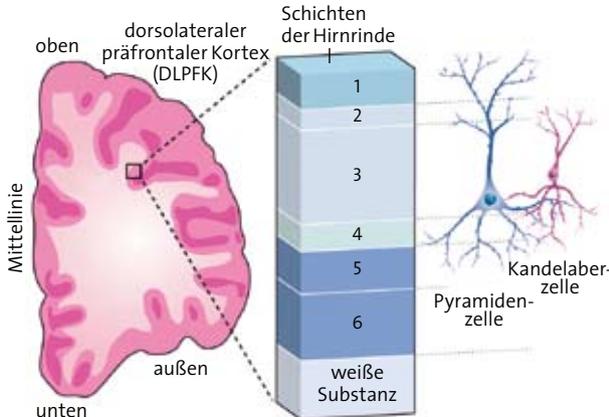
Lewis vermutet daher: Wenn ein Mensch später schizophren wird, haben die Kandelaberzellen in der Kindheit oder frühen Jugend an irgendeiner Stelle bei ihrer Aufgabe versagt, die Reifung der Pyramidenzellen zu fördern. Den beiden Zelltypen würde es dann nicht gelingen, miteinander jenes Maß systematischer neuronaler Kommunikation zu

Was behindert die Reifung von Pyramidenzellen?

Hirnzellen unter Verdacht

Manche neuronalen Verschaltungen in der präfrontalen Großhirnrinde scheinen bei Schizophrenie nicht intakt zu sein. Ein besonderer Verdacht richtet sich auf die Kommunikation zwischen Pyramiden- und Kandelaberzellen im dorsolateralen präfrontalen Kortex (DLPFK). Probleme an dieser Stelle könnten sich störend bemerkbar machen, wenn im Zuge von Eliminierungsmaßnahmen und größeren Umbauten in der Jugendphase bisherige Kommunikationsreserven verloren gehen.

SCHNITT DURCH DEN PRÄFRONTALEN KORTEX DER LINKEN HEMISPHERE



NATURE GRAPHIC, NACH LEWIS, DA & GONZÁLEZ-BURGOS, G. NEUROPSYCHIOPHARMACOLOGY REVIEWS 33: 5, 14-165, 2008, BOX 1

etablieren, das erforderlich ist, damit stabile Synapsen entstehen. Weil beide Zelltypen Schwächen aufweisen, vermöge der präfrontale Kortex später nicht die kräftigen koordinierten Signalfreier aufzubauen, die ein gut funktionierendes Arbeitsgedächtnis kennzeichnen – wovon die charakteristischen Gammawellen in Hirnstrombildern zeugen. Die Folgen würden sich zunächst nur subtil, mit der Zeit aber immer deutlicher bemerkbar machen, wenn in der Adoleszenz zunehmend Synapsen gekappt werden. Denn das Gehirn tut sich nun schwer damit, seine elektrische Aktivität stimmig zu organisieren. Könnte sich so die geistige Zerrüttung bei einer Schizophrenie erklären?

Thomas R. Insel, Direktor des National Institute of Mental Health in Bethesda (Maryland), begrüßt dieses Modell. Den verschiedenen Beobachtungen auf Molekular-, Zell- und Systemebene biete der Ansatz endlich einmal einen gemeinsamen Rahmen. Selbst wenn sich herausstellen sollte, dass sich die Vorgänge nicht in allem genau nach diesem Schema abspielen, sei es doch sehr wertvoll.

Eigenes Fehlverhalten oder Notreparatur einer anderen Schwachstelle

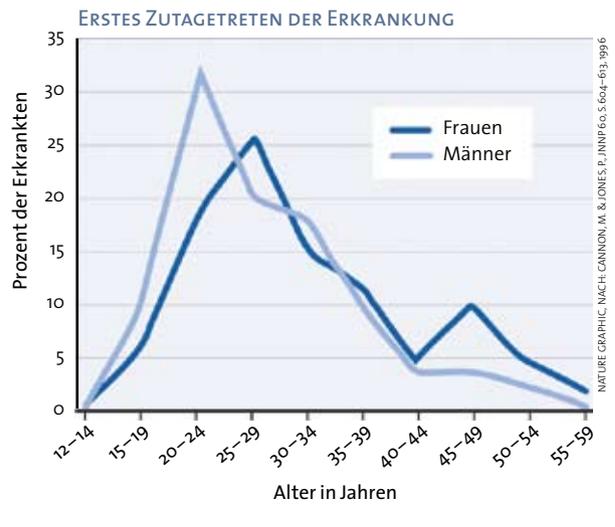
Lewis bemüht sich aber auch um Aufklärung weiterer Details. Ein Beispiel: Zur Signalübertragung verwenden Kandelaberzellen den Neurotransmitter GABA (Gamma-Aminobuttersäure), der auf Kontaktneurone hemmenden Einfluss hat. Da stellt sich die Frage, ob die abweichenden GABA-Muster bei Schizophrenie überhaupt die Fehlfunktion von Kandelaberzellen mit verursachen – oder ob das falsche Muster nicht vielmehr einen anderweitigen Defekt zu kompensieren versucht. In Studien erhielten Schizophreniepatienten einen in Erprobung befindlichen Wirkstoff, der bestimmte GABA-Rezeptoren von Kandelaberzellen sowie einer anderen Sorte Zwischenneuronen, so genannten Korbzellen, beeinflusst. Tatsächlich förderte die Behandlung Gammawellen, und das Arbeitsgedächtnis der Studienteilnehmer schien etwas besser zu funktionieren.

Daneben möchte Lewis völlig andere Forschungsansätze über Schizophrenie reflektieren und einbinden, etwa jenen von Anissa Abi-Dargham von der Columbia University in New York. Die auch klinisch tätige Psychiaterin untersucht evolutionär ältere, tiefer gelegene Hirngebiete, die den Neurotransmitter Dopamin benutzen – das so genannte Striatum. Sie möchte mit Hirnscans herausfinden, ob die dort bei Schizophrenen beobachteten erhöhten Dopaminmengen Schuld daran tragen, dass sich die Schaltkreise im präfrontalen Kortex nicht richtig ausbilden. Möglich wäre ja ein umgekehrter Einfluss, nämlich dass Fehler im Kortex die Dopaminmuster und deren Funktionen beeinträchtigen.

So fruchtbar es sich bei Schizophrenie für die Forschungsszene erweist, die Hirnentwicklung in der Adoleszenz ins Visier zu nehmen – viele Kliniker haben Bedenken, was die Umsetzung in die Praxis betrifft. Besonders strittig ist die These,

Ausbruchsalter der Schizophrenie

Typischerweise tritt der erste Schub in der Adoleszenz oder kurz danach auf und bei Frauen durchschnittlich etwas später als bei Männern. Ursache scheinen Hirnreifungsstörungen zu sein. Die Forscher fahnden inzwischen nach den molekularen Hintergründen der an Hirnstrukturen beobachteten Entwicklungsdefizite.



ob man das Hören leiser Stimmen in der Jugend zu den Vorzeichen (Prodromen) der Krankheit zählen darf. Genauer gesagt: ob es wirklich ein diagnostizierbares Vorstadium der Krankheit gibt (Grafik oben).

Um darüber mehr Klarheit zu gewinnen, riefen in den USA 2003 acht Forschungsinstitutionen ein gemeinsames Langzeitprojekt ins Leben, genannt NAPLS (North American Prodrome Longitudinal Study). Die Beteiligten prüfen an größeren Teilnehmerzahlen Diagnosen für eine verlässliche Früherkennung einer drohenden Schizophrenie. Die Überlegung dahinter: Falls es solche Möglichkeiten gäbe, ließe sich gegebenenfalls auch versuchen, einem späteren Ausbruch der Krankheit vorzubeugen – mit Maßnahmen wie Psychotherapie, Kognitionstraining, Familientherapie oder Medikamenten. Anhand eines Standardfragebogens erfassen Mitarbeiter verdächtige Symptome und deren Stärke – wie zersplitterte oder abnorme Gedanken, Psychosen in der Familie, soziale oder schulische Schwierigkeiten, Sinnestäuschungen, Wahnvorstellungen und Verfolgungsängste oder auch andere Auffälligkeiten in der Gefühlswelt, im Verhalten und Denken.

Im Jahr 2008 veröffentlichten die beteiligten Forscher erste Ergebnisse: Unter den Teilnehmern der Studie hatten sie 291 Jugendliche und junge Erwachsene als mit einem sehr hohen Risiko behaftet eingestuft, eine Schizophrenie oder andere Psychose zu bekommen. Von diesen Personen erlit-

Risikostudie: Verdächtige Frühsymptome im Langzeittest

ten innerhalb der nächsten zweieinhalb Jahre 35 Prozent psychotische Episoden. Daraufhin sichtet die Wissenschaftler nochmals die anfänglich erhobenen Daten und konnten nun einige Faktoren ausmachen, die im Zusammenspiel ein besonders hohes Risiko bedeuten. So gewannen sie einen verbesserten Vorhersagealgorithmus, mit dem sich das Erkrankungsrisiko jetzt zu fast 80 Prozent vorhersagen ließ – laut den Autoren eine ähnlich hohe Quote, wie man sie mit üblichen Instrumenten etwa für das Risiko von Herz-Kreislauf-Erkrankungen erzielt.

Laut dem Forscherteam sprechen diese und weitere harte Hinweise dafür, dass ein »prodromales Risikosyndrom« tatsächlich existiert. Nach Ansicht der Vereinigung wäre nun zu prüfen, ob das Syndrom in das Diagnostische und Statistische Manual psychischer Störungen (DSM) aufgenommen werden sollte, das die Amerikanische Psychiatrische Vereinigung herausgibt. Neben dem internationalen Klassifikationssystem ICD der Weltgesundheitsorganisation ist dieses Manual ein wichtiges Instrument für medizinische Diagnosen. Eine Aufnahme des Syndroms ins DSM würde diese wie andere Formen der Psychosefrüherkennung wohl in vielen Praxen etablieren und vermutlich auch der Vorbeugung und Frühbehandlung nutzen.

Warnung vor den Folgen von Fehldiagnosen

Allerdings äußern manche Kliniker ernste Bedenken gegen solch einen Schritt. Sie fürchten die unvermeidlichen Fehldiagnosen. Die Psychologin und Schizophrenieexpertin Til Wykes vom King's College London, Professorin für klinische Psychologie und Rehabilitation, warnt: Bestimmt käme es vor, dass Personen, die eigentlich kaum schizophreniefährdet sind, als hochgefährdet eingestuft würden. Für Betroffene könne sich das weit schlimmer auswirken als etwa eine falsche oder unnötige Medikation. Nicht nur bestünde die Gefahr, dass die Familie, Freunde, überhaupt das Umfeld denjenigen oder diejenige nun anders und vielleicht auf für ihn ungünstige Art behandeln, sondern auch das Selbstbild des- oder derjenigen könne Schaden nehmen. Wykes befürchtet: »Die Angst davor, wirklich schizophren zu werden, kann geradewegs in eine Entwicklung führen, die man mit der Diagnose abfangen möchte. Oft handelt es sich ja um ganz junge Menschen, 15, 16 Jahre alt. So etwas Leuten anzutun, die sonst vielleicht nie krank würden ... das wäre schon ein schwerer Eingriff in ein Leben.«

Diese Meinung teilen nicht alle Kollegen. Manche glauben, wenn man früh gezielt eingreifen kann, würden die Vorteile überwiegen. Der Psychiater William McFarlane etwa, der am Maine Medical Center in Portland (Maine) ein Studienprogramm zur Diagnose des Prodromalstadiums betreut, versteht die Bedenken nicht. Er sieht nichts Fragwürdiges an Verbesserungen der Früherkennung und hält die Warnung vor möglichen Übertherapien für unangebracht. Eine Aufnahme

der Frühestufung in das DMS würde er schon deswegen begrüßen, weil eine einheitlichere Diagnose und Therapie von Schizophrenievorstufen vielen Patienten zugutekämen.

Bei den Forschern, die die Hintergründe der Geisteskrankheit im Labor zu ermitteln versuchen, klingt das jedoch noch anders. Viele von ihnen bezweifeln, dass sie heute schon differenzielle Diagnoseverfahren haben, um eine Schizophrenie im Prodromalstadium sicher zu erkennen – von einer vorbeugenden Behandlung ganz zu schweigen. »Was in Frühphasen abläuft, können wir uns

inzwischen zwar besser vorstellen«, kommentiert Lewis. »Uns fehlt aber nach wie vor ein Angriffspunkt für Interventionen, die einige Aussicht auf Erfolg hätten.«

Auch Rachels Arzt Freedman hält beim heutigen Kenntnisstand eher Bescheidenheit und Vorsicht für angebracht. In seinen Worten: »In der Schizophrenieforschung gab es stets eine Menge Leute, die meinten, sie wüssten genau, was los ist und was sie tun. Aber dann stürzte alles in sich zusammen. Es wäre schön, wenn die Forscher unserer Zeit sich das klarmachen. Dann behaupten sie nicht so schnell, sie seien am Ziel.«

»Ein Angriffspunkt für frühe Interventionen fehlt noch«

David A. Lewin

DER AUTOR



David Dobbs ist freier Wissenschaftsjournalist und lebt in London.

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature 468, S. 154–156, 11. November 2010

QUELLEN

- Beneyto, M., Lewis, D.A.:** Insights into the Neurodevelopmental Origin of Schizophrenia from Postmortem Studies of Prefrontal Cortical Circuitry. In: International Journal of Developmental Neuroscience 29, S. 295–304, 2011
- Cannon, T.D. et al.:** Prediction of Psychosis in Youth at High Clinical Risk. In: Archives of General Psychiatry 65, S. 28–37, Januar 2008
- Hashimoto, T. et al.:** Protracted Developmental Trajectories of GABA_A Receptor $\alpha 1$ and $\alpha 2$ Subunit Expression in Primate Prefrontal Cortex. In: Biological Psychiatry 65, S. 1015–1023, 2009
- Lewis, D.A., González-Burgos, G.:** Neuroplasticity of Neocortical Circuits in Schizophrenia. In: Neuropsychopharmacology Reviews 33, S. 141–165, 2008
- Sohal, V.S. et al.:** Parvalbumin Neurons and Gamma Rhythms Enhance Cortical Circuit Performance. In: Nature 459, S. 698–702, 4. Juni 2009
- Sweet, R.A. et al.:** Mapping Synaptic Pathology within Cerebral Cortical Circuits in Subjects with Schizophrenia. In: Frontiers in Human Neuroscience 4, Artikel 44, 23. Juni 2010
- Szabadics, J. et al.:** Excitatory Effect of GABAergic Axo-Axonic Cells in Cortical Microcircuits. In: Science 311, S. 233–235, 13. Januar 2006

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072099

»Eins zu eins lässt sich Forschung nicht umsetzen«

Erwin Neher ist ein Forscher mit Überzeugungen. Im Interview mit »Spektrum der Wissenschaft« fordert der Medizin-Nobelpreisträger, dass Wissenschaftler über Schwerpunkte der Forschungsförderung mehr mitbestimmen sollten, und erläutert, weshalb die Öffentlichkeit nicht immer perfekte Kommunikation, sehr wohl aber gute Ergebnisse erwarten darf – und wie ein Forscher mit Frustrationen umgeht.



Erwin Neher, geboren 1944, wuchs in Buchloe im bayrischen Allgäu auf. 1963 beginnt er ein Studium der Physik an der TU München. Ein Fulbright-Stipendium führt ihn 1966 für ein Jahr an die University of Wisconsin in Madison, USA. 1970 wird er mit Arbeiten über Neurone von Weinbergschnecken promoviert, die er in der Arbeitsgruppe von Hans Dieter Lux am Münchner Max-Planck-Institut (MPI) für Psychiatrie durchführte.

Hier lernt er den zwei Jahre älteren Mediziner Bert Sakmann kennen, mit dem er sich 1991 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin teilen wird.

Ihre bahnbrechende Idee entwickeln beide ab 1973 als Postdocs am Göttinger MPI für biophysikalische Chemie: die Patch-Clamp-Technik (»Flicken-Klemm-Technik«, bei der ein winziger Membranflicken mit einer Mikropipette erfasst wird). Damit lassen sich seit 1976 die Ströme einzelner Ionenkanäle in Zellmembranen gezielt messen.

Auch wenn Neher nicht mehr zusammen mit Sakmann forscht, treffen sich beide noch regelmäßig, etwa bei einem Glas Wein – bevorzugt regionaler Provenienz, in Spanien vielleicht ein Rioja, wie Neher schmunzelnd erzählt.

Herr Professor Neher, 1991 bekamen Sie zusammen mit Bert Sakmann den Nobelpreis. Es war Ihnen gelungen, erstmals die Ströme durch einzelne Ionenkanäle in Zellen zu messen. 20 Jahre lang hatten Sie diese Moleküle belauscht, wie sie sich öffnen und schließen und damit die Kommunikation zwischen Zellen ermöglichen. Sind Sie also Kommunikationsforscher?

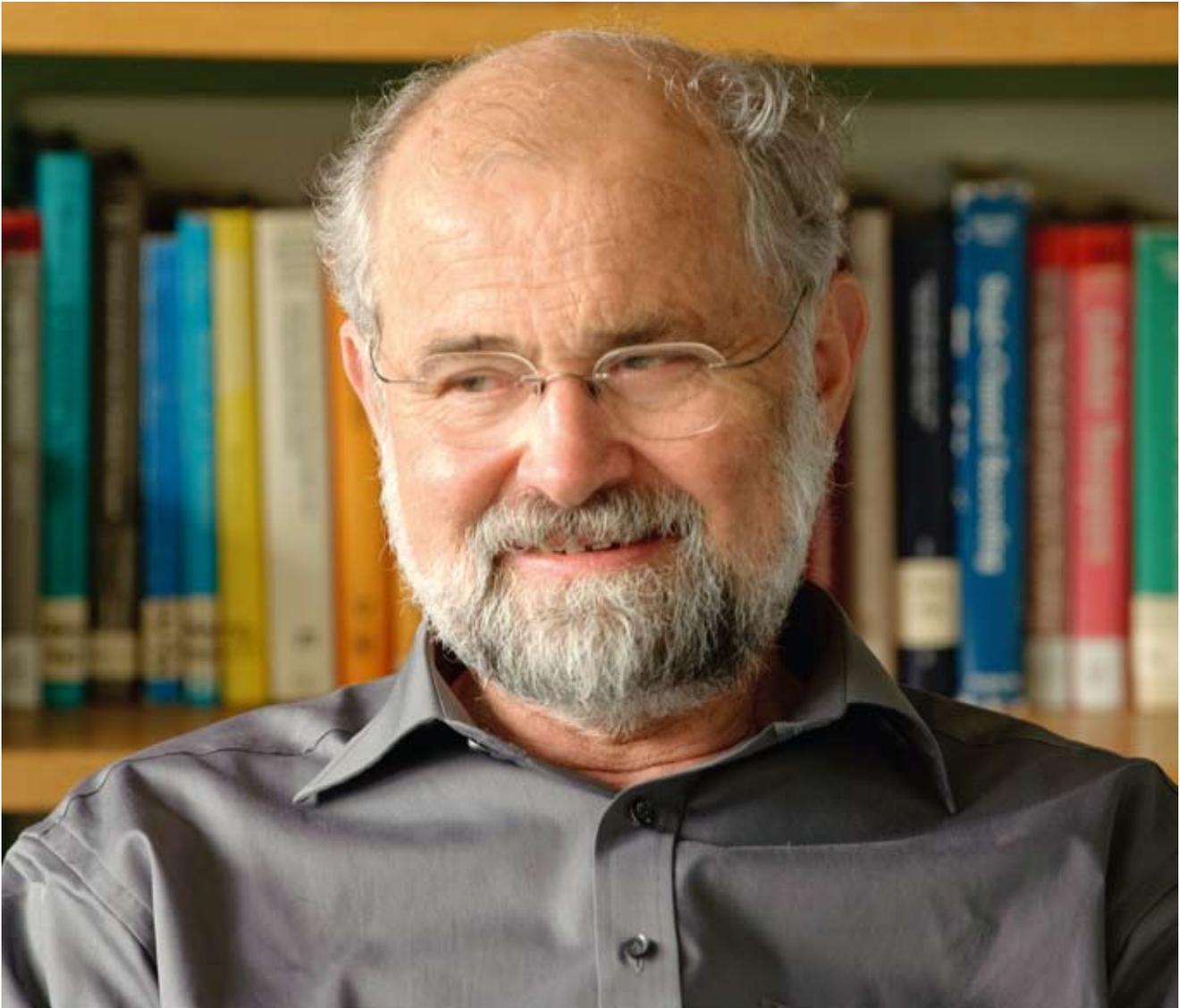
ERWIN NEHER: Die Frage, wie es ein Lebewesen schafft, seinen komplexen Organismus zu koordinieren, ist bis heute ein Ausgangspunkt für unsere Arbeit. Der Körper besteht aus sehr vielen Einzelzellen, jede davon bereits ein Lebewesen an sich. Alle aber müssen miteinander kommunizieren, wenn das Ganze funktionieren soll. Ionenkanäle sind ein wesentliches Element dabei. Das sind Membranproteine, die unter bestimmten Bedingungen geladene Teilchen durch die Zellmembranen passieren lassen und damit einen Stromfluss ermöglichen, der etwa in unserem Nervensystem Signale leitet.

Ende Juni nehmen Sie zusammen mit 24 anderen Laureaten an der Lindauer Nobelpreisträgertagung teil, um dort mit Nachwuchsforschern zu diskutieren. Auch eine Form der Kommunikation ...

NEHER: Das authentische Gespräch vis-a-vis ist mir besonders wichtig. Allerdings trifft sich in Lindau ein ziemlich ausgewählter Kreis. Die Teilnehmer werden in einem kompetitiven Verfahren von Nationalakademien und Universitäten ausgesucht und kommen aus allen Teilen der Erde.

Wie steht es generell um den Dialog der Forscher mit der Öffentlichkeit?

NEHER: Einerseits sehe ich durchaus, dass wir Wissenschaftler eine Bringschuld, ja eine Rechtfertigungspflicht haben. Wir sind aufgerufen darzulegen, wofür wir das Geld der Steuerzahler ausgeben. Andererseits ist ein guter Wissenschaftler keineswegs automatisch ein guter Kommunikator, das muss er auch nicht sein. Wir sollten zunächst mal das tun, was wir können und was von uns erwartet wird: gute Forschung be-



ALLE FOTOS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / IRENE BOTTICHER-CAEWSKI, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOPHYSIKALISCHE CHEMIE

treiben. Doch ganz klar, natürlich hat die Öffentlichkeit am Ende auch ein Recht, von Ergebnissen zu erfahren. Andererseits interessieren sich viele Menschen nicht für die Details unserer Arbeit.

Es gibt derzeit mehrere große Reizthemen wie Atomkraft, grüne Gentechnik, Embryonenforschung ... Stimmt der öffentliche Diskurs darüber?

NEHER: Überhaupt nicht! Ich bin oft sehr unzufrieden damit, wie die Massenmedien solche Themen aufbereiten. Sobald irgendein Problem auftaucht, berichten sie fast immer nur darüber, welcher Politiker was wusste und sich wie geäußert hat. Sachinformationen gibt es hingegen kaum – es wäre wichtig, diese würden mehr vermittelt. Da sehe ich vor allem die Wissenschaftsjournalisten gefordert.

Aber neue Medien wie Blogs oder Formate wie Kinderunis gestatten es Forschern, ganz direkt in die Gesellschaft hineinzuwirken und damit die Rechtfertigungspflicht einzulösen. Machen Forscher davon schon genug Gebrauch?

Ich kenne viele Kollegen, die sich dabei sehr engagiert einbringen, und das ist gut so. Aber auch für einen Forscher hat der Tag nur 24 Stunden, und jede Stunde, die für Kommunikation aufgewendet wird, fehlt im Labor. Wer gut kommunizieren kann, sollte das tun; wer nicht, sollte es den Wissenschaftsjournalisten überlassen, die dafür ausgebildet sind.

Zurück zu Ihren Forschungsarbeiten. Ist Leben ohne Strom denkbar?

NEHER: Kaum. Wir sehen zwar in der Evolution, dass manche niedrigere Lebewesen ohne elektrische Aktivität in Form von Nervenimpulsen zurechtkommen. Um aber einen Organismus zu steuern, der größer ist als ein Zentimeter und rasch reagieren soll, arbeitet nur das elektrische Signal schnell genug. Die Leistungen unseres Gehirns etwa sind nur unter Einbeziehung elektrischer Mechanismen denkbar.

Das Thema Elektrizität in Organismen hat Ihre Forscherkarriere geprägt. Wie kamen Sie dazu?

NEHER: Mich hat sehr früh schon vor allem das Aktionspotenzial fasziniert. Das ist ein zentrales Element für die Informationsweitergabe in Nervenzellen – ein elektrischer Impuls, der sich entlang der Nervenfaser ausbreitet. Jede Zellmembran, die sowohl den Zellkörper als auch die Nervenfaser umgibt, fungiert für sich normalerweise wie ein Isolator, lässt kaum Ionen durch. Spezielle Ionenkanäle lassen hingegen jeweils bestimmte Ionensorten passieren, zumindest ab und zu. Daneben gibt es so genannte Ionenpumpen – Proteine, die Ionen aktiv über die Membran hinweg transportieren. Das führt dazu, dass die Zellen unterschiedliche Verteilungen vor allem von Kalzium (Ca^{2+}), Kalium (K^+), Natrium (Na^+) und Chlorid (Cl^-) haben. Und damit kommen zwangsläufig auch Spannungsunterschiede zwischen innen und außen zu Stande. Die meisten Zellen sind im Ruhezustand gegenüber dem Äußeren negativ geladen.

Das Aktionspotenzial ist nun eine blitzschnelle Umpolung der Ladungsverteilung zwischen innen und außen. Binnen einer tausendstel Sekunde wird die Membran plötzlich durchlässig für Natriumionen – was zu einem Na^+ -Einstrom und positiver Ladung im Zellinneren führt. Diese Umpolung breitet sich dann entlang der Membran mit bis zu 100 Meter pro Sekunde aus. 1952 veröffentlichten Alan Hodgkin und Andrew Huxley ein Modell, das diese Ionenströme und damit das Aktionspotenzial beschreibt. Ihr Konzept hatten sie anhand zahlreicher Versuche mit der so genannten Spannungsklemme an den sehr großen Nervenfasern von Tintenfischen hergeleitet. Für mich wurde schon in der Schule klar, dass ich Physik und Mathematik studieren wollte, um damit derartige Fragen aus der Biologie zu erforschen.

Und was ist diese Spannungsklemme?

NEHER: Die Spannungsklemme, entwickelt 1949 von Kenneth Cole und George Marmont in den USA, machte es möglich, die Spannung über einer Membran konstant zu halten oder in vorbestimmter Weise zu ändern und die resultierenden Ströme zu messen. Dazu benötigt man zwei Elektroden, eine zur Spannungsmessung und eine zur Einspeisung von Strom. Hodgkin und Huxley haben diese Methode intensiv genutzt.

Aber auch die beiden hatten nur ein theoretisches Modell für das, was da an der Membran passiert, haben die Ionenkanäle nur postuliert, nicht wahr? Und damit kommen Sie ins Spiel.

NEHER: Wir waren, wie andere Forschungsgruppen, Anfang der 1970er Jahre in der Tat auf der Suche nach den Mechanismen der Ionenleitung in Membranen. Das war, als ich 1972 als Postdoc an das MPI in Göttingen kam. Wir wollten damals nachweisen, dass dabei kleine Membranporen oder so genannte Ionenkanäle im Spiel sind. Es gab bereits Abschätzungen, dass Ströme im Bereich von Pikoampere (10^{-12} Ampere) zu erwarten waren. Solche Signale kann man jedoch nicht

an einer ganzen Zelle messen, da sich die Signale von Tausenden von Ionenkanälen einer Zelle überlagern. Wir wussten auch aus theoretischen Überlegungen, dass die Signalquelle unserer Messung einen sehr hohen Innenwiderstand in der Größenordnung von einem Gigaohm (10^9 Ohm) und mehr aufweisen musste. Andernfalls ist der winzig feine Strom durch einen einzelnen Ionenkanal schon aus physikalischen Gründen nicht messbar. Damit wurde uns klar, dass wir die Messung auf einen ganz kleinen Ausschnitt der Membran beschränken mussten. Denn je kleiner der Ausschnitt, desto höher der Widerstand.

Was war Ihre zündende Idee?

NEHER: Wir überlegten uns, dass wir Mikropipetten aus Glas verwenden sollten, um diese nicht, wie vormalig üblich, in die Zellen einzustechen, sondern sie nur berührend auf die Membran aufzulegen, und um damit winzige Bereiche der Oberfläche für die elektrische Messung zu isolieren: das Grundprinzip des Patch-Clamp-Verfahrens – quasi eine Klemme über einen winzigen Flecken der Membran, in dem idealerweise nur noch ein einzelner Ionenkanal liegt.

Das Hauptproblem war dabei lange Zeit, den Patch überhaupt annähernd dicht zu kriegen. Denn zwischen Zellmembran und Pipette fließen Ströme, die zunächst viel größer sind als die winzigen Ströme durch Ionenkanäle. Bert Sakmann und ich haben daher ab 1973 zunächst systematisch versucht, die Abdichtung zwischen Messpipette und Membran zu erhöhen – zum Beispiel indem wir die Oberflächen der Zellen enzymatisch gereinigt haben, indem wir die Pipetten bearbeitet haben, beschichtet, umgeladen, weiß Gott alles, was einem dazu einfällt. Das Einzige, was genützt hat, war, die Pipetten kleiner und an der Spitze schön konisch zu machen.

Bis Sie 1976 erstmals den Stromfluss durch einen einzelnen Azetylcholinrezeptor vermessen hatten. Das war der Durchbruch?

NEHER: Es war ein Durchbruch von mehreren. Dabei war die Dichtung zwischen Messpipette und Zelle zunächst noch alles andere als ideal. Erst 1981 konnten wir eine bessere Technik präsentieren. Am Ende hat da der Zufall geholfen – als wir endlich lernten, dass wir für jede Messung eine frische Pipette nehmen müssen. Ursprünglich haben wir diese Mikropipetten aufwändig von Hand hergestellt, daher haben wir sie nach Gebrauch gereinigt und wiederbenutzt. Das hat eine gute Abdichtung verhindert. Immer eine frische Pipette, zusammen mit einigen weiteren Tricks, das war die Lösung.

Wo bleibt beim Patch-Clamp-Verfahren eigentlich die zweite Elektrode für die Spannungsklemme?

NEHER: Die braucht man nicht. Der vergleichsweise geringe Stromfluss durch den einzelnen Kanal, den ich über meine einzel-



Die Patch-Clamp-Technik: Im Maiheft 1992 beschrieben Erwin Neher und Bert Sakmann ihre bahnbrechenden Forschungen.



Bernhard Epping im Gespräch mit Erwin Neher

ne Elektrode sowohl auslösen als auch messen kann, führt zu einer so kleinen Spannungsänderung in der großen Zelle, dass diese kaum ins Gewicht fällt.

Was ist das für ein Ionenkanal, den Sie 1976 zunächst beschrieben haben?

NEHER: Der Azetylcholinrezeptor ist ein Kanal, der in den Membranen von Muskelzellen sitzt. Er öffnet sich, wenn der Botenstoff Azetylcholin andockt, den die Nervenendigungen ausschütten, und lässt dann Natriumionen in die Muskelzelle eindringen, was sie zur Kontraktion veranlasst.

Forschung ist keine Spaßveranstaltung. Wie geht man mit den Frustrationen während jahrelanger Entwicklungsarbeiten um?

NEHER: Na ja, man probiert immer wieder etwas Neues. Ungeduldig darf man nicht sein. Vor allem brauchen Sie als Wissenschaftler ein echtes Interesse an einem Problem. Es muss eine große Neugierde da sein, die einen so gefangen nimmt, dass man davon nicht loskommt.

Ist die Konkurrenz in der Wissenschaft heute härter als noch 1970?

NEHER: Konkurrenz gab es damals schon – und sie ist wichtig. Sie müssen als Forscher bereit sein, auch mal Tiefschläge hinzunehmen.

Das Gros der Forschung wird heute sogar an den Universitäten über Drittmittel finanziert. Und die werden überwiegend bestimmten Forschungsschwerpunkten zugeteilt. Kann man in diesem Betrieb immer seiner Neigung folgen oder muss man Kompromisse eingehen, Dinge tun, die man nicht vorhatte?

NEHER: Davor warne ich. Wenn man sich für ein Gebiet nur interessiert, weil es dort Geld gibt, dann ist das keine gute Voraussetzung. Ich treffe mitunter Kollegen, die eigentlich gar nicht sonderlich an der eigenen Fragestellung interessiert sind. Das führt nicht zu Spitzenleistungen.

Gibt es wichtige Forschungsthemen, die Ihrer Meinung nach heute vernachlässigt werden?

NEHER: Die große Frage betrifft die richtige Aufteilung der Forschungsförderung zwischen angewandter Forschung und Grundlagenforschung. Ich glaube, dass letztere in Deutsch-

land eher zu wenig gefördert wird. Es gehen gerade mal drei bis vier Prozent der Gelder in die Grundlagenforschung.

Wenn man die Ausgaben von Staat und Industrie für Forschung zusammenrechnet ...

NEHER: Ja. Ich finde, ein Anteil von etwa zehn Prozent für Grundlagenforschung wäre angebracht. Denn Innovation gedeiht am besten in einem Klima, in dem neues Wissen entsteht. Überall auf der Welt erfolgen die Schlüsselinnovationen in der Industrie am ehesten in der Nachbarschaft von akademischen Zentren, wo exzellente Grundlagenforschung betrieben wird.

Und noch etwas: Grundlagenforschung ist nicht am grünen Tisch planbar. Ein Wissenschaftspolitiker in Berlin oder Brüssel kann zwar Ziele setzen, wird aber kaum in der Lage sein, die Erfolg versprechenden Schritte zu grundlegend neuen Erkenntnissen zu formulieren. Diese können nur aus der Wissenschaft entwickelt werden.

Für welche Anwendungen ist Ihre Arbeit nützlich gewesen? Viele Krankheiten gehen ja auf Defekte in Ionenkanälen zurück: bestimmte Formen von Diabetes, Mukoviszidose, Herzrhythmusstörungen, manche Formen von Taubheit. Sind der Patch-Clamp-Technik neue Therapien zu verdanken?

NEHER: Das ist ein sehr langwieriger Prozess. Nur vereinzelt erreichten bislang neue Substanzen die Zulassung als Medikament. Bestimmte Gifte von Kegelschnecken beispielsweise blockieren Kalziumkanäle in Zellmembranen. Und aus dieser Erkenntnis heraus sind aus einigen dieser so genannten Conotoxine Schmerzmittel entwickelt worden. Der Wirkstoff Ziconotid des japanischen Herstellers Eisai ist hier zu Lande für Patienten mit starken chronischen Schmerzen zugelassen, bei denen Opiode nicht wirken. Die gezielte Suche nach Hemmstoffen oder Aktivatoren solcher Kanäle setzt obendrein voraus, dass ihre räumliche Struktur entschlüsselt wird – was vor allem Biochemiker im Verbund mit Genetikern leisten müssen.

Nein, ich sehe da keine Eins-zu-eins-Verknüpfung zwischen Forschung und Anwendung. Vielmehr entstehen neue Arzneimittel aus dem Zusammenwirken neuer Erkenntnisse auf vielen Gebieten. Andererseits wissen wir heute dank der Patch-Clamp-Technik, dass viele längst bewährte Arzneimittel wirken, indem sie an Ionenkanälen im Körper ansetzen.

Wie viele Ionenkanäle hat unser Körper überhaupt?

NEHER: Einige hundert unserer Gene kodieren Ionenkanäle und Untereinheiten davon. Unterschiedliche Kombination dieser Genprodukte bringen vielleicht einige tausend funktionell verschiedene Ionenkanäle hervor. Mehr als Schätzungen haben wir bis heute aber nicht.

Woran arbeiten Sie zurzeit?

NEHER: Wir interessieren uns für die Plastizität der Verschaltungen im Gehirn, für die molekularen Grundlagen dafür an den Kontaktstellen der Nervenzellen, den Synapsen.

Zum Beispiel?

NEHER: Dazu muss ich zunächst den grundlegenden Mechanismus der Signalübertragung erläutern: An den Synapsen wird durch ein Aktionspotenzial in der vorgelagerten – prä-

synaptischen – Zelle ein chemischer Botenstoff, der Neurotransmitter, freigesetzt. Dieser öffnet in der nachgelagerten, der postsynaptischen Zelle Ionenkanäle und löst dadurch dort wieder ein elektrisches Signal aus. Der Neurotransmitter liegt in der Nervenendigung in kleinen membranumhüllten Verpackungseinheiten vor, in so genannten Vesikeln. Wir untersuchen eine besonders große Synapse in der Hörbahn im Gehirn, den Heldschen Kelch. Heute können wir genau beziffern, wie viele Vesikel in einer präsynaptischen Zelle vorhanden sind und wie viele Transmittermoleküle jedes Vesikel enthält. Ein Teil dieser Vesikel ist immer an der Membran der Zellen von innen angedockt. Bei jedem Aktionspotenzial in der Nervenendigung verschmelzen etwa 40 bis 50 Vesikel mit der Membran und schütten ihren Inhalt in den synaptischen Spalt aus. Der Auslöser dafür ist ein Einstrom von Kalziumionen während des Aktionspotenzials.

Und wo bleibt jetzt die Plastizität der Synapse?

NEHER: Plastizität heißt hier, dass sich die Synapsenstärke mit der Häufigkeit der Signale ändert. Je größer die Frequenz von Aktionspotenzialen ist, also je häufiger eine Synapse in einem bestimmten Zeitraum gereizt wird, desto weniger Transmitter kommt jedes Mal frei. Schon bei völliger Stille, selbst wenn kein Geräusch zu hören ist, feuern die Fasern des Hörnervs etwa 20-mal pro Sekunde. Bei Schalleinwirkung steigt die Frequenz an; zugleich sinkt die Größe des übertragenen Signals. Denn schon bei 100 Signalen pro Sekunde stoßen die präsynaptischen Zellen pro Aktionspotenzial nur noch etwa halb so viel Transmitter aus, wie sie im Ruhezustand jedes Mal bereitstellen. Wir sprechen von synaptischer Depression.

Welchen Sinn hat das?

NEHER: Es ermöglicht dem Gehirn, Informationen zu filtern. In den Synapsen der Hörbahn kann der Effekt dazu dienen, Übergänge in der Intensität von Tönen hervorzuheben. Bei einem Dauerton etwa entstehen hochfrequente Aktionspotenziale, was die synaptische Übertragung abschwächt. Die Aktionspotenziale eines neu einsetzenden Tons werden hingegen zunächst optimal weitergeleitet und so hervorgehoben. Dies ist eine der Grundlagen für das Phänomen der Adaptation, die auch bei anderen Sinneswahrnehmungen auftritt. Umgekehrt gibt es in manchen Hirnregionen auch Synapsen, die sich genau gegenteilig verhalten: Bei wiederholter Reizung agieren sie stärker – was als Bahnung bezeichnet wird. Hinsichtlich Plastizität hat jede Synapse sozusagen ihre eigene Identität.

Wir kennen heute viele Mechanismen der Signalverarbeitung im Gehirn, für die Plastizität bei der synaptischen Übertragung essenziell ist. Andererseits bleiben natürlich viele Details offen. Betrachten wir die synaptische Depression: Prinzipiell kommen als Ursache dafür zwei Schritte in Frage. Die Zelle muss ja nach jeder Runde der Transmitterfreisetzung die benutzten Vesikel in ihrem Inneren recyceln: Sie holt die Vesikelmembran aus der Außenmembran, regeneriert die Vesikel und füllt sie neu.

Und weil das dauert, kommt die Zelle bei hochfrequenten Aktionspotenzialen nicht mehr nach?

NEHER: Nein, das glauben wir gerade nicht! Die Zelle hat ein sehr großes Reservoir an Vesikeln. Wir gehen vielmehr davon aus, dass ein Mangel an Bindungsstellen für sie auf der Membran die kurzen Pausen verlangt. Es gibt offenbar nur eine sehr begrenzte Zahl dieser Stellen, und auch die müssen jedes Mal regeneriert werden. Wir nehmen an, dass die geringe Zahl das begrenzende Element ist, das in vielen Fällen die synaptische Depression bedingt.

Können solche Details wirklich erklären, wieso wir hören, sehen und schmecken und am Ende denken können?

NEHER: Das führt zurück zu dem eingangs behandelten Thema: Kommunikation von Wissenschaft. Wir Forscher müssen uns in Details vertiefen, was aber für die Öffentlichkeit oft nicht sehr interessant ist. Das große Bild ergibt sich meist erst aus der Zusammenschau der Forschung vieler Jahre. Aber wir kommen zumindest weiter. Denken Sie daran, wie vor 30, 40 Jahren die Biochemiker Einzelschritte der Stoffwechselfade entschlüsselt haben. Jeder einzelne davon ist sicher nicht umwerfend. Zusammen jedoch bilden sie die Grundlagen für das Verständnis des Stoffwechsels, ohne die heute kein Mediziner mehr auskommt.

Ob wir nun durch die Detaillergebnisse an Synapsen tatsächlich einmal verstehen werden, wie das Gehirn als Ganzes funktioniert, weiß ich nicht. Aber vielleicht schaffen wir es, nachzuvollziehen, wie beteiligte Zellen zu Grunde gehen. Und vielleicht reicht das ja schon aus, um eines Tages bei degenerativen Hirnerkrankungen einmal mit neuen Therapien das Absterben von Zellen zu verhindern.

Eine Therapie gegen Alzheimer?

NEHER: Nein, auch das geht nicht so eins zu eins. Aber ich sehe die Chance, dass wir bestimmten Hirnerkrankungen auf die Schliche kommen, indem wir die Zellbiologie des Neurons besser verstehen.

Da wäre sie, die Rechtfertigung, warum Sie öffentliche Forschungsgelder brauchen – aber es bleibt ein Wechsel auf die Zukunft?

NEHER: Wenn Sie so wollen – ja. ☺

Die Fragen stellte **Bernhard Epping**. Er ist promovierter Biologe sowie Wissenschaftsjournalist und lebt in Tübingen.

WEBLINKS

www.lindau-nobel.org/2010_Meeting_Interdisciplinary.
AxCMS?ActiveID=1338

Englischsprachige Seite der Lindauer Nobelpreisträgertagung 2011, zu der sich vom 26. Juni bis 1. Juli insgesamt 26 Laureaten in Medizin oder Physiologie mit 570 Nachwuchswissenschaftlern aus 80 Nationen treffen

<http://lindau.nature.com/>

Blogs und Videos von der Lindauer Tagung in deutscher und englischer Sprache

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072100

Mit Pulsaren auf der Jagd nach Gravitationswellen

Bestimmte Neutronensterne lassen sich als äußerst genaue kosmische Uhren nutzen. Mit ihrer Hilfe wollen Astronomen nun die Existenz von Gravitationswellen direkt nachweisen. So genannte Pulsar Timing Arrays werden es sogar erlauben, die Signale supermassereicher Schwarzer Löcher aufzufangen, die gerade miteinander verschmelzen.

Von Michael Kramer und Norbert Wex

Der Raum ist die unverrückbare Bühne, auf der das Weltgeschehen spielt, und die Zeit fließt absolut gleichmäßig dahin – so stellte sich zumindest Isaac Newton die Welt vor. Doch mit Albert Einsteins Relativitätstheorie haben wir uns von dieser statischen Sichtweise verabschiedet. Heute wissen wir, dass sich der Raum stauchen und dehnen lässt und auch die Zeit mal schneller und mal langsamer vergeht. Diese Erkenntnis eröffnet uns nun ein neues Fenster zum Universum. Astronomen hoffen, dass sie die energiereichsten Ereignisse im Kosmos bald studieren können, indem sie Gravitationswellen untersuchen: wellenförmige Verzerrungen der Raumzeit, die von beschleunigten Massen herrühren und sich mit Lichtgeschwindigkeit durchs All bewegen.

In Newtons Theorie wirkte die Schwerkraft noch augenblicklich über beliebige Entfernungen hinweg. Es war undenkbar, dass sich Störungen der Gravitation wellenförmig und mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten könnten – wie Wasserwellen, die ein in einen See geworfener Stein auslöst. Doch bereits Anfang des 20. Jahrhunderts spekulierten Physiker über solche Ideen. Henri Poincaré (1854–1912) woll-

te mit Hilfe von »Wellen der Beschleunigung« den bis dahin unerklärten Anteil in der Periheldrehung des Merkurs verstehen. Bei dieser dreht sich die Bahn des Planeten innerhalb der Bahnebene. Aber erst Einstein gelang es im Rahmen seiner 1915 veröffentlichten allgemeinen Relativitätstheorie, Gravitationswellen korrekt zu beschreiben. (Dass sie nichts mit der Periheldrehung zu tun haben, fand ebenfalls Einstein heraus. Diese ist vielmehr eine Folge der starken Raumzeitkrümmung in der Nähe der Sonne.)

Seither betrachten wir die Gravitation als Eigenschaft der Raumzeit. Raum und Zeit sind dynamische Größen, deren metrische Verhältnisse durch die Materieverteilung bestimmt werden – und die im Gegenzug festlegen, wie sich die Materie bewegt. Mittels eines Näherungsverfahrens wies Einstein im Juni 1916 erstmals nach, dass seiner Theorie zufolge wellenförmige Schwingungen der Raumzeit tatsächlich existieren und sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten müssen. Als er berechnete, wie viel Energie ein System von Körpern durch Gravitationswellen abstrahlt, unterlief ihm zwar zunächst ein Fehler. Doch in seiner Arbeit »Über Gravitationswellen« von 1918 korrigierte er ihn und leitete – bis auf einen fehlenden Faktor 2 – die so genannte Quadrupolformel her.

Noch heute besitzt diese Formel zentrale Bedeutung in der Gravitationsphysik. Jede Masse, die beschleunigt wird, verliert durch die Ausstrahlung von Gravitationswellen Energie – gleichgültig ob ein Auto, die Erde auf ihrer Bahn um die Sonne oder zwei einander umkreisende Sterne. Die Größe dieses Energieverlusts lässt sich mit der Quadrupolformel in erster Näherung berechnen. Allerdings galten Einsteins Überlegungen nur für Systeme wie schwingende Stahlplatten oder rotierende Hanteln, in denen die Massen durch mechanische Kräfte beschleunigt werden. Erst mehr als ein halbes Jahrhundert später ließ sich einwandfrei nachweisen, dass die Quadrupolformel auch dann gilt, wenn sich Massen durch ihre gravitative Wechselwirkung beschleunigen wie im Fall der einander umkreisenden Sterne.

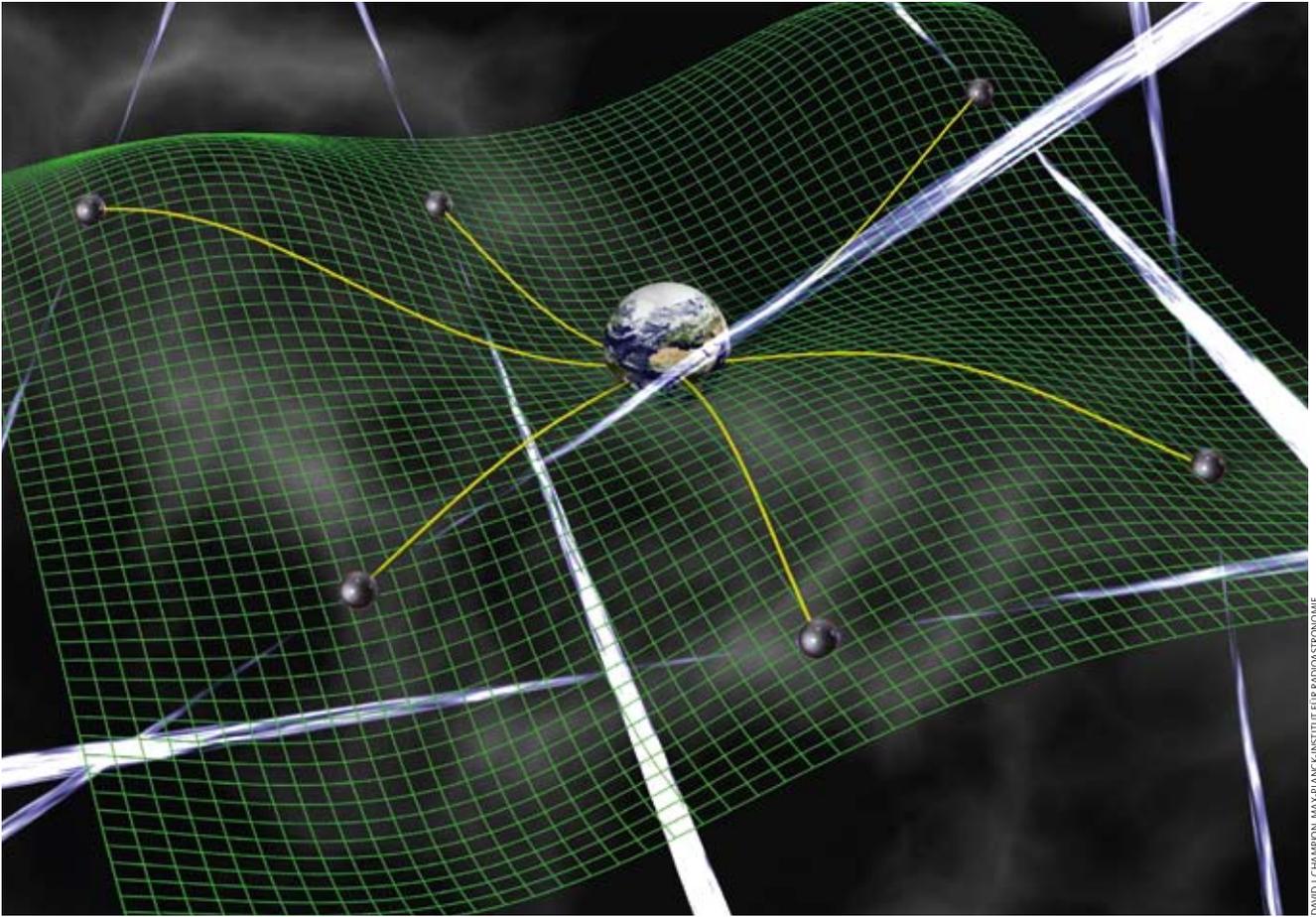
AUF EINEN BLICK

DIE VERMESSUNG DER RAUMZEIT

1 Pulsare sind schnell rotierende **Neutronensterne**, die äußerst regelmäßige Radiosignale aussenden. Ist die Regelmäßigkeit gestört, deutet dies auf **Gravitationswellen** hin.

2 Der indirekte Nachweis solcher wellenförmiger Erschütterungen der Raumzeit ist mit Pulsaren bereits gelungen. Auch Tests der **allgemeinen Relativitätstheorie in starken Gravitationsfeldern** wurden so möglich.

3 Nun wollen Pulsarforscher die Existenz von Gravitationswellen endlich auch **direkt nachweisen**. Doch weltweit sind weitere Detektoren in Betrieb. Wer am Ende das Rennen macht, ist offen.



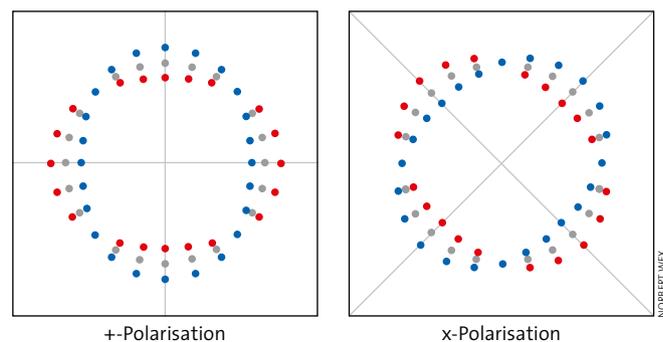
DAVID J. CHAMPION, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR RADIOASTRONOMIE

Einstein hatte auch gezeigt, dass es sich bei Gravitationswellen um so genannte transversale Wellen handelt (kleine Abbildungen rechts): Demnach dehnt und staucht eine Gravitationswelle den Raum senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Rollt sie beispielsweise über zwei im Raum frei schwebende Massen hinweg, verändert sich der Abstand ℓ zwischen diesen Massen um den Betrag $\Delta\ell$. Die Amplitude h der Gravitationswelle, sozusagen ihre Stärke, lässt sich dann als $h = \Delta\ell/\ell$ berechnen.

Selbst auf astronomischen Skalen erzeugen nur wenige Prozesse Gravitationswellen nennenswerter Amplitude. Die Erde in ihrer Bewegung um die Sonne verliert lediglich 200 Watt in Form von Gravitationswellen – das ist unmessbar wenig. Hingegen strahlen zwei Schwarze Löcher mit je zehn Sonnenmassen, die einander mit rund 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit umkreisen und kurz vor dem Verschmelzen stehen, in einer millionstel Sekunde etwa so viel Energie ab wie unsere Sonne im Verlauf von 100 Millionen Jahren im elektromagnetischen Spektrum.

Zwar werden die von ihnen ausgehenden Gravitationswellen schnell schwächer – ihre Stärke sinkt umgekehrt proportional zu ihrer Entfernung von der Quelle –, so dass sie in einigen tausend Lichtjahren nur noch eine Amplitude von $h = 10^{-16}$ besitzen. Eine Strecke von 100 Metern wird dadurch gerade einmal um den Durchmesser eines Eisenatomkerns verkürzt beziehungsweise verlängert. Doch selbst ein solches

Pulsare (graue Kugeln) senden in Richtung ihrer magnetischen Achse Radiostrahlen (blau-weiß) aus. Weil die Objekte schnell rotieren, erreicht die Strahlung die Erde in Form kurzer, regelmäßiger Pulse. Gravitationswellen verzerren aber den Raum (angedeutet durch ein Gitternetz), so dass die Ankunftszeiten der Signale schwanken. Aus den Variationen ermitteln Physiker Informationen über die Gravitationswellen. Mit einem Netzwerk aus Pulsaren können sie sogar die Raumzeit präzise vermessen (schematische Darstellung).



NOBERT WEX

Läuft eine Gravitationswelle durch einen Ring aus frei schwebenden Testteilchen (grau), oszilliert deren Konfiguration senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle periodisch von der blauen zur roten Anordnung und zurück. Dabei lassen sich zwei Polarisationsmuster unterscheiden. Jede Gravitationswelle besteht aus einer Überlagerung dieser beiden Polarisationen.

Ereignis könnten moderne Gravitationswellendetektoren noch leicht nachweisen. Das größere Problem besteht für die Forscher jedoch darin, dass in der Milchstraße nur sehr selten zwei Schwarze Löcher miteinander verschmelzen. Selbst die viel häufigeren Explosionen massereicher Sterne, so genannte Supernovae – eine weitere Quelle von Gravitationswellen –, kommen in unserer Galaxis lediglich einmal pro Jahrhundert vor. Damit Detektoren eine realistische Chance haben, ein solches Ereignis tatsächlich zu beobachten, sollen sie daher mindestens in der Lage sein, die Gravitationswellen von Supernovae auch im rund 50 Millionen Lichtjahre entfernten Virgo-Galaxienhaufen registrieren zu können.

Doch die Chancen auf eine Detektion wachsen derzeit schnell. Schon in den nächsten Jahren wird es so weit sein: Dann gelingt den Wissenschaftlern wohl erstmals der direkte Nachweis von Gravitationswellen. Sie werden uns insbesondere helfen, die Gültigkeit der allgemeinen Relativitätstheorie auch in extrem starken Gravitationsfeldern zu überprüfen. Denn noch ist nicht klar: Treffen die Voraussagen der Theorie auch dort zu? Oder müssen alternative Gravitationstheorien entwickelt werden (siehe Kasten unten)?

Indirekte Belege für die Existenz von Gravitationswellen haben die Forscher indessen längst gefunden. Der erste Nachweis gelang vor mehr als 30 Jahren und beruhte auf einer

Entdeckung aus dem Jahr 1967. Damals waren Jocelyn Bell Burnell und Anthony Hewish an der englischen University of Cambridge auf eine neue Art von Radioquellen gestoßen, so genannte Pulsare. Diese senden Pulse von Radiostrahlen mit einer Regelmäßigkeit zur Erde, die man bis dahin nur von Atomuhren kannte. Schnell erwies sich, dass es sich bei den Objekten um rotierende Neutronensterne mit extrem starken Magnetfeldern handelt. An ihren magnetischen Polen werden geladene Teilchen auf höchste Geschwindigkeiten beschleunigt und gebündelt in Richtung der magnetischen Achse abgestrahlt. Liegt die Erde zufällig im Kegel des abgestrahlten Radiolichts, können Astronomen das Signal registrieren. Wegen seiner Rotation erscheint der Pulsar dann als kosmischer Leuchtturm, dessen »Licht« in regelmäßigen Abständen über die Erde streicht.

Gewaltiger Energieausstoß

In Pulsaren ist eine gewaltige Rotationsenergie gespeichert. Denn die extrem dichten und typischerweise rund 20 Kilometer durchmessenden Objekte entstehen, wenn im Verlauf einer Supernova der Kern des explodierenden Sterns kollabiert und Gravitationsenergie der in sich zusammenfallenden Masse dabei in Rotationsenergie umgewandelt wird. Aus dem gemächlich rotierenden Vorgängerstern wird so ein Neu-

Alternative Gravitationstheorien

Theoretiker haben zur einsteinschen Gravitationstheorie eine ganze Reihe Alternativen entwickelt. Denn noch lässt sich die Gravitation nicht mit den anderen drei Fundamentalkräften in einem gemeinsamen Theoriegebäude darstellen, in einer »Theorie für Alles«.

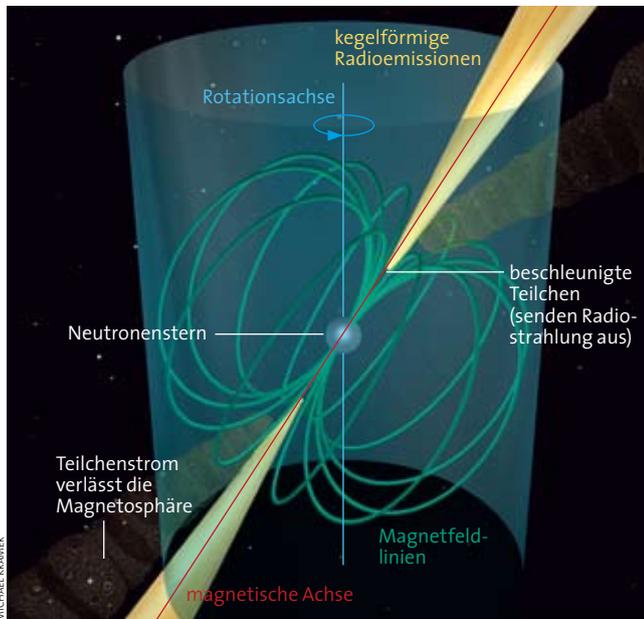
Das Verhalten physikalischer Objekte wird in solchen Theorien durch Felder beschrieben, zum Beispiel durch elektromagnetische oder Gravitationsfelder. Felder wiederum lassen sich durch mathematische Objekte wie Skalare, Vektoren und Tensoren darstellen. In einem Skalarfeld ist jedem Ort im Raum eine Zahl (und eine Einheit) zugeordnet, etwa eine Temperatur oder ein elektrisches Potenzial. Vektorfelder weisen hingegen jedem Ort einen Vektor zu. Eine Kraft etwa hat an diesem Ort nicht nur eine gewisse Stärke, sondern weist auch in eine bestimmte Richtung. Ein Tensor ist schließlich, grob gesagt, die Erweiterung eines Vektors zu einer mehrdimensionalen Matrix.

Das Gravitationsfeld der einsteinschen Theorie wird durch genau einen Tensor beschrieben. Alternative Theorien führen in der Regel zusätzliche Felder ein. Mal geschieht dies aus theoretischen Gründen, mal sind sie durch überraschende Beobachtungen motiviert. Beispielsweise gehen Forscher davon aus, dass sich die Geschwindigkeitsverteilung von Sternen in Galaxien nur durch die zusätzliche Schwerkraft so genannter Dunkler Materie erklären lässt. Möglicherweise lässt sich das Problem aber auch durch Einführung neuer Felder lösen. Die beschleunigte

Expansion des Universums, die durch Dunkle Energie hervorgerufen wird, versuchen Forscher ebenfalls mittels neuer Felder in die Theorie zu integrieren.

Während in der allgemeinen Relativitätstheorie allein das Tensorfeld die metrischen Eigenschaften der Raumzeit beschreibt, werden in Tensor-Skalar-Theorien – den wohl am besten untersuchten alternativen Gravitationstheorien – räumliche und zeitliche Abstände von einem Tensorfeld und zusätzlichen Skalarfeldern bestimmt. Gravitationswellen besitzen darin im allgemeinen auch zusätzliche Polarisierungseigenschaften, beispielsweise eine Mode, die den Raum in alle Richtungen streckt. In vielen alternativen Theorien gilt auch nicht mehr die Quadrupolformel. Stattdessen findet ein wesentlicher Teil der Emission eines Doppelsternsystems dann in Form so genannter Dipolstrahlung statt. Damit haben die Astronomen ein wichtiges Kriterium an der Hand, um ihre Theorien zu testen. Denn in vielen Fällen ist mit der Dipolstrahlung ein deutlich höherer Energieverlust verbunden als mit der Quadrupolstrahlung der allgemeinen Relativitätstheorie.

Die Vermessung und Charakterisierung von Gravitationswellen werden künftig besonders aufschlussreiche Tests der Relativitätstheorie und ihrer Alternativen, vor allem für den Fall sehr starker Gravitationsfelder, erlauben. Wann immer ein neues Experiment mit den Vorhersagen der Relativitätstheorie übereinstimmt, lassen sich alternative Theorien ausschließen oder zumindest in ihrem möglichen Geltungsbereich einschränken.



tronenstern mit extrem hoher Umdrehungsgeschwindigkeit. Ein typischer Pulsar mit einer Periode von 0,5 Sekunden, der sich also zweimal pro Sekunde um sich selbst dreht, besitzt eine Rotationsenergie von etwa 10^{40} Joule. Noch etwa 200-mal mehr Energie speichert der mit einer Periode von nur 33 Millisekunden rotierende Krebs-Pulsar im Krebsnebel, dem Überrest einer im Jahr 1054 beobachteten Supernova.

Mit der Zeit nimmt die Rotationsfrequenz der Pulsare ab, da sie einen Teil ihrer Energie als elektromagnetische Strahlung abgeben. Die Pulsperiode des noch jungen Krebs-Pulsars verlängert sich darum jeden Tag um 37 Nanosekunden (bei älteren Pulsaren wächst die Pulsperiode viel weniger schnell). Dabei strahlt das Objekt in einer Sekunde eine Energie von $5 \cdot 10^{31}$ Joule ab, hauptsächlich als niederfrequente magnetische Dipolstrahlung und als Teilchenfluss. Dies würde ausreichen, um den heutigen Energiebedarf der Menschen mehr als zehn Milliarden Jahre lang zu decken!

Auf Grund seines hohen Energieverlusts rotiert der Krebs-Pulsar aber nicht besonders gleichmäßig. Pulsare, die ein schwächeres Magnetfeld besitzen und deshalb auch schwächer abbremsen, sind für astronomische Experimente daher geeigneter, insbesondere Exemplare mit Rotationsperioden im Bereich weniger tausendstel Sekunden. Der schnellste, den wir kennen, dreht sich 716-mal pro Sekunde um sich selbst und besitzt damit eine Rotationsperiode von nur 1,4 Millisekunden, bei einer täglichen Abbremsrate von weniger als 10^{-14} Sekunden. Solche so genannten Millisekundenpul-

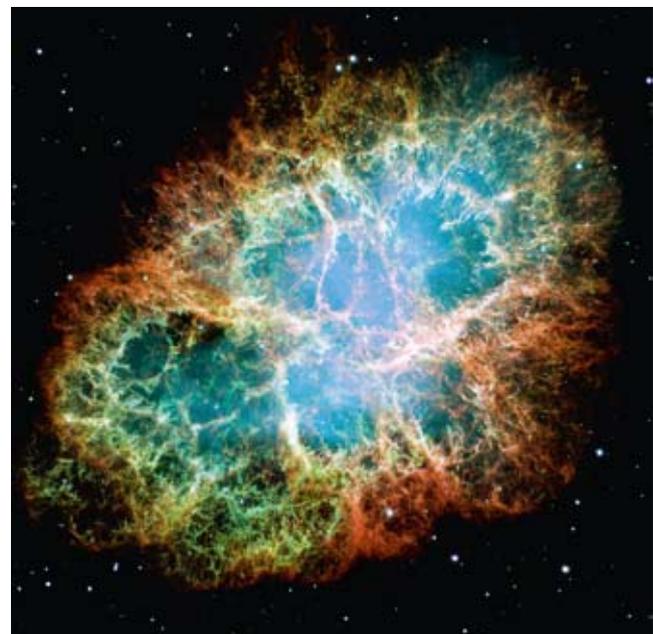
Der Krebs-Pulsar rotiert mit einer Periode von 33 Millisekunden. Astronomen haben ihn im so genannten Krebsnebel entdeckt (Bild), dem Überrest einer im Jahr 1054 beobachteten Supernova. Weil der Pulsar viel Rotationsenergie verliert, ist seine Drehbewegung nicht sehr gleichmäßig. Für die Präzisionsastronomie geeigneter sind Pulsare, die schwächer abbremsen.

An den Magnetpolen eines Pulsars werden geladene Teilchen entlang der dort senkrecht zur Sternoberfläche weisenden Magnetfeldlinien (grün) auf höchste Geschwindigkeiten beschleunigt und schließlich als gebündelte Radiostrahlen (gelb) emittiert. Auch ein zusätzlicher Teilchenstrom wird emittiert, der zu Schwankungen in der Rotationsperiode des Sterns führt. Manche Pulsare sind so zur Erde hin ausgerichtet, dass die Radiostrahlen während der Rotation des Pulsars auch die Erde überstreichen. Der Pulsar erscheint Astronomen dann als kosmischer Leuchtturm, dessen Signale in kurzen, extrem regelmäßigen Abständen aufblitzen.

sare gleichen massiven Schwungrädern, die nur schwer aus dem Tritt zu bringen sind. So lassen sie sich als äußerst präzise kosmische Uhren nutzen, die es sogar mit Atomuhren aufnehmen können. Entscheidend ist dabei das so genannte Pulsar-Timing, mit dem wir die auf der Erde gemessenen Zeiten in das Zeitsystem des Pulsars überführen.

Zunächst einmal müssen wir dafür die Drehung der Erde um den Massenschwerpunkt des Sonnensystems aus den Daten herausrechnen. Schließlich bewegt sie sich dadurch mal auf den Pulsar zu, mal von ihm weg. Auch relativistische Effekte im Sonnensystem, welche die Radiowellen beeinflussen, müssen wir berücksichtigen. Zudem verzögert sich die Ankunft der Pulse abhängig von der Elektronendichte entlang der Sichtlinie zum Pulsar. Durch Beobachtungen bei mehreren Frequenzen können wir diesen Dispersionseffekt aber ermitteln. Die eigentliche Unsicherheit ist das »interstellare Wetter«, also die zeitliche Veränderung der Dispersion. Das macht regelmäßige Messungen nötig.

Findet man einen Pulsar, der sich im Schwerfeld eines anderen Körpers bewegt – in der Regel in einem Doppelsternsystem –, lässt er sich für hochpräzise Messungen zum Test von Gravitationstheorien verwenden. Den ersten Pulsar mit

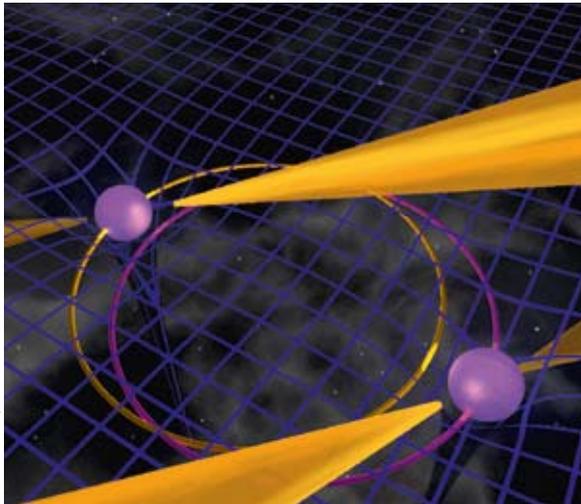


einem Begleiter entdeckten die US-Astrophysiker Russell A. Hulse und Joseph H. Taylor 1974. Der Neutronenstern PSR B1913+16 (so benannt nach seinen Himmelskoordinaten) ist ein Pulsar mit einer Periode von 59 Millisekunden, und sein (unsichtbarer) Partner stellte sich ebenfalls als Neutronenstern heraus. Bereits kurz nach der Entdeckung war klar, dass Hulse und Taylor auf ein einzigartiges Testsystem für die Relativitätstheorie gestoßen waren. Während der Pulsar um

den Schwerpunkt des Systems kreist, verändert sich die Laufzeit seiner Pulse zur Erde. In jahrelangen Untersuchungen konnten Taylor und Kollegen die Raumzeit des Systems daher genau ausmessen und entdeckten schließlich, dass sich die Bahn des Pulsars langsam, aber stetig verengt. Dies entsprach einem Verlust an Bahnenergie, der perfekt mit den Voraussagen der Quadrupolformel übereinstimmte (siehe auch Diagramm unten). Somit war den Forschern, die dafür 1993 den Nobelpreis erhielten, der erste Beleg für die Existenz von Gravitationswellen gelungen (siehe »Pulsar PSR1913+16 sendet Gravitationswellen« von Joseph H. Taylor et al., SdW 12/1981, S. 52).

Einzigartiges Testlabor

2003 entdeckte ein internationales Astronomenteam, darunter einer der Autoren, Michael Kramer, das erste System, in dem zwei aktive Radiopulsare einander umkreisen. Dieser Doppelpulsar bietet die bislang besten Möglichkeiten, die allgemeine Relativitätstheorie in starken Gravitationsfeldern zu testen. Die schematische Darstellung zeigt die beiden Pulsare (lila) und ihre Bahnen (lila und gelb). Die extrem kompakten Objekte krümmen die Raumzeit (als zweidimensionales Gitternetz angedeutet) in ihrer Umgebung millionenfach stärker, als dies die Sonne im Sonnensystem tut.



DAVID J. CHAMPION, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR RADIOASTRONOMIE

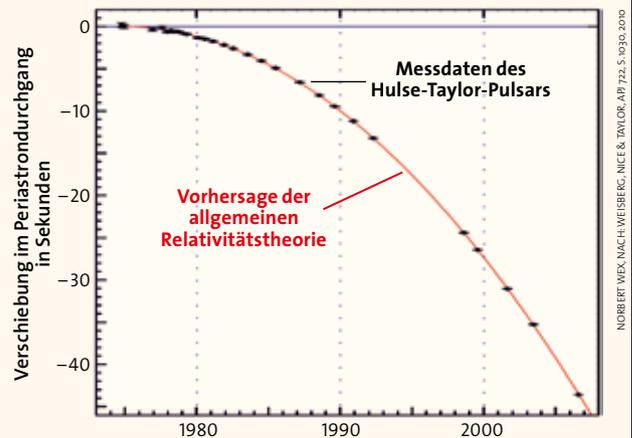
Das äußerst Unwahrscheinliche war eingetreten

30 Jahre lang blieb das Labor B1913+16 das Nonplusultra für Tests der allgemeinen Relativitätstheorie in starken Gravitationsfeldern, auch wenn es 23 000 Lichtjahre entfernt liegt. Gleichwohl hofften die Forscher auf ein näher liegendes System, das sich noch präziser würde vermessen lassen. Und tatsächlich: Im Frühjahr 2003 stellte ein neuer Fund den Hulse-Taylor-Pulsar in den Schatten. In diesem System bewegt sich ein 23-Millisekunden-Pulsar in nur 147 Minuten – gegenüber fast acht Stunden im Fall von PSR B1913+16 – zusammen mit einem Begleiter um einen gemeinsamen Schwerpunkt. Die eigentliche Sensation folgte indessen einige Monate später. Man fand nämlich ein weiteres, mit einer Frequenz von 2,8 Hertz pulsierendes Radiosignal in den Daten. Das äußerst Unwahrscheinliche war eingetreten: Die Astronomen hatten das erste Doppelsternsystem entdeckt, in dem beide Sterne aktive Radiopulsare sind. Der offizielle Name dieses einzigartigen Paares, das Fachleute einfach als den Doppelpulsar bezeichnen, lautet PSR J0737-3039A (für den 23-Millisekunden-Pulsar) und PSR J0737-3039B (für seinen langsamer rotierenden Begleiter).

Die für die allgemeine Relativitätstheorie typischen Phänomene fallen beim Doppelpulsar stärker aus als bei jedem anderen bekannten Pulsar in einem Doppelsternsystem. Denn die beiden Objekte bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von rund einer Million Kilometer pro Stunde entlang

Überzeugender Beleg

Der erste indirekte Nachweis für die Existenz von Gravitationswellen gelang mit Hilfe des ab 1974 beobachteten Hulse-Taylor-Pulsars. Die Forscher ermitteln jeweils, wann der Pulsar den Punkt seiner Bahn erreicht, wo er seinem Begleiter am nächsten kommt (in der Grafik wird dies als Verschiebung im Periastrondurchgang bezeichnet). Die rote Linie zeigt, welche Werte auf Basis der aus der allgemeinen Relativitätstheorie abgeleiteten Quadrupolformel erwartet wurden. Die schwarzen Punkte sind aktuelle Messdaten, ermittelt von Joseph H. Taylor und seinen Kollegen Joel M. Weisberg und David J. Nice.

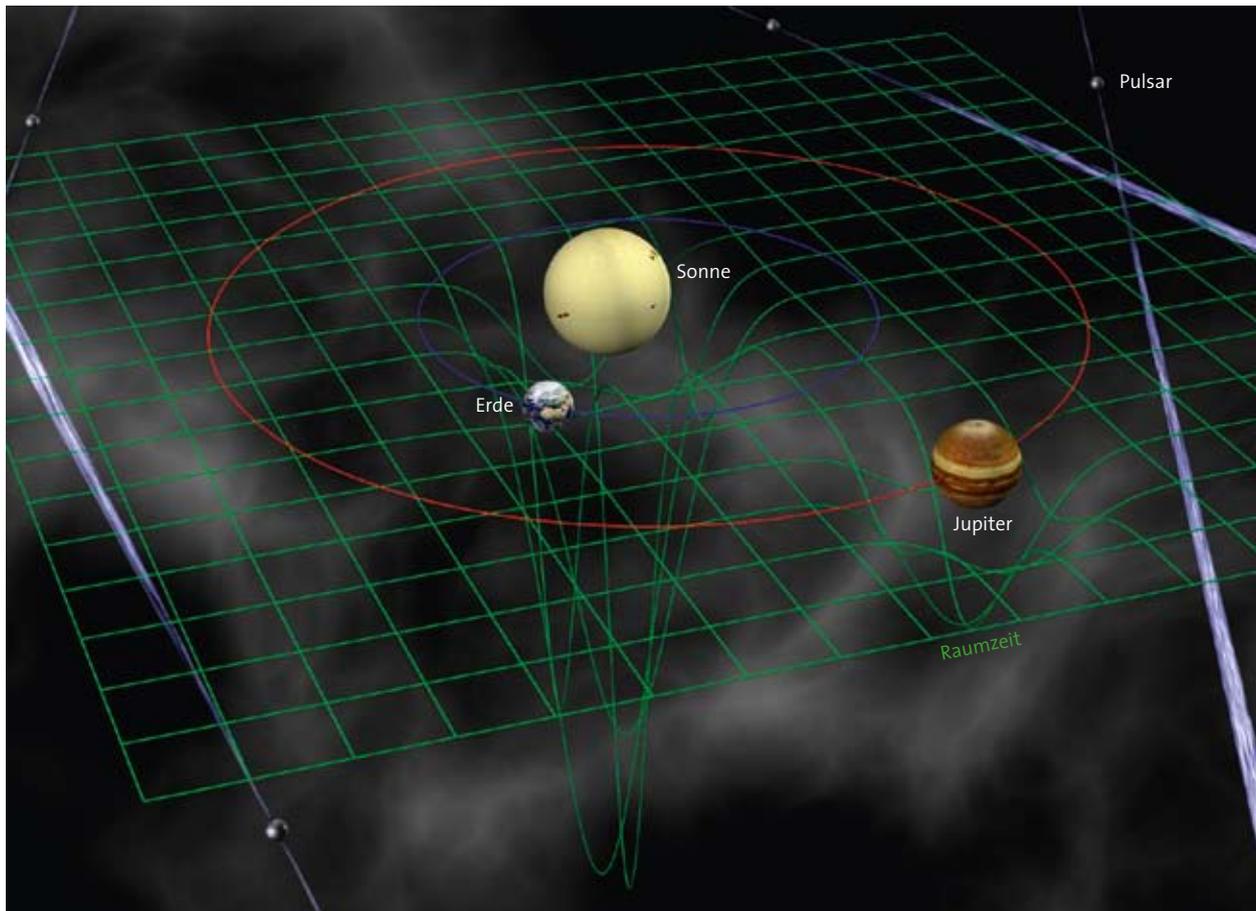


NOBBERT WEX, NACH WEISBERG, NICE & TAYLOR, APJ 724, 5, 1030, 2010

Planeten wiegen mit Pulsaren

Unter der Annahme, dass Pulsare genaue und unabhängige Uhren sind, kann man mit Hilfe des Pulsar-Timings sogar die Planeten des Sonnensystems »wiegen«. Kennt man Position oder Masse eines Planeten nicht genau genug, wird dies direkt in den Auswertungen der Pulsankunftszeiten erkennbar. Lässt man beispielsweise eine falsche Jupitermasse in die Berechnungen einfließen, so schwanken die ermittelten Zeiten mit einer Perio-

de, die genau mit der Bahnperiode des Jupiters übereinstimmt. Die Schwankungen werden umso geringer, je präziser die verwendete Jupitermasse ist. So haben David Champion, Michael Kramer und ein Team internationaler Kollegen die Masse des Systems aus Jupiter und seinen Monden auf 200 billionstel Sonnenmassen genau bestimmt. Eine solche Genauigkeit wurde bislang nur von Messungen mit Raumsonden erreicht.

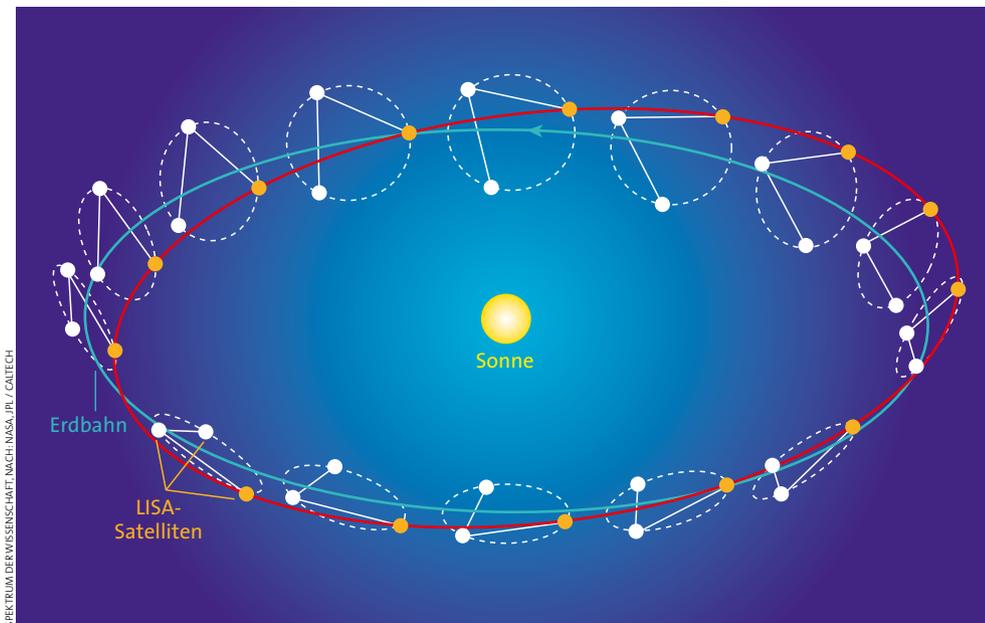


ihrer Bahnen. Auf den ersten relativistischen Effekt stießen die Forscher daher schon am zweiten Tag nach ihrer Entdeckung. Die Präzession der Bahnhalbachsen erfolgt beim Doppelpulsar mit einer Rate von 17 Grad pro Jahr, so dass nach gerade einmal 21 Jahren eine komplette Umdrehung abgeschlossen ist. Zum Vergleich: Die Bahn des Merkurs benötigt für diese Drehbewegung rund drei Millionen Jahre.

Auch mit seiner »Gravitationswellen-Leuchtkraft« stellt der Doppelpulsar alles Bekannte in den Schatten. Die Annäherung der beiden Pulsare um rund sieben Millimeter pro Tag ließ sich schon nach nur sieben Jahren mit einer Genauigkeit von 0,1 Prozent messen – deutlich genauer, als es die Hulse-Taylor-Daten selbst nach 30 Jahren zulassen. Weil der Pulsar zudem nur 3500 Lichtjahre entfernt ist, kann man das galaktische Schwerefeld, das ihn relativ zu unserem Sonnen-

system beschleunigt, praktisch vernachlässigen. Das ist hilfreich, weil sich dieser Effekt in den Messdaten nicht von Änderungen der Bahnperiode trennen lässt. Mit seiner Eigenbewegung von nur zehn Kilometer pro Sekunde steht das System zudem nahezu still. Durch seine Bewegung relativ zu seiner galaktischen Umgebung treten daher kaum störende Effekte auf.

Eines Tages werden wir mit dem Doppelpulsar vielleicht sogar die Gravitationswellenabstrahlung jenseits der Quadrupolformel testen. Zwar erklärt diese Näherung schon 99,9986 Prozent der vom Doppelpulsar abgestrahlten Energie. Können wir die Messgenauigkeit für dieses System jedoch noch um etwa den Faktor 70 steigern, würden wir die zu Grunde liegende Physik noch genauer verstehen können – vielleicht schon in den nächsten fünf bis zehn Jahren.



Der für 2020 geplante Weltraumdetektor LISA besteht aus drei Satelliten, angeordnet an den je fünf Millionen Kilometer voneinander entfernten Ecken eines gedachten, langsam rotierenden Dreiecks. Während LISA entlang der Erdbahn die Sonne umrundet – als Nachzügler rund 50 Millionen Kilometer »hinter« der Erde –, wird Laserlicht zwischen den Satelliten hin und her geschickt und an frei darin fliegenden Testmassen reflektiert. Aus Variationen der Lichtlaufzeit können die Forscher auf Gravitationswellen schließen.

Manche Fragen bleiben dennoch offen. Aus einigen alternativen Gravitationstheorien folgen Effekte, die sich von den Voraussagen der allgemeinen Relativitätstheorie zwar unterscheiden, in Systemen aus zwei Sternen vergleichbarer Dichte wie dem Doppelpulsar jedoch nur sehr schwach ausgeprägt sind. Auch besitzen viele alternative Gravitationstheorien frei wählbare Parameter, die man häufig so anpassen kann, dass die Theorien auch die Messungen am Doppelpulsar erklären. In diesen Fällen bleibt weiterhin unklar, ob die Theorien zutreffen oder nicht.

Aufschlussreiche Kombination eines Pulsars mit einem Weißen Zwerg

Wir brauchen also weitere Untersuchungsobjekte. Hier kommt eine zweite Klasse von Binärpulsaren ins Spiel: Pulsare, die von einem massearmen Stern in seinem Endstadium begleitet werden, nämlich einem Weißen Zwerg. Anders als im Fall des Hulse-Taylor- und des Doppelpulsars besitzen die beiden Komponenten des Systems höchst unterschiedliche Dichte. Das bedeutet vor allem für Alternativtheorien mit Skalarfeldern (siehe Kasten S. 50), dass der extrem kompakte Pulsar eine deutlich höhere skalare Ladung aufweisen sollte als der weniger kompakte Weiße Zwerg. Dies würde dazu führen, dass das System durch gravitative Dipolstrahlung wesentlich mehr Energie verliert, als es die allgemeine Relativitätstheorie vorhersagt.

In Systemen mit kurzen Umlaufperioden wäre so etwas besonders deutlich zu beobachten. Zwei Pulsare eignen sich für entsprechende Untersuchungen besonders, zumal Forscher sie auch schon lange beobachten: PSR J1141-6545, ein 394-Millisekunden-Pulsar, der sich in nur 4,7 Stunden um einen Weißen Zwerg mit etwa der Masse der Sonne bewegt, und PSR J1738+0333, ein 5,9-Millisekunden-Pulsar, dessen Umlaufperiode 8,5 Stunden beträgt und dessen Begleiter 0,18 Sonnenmassen besitzt. Im letzteren Fall ist der Weiße Zwerg

sogar hell genug, dass sich seine Bewegung über die Dopplerverschiebung der Spektrallinien vermessen lässt und man so wertvolle Zusatzinformationen über das System erhält.

Mittlerweile haben Forscher belegt, dass sich beide Pulsare gemäß den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie bewegen. Außerdem haben sie gezeigt, dass ein Neutronenstern – wenn überhaupt – nur eine sehr kleine skalare Ladung besitzen kann. Diese Erkenntnis schränkt Theorien stark ein, in denen skalare Felder eine große Rolle spielen. Sie widerspricht auch einer Theorie des israelischen Physikers Jacob Bekenstein, die zwar in Teilen der Forschungsgemeinde Rückhalt findet, aber stark umstritten ist. Sie versucht die Rotationskurven von Galaxien zu erklären, ohne von der Existenz Dunkler Materie auszugehen.

Der direkte Nachweis von Gravitationswellen steht indes weiterhin aus. Selbst der Doppelpulsar bringt uns nicht weiter. Die Frequenz der von ihm ausgesandten Wellen beträgt gerade einmal 0,2 Millihertz – das liegt für unsere Messinstrumente bislang außer Reichweite.

Der erste Versuch, die Wellen zu detektieren, hatte sogar noch vor der Entdeckung des Hulse-Taylor-Pulsars stattgefunden. Um 1960 begann Joseph Weber an der University of Maryland in den USA mit dem Bau eines so genannten Zylinderdetektors, eines Aluminiumzylinders mit zwei Meter Länge und einem Meter Durchmesser. Vergeblich hoffte Weber, dass die Resonanzfrequenz des Instruments durch Gravitationswellen angeregt würde und er die Schwingungen mit piezoelektrischen Sensoren registrieren könnte.

Heute setzen Forscher vor allem auf die Laserinterferometrie. Dabei wird Laserlicht zwischen frei hängenden Spiegeln hin- und herreflektiert und anschließend überlagert. Ändern sich die Abstände zwischen den Spiegeln durch hindurchlaufende Gravitationswellen, ändern sich die bei der Überlagerung entstehenden Interferenzmuster. Dieses Prinzip liegt etwa dem vom Albert-Einstein-Institut in der Nähe

von Hannover betriebenen Interferometer GEO600 zu Grunde. Hier werden zentrale technische Komponenten für die Detektoren weltweit entwickelt. Die Arme des Instruments, an deren Enden die Spiegel angebracht sind, sind 600 Meter lang. LIGO I und II in den US-Bundesstaaten Washington und Louisiana sowie Virgo in der Toskana (in Italien) besitzen sogar bis zu vier Kilometer lange Arme. Auf Grund ihres Designs und ihrer Isolation gegenüber seismischen Störungen können diese Laserinterferometer den gesamten Frequenzbereich von etwa zehn bis einige tausend Hertz »sehen«.

Auffällige Signale kurz vor dem Verschmelzen

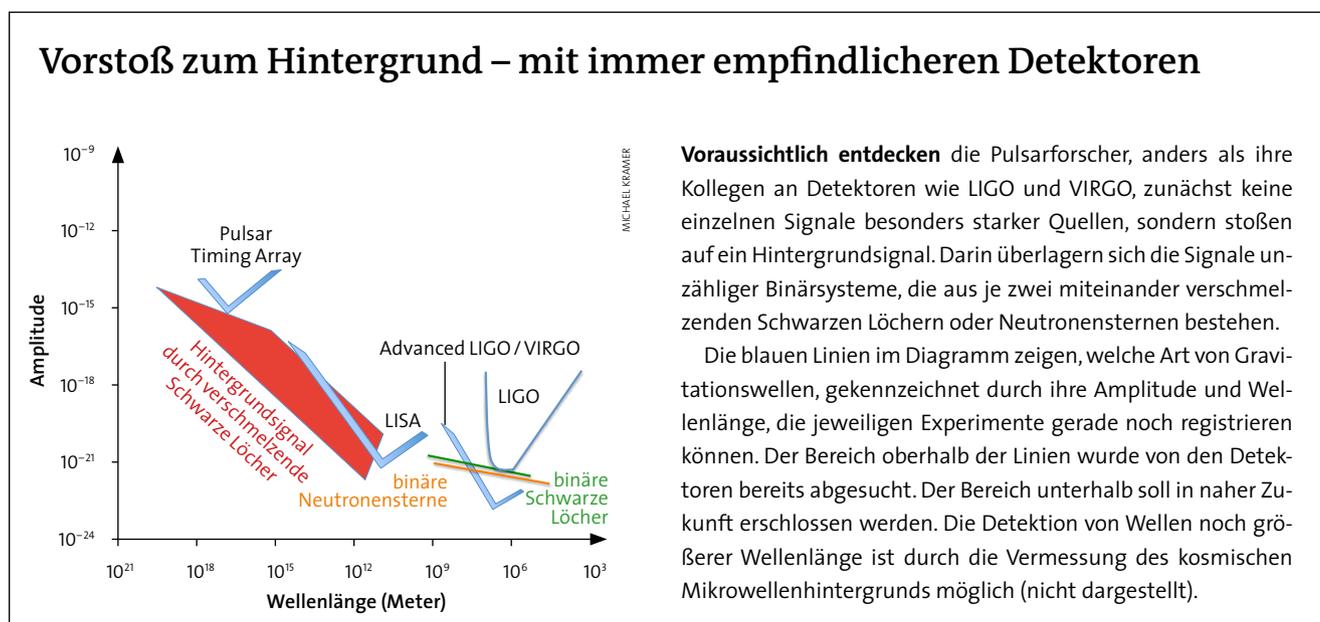
Theoretische Physiker gehen davon aus, dass irdische Gravitationswellendetektoren zunächst wohl vor allem die Signale miteinander verschmelzender Neutronensterne und Schwarzer Löcher registrieren werden. Die LIGO-Detektoren, die derzeit technisch aufgerüstet werden und als Advanced LIGO voraussichtlich 2015 wieder in Betrieb gehen werden, dürften dann pro Jahr mehrere Ereignisse dieser Art beobachten. Wie Abschätzungen auf Basis der zehn bekannten Doppelnutronensternsysteme vermuten lassen, kommt es in einer Galaxie etwa alle 10 000 Jahre vor, dass die Mitglieder eines solchen Systems miteinander verschmelzen. Diese Ereignisse finden damit zwar 100-mal seltener statt als eine Supernova, lassen sich aber noch in deutlich größeren Entfernungen registrieren. Letzteres hängt auch damit zusammen, dass Astronomen sie inzwischen mittels mathematischer Näherungsverfahren sehr genau beschreiben können. Von dem Zeitpunkt, ab dem die Frequenz des Gravitationswellensignals auf zehn Hertz angewachsen und somit für ein typisches Laserinterferometer sichtbar geworden ist, umkreisen sich die beiden Neutronensterne noch etwa 10 000-mal, bevor sie nach wenigen Minuten miteinander verschmelzen. Die typischen Signale sollten sich bei entsprechender Amplitude eindeutig in den Daten nachweisen lassen.

Dennoch leiden irdische Gravitationswellendetektoren unter Einschränkungen. Sie lassen sich nicht völlig von seismischen Schwingungen entkoppeln und sind daher auf die Messung von Frequenzen oberhalb von etwa zehn Hertz begrenzt. Damit liegen aber viele Quellen von Gravitationswellen »außer Sicht« – neben dem Doppelpulsar auch supermassereiche Schwarze Löcher mit mehreren Millionen Sonnenmassen, wie sie im Zentrum vieler Galaxien und auch der Milchstraße zu finden sind. Verschmelzen sie miteinander, weil ihre Muttergalaxien fusionieren, entstehen Gravitationswellen mit Frequenzen von höchstens wenigen Millihertz.

Um auch diese zu messen, soll um das Jahr 2020 das europäisch geführte Laserinterferometer LISA ins All starten. Es wird aus drei Satelliten bestehen, die ein Dreieck mit etwa fünf Millionen Kilometer Seitenlänge bilden und den Frequenzbereich von 0,1 Millihertz bis 0,1 Hertz abdecken. Unterhalb von einem Millihertz wird LISA voraussichtlich sogar so viele Quellen sehen, dass der Detektor sie nicht mehr einzeln auflösen kann. Stattdessen wird das Instrument nur noch einen stochastischen Gravitationswellenhintergrund wahrnehmen.

Die stärksten Quellen, die es sehen wird, dürften verschmelzende Schwarze Löcher mit 10 000 bis 10 Millionen Sonnenmassen sein. Diese kann LISA in die Zeit bis rund 300 Millionen Jahre nach dem Urknall zurückverfolgen und damit auch jene Epoche untersuchen, in der die ersten Galaxien entstanden.

Im Universum scheinen zudem Schwarze Löcher zu existieren, die selbst LISA nicht entdecken wird. So fanden Forscher im Zentrum großer Galaxien deutliche Hinweise auf Objekte mit einer Milliarde und mehr Sonnenmassen. Die elliptische Galaxie M 87 könnte ein Schwarzes Loch mit sieben Milliarden Sonnenmassen beherbergen, dessen so genannter Schwarzschildradius grob den Ausdehnungen unseres gesamten Sonnensystems entspricht. Verschmelzen derart





In Australien oder Südafrika soll bald das Square Kilometre Array (SKA) gebaut werden. Dieses Radioteleskop wird auf seiner Gesamtfläche von rund einem Quadratkilometer auch die Genauigkeit des Pulsar-Timings erheblich verbessern. Dazu werden rund 3000 Parabolantennen mit je 15 Meter Durchmesser zusammengeschaltet. Sie registrieren hohe Frequenzen bis in den Gigahertzbereich hinein. Hinzu kommen ganze Felder von Antennen unterschiedlicher Bauart, die niedrige und mittlere Frequenzbereiche abdecken.

große Schwarze Löcher, entstehen dabei Gravitationswellen mit Frequenzen im Nanohertz-Bereich (10^{-9} Hertz). Welchen Detektor müsste man bauen, um Signale mit so niedrigen Frequenzen zu registrieren?

Zum Glück hat uns die Natur ein derartiges Instrument bereits zur Verfügung gestellt. Das Grundprinzip der Messung ist einfach: Pulsare senden Radiopulse mit extrem konstanter Frequenz aus. Variieren nun die Ankunftszeiten dieser Signale, weil sie einen von Gravitationswellen deformierten Raumbereich durchqueren mussten, lassen sich aus diesen Daten Informationen über diese Gravitationswellen gewinnen. Das Verfahren ist ähnlich dem, wie es bei GEO600 oder LIGO zum Einsatz kommt. Auch hier wird geprüft, ob sich die Lichtlaufzeit auf einer bestimmten Strecke durch eine durchlaufende Welle verändert. Nutzt man Pulsare als Lichtquellen, ist der Arm des »Instruments« allerdings mehrere tausend Lichtjahre lang.

In einem einfachen (wenn auch nicht ganz korrekten) Bild kann man sich vorstellen, dass sich die Distanz der Erde zu den Pulsaren durch eine Gravitationswelle verändert. Infolge der erwarteten Polarisierungseigenschaften (siehe Bild S. 49) variieren die Pulsankunftszeiten von zwei Quellen, deren Verbindungslinien zur Erde senkrecht aufeinanderstehen, gegenläufig. Die einen Pulse treffen also verzögert ein, die anderen früher. So sind die Schwankungen der Ankunftszeiten also mit der Position der Quellen am Himmel korreliert.

Indem wir die genauesten dieser Pulsare, das sind derzeit rund 30 Exemplare, regelmäßig mit den größten Radioteleskopen der Welt beobachten, können wir die Schwankungen detektieren und daraus auf die sie verursachenden Gravitationswellen zurückschließen.

Die Empfindlichkeit eines solchen Pulsar-Timing-Arrays (PTA) aus mehreren Pulsaren wächst mit der Länge des Beobachtungszeitraums. Gleichzeitig erweitert sich dadurch das Spektrum der beobachtbaren Frequenzen. Mit unserem PTA, so lassen Simulationen unserer Kollegen vom Standort Potsdam-Golm des Albert-Einstein-Instituts erwarten, werden wir innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre Gravitationswellen sehen – entweder als dominierendes Signal einer einzelnen Quelle oder, was wahrscheinlicher ist, als Gravitationswellenhintergrund aus einer Reihe weniger starker Quellen.

Bei all diesen Überlegungen darf man nicht aus den Augen verlieren, dass auch Pulsare ihre Signale nicht in absolut regelmäßigen Abständen aussenden. Die Frage ist, welche von ihnen überhaupt genau genug »ticken«, dass wir sie für Experimente nutzen können. In der Tat lassen insbesondere junge Pulsare ein gewisses Eigenrauschen erkennen. Bislang wurde dieses Phänomen als zufällige Variation gedeutet. Kürzlich konnten Pulsarforscher jedoch zeigen, dass sie sich auf physikalische Prozesse in der Magnetosphäre des Pulsars zurückführen lassen. Dabei treten Variationen des aus der Magnetosphäre strömenden Teilchenflusses auf (siehe Gra-

fik S. 51). Dies führt zu kleinen Schwankungen in den Abbremsraten, die sich auch auf die Pulsformen der Radiosignale auswirken. Durch Messungen der Pulsformen können wir nun die Abbremsrate genauer bestimmen und so unsere Uhren noch präziser kalibrieren.

Um die Genauigkeit des Timings weiter zu erhöhen, suchen die Forscher auch nach stärkeren Pulsaren, unter anderem mit dem berühmten Effelsberger 100-Meter-Radioteleskop. Außerdem nutzen sie die weltweit größten Instrumente, die im Radiobereich arbeiten. In den USA gehört dazu das 100-Meter-Green-Bank-Teleskop, auf Puerto Rico das 300-Meter-Arecibo-Instrument und in Australien das 64-Meter-Parkes-Teleskop. Zudem arbeiten sie mit vier europäischen Geräten: neben dem Effelsberger Instrument mit dem Westerbork-Synthesis-Radioteleskop in den Niederlanden (dessen Leistung äquivalent der einer 94 Meter durchmessenden Radio-»Schüssel« ist), dem englischen 76-Meter-Lovell-Teleskop in England und dem Transit-Teleskop im französischen Nançay, das äquivalent einem 100-Meter-Instrument ist. Bald wird ein neues 64-Meter-Teleskop auf Sardinien hinzukommen. Obwohl die Gesamtfläche der europäischen Teleskope schon jetzt ihresgleichen in der Welt sucht, werden wir die Instrumente bald sogar zum Large European Array for Pulsars (LEAP) zusammenfassen. Dann verfügen wir über ein virtuelles Instrument, dessen Leistungsfähigkeit der einer 200-Meter-Schüssel entspricht.

Ein Quadratkilometer Sammelfläche für Radiolicht

Bereits jetzt wurde im Rahmen des europäischen Verbunds European Pulsar Timing Array (EPTA) die derzeit beste obere Grenze für den Gravitationswellenhintergrund bestimmt. Das heißt: Wir wissen, dass die Amplitude des Hintergrundsignals eine bestimmte Stärke nicht überschreitet. Das tatsächliche Signal muss also schwächer sein, woraus sich bereits Randbedingungen für das Verschmelzen von Galaxien im frühen Universum ableiten lassen.

Doch selbst im Rahmen der internationalen IPTA-Kooperation (International Pulsar Timing Array), in der EPTA und LEAP mit nordamerikanischen und australischen Forschern zusammenarbeiten, reicht die Empfindlichkeit der derzeitigen Teleskope kaum aus, um mehr als nur den Hintergrund zu detektieren. Aussagen über die physikalischen Eigenschaften der Gravitationswellen sind so aber noch nicht möglich. Darum arbeiten Astronomen in mehr als 20 Ländern bereits heute an der Errichtung des größten Radioteleskops der Welt.

Die Gesamtfläche des Square Kilometre Array (SKA, ein Nachfolger des LOFAR-Teleskops, siehe »Per Software zu den Sternen«, SdW 7/2008, S. 26), für das tausende kleinerer Antennen elektronisch zusammengeschaltet werden, wird den gigantischen Wert von einem Quadratkilometer besitzen. Das mit SKA gemessene Signal wird rund 100-mal stärker sein als das zufällige Hintergrundrauschen, so dass wir sogar die Polarisierungseigenschaften der Gravitationswellen und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wellenlänge werden messen können. Damit sollten sich

spannende Fragen über die fundamentalen Eigenschaften der Gravitation beantworten lassen, insbesondere über das Graviton. Das noch hypothetische Teilchen könnte für die Übertragung der Schwerkraft verantwortlich sein, so wie Photonen die elektromagnetische Wechselwirkung übertragen oder Gluonen die starke Kernkraft.

Mit SKA werden wir auch einzelne Quellen detektieren und nicht nur einen stochastischen Hintergrund. Identifizieren lassen sie sich mit einem Trick: Gravitationswellen rütteln nicht nur an der Erde, sondern – zeitlich versetzt – auch am Pulsar. Kennt man die Entfernung zwischen Pulsar und Erde genau, kann man anhand der Signale die Richtung der Quelle relativ zu Pulsar und Erde mit großer Genauigkeit bestimmen. Aus der Kombination der beiden Richtungen können wir dann die Himmelsposition der Quelle auf Bruchteile eines Grads genau bestimmen und schließlich auch im elektromagnetischen Spektrum nach ihr fahnden.

So beginnt sich mit der Gravitationswellenastronomie ein neues Fenster ins Universum zu öffnen. Was wir entdecken werden, ist noch ungewiss. Aber wir können sicher sein: Pulsare werden bei den kommenden Entdeckungen eine wichtige Rolle spielen. ~

DIE AUTOREN



Michael Kramer (links) ist Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn und Professor für Astrophysik an der Universität Bonn sowie an der University of Manchester. In seiner Arbeit verbindet er

Gravitationsphysik und Kosmologie mit der Erforschung von Pulsaren und ihren Vorgängersternen. Der Radioastronom gehörte dem Team an, das 2003 den Doppelpulsar entdeckte. **Norbert Wex** ist theoretischer Astrophysiker und leitet am MPIfR die Theoriegruppe in der Abteilung Radioastronomische Fundamentalphysik. Er befasst sich insbesondere mit relativistischen Theorien der Gravitation, mit Gravitationswellen und Schwarzen Löchern sowie den Möglichkeiten des Pulsar-Timings.

QUELLEN

Bartusiak, M.: Einsteins Vermächtnis. Der Wettlauf um das letzte Rätsel der Relativitätstheorie. Europäische Verlagsanstalt, Hamburg 2005

Champion, D.J. et al.: Measuring the Mass of Solar-System Planets Using Pulsar Timing. In: The Astrophysical Journal Letters 720, S. L201, 2010

Kennefick, D.: Traveling at the Speed of Thought: Einstein and the Quest for Gravitational Waves. Princeton University Press, 2007

Kramer, M., Wex, N.: The Double Pulsar System: A Unique Laboratory for Gravity. In: Classical and Quantum Gravity 26, S. 073001, 2009

Lorimer, D.R., Kramer, M.: Handbook of Pulsar Astronomy. Cambridge University Press, 2005

Lyne, A. et al.: Switched Magnetospheric Regulation of Pulsar Spin-Down. In: Science 329, S. 408–412, 23. Juli 2010

WEBLINK

Den vollständigen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072101

Der schwingende Weihrauchkessel

Wird ein pendelnder Körper periodisch angehoben und abgesenkt, gewinnt er Energie. Warum?

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Wer nach Santiago de Compostela im Nordwesten Spaniens reist, sollte sich einen Besuch in der Kathedrale der Stadt nicht entgehen lassen. Wenn er Glück hat – oder einen beträchtlichen Obolus entrichtet –, sieht er, wie dort der berühmte Weihrauchkessel Botafumeiro in Bewegung gesetzt wird und die riesige Kirche mit dem charakteristischen Duft erfüllt. Der rund 1,6 Meter hohe und einschließlich Weihrauchladung 80 Kilogramm schwere Kessel wird nicht einfach geschwenkt. Vielmehr versetzen ihn üblicherweise acht Männer, die Tiraboleiros, mit vereinten Kräften in gewaltige Pendelbewegungen. Dann rast der Kessel mit bis zu 70 Kilometer pro Stunde durch das Querschiff der Kathedrale und zieht dabei einen Weihrauchschweif hinter sich her. Vom einen Umkehrpunkt zum anderen legt er 65 Meter zurück und erreicht jeweils eine maximale Auslenkung von 82 Grad. Dort ist er nicht mehr weit vom Gewölbe der über 20 Meter hohen Seitenschiffe entfernt.

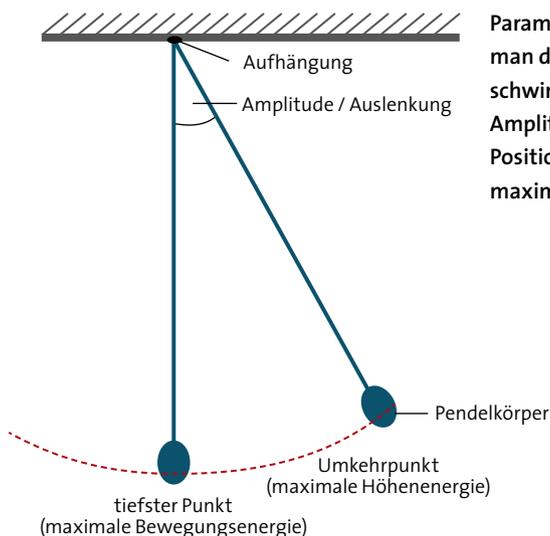
Die Tiraboleiros bedienen sich eines ebenso raffinierten wie einfachen Mechanismus. Physiker bezeichnen ihn als

parametrische Anregung, weil dabei charakteristische Parameter des Systems periodisch verändert werden, in diesem Fall die Länge des Pendels. Der Kessel ist an einem langen Seil befestigt, das über eine am Deckengewölbe befestigte Rolle wieder zurück zu den acht Männern führt. Einer der Beteiligten lenkt den Kessel leicht aus und versetzt ihn damit in eine Schwingung kleiner Amplitude. Anschließend machen die Tiraboleiros nichts anderes, als das herabhängende Seil immer dann mit vereinten Kräften nach unten zu ziehen, wenn der Kessel den tiefsten Punkt seiner Bahn durchläuft. Dabei heben sie ihn jeweils um etwa zwei Meter an. Um diesen Vorgang periodisch wiederholen zu können, müssen sie ihn danach wieder auf die alte Höhe absinken lassen. Auch dafür ist der richtige Zeitpunkt entscheidend. Die Tiraboleiros lockern das Seil immer genau dann, wenn der Kessel den höchsten Punkt erreicht hat.

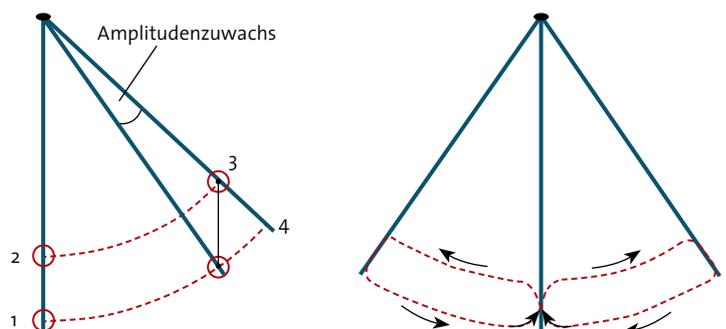
Ein bisschen erinnert das an einen Trick des Barons von Münchhausen: Schließlich ziehen die Akteure keineswegs in die Richtung, in die der Kessel schwingt. Und eigentlich variieren sie

ja auch nur die Seillänge. Doch diesem spektakulären Vorgang liegt ein einfaches physikalisches Prinzip zu Grunde, das eine Reihe von Anwendungen etwa in der Mechanik oder bei der Verstärkung elektromagnetischer Schwingungen besitzt. Will man es experimentell nachvollziehen, benötigt man nur eine Schnur, an die man eine Kugel oder einen anderen schweren Gegenstand hängt. Die Schnur führt man über einen Haken an der Decke – und schon ist der Minibotafumeiro komplett. Zu Beginn ruckelt man ein wenig am Faden oder stößt den Pendelkörper leicht an. Anschließend muss man, dem Beispiel der Tiraboleiros folgend, nur noch »pumpen« – also im richtigen Moment an der Schnur ziehen und sie wenig später wieder locker lassen.

Ideal ist es, genau dann zu ziehen, wenn das Pendel den tiefsten Punkt durchläuft. An den Umkehrpunkten muss man die Schnur wiederum so lockern, dass das Pendel seine ursprüngliche Länge zurückerhält. Am Anfang, wenn die Auslenkungen noch klein sind, trifft man die günstigsten Zeitpunkte zum Pumpen allerdings nur mit Mühe und wird es zudem kaum



Parametrische Anregung lässt ein gewöhnliches Pendel (links) stärker schwingen. Zieht man den durch Position 1 (Mitte) schwingenden Pendelkörper am Seil hinauf in Position 2, schwingt das verkürzte Pendel im Idealfall bis zu Position 3 aus. So vergrößert sich seine Amplitude. Lässt man das Seil an Position 3 wieder los, »fällt« die Kugel zunächst auf Position 4 und pendelt dann zurück zu Position 1 und so weiter. Damit der Pendelkörper maximal angeregt wird, muss er eine bestimmte Bahn durchlaufen (rechts).





Der Botafumeiro in der Kathedrale von Santiago de Compostela rast an den Tiraboleiros (links) vorbei. Die Männer »pumpen« – ziehen also mit vereinten Kräften am Seil –, kurz bevor der pendelnde Weihrauchkessel den tiefsten Punkt seiner Bahn erreicht hat.

schaffen, jede sich bietende Gelegenheit – zweimal pro Schwingungsperiode! – auszunutzen. Aber man kann das Pendelseil verlängern. Da die Schwingungsdauer mit der Pendellänge zunimmt, bleibt dann mehr Zeit zu reagieren. Das Timing wird auch durch die wachsende Auslenkung erleichtert. Die Tiraboleiros hingegen brauchen keine guten Ratschläge mehr: Sie pumpen stets zweimal pro Periode, und bereits nach 17 Zügen erreicht ihr Pendel die maximale Auslenkung.

Vollständige Energieumwandlung

Warum aber wirkt sich die Variation der Seillänge überhaupt auf den energetischen Haushalt des Pendels aus? Das erscheint nur auf den ersten Blick merkwürdig. Denn der am Seil hängende Kessel bewegt sich nicht lediglich hin und her. Vielmehr ist dieser Bewegung eine zweite überlagert: Der Kessel wird gleichzeitig von einer tiefsten Stelle bis zu seinem Umkehrpunkt angehoben und fällt – wenn auch auf einer Kreisbahn – von dort wieder zurück. Darin besteht das Grundprinzip des Pendels: Während der Pendelkörper nach oben schwingt, wird seine gesamte Bewegungsenergie in Höhenenergie umgewandelt, bis es schließlich zur Umkehr der Bewegung kommt. Dann geht die Höhenenergie wieder allmählich in Bewegungsenergie über, bis der Pendelkörper am tiefsten Punkt maximal schnell ist.

In dem Moment, in dem die Tiraboleiros das Seil verkürzen, heben sie den

Botafumeiro ein Stück an. So kann er höher steigen und vor allem weiter ausschlagen. Lassen ihn die Männer im Umkehrpunkt dann wieder sinken, bleibt die vergrößerte Amplitude weitgehend erhalten. Bei dem Kreisprozess – Verkürzen des Pendels im tiefsten Punkt und Verlängern des Pendels im Umkehrpunkt – wächst also zunächst einmal die Amplitude. (Wer die maximale Auslenkung von 90 Grad zu überschreiten versucht, provoziert allerdings den Absturz des Pendelkörpers.)

Doch geben die Tiraboleiros die investierte Energie nicht einfach wieder frei, sobald sie den Weihrauchkessel zurücksinken lassen? Nur zum Teil. Die Männer haben nämlich nicht nur die Gewichtskraft zu überwinden. Gleichzeitig müssen sie die zum Aufhängepunkt hin gerichtete Zentripetalkraft aufbringen, die den Pendelkörper auf seiner Bahn hält.

Denn eigentlich würde er sich als träger Körper auf einer Geraden bewegen. Eine Kreisbahn vollführt er nur dank der Kraft, die ihn zur Aufhängung in der Kirchendecke zieht. Diese Kraft nimmt mit wachsender Geschwindigkeit übrigens zu, so dass die Männer bei jedem Zug mehr Kraft aufbringen müssen. Die Höhenenergie wird am Umkehrpunkt also tatsächlich wieder frei.

Die Energie, welche die Männer durch das Aufbringen der Zentripetalkraft ins System stecken, bleibt hingegen darin enthalten.

Was die Besucher an dem schwingenden Weihrauchfass derart fasziniert, ist indessen nicht so leicht zu beantworten. Möglicherweise ist es ja die Diskrepanz zwischen der Einfachheit der Aktion und der Mächtigkeit der Wirkung. Oder man empfindet hier, was schon Michel de Montaigne wusste: Die Welt ist nichts als eine ewige Schaukel. ∞

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting ist Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Sanmartín, J.R.: O Botafumeiro: Parametric Pumping in the Middle Ages. In: American Journal of Physics 52, S. 937–945, 1984

Schlichting, H.J., Rodewald, B.: Zum kritischen Verhalten eines invertierten Pendels. In: Physik und Didaktik 14, S. 38, 1987

Was ist gerecht?

Gerechtigkeit war für Platon die höchste Tugend, sowohl des Staats als auch der einzelnen Person. Für den bedeutendsten Gerechtigkeitstheoretiker des 20. Jahrhunderts, John Rawls, ist es ebenfalls der Gerechtigkeitssinn der Bürger, der ein demokratisches Gemeinwesen zusammenhält. Dazwischen liegen 2500 Jahre des Nachdenkens über dieses zentrale Thema.

Von Julian Nida-Rümelin

Die Frage nach der Gerechtigkeit stellt sich, seit Menschen über ihr Zusammenleben nachdenken. Entsprechend nimmt das Thema auch seit jeher einen zentralen Platz in der Philosophie ein. Ausführliche Gedanken dazu hat sich etwa der antike Philosoph Platon im vierten vorchristlichen Jahrhundert in seinem Werk »Politeia« gemacht. Für ihn ist ein Staat dann gerecht, wenn jeder das tut, was er am besten kann, und insofern Har-

monie herrscht. Diejenigen, welche die Entscheidungen im Staat treffen, sollten dies auf der Grundlage wissenschaftlicher beziehungsweise philosophischer Erkenntnis tun. Der griechische Denker meinte sogar, dass jede falsche Entscheidung stets auf Unwissen beruhe.

Die verschiedenen Teile der Bürgerschaft unterscheiden sich in Platons idealem Staat nicht nach ihrem Herkunft oder sozialen Stand, sondern lediglich nach ihrem Bildungserfolg. Das gerechte Gemeinwesen ist demnach ein Bildungsstaat. Aber nur eine Minderheit seiner Bürger ist auch im Stande, den langwierigen Weg wissenschaftlicher und philosophischer Erkenntnis zu gehen. Daher ist ein gerechter Staat nur möglich, wenn alle besonnen sind. Dazu gehört, diejenige als Herrscher anzuerkennen, die über ausreichend wissenschaftliche und philosophische Kenntnisse verfügen, um die richtigen Entscheidungen zu treffen. Der (Stadt-)Staat der Erkenntnis bildet Platons Gegenmodell zur Stadt der bloßen Bedürfnisbefriedigung: der »Schweinestadt«, wie der Philosoph diese charakterisiert. Dieses Menschen und Werte verachtende Gemeinwesen hat weder Maß noch innere Harmonie und ist auf ständiges Wachstum angewiesen. Die platonische Stadt dagegen ist statisch und harmonisch. Man kann durchaus sagen, dass Gerechtigkeit bei Platon als Harmonie charakterisiert wird, sowohl des Staats als auch der einzelnen Person, der einzelnen Seele. Gerechtigkeit ist gleichbedeutend mit dem harmonischen Verhältnis aller Teile.

SPEKTRUM-SERIE

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

	Interview mit Julian Nida-Rümelin	März 2011
Teil 1	Albert Newen: Wer bin ich?	
Teil 2	Michael Pauen: Willensfreiheit	
Teil 3	Tobias Schlicht: Bewusstsein	April 2011
Teil 4	Albert Newen: Das Verhältnis von Mensch und Tier	
Teil 5	Sabine Döring: Gefühl und Vernunft	Mai 2011
Teil 6	Elke Brendel: Skepsis und Wissen	
Teil 7	Michael Esfeld: Philosophie der Physik	Juni 2011
Teil 8	Marcel Weber: Philosophie der Biologie	
Teil 9	Julian Nida-Rümelin: Gerechtigkeit	Juli 2011
Teil 10	Wilfried Hinsch: Menschenrechte	
Teil 11	Gottfried Vosgerau: Sprache und Denken	August 2011
Teil 12	Albert Newen und Kai Vogeley: Den anderen verstehen	

FOTOLIA / DAVISALES



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

Die Gerechtigkeitstheorie Platons beruht auf einer »Anthropologie der Ungleichheit« (die philosophische Anthropologie befasst sich mit dem Wesen des Menschen). Menschen sind ungleich, so der Philosoph, und dies zeigt sich im Bildungsweg. Die einen widmen viele Jahre ihres Lebens dem wissenschaftlichen Studium, um dann für einige Zeit ihre Kenntnisse in den Dienst des Staats zu stellen. Andere sind als »Wächter« und Beamte des Staats für die Durchführung der Entscheidungen verantwortlich. Die große Mehrheit aber geht Tätigkeiten nach, die lediglich der unmittelbaren Bedürfnisbefriedigung dienen: Sie sorgen für ihre Kleidung, Wohnung und Nahrung.

Platon selbst scheint allerdings Zweifel gehabt zu haben, ob Besonnenheit allein ausreicht, um innere Harmonie und Stabilität im Staat zu sichern. In seinem berühmten Höhlengleichnis verlässt einer die Höhle und kehrt erfüllt von philosophischer Erkenntnis zurück. Doch die Dagebliebenen, die immer nur die Schattenbilder an der Höhlenwand beobachtet haben, erkennen ihn nicht mehr an. Dies spiegelt Sokrates' Schicksal wider, den die Bürger Athens zum Tod verurteilten, obwohl – oder weil – er ihnen philosophische Erkenntnis gebracht hatte. Das Spätwerk Platons »Die Gesetze« (*nomoi*) kann man auch als eine Antwort auf diesen paradoxen Vorfall lesen. Hier regieren nicht mehr Menschen die gerechte Stadt, sondern die Gesetze sind an ihre Stelle getreten. Dabei handelt es sich lediglich um den zweitbesten Zustand,

Justitia, das Sinnbild der Gerechtigkeit, in drei Epochen des Abendlandes: in der römischen Antike (links, ohne Augenbinde, da noch »sehend«), im Mittelalter (rechts) sowie in der Neuzeit

da Gesetze immer nur pauschale Regelungen treffen können, die im Einzelfall zu Ungerechtigkeiten führen. Dieser Entwurf eines zweitbesten Staats kann aber durchaus als die erste Konzeption des Rechtsstaats gelten.

Der Schüler und Kritiker Platons Aristoteles (384–322 v. Chr.) hat selbst eine umfangreiche Abhandlung über Gerechtigkeit geschrieben, die leider nicht erhalten ist. Dennoch sind seine Überlegungen bis heute von großer Wirkungskraft. Die mittelalterliche Scholastik unterschied, gestützt auf das Buch 5 der »Nikomachischen Ethik« von Aristoteles, zwischen einer *iustitia legalis*, einer Gesetzesgerechtigkeit, und einer *iustitia commutativa*, einer Tauschgerechtigkeit, sowie einer *iustitia distributiva*, einer Verteilungsgerechtigkeit. Die Gesetzesgerechtigkeit sichert die staatliche Ordnung, die kommutative Gerechtigkeit sorgt für einen fairen Gütertausch, und die distributive Gerechtigkeit orientiert sich bei der Zuteilung von Gütern und Positionen an der Leistung des Einzelnen.

Wie schon bei Platon beruht auch die aristotelische Gerechtigkeitsvorstellung auf der Ungleichheit des Menschen. Aristoteles ist davon überzeugt, dass es von Natur aus drei

Herrschaftsverhältnisse gibt: das der Eltern über die Kinder, das des Mannes über die Frau und das des Freien über den Sklaven. Diese drei Machtverhältnisse seien geradezu konstitutiv für jede Hausgemeinschaft als natürliche Herrschaftsordnung.

Die politische Moderne beginnt dagegen mit der Erkenntnis, dass

- Menschen gleich und frei sind;
- es keine Unterschiede im Wesen der Menschen gibt, die eine Zugehörigkeit zu verschiedenen Ständen der Gesellschaft kennzeichnen könnten;
- niemand herrscht, weil Gott es so will, sondern legitime Herrschaft die Zustimmung der Beherrschten erfordert;
- jede Herrschaft ihre Grenzen hat, nämlich dort, wo sie mit den individuellen Freiheitsrechten kollidiert.

Der erste systematische politische Denker der Moderne, Thomas Hobbes (1588–1679), geht entsprechend von einer Anthropologie der Gleichen und Freien aus. Menschen sind gemäß dem englischen Mathematiker und Staatstheoretiker zwar mit unterschiedlichen Begabungen und Fähigkeiten ausgestattet. Dennoch sind sie hinreichend gleich, so dass zwischen ihnen keine natürliche Hierarchie existiert. Dies führt außerhalb einer staatlichen Ordnung zu Konkurrenz und Konflikt, was schließlich in einem Krieg aller gegen alle mündet und das Leben jedes Einzelnen zur Qual macht. Deshalb müssen alle an staatlicher Ordnung interessiert sein, an einem bürgerlichen Zustand (*status civilis*), für den es eines Konstrukts bedarf. Denn es gibt keine natürliche Herrschaftsordnung: Die angeborenen Ungleichheiten der Menschen reichen nicht aus, um eine stabile und allgemein akzeptierte Staatlichkeit zu etablieren.

Da alle einen Krieg aller gegen alle verhindern wollen, vereinbaren sie, ihre Gewaltmittel an eine Person oder Instanz abzutreten – natürlich in der Hoffnung, dass diese dann als souveräne Macht auch den Frieden sichert. Konkurrierende Vorstellungen von Gerechtigkeit würden diesen Frieden wiederum gefährden. So bestimmt allein der Wille der souverä-

nen Macht, was gerecht und was ungerecht ist. Sobald der Frieden durch Gesetze und Strafen gesichert sei, würden laut Hobbes Handel und Wandel gedeihen und die Gesellschaft als Ganzes prosperieren. Spätestens nach den Erfahrungen des 20. Jahrhunderts mit Hitler, Stalin und Mao wird man diesen Optimismus jedoch nicht mehr teilen können. Der Staat braucht Grenzen in Form der individuellen Freiheit seiner Bürger, und Gerechtigkeit darf nicht gleichgesetzt werden mit den jeweils geltenden Gesetzen.

In Absetzung von Hobbes behauptete schon der englische Philosoph John Locke (1632–1704), Menschen hätten Rechte unabhängig aller Staatlichkeit. Der Staat sei vielmehr ein Mittel, um diese Menschenrechte zu sichern. Das Recht auf Leben, auf körperliche Unversehrtheit und auf rechtmäßig erworbenes Eigentum sei jedem Menschen mit seiner Geburt (von Gott) gegeben, und die Menschen seien grundsätzlich bereit, diese Rechte auch anzuerkennen und zu beachten. Aber ohne rechtsstaatliche Ordnung führten Konflikte um die richtige Auslegung dieser Rechte und um die Bestrafung von Rechtsverletzungen zu Streit – oft sogar zu Blutrache und Krieg.

Der Rechtsstaat jedoch könne nicht bestimmen, was Gerechtigkeit sei, sondern er habe sich an die Menschenrechte zu halten, diese durch konkrete Gesetze zu schützen und Konflikte gerecht zu regeln. Nicht das bloße Eigeninteresse am Überleben und Frieden wie bei Thomas Hobbes sichere den Rechtsstaat, sondern vielmehr die gemeinsame Anerkennung, dass allen Menschen unabhängig von Stand und Herkunft gleichermaßen fundamentale Rechte zustehen. Gerechtigkeit sei nicht gesetzt durch staatliche Entscheidungen, sondern diene umgekehrt als Richtschnur eines gerechten Staats. Alle demokratischen Verfassungen der Welt haben diesen lockeschen Grundgedanken der Gerechtigkeit aufgenommen. Im deutschen Grundgesetz zeigt sich dies besonders deutlich, da der Wesensgehalt der Grundrechte selbst durch verfassungsändernde Mehrheiten im Parlament nicht angetastet werden kann.

In gewissem Sinn bewegt sich auch ein guter Teil der zeitgenössischen Gerechtigkeitsdiskurse noch immer zwischen Hobbes und Locke. Die Hobbesianer setzen in erster Linie auf die Rationalität der Bürgerinnen und Bürger und die ordnungstiftende Funktion des Staats. Sie sind Rechtspositivisten und misstrauen universalistischen Gerechtigkeitsvorstellungen, weil diese die Stabilität der gesellschaftlichen Ordnung gefährden können. Die Lockeianer hingegen sehen den Staat lediglich als Instrument, universelle individuelle menschliche Rechte zu garantieren. Sie stehen staatlichen Aktivitäten skeptisch gegenüber, die über die Sicherung der Menschenrechte hinausgehen. Viele von ihnen befürworten daher eine minimale Staatlichkeit.

Das dritte große Konzept moderner Gerechtigkeit geht auf den Genfer Philosophen Jean-Jacques Rousseau (1712–1778) zurück. Er wollte die ursprüngliche, natürliche Freiheit des Menschen dadurch wiederherstellen, dass jeder nur das

Der Staat ist das Mittel, um Menschenrechte zu sichern

AUF EINEN BLICK

GLEICH UND FREI

1 Nach **Platon** ist das gerechte Gemeinwesen ein **Bildungsstaat**. Aber nur eine Minderheit seiner Bürger ist zu wissenschaftlichen und philosophischen Erkenntnissen fähig. Daher ist ein gerechter Staat nur möglich, wenn alle besonnen sind.

2 Die **politische Moderne** beginnt mit der Erkenntnis, dass Menschen gleich und frei sind. Legitime Herrschaft erfordert die Zustimmung der Beherrschten und hat ihre Grenzen, nämlich dort, wo sie mit den **individuellen Freiheitsrechten** kollidiert.

3 Die aktuelle Diskussion zur Gerechtigkeit wurde von **John Rawls** angestoßen. Der Harvard-Philosoph versteht Gerechtigkeit vor allem als **Fairness**: Einzelne Mitglieder einer Gesellschaft profitieren von Kooperation mit anderen, aber die Bedingungen der Kooperation sollten fair sein.



tut, was er selbst tun will. Unter den Bedingungen der Zivilisation heißt dies aber, ein Gemeinwesen zu etablieren, in dem nur diejenigen Gesetze Geltung haben, die von allen gemeinsam beschlossen werden.

Ohne Rousseau wäre die Französische Revolution anders verlaufen

Möglich ist dies nach Rousseau nur deshalb, weil in der Versammlung, die diese Gesetze beschließt, Privatinteressen keine Rolle spielen können. Denn wer dort seinen eigenen Vorteil verfolgt, wird von den anderen Mitgliedern keine Zustimmung erfahren. Autarkie und Selbstbestimmung sind Rousseau so wichtig, dass es eine inhaltliche Bestimmung von Gerechtigkeit gar nicht braucht. Gerecht ist eben das, was eine Versammlung der Citoyens, also von gleichberechtigten und eigenverantwortlichen Staatsbürgern, beschließt. Da der Citoyen sich von seinem eigenen Privatinteresse in der Versammlung distanzieren muss, bildet die Republik eine sittliche Körperschaft, das heißt, sie vertritt die mehrheitlich akzeptierten Regeln der Gemeinschaft. Ohne die Ideen Jean-Jacques Rousseaus wäre die Französische Revolution anders verlaufen, und viele Demokratien weltweit, neben der französischen etwa auch die türkische oder amerikanische, gäbe es nicht in ihrer heutigen Gestalt.

Auch Immanuel Kant (1724–1804) zeigte sich in seinen späten Schriften von Rousseau zutiefst beeindruckt. Der Philosoph aus Königsberg war wohl der bedeutendste Erkenntnistheoretiker und Ethiker der europäischen Aufklärung. Aber in seiner politischen Philosophie blieb er weit weniger wirksam. Bis heute ist der Zusammenhang von Politik, Ethik und Recht bei Kant umstritten. Mit ihm und seinen Nachfolgern ging die hohe Zeit der politischen Philosophie zu Ende. Erst im letzten Drittel des 20. Jahrhunderts setzte wieder

eine Renaissance ein – und die hat viel mit John Rawls (1921–2002) zu tun, der lange an der Harvard University lehrte. Sein Hauptwerk »Eine Theorie der Gerechtigkeit« (1971, deutsche Ausgabe 1979) bestimmt die Debatten bis heute.

Der amerikanische Denker setzte sich zum Ziel, die große Tradition der politischen Philosophie der europäischen Aufklärung zu erneuern. Diese ist insbesondere mit den schon erwähnten Klassikern Locke, Rousseau und Kant verbunden. Zudem wollte Rawls eine Alternative zu dem im angelsächsischen Raum dominierenden utilitaristischen Denken formulieren, in welchem das Wohl des einzelnen Individuums unter Umständen dem Wohl der Gemeinschaft geopfert werden kann. Rawls' Gerechtigkeitstheorie lässt sich auf die institutionelle Verfassung westlicher Demokratien ein. Es geht ihm um ein besseres Verständnis der Rolle von Verfassung, Gesetzgebung und Rechtsprechung und besonders um das Verhältnis zwischen individuellen Freiheiten und Kooperationspflichten. Der Harvard-Philosoph versteht Gerechtigkeit vor allem als Fairness: Einzelne Mitglieder einer Gesellschaft profitieren von Kooperation mit anderen, aber die Bedingungen der Kooperation sollten fair sein. Und die Vorteile, die sie daraus ziehen, sollten gerecht verteilt werden.

Um zu klären, wann die institutionelle Grundstruktur einer Gesellschaft gerecht im Sinn von fair ist, ersinnt John Rawls ein fiktives Entscheidungsmodell: Er stellt sich vor, dass wir beziehungsweise die Repräsentanten gesellschaftlicher Gruppen über die Prinzipien entscheiden müssten, nach denen die institutionellen Grundstrukturen einer Gesellschaft aufgebaut werden. Um die Fairness dieser Entscheidung zu garantieren, fordert er einen »Schleier des Nichtwissens« für die Repräsentanten. Dieser lässt zwar alles allgemeine, relevante Wissen zu, etwa aus der Ökonomie oder Psychologie, aber keines über die entscheidenden Per-

sonen selbst. Keine von diesen weiß also, welchem Geschlecht sie angehört, wie alt sie ist, ob und wenn ja, welcher Religion sie anhängt oder welcher Herkunft sie ist. Unter solchen Bedingungen, meint Rawls, sollte ein fairer Vertrag zu Stande kommen, welcher die Prinzipien einer gerechten Gesellschaft festlegt. Da die Personen nicht wissen, was ihnen persönlich zum Vorteil gereicht, werden sie sich für solche Grundprinzipien entscheiden, die auch im ungünstigsten Fall ein akzeptables Leben nach den eigenen Vorstellungen ermöglichen.

Ein Beispiel: Da die Repräsentanten gar nicht wissen, welcher Religion sie angehören, werden sie sich dafür aussprechen, dass Religionsfreiheit für alle gleichermaßen garantiert ist. Denn eine Gesellschaft, die eine bestimmte Religion vorschreibt oder einige Religionen unterdrückt, könnte katastrophale Konsequenzen für das eigene Leben haben, wenn man am Ende nicht zur akzeptierten Gemeinschaft gehört.

Das Faszinierende an Rawls' Gerechtigkeitstheorie ist der systematische Versuch, die komplexe Frage der Gerechtigkeit auf zwei scheinbar einfachere zu reduzieren: Rationalität und Fairness. Was fair ist, wird über die Entscheidung unter dem Schleier des Nichtwissens bestimmt. Rationalität wird im üblichen Sinn als eigenorientierte Klugheit verstanden. Zur Verteilungsgerechtigkeit meint Rawls außerdem ein präzises und quantifizierbares Kriterium ableiten zu können. Da die Personen nicht wissen, welche Rolle sie am Ende in der Gesellschaft spielen werden, werden sie Risiken zu minimieren versuchen. Das heißt, sie werden Verteilungen bevorzugen, bei denen die am schlechtesten gestellte Gruppe möglichst gut abschneidet. Sie wollen ja schließlich verhindern, dass sie im schlimmsten Fall selbst kein anständiges Leben nach ihren eigenen Vorstellungen führen können.

Eine gerechte Gesellschaft gestaltet demnach ihre Institutionen so, dass sie im besonderen Maß der am schlechtesten gestellten Personengruppe zugutekommen. Man kann dies auch umgekehrt fassen: Ungleichheiten sind nur dann gerecht, wenn sie den am stärksten Benachteiligten nutzen. In diesem Sinn treffen sich bei John Rawls zwei große Traditionslinien der Politik: der Liberalismus und die Sozialdemokratie. Dagegen scheitert das utilitaristische Denken, also die Vorstellung, wonach das Glück aller zu maximieren sei. Rawls spricht hier von der *seperateness of persons*: Menschen leben ihr eigenes Leben, also kann man den Nachteil, der einer Person zugemutet wird, nicht dadurch aufwiegen, dass man einer anderen Person einen größeren Vorteil verschafft. Alle sind im Prinzip rationale Moralbeurteiler, die unter Fairnessbedingungen agieren. Sie müssen der institutionellen Grundstruktur einer Gesellschaft, wenn diese gerecht ist, zustimmen können.

In dieser Hinsicht findet sich Thomas Hobbes in Rawls' Theorie der Gerechtigkeit wieder. Aber auch John Locke hinterließ seine Spuren. Denn die individuellen Freiheiten haben für die entscheidenden Personen unter dem Schleier des

Nichtwissens Priorität gegenüber ökonomischer Optimierung. Des Weiteren ist auch Jean-Jacques Rousseau mit im Spiel, weil die gerechte institutionelle Grundstruktur Ausdruck kollektiver Selbstbestimmung ist. Und schließlich ist der Einfluss von Immanuel Kant zu sehen, weil die gerechte Gesellschaft die Autonomie der einzelnen Personen, ihre gleiche Würde und gleichen Respekt vor ihnen sichern soll.

In seinen späteren Vorträgen und Aufsätzen hat sich John Rawls ausdrücklich zu einer kantischen Interpretation seiner Gerechtigkeitstheorie bekannt, aber auch von jeder »metaphysischen« Begründung immer deutlicher abgesetzt. In seiner zweiten großen Monografie »Politischer Liberalismus« von 1993 nimmt der Philosoph die systematischen Ansprüche der Theorie der Gerechtigkeit zurück und betont die Rolle der öffentlichen Deliberation, also Beratung.

In diesem Sinn nähert er sich dem anderen bedeutenden politischen Philosophen der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts an, dem 1929 geborenen Jürgen Habermas. Der Frankfurter Philosoph befasste sich immer wieder mit der Gerechtigkeitsfrage, nahm dazu über die Jahre zunehmend Impulse aus der analytischen Philosophie und der Theorie des Pragmatismus auf und charakterisierte seine Position als kantianisch. In einer interessanten Gegenbewegung gab John Rawls sein ursprüngliches Verständnis der Gerechtigkeitstheorie als eines Zweigs der Theorie rationaler Entscheidung (*rational choice*) und die damit verbundenen systematischen Ansprüche auf.

Freiwillig zusammen in wechselseitigem Interesse

Der entscheidende Unterschied zwischen den beiden Ansätzen bleibt jedoch, dass Habermas sich einer inhaltlichen Bestimmung von Gerechtigkeit, ganz in der Tradition Rousseaus, weit gehend zu enthalten sucht. John Rawls gibt zwar den Anspruch einer philosophisch-ethischen Begründung auf, wird aber in der inhaltlichen Bestimmung konkret. Der Amerikaner beschäftigt sich insbesondere mit der Rolle kultureller Gemeinschaften in der Demokratie, die er – meines Erachtens jedoch fälschlicherweise – über umfassende moralische Leitlinien (*comprehensive moral doctrines*) zu charakterisieren sucht sowie mit deren Vereinbarkeit mit einer demokratischen Ordnung.

Rawls entwickelt darüber hinaus eine Konzeption der Gerechtigkeit in den internationalen Beziehungen und legt dabei eine Dreiteilung von Staaten beziehungsweise Nationen zu Grunde, die in der Rhetorik der Bush-Administration dann in Gestalt der »Schurkenstaaten«, die es zu bekämpfen gilt, eine unrühmliche Rolle gespielt hat. (Rawls spricht zwar von *peoples*, meint dies aber in keinem ethnischen, sondern in einem politischen Sinn.) Der Harvard-Philosoph bleibt hier einem nationalstaatlichen Denken verhaftet, anders als viele seiner Anhänger, die sein Grundmodell der Gerechtigkeit auf die globalisierte Welt, also auf die Weltgesellschaft, anwenden. Seine Gegenthese: Die Theorie müsse sich auf die

Eine gerechte Gesellschaft ist auch rational und fair

Mitglieder einer Gesellschaft beschränken, zwischen denen ein enges Kooperationsgefüge besteht, und die Akteure müssen Staaten beziehungsweise Staatsvölker sein und nicht Individuen. Angesichts der Globalisierung der letzten Jahrzehnte verliert jedoch diese Zweiteilung der Gerechtigkeitstheorie zunehmend an Überzeugungskraft.

In Reaktion auf John Rawls entwickelten einige Politikphilosophen seit Mitte der 1970er Jahre alternative Gerechtigkeitsmodelle. So präsentierte der Harvard-Professor Robert Nozick eine Konzeption, die ganz in der Tradition von John Locke steht und sich deutlich von derjenigen Rawls' unterscheidet. Bei Nozicks Gerechtigkeitsmodell fehlt das soziale Element, dafür wird der Liberalismus radikalisiert: Menschen haben einen Körper, Talente, Fähigkeiten, die auch mit ihrer Herkunft zusammenhängen. Über all das verfügen sie individuell selbst – das ist die so genannte These der *self-ownership*.

Demnach kann die einzige Legitimation von Staatlichkeit im freiwilligen Zusammenschluss im wechselseitigen Interesse bestehen. Nozick meint, dass es ein individuelles Interesse an Sicherheit gibt. Das würde die Menschen in einem anarchischen Naturzustand dazu bringen, untereinander Verträge zu schließen, die am Ende in einen »Ultraminimalstaat« münden. Dieses Gebilde hat mit dem modernen Staat einiges gemeinsam, beschränkt sich aber ganz auf den Schutz vor Übergriffen von innen und außen.

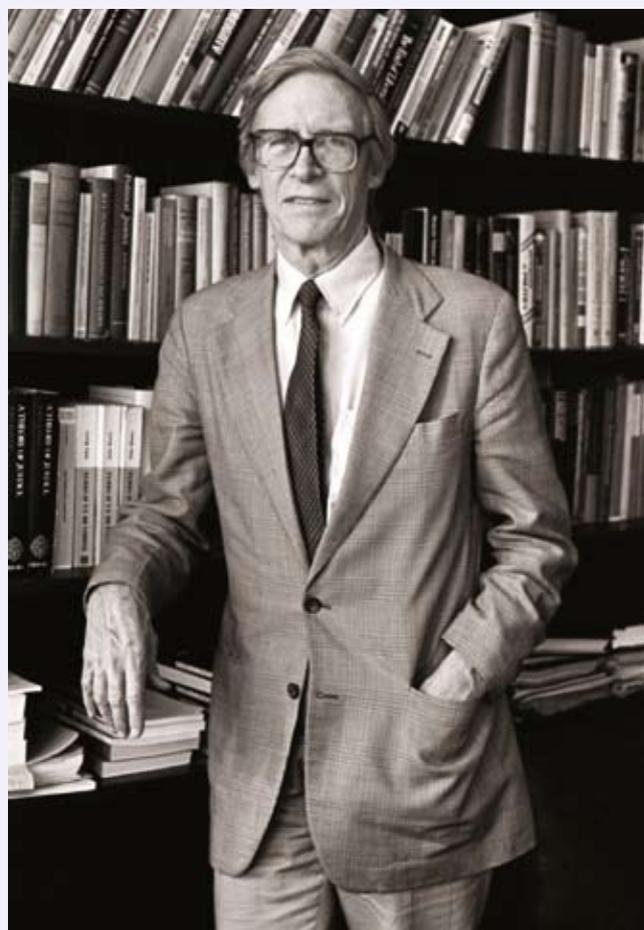
Jede darüber hinausgehende Staatlichkeit wäre nach Robert Nozick illegitim. Ansprüche des Staats auf Steuer, um zum Beispiel mehr Verteilungsgerechtigkeit zu sichern, seien Diebstahl. Niemandem ist es genommen, sich karitativ zu engagieren, aber Institutionen sollten das Soziale nicht zu regeln suchen. Dieses Konzept beruht auf einer Gerechtigkeitstheorie über Berechtigungen (*entitlement theory of justice*), wonach es nicht die Charakteristika der Verteilung von Gütern sind, die über die Gerechtigkeit entscheiden, sondern wie diese Verteilung zu Stande kommt. Das heißt: Was sich auf dem freien Markt etabliert, ist gerecht, wenn die Ausgangsbedingungen gerecht waren (dazu sagt Nozick allerdings wenig) und wenn die Transfers legitim abgewickelt wurden.

Nach Ausbruch der Weltfinanzkrise antwortete der langjährige Vorsitzende der US-Notenbank Alan Greenspan auf die Frage eines Interviewers, ob er denn geglaubt habe, dass es auf den internationalen Finanzmärkten keiner Regulierungen bedarf. Greenspan erwiderte darauf, er habe schon angenommen, dass solche Regelungen nötig sind. Aber zugleich sei er davon überzeugt gewesen, dass diese notwendigen Regulierungen von den Märkten selbst vorgenommen würden. Dies berührt offensichtlich den Schwachpunkt der libertären Gerechtigkeitstheorie: das ungeklärte Problem, wie wir mit kollektiven Gütern umgehen.

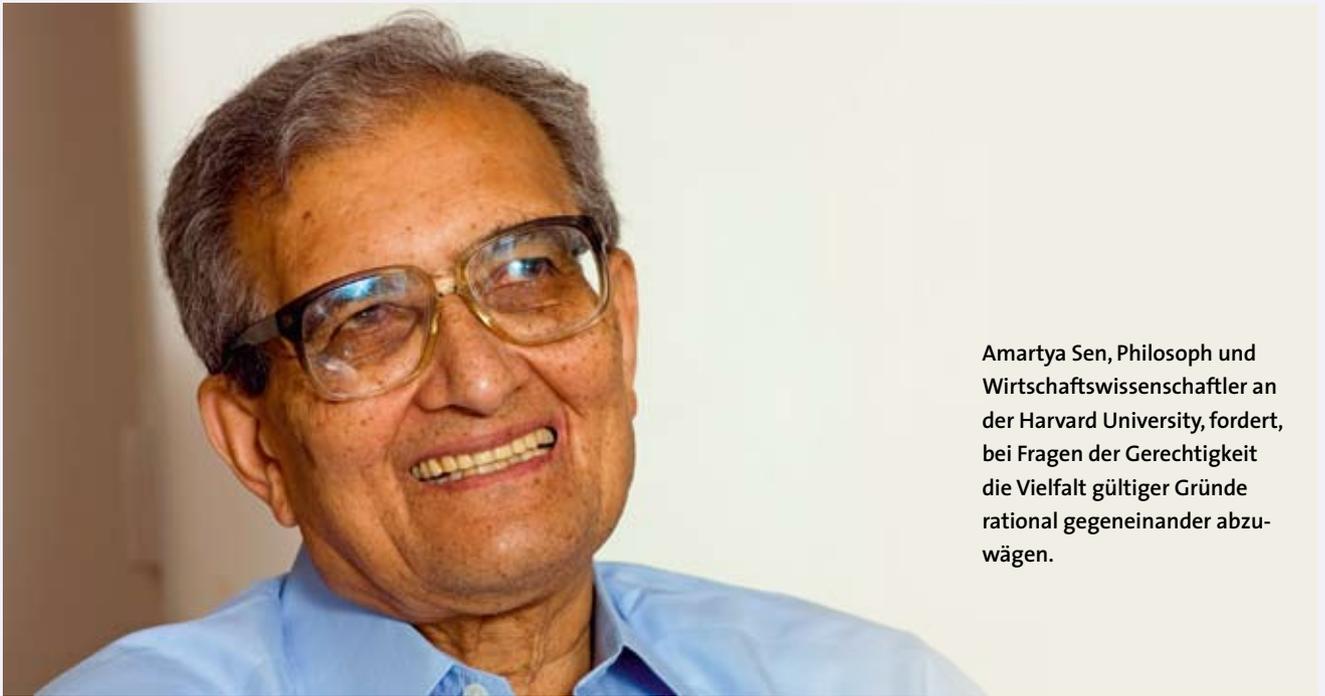
Eine weitere Kritik gegen John Rawls hat der amerikanische Wirtschaftswissenschaftler James M. Buchanan vorgebracht. Die These des späteren Ökonomie-Nobelpreisträgers lautet: »Wir haben zwar als Individuen gleichermaßen ein Interesse, bestimmte Handlungsweisen zu verbieten, zum Bei-

spiel Mord. Wir werden daher der Etablierung einer Rechtsordnung zustimmen, welche die individuellen Rechte sichert. Aber wir fordern darüber hinaus eine Staatlichkeit, die kollektive Güter bereitstellt.« James Buchanan nannte das einen produktiven Staat. Ein solcher ist demnach gerecht, wenn er den individuellen Interessen aller entspricht. Daraus ergibt sich allerdings ein Spannungsverhältnis zu den demokratischen Entscheidungsverfahren. Dort entscheidet die Mehrheit, und das kann dazu führen, dass kollektive Güter zur Verfügung gestellt werden, deren Erstellung mehr Kosten verursachen, als sie Nutzen bringen – wobei Buchanan auch deutlich machen sollte, dass die Umkehrung ebenso gilt. Auf Grund des Mehrheitswahlrechts kann es also auch sein, dass kollektive Güter, deren Produktion durchaus effizient wäre, nicht bereitgestellt werden.

Seit Anfang der 1980er Jahre verstärkte sich die Kritik an Rawls' Gerechtigkeitstheorie in Gestalt des so genannten kommunitaristischen Denkens. Darunter versteht man die Weltsicht, dass sich das Individuum nicht ohne seine Einbettung in gemeinschaftliche Zusammenhänge verstehen lässt. Rawls wurde vorgehalten, dass seine Gerechtigkeitstheorie allzu individualistisch sei und er zudem Annahmen über die Rationalität mache, die in die Irre führten: Menschen



Der Philosoph John Rawls, der mehr als 30 Jahre an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) lehrte, belebte die Debatte um die Gerechtigkeit im Geist der Aufklärung.



Amartya Sen, Philosoph und Wirtschaftswissenschaftler an der Harvard University, fordert, bei Fragen der Gerechtigkeit die Vielfalt gültiger Gründe rational gegeneinander abzuwägen.

seien moralische Akteure als Mitglieder von Gemeinschaften, und ihre Gemeinschaftszugehörigkeit ließe sich bei der Entscheidung über Gerechtigkeit in einer Gesellschaft nicht ausklammern.

Radikale Kommunitaristen gehen sogar so weit, dass sie den Begriff der Gerechtigkeit als Ganzes für irreführend halten. Doch der wohl einflussreichste Kommunitarist, der sich aber selbst gar nicht als solchen bezeichnet, Michael Walzer, hat 1983 in seinem Buch »Spheres of Justice« durchaus den Gerechtigkeitsbegriff in den Mittelpunkt seiner Theorie gestellt. Jedoch betont der amerikanische Sozial- und Moralphilosoph die Komplexität der unterschiedlichen Kriterien, die wir für gerecht beziehungsweise ungerecht halten. Walzer weist damit die Idee zurück, es könne die eine, umfassende Gerechtigkeitstheorie geben. Was gerecht ist und was nicht, hänge in hohem Maß von etablierten gesellschaftlichen Praktiken ab, an denen wir teilhaben.

Es sei beispielsweise gerecht, wenn ein Verein die Aufnahme eines weiteren Mitglieds verweigert, denn es gebe schließlich kein allgemeines Recht, Mitglied eines Vereins zu werden. Wenn aber ein Staatsbeamter die Zustimmung eines Antrags etwa von ökonomischen Vorteilen abhängig macht, sei dies Korruption und somit ungerecht, während Verhandlungen über den wechselseitigen Vorteil in Wirtschaftskreisen wiederum legitim seien. Der New Yorker Philosoph betont, dass die Gerechtigkeit einer modernen Gesellschaft vor allem darin bestehe, nicht einer einzigen Sphäre die dominante Rolle zu überlassen, die anderen Sphären also vor Übergriffen zu schützen.

Was allerdings genau die Kriterien unzulässiger, die Gerechtigkeit verletzender Übergriffe sind, lässt sich nach Michael Walzer nicht allein über eine philosophische Theorie bestimmen. Walzer hat die zeitgenössische Gerechtigkeits-

theorie wesentlich beeinflusst. Denn er hat erfolgreich darauf hingewiesen, dass die kommunitaristische Kritik – die Betonung der Gemeinschaftszugehörigkeit – nicht bedeuten könne, dass man die Freiheitsgarantien der modernen liberalen und sozialen Demokratien geringschätze. Kommunitaristische Kritik könne letztlich nur die selbstzerstörerischen Kräfte eines liberalen Verständnisses von Gerechtigkeit korrigieren und Gegenmaßnahmen diskutieren. Eine Gesellschaft, die hochgradig individualisiert, von Mobilität und ökonomischem Vorteilsdenken geprägt ist, unterminiere die moralischen Fundamente der politischen Ordnungen, die jene erst möglich gemacht hätten.

Freiheit und Gleichheit als Merkmale der Moderne

Freiheit und Gleichheit sind beide – darüber besteht Einigkeit – Grundpfeiler der politischen Moderne sowie der zeitgenössischen Demokratie. Ihre Verknüpfung zur Idee der gleichen menschlichen Würde und Autonomie, wie sie in der Ethik und politischen Philosophie Immanuel Kants zum Ausdruck kommt, scheint mir unverzichtbar zu sein. Die Gerechtigkeit einer Gesellschaft bestimmt sich danach, ob sie gleiche Freiheit ermöglicht, Kooperation fördert und Solidarität sichert. Die weitere Begründung dieser Postulate, nach welcher auch gelegentlich in der politischen Öffentlichkeit gefragt wird, ist schwierig und führt zu Fragen nach unserem Menschenbild.

Die Annahme, dass Menschen frei und gleich sind, ist meiner Ansicht nach ein konstitutives Merkmal der politischen Moderne. Ich halte das für eine Erkenntnis und nicht lediglich für ein Merkmal einer spezifischen historischen Phase oder einer speziellen kulturellen Prägung. Aber wie immer sich dies verhält: Die Grundbedingungen des gleichen Respekts, der gleichen Freiheit und Würde, die uns so

gewiss erscheinen, lassen sich nicht durch andere, noch gewissere Überzeugungen beweisen. Wer zum Beispiel die religiös motivierte Überzeugung vertritt, dass Menschen ungleich geboren werden, dass das Vorleben unsere Kastenzugehörigkeit bestimmt oder wer etwa meint, dass der Starke das Recht habe, den Schwachen zu unterdrücken, weil dies der biologischen Ordnung der Natur entspräche, der ist mit rationalen Argumenten vermutlich kaum zu überzeugen. Hier fehlen Gemeinsamkeiten, die für jeden fruchtbaren Streit erforderlich sind.

In den vergangenen Jahrzehnten hat die philosophische Diskussion um Gerechtigkeit gezeigt, dass die konkreten Kriterien für eine gerechte Gesellschaft von freien und gleichen Menschen äußerst komplex sind und dass die systematische philosophische Theorie auf diese Komplexitäten Rücksicht nehmen muss. Um zu bestimmen, was Gerechtigkeit ist, bedarf es einer beträchtlichen interdisziplinären Kompetenz. Beteiligt sind Philosophie, Rechtswissenschaften, Soziologie, Politikwissenschaft, Sozialpsychologie und Ökonomie ebenso wie Statistik, Entscheidungs- und Spieltheorie oder Mathematik, um nur die wichtigsten zu nennen.

Ein prominenter Vertreter dieses interdisziplinären Gebiets ist der 1933 geborene Amartya Sen. Der indische Wirtschaftswissenschaftler und Philosoph greift wie kaum ein anderer lebender Denker über die Grenzen vieler Fachdisziplinen hinaus. Über Jahrzehnte hatte er eine Doppelprofessur in Ökonomie und Philosophie an der Harvard University inne. 1998 erhielt er den Nobelpreis für Ökonomie für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Wohlfahrtsökonomie und zur Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung.

Ursprünglich als Mathematiker ausgebildet, hat Sen viel zur Entscheidungstheorie, speziell zu der so genannten Kollektiventscheidung (*collective choice*) beigetragen. Er hat sich auch mit den soziologischen und politikwissenschaftlichen Fragen einer humanen Entwicklung auseinandergesetzt und kürzlich mit dem Werk »Idee der Gerechtigkeit« eine große Monografie vorgelegt, in der er seine Überlegungen ohne die Zuhilfenahme wirtschaftswissenschaftlichen Instrumentariums erläutert.

Worum es Amartya Sen vor allem geht, sind die Gründe, die in den verschiedenen Entscheidungssituationen erörtert werden müssen. Nur sie bestimmen jeweils im Einzelnen, was gerecht ist. Es mag manche überraschen und viele enttäuschen, aber der indische Philosoph ist davon überzeugt, dass es keine systematische und umfassende Theorie der Gerechtigkeit geben kann. Das macht jedoch eine Philosophie der Gerechtigkeit nicht irrelevant – im Gegenteil: Sie sollte die Vielfalt der Gründe betonen, die wir in Gerechtigkeitsfragen gelten lassen, und sie sollte helfen, diese in einer rationalen Weise gegeneinander abzuwägen.

Schließlich ist die vornehmlichste Aufgabe der Philosophie, begriffliche und gedankliche Konfusionen zu beheben sowie zur Klarheit des Denkens beizutragen, und nicht, die politische Abwägung von Gerechtigkeitsgründen durch philosophische Theorien zu ersetzen. ~

DER AUTOR



Julian Nida-Rümelin, Jahrgang 1954, studierte Philosophie, Physik, Mathematik und Politikwissenschaft in München und Tübingen, promovierte 1983 in Philosophie bei dem Wissenschaftstheoretiker Wolfgang Stegmüller und habilitierte sich dort 1989. Nach einer Gastprofessur in den USA übernahm Nida-Rümelin zunächst einen Lehrstuhl für Ethik in den

Biowissenschaften an der Universität Tübingen und danach (1993–2003) einen Lehrstuhl für Philosophie an der Universität Göttingen. Danach wechselte er auf den Lehrstuhl für Philosophie und politische Theorie am Geschwister-Scholl-Institut für Politikwissenschaft in München, dessen Direktor er in den Jahren 2004 bis 2007 war. 2009 wechselte er auf einen Lehrstuhl für Philosophie am Seminar für Philosophie der Ludwig-Maximilians-Universität München. In den Jahren 2001 und 2002 war er als Kulturstatsminister Mitglied der Bundesregierung. Seit 2008 steht er der Deutschen Gesellschaft für Philosophie als Präsident vor.

QUELLEN

Klassiker der Gerechtigkeitstheorie der Antike:

Aristoteles (384–322 v. Chr.): Nikomachische Ethik und Politika
Platon (427–347 v. Chr.): Politeia

Klassiker der Gerechtigkeitstheorie der Neuzeit, speziell der europäischen Aufklärung:

Hobbes, T. (1588–1679): Leviathan. London 1651

Kant, I. (1724–1804): Grundlegung zur Metaphysik der Sitten. Riga 1785; Zum ewigen Frieden. Königsberg 1795

Locke, J. (1632–1704): Two Treatises of Government. London 1690

Rousseau, J.-J. (1712–1778): Du contrat social (entst. 1754). Amsterdam 1762

Klassiker der zeitgenössischen Debatte:

Buchanan, J.: The Limits of Liberty. Between Anarchy and Leviathan. University of Chicago Press, Chicago/London 1975

Habermas, J.: Faktizität und Geltung. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1992

MacIntyre, A.: After Virtue. A Study in Moral Theory. University of Notre Dame Press, Notre Dame 1981

Nozick, R.: Anarchy, State, and Utopia. Basic Books, New York 1974

Pogge, T.: Realizing Rawls. Cornell University Press, Ithaca und London 1989

Rawls, J.: Eine Theorie der Gerechtigkeit. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1979; Politischer Liberalismus. Suhrkamp 2003; Das Recht der Völker. de Gruyter, Berlin, New York 2002; Freeman, S. (Hg.): Collected Papers. Cambridge und London 1999

Sandel, M.: Liberalism and the Limits of Justice. Cambridge University Press, Cambridge 1982

Sen, A.: Die Idee der Gerechtigkeit. C.H.Beck, München 2010

Walzer, M.: Spheres of Justice. Basic Books, New York 1983

Publikationen von Julian Nida-Rümelin zum Thema:

Demokratie als Kooperation. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1999

Demokratie und Wahrheit, C.H.Beck, München 2006

Philosophie und Lebensform. Suhrkamp, Frankfurt am Main 2009

Internationale Gerechtigkeit (mit M. Rechenauer). In: Ferdowsi, M. A. (Hg.): Internationale Politik als Überlebensstrategie. Bayerische Landeszentrale für politische Bildungsarbeit, München 2009

WEBLINKS

www.dgphil2011.uni-muenchen.de/programm/index.html

Vom 11.–15. September findet in München der XXII. Deutsche Kongress für Philosophie statt zum Thema »Welt der Gründe«.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072105

Streitpunkt Menschenrechte

Im Zeitalter der Aufklärung entstand die Idee, jeder Mensch habe ohne Ansehen der Person die gleichen fundamentalen unveräußerlichen Rechte. Dieses Konzept ist zur Grundlage aller modernen freiheitlichen Verfassungen geworden. Trotz seiner langen Geschichte und seines erstaunlichen Siegeszugs ist seine theoretische Basis jedoch bis heute unsicher.

Von Wilfried Hirsch

Es mag verwundern, dass in einer Serie über die größten Rätsel der Philosophie auch die Menschenrechte zur Sprache kommen – sind sie doch fest in unserer Verfassung wie auch im allgemeinen Bewusstsein verankert. Wie könnte etwas ein Rätsel enthalten, auf das sich viele ganz selbstverständlich beziehen, wenn sie etwa Menschenrechtsverletzungen durch totalitäre Regimes anprangern? Kann es Zweifel bezüglich eines Begriffs geben,

der dazu dient, Leben zu retten, Grausamkeiten zu verhindern sowie elementare persönliche und politische Freiheiten zu schützen? Doch wie so oft ist es gerade das Vertraute, das sich bei einer kritischen Analyse als zu vage umrissen oder unzulänglich begründet herausstellt.

Menschenrechte sind Rechte, die wir allein schon darum haben, weil wir Menschen sind. Sie umfassen also insbesondere das Recht auf Leben, Freiheit und Gleichbehandlung, aber auch den Anspruch auf das lebensnotwendige Minimum an materiellen Gütern. Sie sind universalistisch – alle Menschen haben sie –, egalitär – alle haben die gleichen Menschenrechte – und unveräußerlich – wir können sie weder freiwillig aufgeben noch verlieren oder verwirken. Ebendeshalb bieten die Menschenrechte eine wichtige Basis für das friedliche Zusammenleben und für nützliche Beziehungen zwischen allen Menschen. So jedenfalls das allgemeine Verständnis.

Die immense Bedeutung der Menschenrechte zeigt sich im Internet. Eine Google-Suche nach dem Begriff ergibt über sechs Millionen Einträge. Noch etwas höher liegen mit rund sieben beziehungsweise fast acht Millionen Treffern »Gerechtigkeit« und »Demokratie«. Damit wären die drei wichtigsten Begriffe der zeitgenössischen politischen Ethik vereint. Wer wollte also bezweifeln, dass die Philosophie, zu deren Hauptgebieten die Ethik gehört, von eminent praktisch-politischer Bedeutung ist?

AUF EINEN BLICK

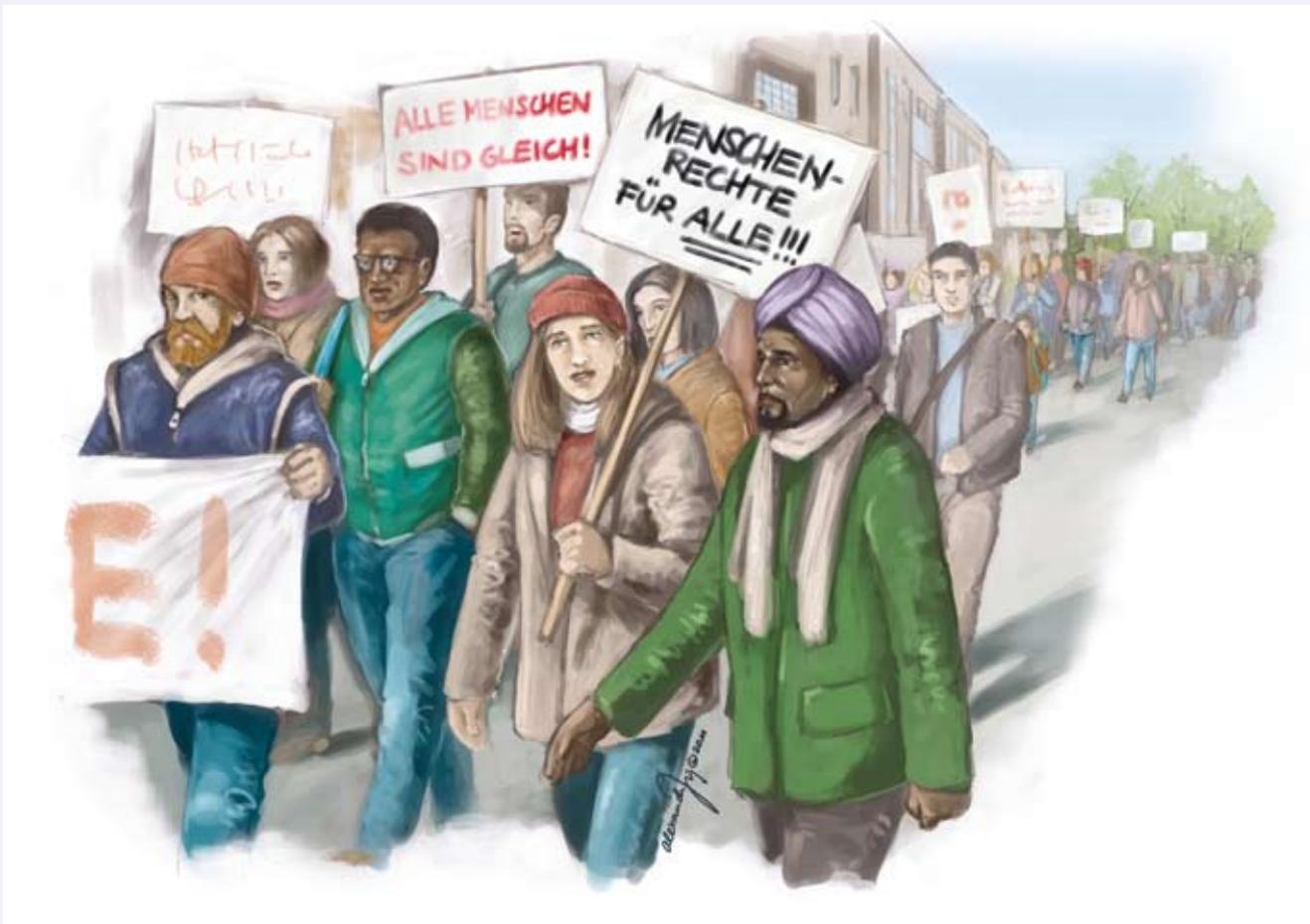
RECHTE OHNE RECHTE FUNDIERUNG

1 Jeder glaubt zu wissen, was **Menschenrechte** sind. Die gängige **Definition** – Rechte, die alle Menschen auf Grund ihres Menschseins haben – lässt jedoch viel **Interpretationsspielraum**.

2 Zwar enthalten **Entschlüsse der Vereinten Nationen** und **nationale Verfassungen** genauere Angaben darüber, was zu den Menschenrechten zählt – etwa das **Recht auf Leben, Freiheit und Gleichbehandlung** sowie auf das lebensnotwendige Minimum an materiellen Gütern. Doch diesen Katalog genau zu umreißen, ist bisher nicht gelungen.

3 Strittig ist auch die Frage, ob wir Menschenrechte natürlicherweise besitzen oder nur im Rahmen einer Gesetzgebung. Das hat Bedeutung für ihre **weltweite Anwendung und Durchsetzbarkeit**.

4 Nur eine **Theorie der Menschenrechte** könnte Klarheit bringen. Eine solche Theorie scheint derzeit aber nicht absehbar.



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

Diesen Suchergebnissen entspricht die Bedeutung der Menschenrechte in Institutionen und Organisationen. Man denke an die Menschen- und Grundrechtskataloge nationaler Verfassungen, den Human Rights Council der Vereinten Nationen, den mit Menschenrechtsverletzungen befassten International Criminal Court und den European Court of Human Rights oder an Amnesty International und Human Rights Watch. Hinzu kommen zahllose Organisationen, die sich mit Teilbereichen des Menschenrechtsschutzes beschäftigen, zum Beispiel: Terre des Femmes, Reporter ohne Grenzen, Pro Asyl, die Gesellschaft für bedrohte Völker oder die International Gay and Lesbian Human Rights Commission.

Operieren sie alle mit einem unklaren, ja sogar »rätselhaften« Begriff? Kaum zu glauben, und doch ist es in gewissem Sinn so.

Moralische oder juristische Rechte?

Das beginnt mit der Frage, als was Menschenrechte eigentlich zu betrachten sind. Handelt es sich um juristische Rechte – beruht ihre Gültigkeit also auf der Existenz von (nationalen oder internationalen) Rechtsordnungen, in denen sie faktisch anerkannt und durchgesetzt werden? Oder sind es moralische Rechte – in einem älteren Sprachgebrauch natürliche Rechte –, denen allgemein gültige Gerechtigkeitsvorstellungen zu Grunde liegen? In diesem Fall wären sie unabhängig von bestehenden Rechtsordnungen zu achten und zu schützen.

Für Menschenrechte gehen Bürger in vielen Teilen der Welt immer wieder auf die Straße.

Allerdings schließen sich beide Auffassungen nicht aus. So können moralische Rechte durch Vereinbarung oder Gesetzgebung auch zu juristischen werden, was ihrer Geltung mehr Nachdruck verschafft. Zum Beispiel war die von der UN-Vollversammlung 1948 verabschiedete Allgemeine Erklärung der Menschenrechte nicht rechtsverbindlich. Es handelte sich lediglich um die Proklamation eines, wie es in der deutschen Übersetzung heißt, »von allen Völkern und Nationen zu erreichenden Ideals«. Die darin verkündeten Rechte erlangten erst 1976 durch zwei 1966 getroffene internationale Vereinbarungen – nach deren Ratifikation durch hinreichend viele Staaten – tatsächlich den Status juristischer Normen. So enthalten die Artikel 6 und 9 des Internationalen Pakts über bürgerliche und politische Rechte von 1966 das Recht auf Leben, Freiheit und Sicherheit der Person aus Artikel 3 der Allgemeinen Erklärung und entsprechend die Artikel 7 und 8 das Verbot der Sklaverei und der Folter aus den Artikeln 4 und 5.

Trotz dieses reibungslosen Übergangs vom bloßen Ideal zur allgemein verbindlichen Rechtsnorm erhebt sich die grundsätzliche Frage, ob es moralische Rechte überhaupt gibt. Namhafte Philosophen bestreiten das mit der Begründung, Rechte seien definitionsgemäß oder ihrem Wesen nach

stets juristisch. Darin stimmten schon vor über 200 Jahren so unterschiedliche Persönlichkeiten wie der konservative Schriftsteller, Staatsphilosoph und Politiker Edmund Burke (1729–1797) und der Sozialreformer Jeremy Bentham (1748–1832) überein. Burke hielt die Menschenrechte der französischen Déclaration des droits de l'homme et du citoyen von 1789 schlicht für schlechte Metaphysik. »Wozu soll es gut sein, das abstrakte Recht eines Menschen auf Nahrung oder Medizin zu diskutieren? Die Frage ist, wie man sie ihm besorgt und zuführt. Bei dieser Überlegung werde ich immer dazu raten, statt des Professors für Metaphysik den Bauern und Arzt zur Hilfe zu rufen.« Und Bentham polemisierte in den »Anarchistischen Trugschlüssen« von 1843: »... Gründe zu wünschen, dass es Rechte geben möge, sind keine Rechte ... einer Sache zu bedürfen, heißt nicht sie zu haben – Hunger ist nicht Brot. ... Natürliche Rechte sind ein schlichter Unsinn: natürliche und unveräußerliche Rechte, ein rhetorischer Unsinn, Unsinn auf Stelzen.«

Auch manche heutigen Philosophen wie Ernst Tugendhat und Jürgen Habermas können sich mit dem Konzept der moralischen Rechte nicht anfreunden. Nach Habermas haben die Menschenrechte zwar einen moralischen Inhalt, aber ihren Rechtscharakter und ihre Schutzfunktion erhalten sie erst als Teil einer etablierten Rechtsordnung. Und bei Tugendhat heißt es lapidar: »Die Menschenrechte können wie alle Rechte nur [im Rahmen einer legitimen Rechtsordnung] verliehene Rechte sein.«

Das Problem der Durchsetzbarkeit

Hinter Zweifeln an der Existenz moralischer Rechte steckt oft die Annahme, es könne keine Rechte ohne wirksame Sanktionsmechanismen geben. Einer verbreiteten Vorstellung zufolge gehört zum Begriff eines Rechts, dass seine Verletzung bestraft und seine Befolgung nötigenfalls erzwungen wird (oder dass dies zumindest mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu erwarten ist). Doch diese Annahme hat sich zunehmend als fragwürdig erwiesen – nicht zuletzt durch die Arbeiten des Oxforder Rechtsphilosophen H. L. A. Hart (1907–1992). So fehlen weiten Teilen des internationalen Rechts klar festgelegte Sanktionsmechanismen. Aber auch innerhalb des nationalen Rechts gibt es Gesetze und Normen – wie der Schutz des ungeborenen Lebens –, die nicht durchgesetzt werden und in einzelnen Fällen wohl auch gar nicht durchsetzbar sind.

Entscheidend für eine Rechtsnorm ist laut Hart daher nicht, dass ihre Einhaltung (mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit) erzwungen und ihre Verletzung bestraft wird. Vielmehr kommt es darauf an, dass sie innerhalb einer Rechtsordnung gemäß den darin gültigen Regeln als ein Grund dafür gelten kann, entsprechende Zwangsmaßnahmen zu ergreifen. Bei einem solchen Verständnis von Rechtsnormen als bloßen Handlungsgrün-

den kann es sehr wohl moralische Rechte geben; denn dann ist zum Beispiel die moralische Ächtung der Folter ein Grund dafür, sie nicht anzuwenden und notfalls auch mit Zwang zu verhindern, dass andere dies tun.

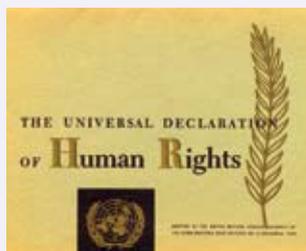
Manche mögen diese Unterscheidungen als spitzfindig und rein akademisch empfinden. Aber sie haben große praktische Bedeutung. Betrachten wir etwa die Frage, ob im Irak während der Zeit Saddam Husseins durch das Foltern von Regimegegnern Menschenrechte verletzt wurden. Wenn es sich um moralische Rechte handelt, lautet die Antwort grundsätzlich Ja. In diesem Fall ist es nämlich irrelevant, ob das Land den einschlägigen internationalen Pakten und insbesondere der UN-Konvention gegen Folter von 1984 beigetreten ist oder nicht. Dann spielt es auch keine Rolle, wann die entsprechenden Vereinbarungen auf Grund ihrer Ratifikation durch die jeweils geforderte Mindestzahl von Staaten tatsächlich Rechtskraft erlangten – was bei der Folterkonvention 1987 der Fall war, nachdem 20 Staaten sie ratifiziert hatten (allerdings nicht der Irak).

Anders verhält es sich, wenn Menschenrechte definitionsgemäß oder ihrem Wesen nach juristische Rechte sind. Dann wurden im Irak vor 1987 trotz Folter keine Menschenrechte verletzt. Auch sonst hätte es nach dieser legalistischen Auffassung vor 1976, als die beiden internationalen Pakte von 1966 über bürgerliche, politische, ökonomische, soziale und kulturelle Rechte Rechtskraft erlangten, in vielen Regionen der Welt – trotz Folter, Vertreibung und Genozid – gar keine Menschenrechtsverletzungen geben können.

All das sind gute Argumente für ein moralisch geprägtes Menschenrechtsverständnis. Doch gibt es auch einen gewichtigen Grund dagegen: die Verschiedenheit der menschlichen Kulturen und der sie bestimmenden Wertvorstellungen. Die historisch maßgeblichen Menschenrechtserklärungen und Proklamationen (Virginia Bill of Rights, 1776; Declaration of Independence, 1776; Déclaration des droits de l'homme et du citoyen, 1789) stammen durchweg aus dem europäischen Kulturkreis. Dasselbe gilt für die sie inspirierenden Ideen der Würde des Menschen, der Freiheit und der Gleichheit. Deshalb vertraten und vertreten insbesondere

totalitäre nichteuropäische Länder die Auffassung, die Menschenrechte seien eine Erfindung des Westens und ihre Verbreitung schlichter Kulturimperialismus.

Wenn eine Idee in einem bestimmten Kulturkreis wurzelt, schließt das ihre universale Geltung jedoch keineswegs aus. Zudem existieren in nichtwestlichen Kulturen ebenfalls religiöse und moralische Wertvorstellungen, auf die sich die Idee der Menschenrechte gründen lässt. Dies haben der indische Wirtschaftsphilosoph Amartya Sen und andere in ihren Schriften überzeugend dargelegt. Zudem gibt es wohl keine menschliche Kultur, in der Folter, Vergewaltigung, Mord und Vertreibung nicht als Übel angesehen würden.



Die Allgemeine Erklärung der Menschenrechte durch die UNO im Jahr 1948 – hier die Titelseite – verhalf der Idee der Menschenrechte zu internationaler Anerkennung, hatte jedoch keinerlei Rechtskraft.

Außerdem waren es nach dem Zweiten Weltkrieg gar nicht die westlichen Demokratien, die der Menschenrechtsidee und der Vorstellung einer ursprünglichen Gleichheit aller Völker und Menschen ohne Ansehen von Rasse, Hautfarbe und Geschlecht zum Durchbruch verhalfen. Die Vereinigten Staaten praktizierten damals vielmehr noch das Prinzip der Rassentrennung, und Großbritannien versuchte mit nicht immer zimperlichen Methoden ein auf Kolonien beruhendes Weltreich zusammenzuhalten. Stattdessen machten sich Länder wie China und Stalins Sowjetunion zu Fürsprechern des Antikolonialismus sowie der Freiheit und Gleichheit aller Menschen und setzten so die Westmächte unter Druck.

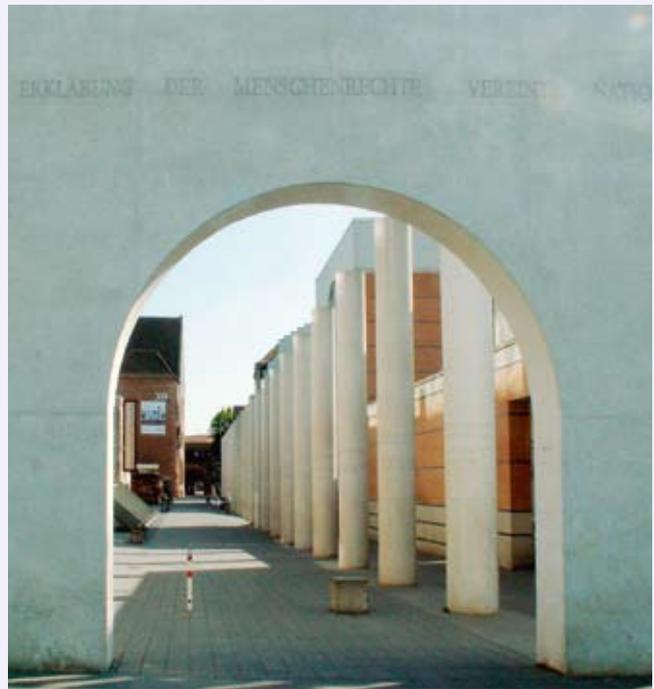
Was gehört alles zu den Menschenrechten?

Dennoch kann man sich angesichts der Heterogenität der sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Verhältnisse weltweit fragen, welche Ansprüche und Forderungen als universal gültige Normen Eingang in Menschenrechtskataloge finden können und welche nicht. Auch dies ist ein heikler Punkt und eine Herausforderung für die Philosophie. Die heute allgemein anerkannten Menschenrechte beziehen sich nicht nur auf die Garantie unbestritten grundlegender Werte wie den Schutz des menschlichen Lebens, der persönlichen und politischen Freiheit und der Gleichheit vor dem Gesetz. In der Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte finden wir auch das Recht auf Arbeit und freie Berufswahl (Artikel 23), auf regelmäßigen, bezahlten Urlaub (Artikel 24) und darauf, am kulturellen Leben der eigenen Gesellschaft teilzunehmen und sich der Künste zu erfreuen (Artikel 27).

Sollen diese Ansprüche wirklich allen Menschen unabhängig von ihren jeweiligen Lebensverhältnissen erfüllt werden? Wäre das überhaupt machbar? Damit nicht genug, gibt es vielerlei Vorschläge für Ergänzungen der etablierten Menschenrechtskataloge, hinter denen teils bizarre Ideen, teils aber auch ernsthafte Überlegungen stecken. Dazu zählt etwa ein Recht auf Schlaf, auf schöpferische Tätigkeit, auf Anderssein, auf Tourismus oder auf Selbstmord.

Vor diesem Hintergrund forderte schon 1984 der Jurist Philip Alston von der New York University in einem einflussreichen Artikel im »American Journal of International Law« eine »Qualitätskontrolle« für Menschenrechte. Anderenfalls bestehe die Gefahr, dass die Erfüllung jedes beliebigen Wunsches, Bedürfnisses oder Interesses zum Menschenrecht erklärt werde. Alston stand mit dieser Einschätzung nicht allein. So schreibt auch der tschechische Schriftsteller Milan Kundera 1990 in seinem Roman »Die Unsterblichkeit«:

»Die Welt ist zu einem Recht des Menschen geworden, und alles in ihr ist zu einem Recht geworden: der Wunsch nach Liebe zu einem Recht auf Liebe ... der Wunsch, nachts auf einem Platz zu schreien, zu einem Recht, nachts auf einem Platz zu schreien. Die Arbeitslosen haben das Recht, einen luxuriösen Lebensmittelladen zu besetzen, die Damen in den Pelzmänteln haben das Recht, Kaviar zu kaufen, Brigitte hat das Recht, ihr Auto auf dem Trottoir zu parken, und alle, die Arbeitslosen, die Damen in den Pelzmänteln und Bri-



Das hohe Ansehen der Menschenrechte dokumentieren viele Monumente zu ihren Ehren weltweit, darunter die Straße der Menschenrechte in Nürnberg. Dort sind die Artikel der Menschenrechtserklärung der Vereinten Nationen auf 30 Säulen in 30 verschiedenen Sprachen eingemeißelt.

gitte, gehören zu derselben Armee von Kämpfern für die Menschenrechte.«

Die ursprüngliche Idee, besonders grundlegende und für alle Menschen wichtige Bedürfnisse, Interessen und Werte zu schützen, ist hier nicht mehr zu erkennen. Wenn die Bezeichnung »Menschenrecht« nicht zu einer bloßen rhetorischen Hülse für Beliebigen verkommen soll, gilt es offenbar, der sich selbst verstärkenden Vervielfachung von Menschenrechtsforderungen einen Riegel vorzuschieben. Rechtsexperten wie Richard B. Bilder von University of Wisconsin in Madison haben vorgeschlagen, alles als internationales Menschenrecht anzuerkennen (aber eben auch nur das), was die UN-Vollversammlung als solches deklariert. Doch diese vermeintlich lebenskluge Lösung signalisiert nur stillschweigende Kapitulation. Auch Alstons Vorschlag, die Rechtssetzung in den Vereinten Nationen strengeren prozeduralen Anforderungen und Sorgfaltspflichten zu unterwerfen, kann allenfalls ein Teil der Antwort sein. Rein prozedural lässt sich die spezifische moralische Autorität der Menschenrechte sicher nicht erklären. Genau dieser moralischen Autorität und nicht etwa legalistischen Aspekten verdanken sie aber ihren großen Erfolg im politischen Diskurs und Handeln der Gegenwart.

Der französische Jurist, Diplomat und Erzieher René Cassin (1887–1976) und die anderen Verfasser der Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte haben bewusst auf eine philosophische, religiöse oder moralische Begründung verzichtet. Sie glaubten wohl zu Recht, dass nach dem Zweiten Welt-



krieg trotz religiöser und weltanschaulicher Divergenzen bei den Vereinten Nationen zwar ein Konsens über konkrete Menschenrechte möglich sei, aber – wegen der bestehenden Heterogenität – eben keiner über die ihnen zu Grunde liegenden Prinzipien und Annahmen.

Nach dem Siegeszug der Menschenrechtsidee befinden wir uns heute allerdings in einer neuen Situation. Inzwischen kommen die Völker der Welt nicht mehr daran vorbei, ein gemeinsames inhaltliches Verständnis darüber zu erlangen, was Menschenrechte ihrem Wesen nach sind und worin ihre Autorität begründet liegt. Anderenfalls droht sich die Erfolgsgeschichte der Menschenrechte eines Tages selbst ad absurdum zu führen, weil sie sich in der Beliebigkeit verlieren. Den Philosophen obliegt es damit, endlich eine Theorie der Menschenrechte zu entwickeln.

Die moralische Autorität der Menschenrechte als Maßstab richtigen Handelns ließe sich etwa aus grundlegenden anthropologischen und ethischen Annahmen über den Menschen und die Erfordernisse seiner sozialen Existenz ableiten. Menschen sind auf Grund ihrer biologischen Verfassung verletzbare und bedürftige Wesen mit ursprünglich gleichen Ansprüchen auf die Rechte und Güter, die sie für ihre Selbstentfaltung und ein glückliches Leben in Gemeinschaft mit anderen benötigen. Schon für das bloße Überleben und die Wahrung unserer körperlichen und seelischen Unversehrtheit sind wir auf Gewaltverzicht und Kooperation seitens unserer Mitmenschen angewiesen. Desgleichen vermögen wir allein mit Hilfe anderer Bedingungen zu schaffen, unter denen ein auch nur annähernd menschenwürdiges Leben möglich ist. Überdies brauchen wir Mechanismen zur kooperativen politischen Entscheidungsfindung und Konfliktregulierung sowie ein Mindestmaß an materiellen Gütern und Ressourcen. Der Schutz von Leib und Leben, persönlichem Eigentum und elementaren Freiheiten gehören demnach ebenso in den Bereich menschenrechtlich relevanter Forderungen wie ein angemessenes Rechts- und Regierungssystem und ein Minimum an Verfügungsgewalt über materielle Güter.

Gemäß dieser Sichtweise dienen internationale Vereinbarungen und nationale Gesetze zum Schutz der Menschen-

Folter ist eine der häufigsten Verletzungen der Menschenrechte. Sie kommt sogar in rechtsstaatlichen Demokratien vor, wie die Behandlung von Insassen des irakischen Gefängnisses Abu Ghraib durch US-Soldaten zeigte.

rechte lediglich dazu, rein ethisch begründete Standards praktisch-politisch durchzusetzen. Allerdings könnte eine Theorie der Menschenrechte auch dazu führen, dass de facto bereits juristisch etablierte Normen ihr moralisches Fundament verlieren. Vielleicht genügen ja nicht alle »Menschenrechte«, auf deren Anerkennung sich eine große Mehrheit von Staaten und Organisationen bereits geeinigt hat, den inhaltlichen Kriterien der Theorie. Umgekehrt ist freilich auch denkbar, dass nicht alle aus ihr ableitbaren Menschenrechte bereits berücksichtigt wurden.

Ob es gelingt, einen Konsens über eine solche Theorie zu erreichen, steht dahin. Jedenfalls haftet den Menschenrechten trotz ihrer vertrauten Allgegenwart ein beachtlicher Rest von Unklarheit an. Das ist politisch bedauerlich; für Philosophen aber stellt es eine spannende Herausforderung dar. ~

DER AUTOR



Wilfried Hirsch ist Professor für praktische Philosophie an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Grundlagen der Ethik und der politischen Philosophie sowie Fragen der internationalen Gerechtigkeit. Er hat 1984 an der Universität Hamburg in Philosophie promoviert. 1986/87 war er Gastwissenschaftler am Philosophical Department der Harvard University in Cambridge (Massachusetts). Nach seiner Habilitation im Jahr 1997 lehrte er bis 2005 praktische Philosophie an der Universität Saarbrücken. Von April 2010 bis März 2011 war er Fellow am Max-Weber-Kolleg in Erfurt.

LITERATURTIPPS

- Beitz, C. R.:** *The Idea of Human Rights.* Oxford University Press 2009
- Griffin, J.:** *On Human Rights.* Oxford University Press 2008
- Die beiden Bücher bieten zwei alternative Entwürfe zur Theorie der Menschenrechte.*
- Fritzsche, K. P.:** *Menschenrechte. Eine Einführung mit Dokumenten.* Schöningh, Paderborn 2004
- Beleuchtet die völkerrechtliche Perspektive der Menschenrechte.*
- Hirsch, W., Janssen, D.:** *Menschenrechte militärisch schützen. Ein Plädoyer für humanitäre Interventionen.* C.H.Beck, München 2006
- Behandelt die Frage, welche Mittel zur internationalen Durchsetzung der Menschenrechte angemessen sind.*
- Hunt, L.:** *Inventing Human Rights – A History.* W. W. Norton & Company, New York/London 2008
- Schildert die Wurzeln und die historische Entwicklung der Menschenrechtsidee.*

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072104

MERKWÜRDIGES UND SCHERZHAFTES

Das Rätselkabinett des Heinrich Hemme

Ein Besuch bei dem produktivsten Autor und fleißigsten Sammler der Unterhaltungsmathematik

VON CHRISTOPH PÖPPE

Wie wird man zum größten deutschen Verfasser und Sammler mathematischer Rätselgeschichten? Ganz allmählich und ohne spektakuläre Ereignisse. Heinrich Hemme, Jahrgang 1955, ist von Haus aus noch nicht einmal Mathematiker. Er hat in Osnabrück Physik mit Nebenfach Philosophie studiert, über das nicht wirklich unterhaltsame Thema »integrierte Magneto-optik« promoviert und bei Philips in Hamburg und Aachen gearbeitet, bis er 1993 Professor an der Fachhochschule Aachen wurde. Gut, schon als Doktorand liebte er es, seine Kollegen mit mathematischen Räseln in der Frühstückspause zu nerven. Aber als er sich Anfang der 1980er Jahre die Frage stellte, ob hinter der verbreiteten Redensart vom Freitag, dem 13. ein sachlicher Kern stecke, hatte er definitiv keine Schriftstellerkarriere im Sinn.

Der Anlass war ziemlich trivial: Heinrich Hemme hatte wieder einmal eine exotische Programmiersprache zu erlernen und suchte eine Übungsaufgabe, um seine neu erworbenen Fähigkeiten zu erproben. Natürlich kann man mit

der schönsten Programmiersprache nicht ausrechnen, ob sich am 13. eines Monats mehr Unglücksfälle ereignen als an anderen Tagen. Aber wenn das Schicksal an einem 13. zuschlägt, dann ist dieser Tag – berechenbar – häufiger als in einem Siebtel der Fälle ein Freitag. Das gilt übrigens auch, wenn kein Unglück stattfindet.

Die Abweichung liegt im Promillebereich. Um sie zu finden, genügt es, einen vollen 400-Jahre-Zyklus durchzuzählen, denn der gregorianische Kalender mit seinen merkwürdigen Schaltjahresregeln erzwingt, dass sich die Zuordnung von Wochentagen zu Kalenderdaten alle 400 Jahre wiederholt. Das macht 4800 Monate und ebenso viele Tage mit der Nummer 13, und da 4800 nicht durch 7 teilbar ist, muss zwangsläufig einer der Wochentage mehr als seinen fairen Anteil von $4800/7$ abbekommen. Dass nun ausgerechnet der Freitag der Gewinner ist, dahinter steckt kein besonderer Tiefsinn; es ergab sich einfach so, als im Oktober 1582 der gregorianische Kalender eingeführt wurde.

Heinrich Hemme ließ also sein Übungsprogramm die Freitage unter den Dreizehnten auszählen und veröffentlichte seinen überraschenden Befund 1984 in der Zeitschrift »Bild der Wissenschaft«. Das Echo war erheblich und hält bis in die Gegenwart an. Noch am Freitag, dem 13. Mai dieses Jahres, kramten mehrere Zeitungen und Rundfunksender das hübsche alte Ergebnis hervor.

Bald nach diesem ersten Erfolg begann Hemme, jeden Monat ein mathematisches Preisrätsel für »Bild der Wissenschaft« zu schreiben. Da tut er bis heute; daneben bedient er regelmäßig die lokale Tageszeitung und gelegentlich die »Frankfurter Allgemeine Zei-

tung« mit appetitlichen Mathematikhäppchen und hält häufig öffentliche Vorträge zum Thema.

Zwischendurch erzeugt diese oder jene seiner Geschichten ein Rauschen im Blätterwald, so etwa die folgende aus Anlass der Einführung des Euro-Bargelds: Wer einen Pfennig zur Bundesbank trägt, bekommt einen Euro-cent dafür, denn da ein Pfennig ein bisschen mehr wert ist als ein halber Cent (0,51129 Cent, um genau zu sein), muss aufgerundet werden. Wie muss man es anstellen, um auf diese Weise sein Vermögen nahezu zu verdoppeln?

Die Sache war schon damals von eher theoretischer Bedeutung. Man muss ja für jeden Pfennig einzeln am Bankschalter anstehen; denn wer zwei Pfennig einreicht, bekommt auch nur einen Cent zurück. Da summieren sich die Stehzeiten derart, dass man sein Vermögen mit ehrlicher Arbeit weitaus schneller mehrt.

Den Ratenden in die Irre führen

Hemmes gesammelte Rätsel füllen inzwischen mehr als 15 Bücher. Kann man diese gewaltige Menge an Stoff irgendwie einteilen? Ein bisschen schon. Gibt es eine Systematik der Unterhaltungsmathematik? Natürlich nicht! Der Reiz der Sache besteht ja gerade darin, dass jede Aufgabe neue, ungewohnte Denkwege fordert.

Da geht es häufig gar nicht vorrangig um das mathematische Problem, das zu Tage tritt, wenn man die Textaufgabe ihrer Rahmenhandlung entkleidet hat. Vielmehr ist die Kunst der Entkleidung das Entscheidende: »Um einen elliptischen Gartenteich mit dem Halbachsenverhältnis von 1:2 und einer Fläche von 21 Quadratmetern wird ein bepflanzter Uferstreifen angelegt, der



Hat der Würfel eine Taille? Ja – jedenfalls trägt er einen Ring um den Leib, den man nicht abstreifen kann, ohne ihn zu öffnen. In diesem Fall wurde der aus Pappe bestehende Würfel in den metallenen Ring hineingefaltet.



ALLE FOTOS DES ARTISTEN DORIS SAMM

überall genau 2,30 Meter breit ist, und um diesen herum ein Weg von 1,60 Meter Breite. Wie groß ist der Flächeninhalt der größten Ellipse in diesem Ensemble?« Wer anfängt, die Halbachsen der Teichellipse auszurechnen, hat schon verloren. Die Kunst besteht darin, zu merken, dass schon die Außenbegrenzung der Uferbepflanzung keine Ellipse mehr ist. Wäre sie eine, dann hätte der Uferstreifen keine konstante Breite. Wir sind es bloß so gewohnt, jede

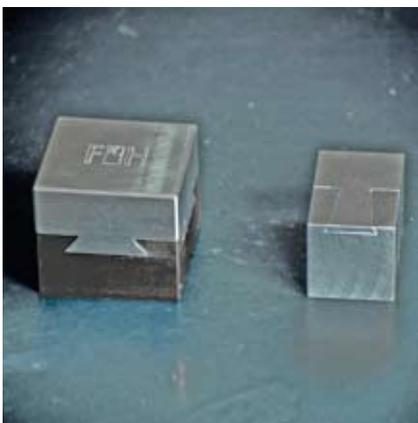
Heinrich Hemme demonstriert einen Zerschneidetrick: Man klebe ein Möbiusband und ein unverdrehtes Ringband (1) rechtwinklig aufeinander (2), zerschneide beide entlang der Mittellinie (3) – und erhält einen unverdrehten quadratischen Rahmen (4)!

Kurve, die ungefähr wie eine zusammengedrückte Kreislinie aussieht, für eine Ellipse zu halten, dass wir auf den falschen Weg gelenkt werden. Die korrekte Antwort ist 21 Quadratmeter.

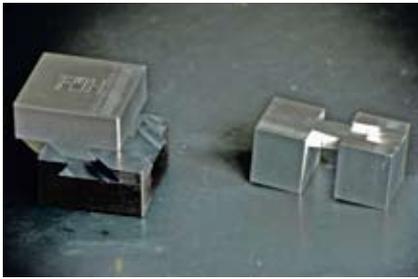
Man kann das Opfer mit fantastischen Sprüchen physikalischen Inhalts

in die Irre führen (Bild S. 78 rechts) oder auch nur mit dem, was es zu sehen gewohnt ist (Bild links unten). Schließlich stellt man sich einen Würfel normalerweise mit einer Fläche auf dem Boden liegend vor und hat deswegen Schwierigkeiten, ihm eine Taille zuzuschreiben (Bild S. 76). Aus demselben Grund will es nicht einleuchten, dass man einen Würfel durch einen würfelförmigen Rahmen hindurchschieben kann, der eine kleinere Kantenlänge hat als der Würfel selbst, oder – was daraus folgt – dass ein dickes Oktaeder in einen etwas dünneren Würfel passt (Bild S. 78 unten).

Mit oder ohne bewusste Irreführung des Lesers – solche Aufgaben sind nicht leicht zu finden. Selbst Heinrich Hemme kann sich zwar jedes Mal eine nette Geschichte zur Einkleidung ausdenken, muss aber für die mathematischen In-



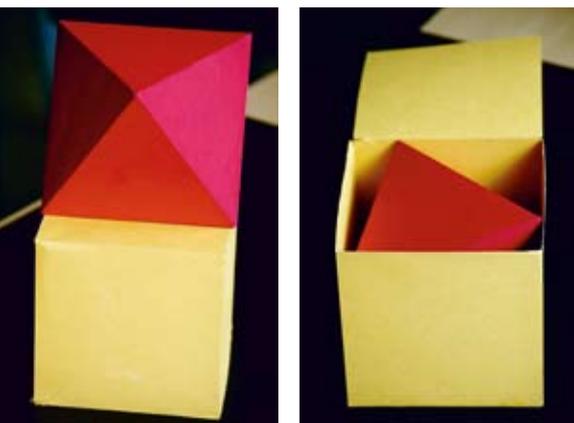
Der obere und der untere Klotz (links im Bild) bieten auf allen vier Seitenflächen genau denselben Anblick, sind also anscheinend durch zwei gekreuzte Schwalbenschwänze miteinander verbunden. Johannes Cornelius Wilhelmus Pauwels hat sich 1887 diese Konstruktion patentieren lassen. Im rechten Klotzpaar, erfunden von Nobuyuki Yoshigahara (1936–2004), wird der Schwalbenschwanz nach hinten sogar schmaler. Sind diese jeweils zwei Klötze unzertrennlich ineinander verkeilt? Bitte umblättern!



Überraschung: Die Schwalbenschwänze im linken Klotz verlaufen schräg und parallel; der im rechten Klotz lädt nach unten aus, wo man es im zusammengesetzten Zustand nicht sieht, und holt sich dort die notwendige Breite.

halte immer wieder auch auf die Ideen seiner Vorgänger zurückgreifen.

So kommt es, dass er die größte deutschsprachige Bibliothek zum Thema Unterhaltungsmathematik sein Eigen nennt. Insgesamt hat er ungefähr 1800 – nicht nur deutschsprachige – Werke gesammelt und ist damit wahrscheinlich die Nummer 3 der Weltrangliste. Der legendäre Martin Gardner (1914–2010), langjähriger Kolumnist des »Scientific American« (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/2011, S. 92), hatte noch mehr Material in seinen Regalen. Und selbst der wird übertroffen von dem amerikanischen, in London lebenden Mathematiker David Singmaster (*1939), der sich vor Jahrzehnten mit einer Lösungsstrategie für den Rubik-Würfel einen Namen ge-



Das Oktaeder hat eine geringfügig größere Kantenlänge als der Würfel, passt aber trotzdem vollständig hinein.

macht hat. Singmaster hat sich vorgenommen, eine umfassende kommentierte Bibliografie der Unterhaltungsmathematik zu erstellen. Zurzeit aktuell und im Internet abrufbar ist die 8. vorläufige Auflage.

Einige gute mathematische Rätsel lassen sich in den verschiedensten Einkleidungen über die Jahrhunderte zurückverfolgen. Allgemein bekannt ist der Klassiker von dem Wolf, der Ziege und dem Kohlkopf: Immer nur einen von den dreien kann der Bauer mit dem Boot über den Fluss transportieren. Wie stellt er es an, dass sie alle über den Fluss kommen, ohne dass eines der Frachtgüter von einem anderen gefressen wird, weil der Mensch am anderen Ufer ist?

Mathematikgeschichten aus Tausendundeiner Nacht

Die bedeutendste Quelle für praktisch alle abendländischen Rätselsammlungen sind die »Propositiones ad acuendos iuvenes«, die »Aufgaben zur Schärfung des Geistes der Jugend«, die im 9. Jahrhundert verfasst wurden. Neben der Aufgabe mit dem Wolf, der Ziege und dem Kohlkopf finden sich auch Texte, in denen es um Kamele geht. Die können dem mutmaßlichen Verfasser Alkuin von York, dem Leiter der Hofschule Karls des Großen, schwerlich zu Hause im Frankenreich über den Weg gelaufen sein – die zahlreichen Schweine, die in anderen Aufgaben vorkommen, schon eher. Aber Karl der Große pflegte diplomatische Beziehungen mit Harun al-Raschid, dem Kalifen von Bagdad, den wir aus den Märchen aus Tausendundeiner Nacht kennen. Heinrich Hemme hat die Aufgaben aus den »Propositiones« zusammen mit neu erstellten Lösungen unter dem Titel »Die Palsträtsel« veröffentlicht.

Im Mittelalter blühte neben der arabischen Wissenschaft auch deren unterhaltsame Variante. Vor allem zu magischen Quadraten haben arabische Mathematiker viel beigetragen (Spektrum der Wissenschaft Dossier 2/2008 »Lustvolle Geometrie«, S. 6).

Dagegen hatte Europa bis Mitte des 19. Jahrhunderts relativ wenig zu bie-



»Dieser Zylinder besteht aus einem Material mit stark wellenlängenabhängigem Brechungsindex. Deswegen wirkt er auf rotes Licht wie eine gewöhnliche Lupe, während er die blaue Schrift auf den Kopf stellt.« Alles Unfug – der Glasstab stellt wie jede Zylinderlinse einfach alles auf den Kopf; aber das kommt einem bei dem Wort »DEICH« nicht als Erstes in den Sinn.

ten. Dann aber nahm die leichte Seite der gestrengen Wissenschaft einen rasanten Aufschwung, der bis heute andauert. Frühe Meister waren Louis Mitzenzwey, Schuldirektor in Leipzig, mit seiner »Mathematischen Kurzweil« von 1880 und Hermann Schubert (1848–1911) mit den »Mathematischen Mußestunden« von 1897.

Der Amerikaner Sam Loyd (1841–1911) und der Engländer Henry Ernest Dudeney (1857–1930) waren die größten Rätselerfinder aller Zeiten. Walter William Rouse Ball (1850–1925), der vor allem in Cambridge lehrte, hat das Thema mit seinen »Mathematical Recreations and Problems« von 1892 (später »Mathematical Recreations and Essays«) bereichert.

Im französischen Sprachraum sind hier vor allem zu nennen: Jacques Ozanam (1640–1718), der große Sammler Édouard Lucas (1842–1891) mit den vierbändigen »Récréations mathématiques« und der Belgier Maurice Krait-

chik (1882–1957), der zwischen 1931 und 1938 die unterhaltungsmathematische Zeitschrift »Sphinx« (»Revue mensuelle des questions récréatives«) leitete.

Unter den Deutschen haben Walther Lietzmann (1880–1959), in erster Linie bekannt als einflussreicher Mathematikdidaktiker, und Wilhelm Ahrens (1872–1927) viel Merkwürdiges und Scherzhaftes zur Mathematik beigetragen. Nach dem Zweiten Weltkrieg bestimmte vor allem Martin Gardner die Szene.

Allgemein hat Heinrich Hemme den Ehrgeiz, zu jedem veröffentlichten Rätsel dessen Stammbaum bis zur ältesten bekannten Quelle nachzuweisen. Nur bei 2000 Jahre alten chinesischen und 1500 Jahre alten armenischen Texten wird es mühsam mit der Sprache. Gleichwohl hat er sich für die nächsten Jahre einige Editionsprojekte vorgenommen.

Und sein erfolgreichstes Buch? Das wollte er eigentlich nie schreiben. Es handelt nicht von Unterhaltungsmathematik, sondern von Einsteins Relativitätstheorie. Der Arbeitstitel »Relativitätstheorie für Hausfrauen« wurde rechtzeitig durch die politisch korrekte Formulierung »Einstein – relativ einfach« ersetzt, und das Werk hat bis jetzt stolze sechs Auflagen erlebt.

Zum Abschied gibt mir Heinrich Hemme noch ein Rätsel mit, das man bequem auf dem üblichen Rechenkästchenpapier bearbeiten kann. Es geht um ein Achteck mit den Seitenlängen 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 und 8, nicht notwendig in dieser Reihenfolge (die Längeneinheit ist eine Kästchenbreite); alle Ecken sollen auf Gitterpunkten liegen. Gesucht ist unter allen Achtecken mit diesen Eigenschaften dasjenige mit dem kleinsten Flächeninhalt; Seiten dürfen sich nicht kreuzen. Die optimale Lösung ist erstaunlich schlank ... ~

DER AUTOR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Hemme, H.: Die Palasträtsel. Denksportaufgaben aus dem Reich Karls des Großen. Anaconda, Köln 2010

Hemme, H.: Der Mathe-Jogger 2. 100 mathematische Rätsel mit ausführlichen Lösungen. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 2011

WEBLINKS

www.gotham-corp.com/sources.htm
David Singmasters Bibliografie der Unterhaltungsmathematik

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen inklusive einer Liste der Bücher von Heinrich Hemme zur Unterhaltungsmathematik finden Sie im Internet unter: www.spektrum.de/artikel/1067489

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft

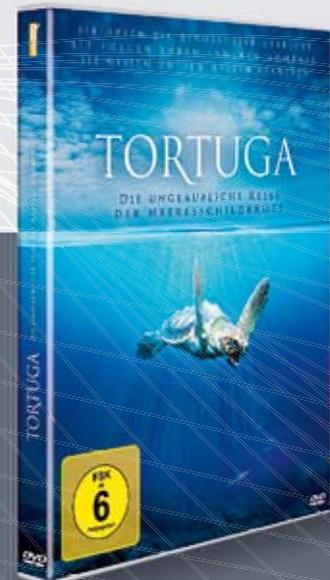


Abonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext

▶ Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält

- ▶ Vergünstigte Sonderhefte und das Produkt des Monats zum Spezialpreis



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus



METEOROLOGIE

Wolken im Klimawandel

Prognosen zur globalen Erwärmung sind immer noch relativ unsicher. Das liegt vor allem an dem schwer fassbaren Verhalten der Wolken. Wie sich bei steigenden Temperaturen Art und Ausmaß der Bewölkung ändern und welche Rückwirkungen das auf das Klima hat, können Forscher bisher nur näherungsweise abschätzen. Neue experimentelle Ansätze versprechen jedoch Abhilfe.

Von Jost Heintzenberg und Julia Lupp

Zirruswolken

Wolken spielen für das Klima eine überragende Rolle. Einerseits reflektieren sie im globalen Mittel etwa 20 Prozent der einfallenden Sonnenstrahlung, haben also auf der Tagseite der Erde einen kühlenden Effekt. Dieser Einfluss ist, wie Berechnungen zeigen, ganz erheblich: Bei einer Zunahme des globalen Bedeckungsgrads um nur etwa zwei Prozent würde die dadurch erhöhte Reflexion von Sonnenstrahlung die Erwärmung durch das vom Menschen bisher freigesetzte Kohlendioxid wettmachen. Andererseits halten die Wolken aber auch etwa zehn Prozent der thermischen Ausstrahlung der Erde zurück, nachts ebenso wie am Tag. Ihre Gesamtwirkung im Klimasystem ist deshalb nicht leicht zu erfassen. Wolken erschweren damit auch Prognosen, wie stark sich die Erde durch den menschengemachten Treibhauseffekt erwärmen wird (siehe Kasten auf S. 82).

Lange waren Bodenbeobachtungen und Ballonaufstiege die einzigen Quellen von Wetterdaten (siehe Kasten auf S. 85).

Insofern eröffneten die ersten Wettersatelliten in den 1960er Jahren eine völlig neue Ära der Wolkenforschung. Sie lieferten endlich einen globalen Überblick der Bewölkung, allerdings mit dem umgekehrten Problem wie bei der Beobachtung vom Boden aus: Während im letzteren Fall die höheren Wolkenschichten verborgen bleiben, sind es bei einem klassischen Wettersatelliten die tieferen.

Radar- und Satellitendaten sowie Wetterinformationen von vielen Verkehrsflugzeugen und Schiffen haben die Wettervorhersage in den vergangenen Jahrzehnten stark verbessert. Allerdings waren die Fortschritte bei der Prognose von Bewölkung und Niederschlag am kleinsten. Es fällt noch immer sehr schwer, Wolken zu verstehen sowie ihre Bildung und ihr Verhalten in Computermodellen zu erfassen.

Das aber ist ein großes Handikap nicht nur bei der Wettervorhersage, sondern auch beim Beurteilen der künftigen Entwicklung des Erdklimas. So stellt der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) in seinem jüngsten



Cirrocumulus



Cumulus



Stratocumulus



Cumulonimbus



Alto cumulus



Cirrostratus



Altostratus



Stratus

Es gibt viele verschiedene Wolkentypen – die Sonnenlicht und Infrarotstrahlung von der Erde unterschiedlich stark reflektieren, absorbieren und emittieren. Auch wenn sich infolge der globalen Erwärmung der Bedeckungsgrad der Erde durch Wolken nicht ändert, könnte sich die Häufigkeitsverteilung der Wolkentypen wandeln. Je nach Art dieser Verschiebung würde der Treibhauseffekt verstärkt oder abgemildert.



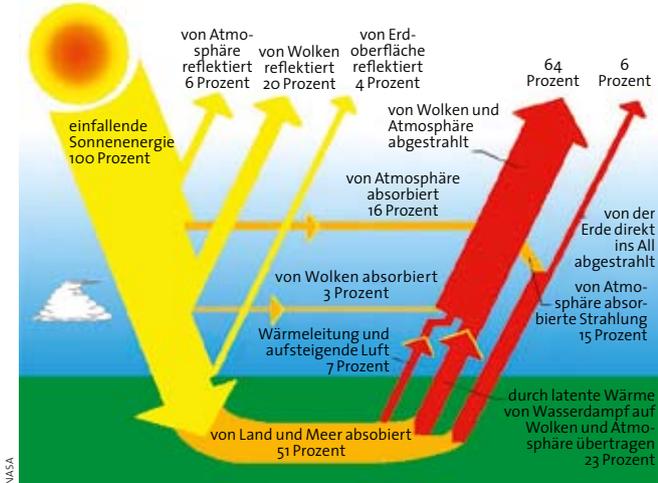
Nimbostratus

ZIRRIUS: DREAMSTIME / NICHOLAS BURNINGHAM; CIRROCUMULUS: DREAMSTIME / ARENACREATIVE; CUMULUS: DREAMSTIME / RAMSEY THOUCCI; STRATOCUMULUS: CASTELLANUS; JÄHNNE: NADUKARININ / PUBLIC DOMAIN; CUMULONIMBUS: DREAMSTIME / QUESTBY; ALTOCUMULUS: DREAMSTIME / LUDIA BARGHEVA; CIRROSTRATUS: MASR; ALTOSTRATUS: DREAMSTIME / SERGET TORONTO; STRATUS: NOAA; NIMBOSTRATUS: DREAMSTIME / ASHAE FABRYKIEWICZ

Bericht 2007 fest, dass unsere begrenzten Kenntnisse der Wolkenvorgänge den größten Unsicherheitsfaktor bei Prognosen der globalen Erwärmung darstellen. Fest steht nur: Auf einer wärmeren Erde verdunstet mehr Wasser. Das heißt aber nicht, dass die Bewölkung generell zunimmt; denn bei höherer Temperatur kann die Luft auch mehr Wasserdampf aufnehmen. Außerdem hängt die Entwicklung des Klimas nicht nur davon ab, ob sich der Bedeckungsgrad ändert. Eben-

so würden sich Verschiebungen in der relativen Häufigkeit der diversen Wolkentypen auswirken: Dicke Cumuluswolken haben einen relativ starken Treibhauseffekt, dünne hohe Zirren einen geringeren und niedrige dünne Wolkenschichten fast keinen. All diese Unsicherheiten brachten Stephen E. Schwartz vom Brookhaven National Laboratory in Upton (New York) 2008 zu dem Schluss, dass sich bisher nicht sicher sagen lässt, wie viele fossile Brennstoffe noch verbrannt werden dürfen, bis eine gegebene Obergrenze der globalen Temperatur erreicht wird.

ENERGIEBILANZ DER ERDE



Mangelnde Kenntnisse über Aerosole

Ebenso lückenhaft wie unser Wissen über Wolken sind die Kenntnisse über die nicht weniger wichtigen festen Schwebeteilchen in der Atmosphäre. Bis auf den Ruß können Partikel mit Durchmessern über 300 Nanometer praktisch ausnahmslos als Kondensationskeime für Wolkentropfen dienen. Inwieweit das auch für die gewöhnlich viel häufigeren kleineren Partikel gilt, ist noch offen.

Laut dem jüngsten IPCC-Bericht gibt es Anzeichen für mehr Niederschlag in feuchten und weniger Niederschlag in

In der Energiebilanz der Erde spielen Wolken an verschiedenen Stellen eine wichtige Rolle.

Klima und Treibhauseffekt

Unter Klima verstehen Meteorologen den mittleren Zustand der Erdatmosphäre während eines Zeitraums von mindestens 30 Jahren. Dieser Zustand ist durch viele Parameter charakterisiert – insbesondere Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung und Niederschlag sowie deren zeitliche Schwankungen. Ein Klimawandel äußert sich also in der langfristigen Änderung zahlreicher Faktoren. Dennoch hat die momentane globale Erwärmung eine einfache Ursache: eine Störung der Strahlungsbilanz unseres Planeten. Nur wenn die Erde genauso viel Sonnenenergie aufnimmt, wie sie als Wärme an den Weltraum abgibt, bleibt die Temperatur an ihrer Oberfläche konstant.

Seit Beginn der Industrialisierung aber bringt der Mensch die Energiebilanz der Erde aus dem Gleichgewicht, indem er in zunehmendem Maß Treibhausgase – in erster Linie Kohlendioxid – in die Atmosphäre freisetzt. Diese absorbieren Infrarotstrahlung und halten so Wärme zurück. Dadurch steigt die durchschnittliche Temperatur der unteren Atmosphärenschichten. Die erwärmte Luft kann zugleich mehr Wasserdampf aufnehmen, das stärkste Treibhausgas in der Atmosphäre. Das führt zu weiterer Erwärmung.

Außerdem beeinflusst der Mensch die Energiebilanz der Erde, indem er die Beschaffenheit der Erdoberfläche und damit ihr Reflexionsvermögen für Sonnenstrahlung – die so genannte

Albedo – verändert. Schließlich erhöht sich durch menschlichen Einfluss die Menge feiner Schwebeteilchen – so genannter Aerosole – in der Atmosphäre. Sie reflektieren einen Teil des auftreffenden Sonnenlichts, so dass es nicht bis zum Boden gelangt.

Als Nettoeffekt all dieser Einflüsse verbleibt, wie James E. Hansen vom NASA Goddard Institute for Space Studies in New York und seine Kollegen 2005 berechnet haben, derzeit insgesamt fast ein Watt pro Quadratmeter mehr Energie im Erdsystem, als abgestrahlt wird. Diese Energie bewirkt, dass sich die Oberfläche unseres Planeten so lange aufheizt, bis die dadurch erhöhte Wärmeabstrahlung die Energiebilanz wieder ausgleicht.

Infolgedessen nimmt der Energieinhalt der Atmosphäre zu – zum Teil direkt durch die gestiegene Temperatur, aber noch stärker über die erhöhte Menge an Wasserdampf, der bei seiner Kondensation in Form von Wolken etwa 2000 Joule pro Gramm Wasser freisetzt. Diese Energie treibt Luftströmungen an. Zugleich führen landwirtschaftliche Maßnahmen und das Abholzen von Wäldern dazu, dass der Boden auf lokaler und regionaler Ebene Sonnenlicht stärker absorbiert. Dadurch verdunstet mehr Wasser, was die Entstehung von Wolken fördert. Außerdem gelangen mehr Aerosolteilchen in Form von feinem Staub oder Ruß in die Atmosphäre, wo sie als Kondensationskeime ebenfalls zur Tröpfchenbildung beitragen.

trockenen Gebieten. Klare Zusammenhänge zwischen langfristigen, menschenbedingten Aerosol- und Treibhausgasemissionen einerseits sowie Wolken und Niederschlag andererseits ließen sich aber bisher nicht feststellen.

Dies liegt vor allem an unvollständigen Aerosol- und Wolkendaten. Zuverlässige Aerosolmessungen am Boden liegen erst seit einigen Jahrzehnten und auch nur an wenigen Stellen vor. Dreidimensionale globale Staubverteilungen lassen sich nur mit Computermodellen auf der Basis von Strahlungsmessungen am Boden und mit Satelliten berechnen.

Satellitendaten sind für Trendanalysen allerdings problematisch. Die meisten Satelliten zur Atmosphärenbeobachtung dienen der Wettervorhersage, die keine langfristig stabil arbeitenden Sensoren erfordert. Daher treten beim Wechsel zu neuen Satellitensystemen immer wieder Brüche in den Messreihen auf, weshalb sich aus diesen Daten bisher keine klaren Tendenzen bei den Aerosolen, den Wolken und der Strahlungsbilanz ablesen lassen.

Aber selbst mit wesentlich besseren Satellitendaten wären menschenbedingte Einflüsse auf die Wolkenbildung sehr schwer festzustellen. Grund dafür sind die Eigenschaften der Atmosphäre selbst. Die unteren Luftschichten verhalten sich großräumig instabil. Weit reichende horizontale und vertikale Luft- und Wärmetransporte lassen Art und Ausmaß der Be-

AUF EINEN BLICK

SONNENSCHIRM UND WÄRMEDECKE

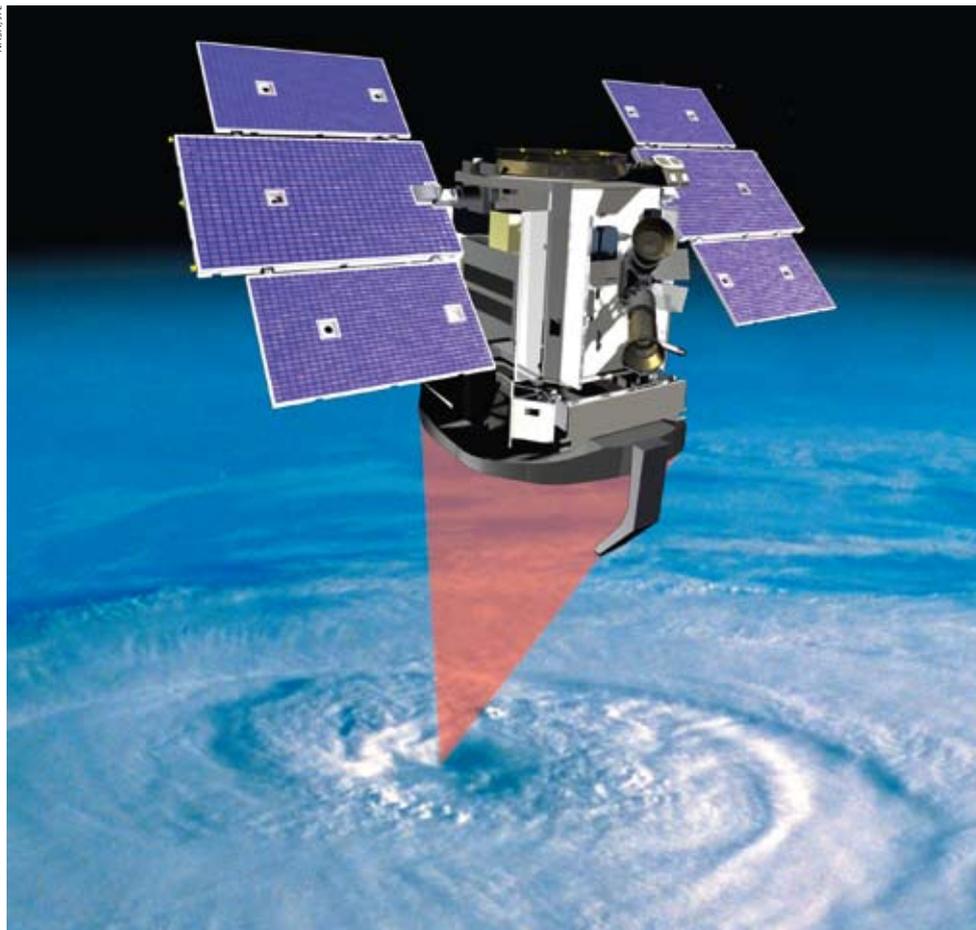
1 Wolken sind wichtige **Klimafaktoren**. Einerseits spenden sie wie ein Sonnenschirm Schatten. Andererseits halten sie als Decke die Erdoberfläche darunter warm.

2 Die heutigen **Klimamodelle** können im Allgemeinen lediglich Vorgänge oberhalb einer Größenskala von etwa 100 Kilometern physikalisch korrekt beschreiben. Deshalb lassen sich die meisten **Abläufe in Wolken**, die wesentlich kleinräumiger sind, nur näherungsweise berücksichtigen.

3 Aus all diesen Gründen bilden Wolken den größten Unsicherheitsfaktor bei Prognosen der **globalen Erwärmung**. Neue Satelliten und spezielle **Wolkenlabors** auf der Erde sollen die bestehenden Wissenslücken schließen helfen. Von ihnen erhoffen sich die Forscher auch neue Erkenntnisse darüber, wie winzige **Schwebeteilchen** in der Luft die **Wolkenbildung** beeinflussen.

wölkung stark variieren. Nur durch jahrzehntelange, hochpräzise Messungen könnte es gelingen, aus dieser meteorologischen Variabilität einen menschlichen Einfluss herauszuentziffern.

Regionale Transportvorgänge und thermodynamische Prozesse beeinflussen aber nicht nur die Wolkenbildung, sondern auch die Schwebeteilchen, die sich in der gleichen



Diese Zeichnung zeigt den 2006 gestarteten Satelliten CloudSat, wie er mit seinem Radar einen Wirbelsturm durchleuchtet. Die Mikrowellenstrahlung ermöglicht es, die Größe der Wolkenteilchen zu bestimmen, Aufschluss über die vertikale Struktur der Wolke zu erhalten und zu ermitteln, wie viel Wasser und Eis sie enthält. Solche Informationen helfen Wissenschaftlern, genauer zu verstehen, wie Wolken sich entwickeln und das Klima beeinflussen.

Luftmasse befinden. Aerosole und Wolken variieren deshalb oft parallel zueinander. Das verführt leicht zu der Fehlannahme, zwischen Staub- und Wolkeneigenschaften bestünde ein kausaler Zusammenhang. Umgekehrt ist es möglich, dass Vorgänge in den Wolken den Einfluss anthropogener Staubpartikel kaschieren. Deshalb lässt sich noch nicht sicher sagen, in welcher Richtung menschenbedingte Staub-

partikel Wolkenalbedo, Bedeckungsgrad und Niederschlag beeinflussen.

Umfassende Theorie in weiter Ferne

Welche Rolle Wolken beim Klimawandel spielen, lässt sich vor allem deshalb so schwer einschätzen, weil es sich um hochkomplexe Mehrphasensysteme handelt. Wer sie vollständig verstehen will, muss zahllose physikalische, chemische und biologische Prozesse betrachten, die eingebettet in das turbulent strömende Medium Luft ablaufen. Zudem beinhaltet die Wolkendynamik Vorgänge, die Zeitspannen von Mikrosekunden bis Wochen überdecken und deren Größenskala von einzelnen Molekülen bis in planetare Dimensionen reicht.

Eine vollständige Wolkentheorie, die alle relevanten Faktoren umfasst, scheint derzeit ebenso unerreichbar wie ein vollständiges Wolkenmodell im Computer. Stattdessen werden wir uns auch in absehbarer Zukunft mit einer Collage aus Einzeltheorien beziehungsweise einer Hierarchie von Wolkenmodellen behelfen müssen, die jeweils höchstens drei Größenordnungen des riesigen Skalenbereichs korrekt beschreiben. Diese müssen optimiert und miteinander verknüpft werden, weil die Prozesse in den Teilbereichen nicht unabhängig voneinander ablaufen.

Die meisten heutigen Klimamodelle können nur Vorgänge oberhalb einer Größenordnung von etwa 100 Kilometern physikalisch korrekt beschreiben. Das schließt den überwiegenden Teil der Abläufe in Wolken aus. Diese werden stattdessen näherungsweise durch Formeln beschrieben, deren Parameter von exakt im größeren Maßstab simulierten Prozessen abgeleitet sind. Darunter leiden insbesondere alle Bemühungen, den Einfluss menschlicher Aerosolpartikel auf Wolken und Klima zu simulieren, der sich am unteren Ende des Skalenbereichs abspielt. Seine Bedeutung für die globale Erwärmung ist deshalb noch weitgehend offen.

Aerosole und Eiswolken

Außer Gasen, Aerosolpartikeln und Wassertropfen treten häufig Eiskristalle in Wolken auf – vor allem, wenn diese unterkühlt sind. Dann herrscht dort eine Temperatur, bei der eigentlich alles Wasser gefroren sein müsste. Es bleibt jedoch größtenteils im flüssigen Zustand, weil Kristallisationskeime fehlen. Die wenigen vorhandenen Eiskristalle wachsen in unterkühlten Wolken auf Kosten der Tropfen an, bis sie so schwer geworden sind, dass sie nach unten fallen und dabei andere Kristalle und Tropfen mitnehmen. In tieferen Bereichen der Regenwolke oder auf dem Weg zwischen ihr und dem Erdboden schmelzen sie in der dort wärmeren Luft. Dies ist die häufigste Art, wie in unseren Breiten Niederschläge entstehen.

Welche Aerosolpartikel als Kristallisationskeime dienen können und welche von vielen möglichen Prozessen die Eiskörner anwachsen lassen, liegt allerdings noch größtenteils im Dunkeln. Ebenso wenig verstehen die Meteorologen, warum kalte Wolken viel mehr kleine Eispartikel enthalten, als



In großen Wolkenlaboren wie AIDA (oben) am Karlsruher Zentrum für Technologie und LACIS (unten) am Leibniz-Institut für Troposphärenforschung in Leipzig untersuchen Forscher die Eigenschaften und Bildungsbedingungen von Wolken auf Größenskalen bis zu etwa zehn Metern. Dabei interessieren sie sich vor allem für die Rolle der Aerosole als Kondensationskeime.

KARLSRUHER ZENTRUM FÜR TECHNOLOGIE

STEFAN WÜLLER - NAUMANN

Kleine Geschichte der Wolkenkunde

Die Anfänge der Wolkenforschung reichen zurück bis ins frühe 19. Jahrhundert. Damals machten direkte Beobachtungen bei ersten Ballonfahrten Schluss mit vielen haltlosen Spekulationen und abstrusen Theorien. Als Begründer der Wolkenkunde oder Nephologie gilt der britische Apotheker und Hobbymeteorologe Luke Howard (1772–1864), der im Jahr 1802 die im Prinzip noch heute gültige Wolkenklassifikation aufstellte.

Zu Anfang des 20. Jahrhunderts konnten Vilhelm Bjerknes (1862–1951) und seine Kollegen am Geophysikalischen Zentrum in Bergen (Norwegen) mit ihrem Zyklonenmodell erstmals die Wolken- und Niederschlagsverteilung in einem Tiefdruckgebiet zutreffend beschreiben – lange bevor Satelliten Aufnahmen der großräumigen Atmosphärenwirbel aus dem Weltall lieferten.

Mit der klassischen Physik, physikalischer Chemie und Thermodynamik gelang es dann auch, die Tropfenbildung recht gut zu verstehen. Allerdings lassen sich zentrale Kenngrößen von

Wolken wie Temperatur und relative Feuchte bis heute noch nicht zufrieden stellend messen.

Einen Durchbruch brachte die Erfindung des Radars im Zweiten Weltkrieg. Es erlaubte endlich, einzelne Wolken zu durchleuchten. Im Jahr 1947 gab es dann erste Versuche, Wolken durch Impfen mit Trockeneis (gefrorenem Kohlendioxid) zum Ausregnen zu bringen. Später ermöglichten elektronische Rechner realistische Wettersimulationen.

All das weckte die Erwartung, dass sich Wetter und Klima in naher Zukunft vollständig verstehen ließen und es somit gelänge, sie vorherzusagen, zu kontrollieren und letztlich zu beherrschen. Nach langjährigen, kostspieligen Versuchen, tropische Wirbelstürme zu beeinflussen, und nach Jahrzehnten milliardenschwerer (und noch immer laufender) Bemühungen, Regen künstlich zu erzeugen, ist allerdings Ernüchterung eingetreten. Eindeutige Beweise, dass sich das Wetter gezielt beeinflussen lässt, gibt es bis heute nicht.

der Anzahl der Kristallisationskeime entspricht. Dabei ist dieser Überschuss wichtig für die Bildung von Starkregen in Tropen und mittleren Breiten.

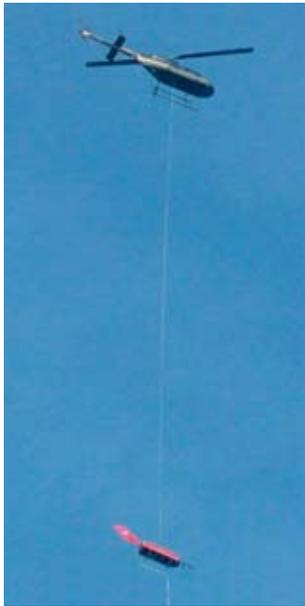
Unterkühlte Wolken lassen sich schlecht untersuchen. Für Flugzeuge sind sie sehr gefährlich, weil sie deren Oberfläche rasch mit einer Eisschicht überziehen können. Auch die Fernerkundung von Eiswolken durch Satelliten bleibt unbefriedigend; denn die unterschiedliche Größe, Form und Anordnung der Eiskristalle erschwert die Interpretation von Messungen aus dem All erheblich. Frank Stratmann vom Leibniz-Institut für Troposphärenforschung in Leipzig und andere Forscher haben Versuche unternommen, die Verhältnisse in unterkühlten Wolken im Labor zu reproduzieren. Aber auch das erwies sich als sehr schwierig.

Reine Eiswolken (Zirren) befinden sich meist nahe der Obergrenze der Troposphäre – jener 8 bis 18 Kilometer hohen Luftschicht, in der sich das Wetter abspielt. Dort oben liegt die Temperatur oft weit unter -40 Grad Celsius. Wie sich Eiswolken bilden und auf das Klima auswirken, ist noch nicht hinreichend geklärt, um sie korrekt in Wetter- und Klimamodelle einbinden zu können. Da Zirren schwer zugänglich sind und für ihre Untersuchung nur bedingt Messverfahren existieren, gibt es zu wichtigen Kenngrößen von ihnen wie der Anzahl, Ausdehnung, Form, Anordnung und den optischen Eigenschaften der Eiskristalle noch zu wenige Daten. Auch Faktoren, die ihre Bildung beeinflussen – etwa die relative Feuchte und kleinräumige Aufwärtsbewegungen der Luft –, sind nur unzulänglich bekannt.

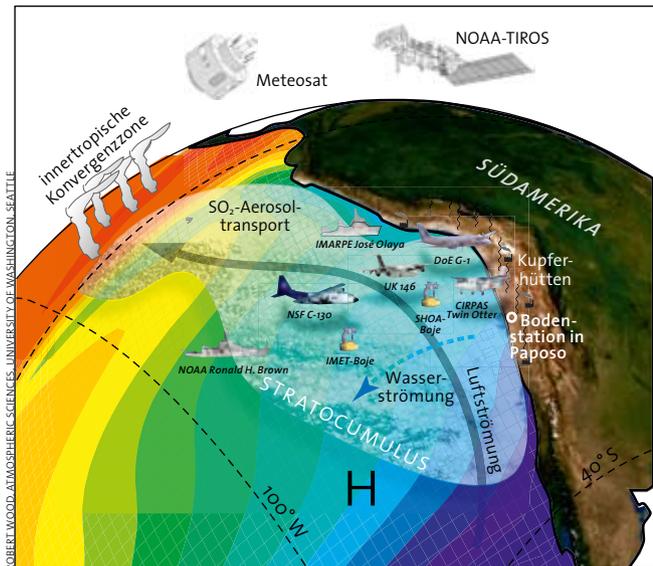
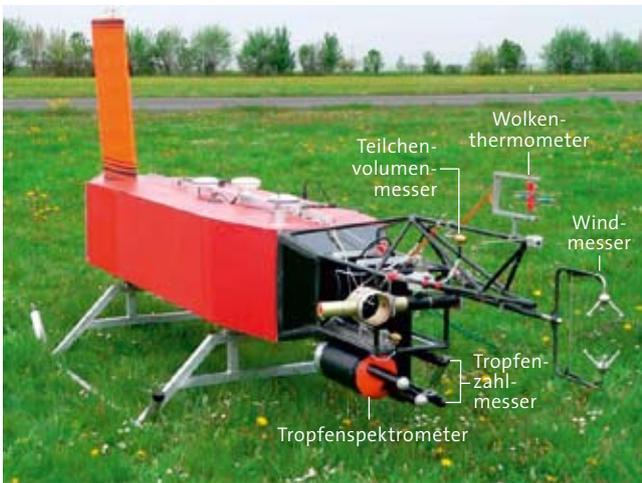
DREAMSTIME / MARGARET ROSS



Auch der Luftverkehr wirkt sich auf das Klima aus, weil Flugzeuge unter bestimmten Bedingungen die Bildung von Zirruswolken in Form von Kondensstreifen auslösen.



Mit dem von einem Hubschrauber getragenen Wolkenlabor ACTOS lassen sich an genau definierten Wolkenorten Informationen über dynamische physikalische Vorgänge bis in den Zentimeterbereich hinunter gewinnen, die traditionellen Messungen vom Flugzeug aus nicht zugänglich sind. Das untere Foto zeigt ACTOS mit seinen verschiedenen Messapparaten am Boden.



Bei dem Schließungsexperiment VOCALS über dem Südpazifik vermaßen Bodenstationen, Schiffe, Flugzeuge und Satelliten jeweils synchron die Atmosphäre in einem begrenzten bewölkten Volumen über dem Meer.

Ein tieferes Verständnis von Eiswolken wäre jedoch sehr wichtig, weil der Mensch ihre Entstehung maßgeblich beeinflusst. Nahe der Obergrenze der Troposphäre findet nämlich der größte Teil des Luftverkehrs statt. Bei günstigen Bedingungen können von Flugzeugen angeregte Zirren – die wohl-bekannteren Kondensstreifen – in dicht beflogenen Luftstraßen große Teile des Himmels bedecken. Das ergaben unter anderem Untersuchungen durch Ulrich Schumann vom Institut für Physik der Atmosphäre am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen aus dem Jahr 2005.

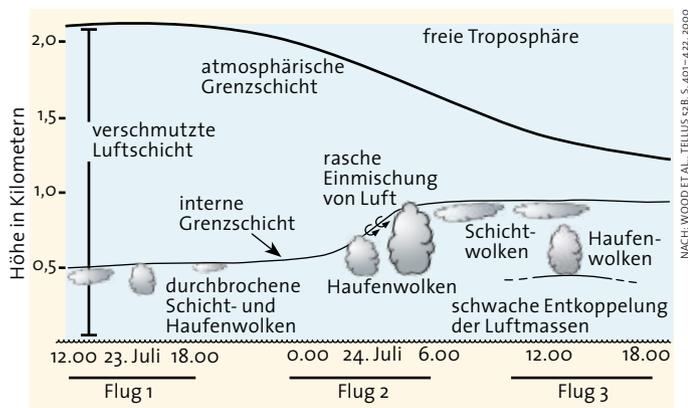
Neue Untersuchungsmethoden im All und am Boden

Da Wolken wegen ihrer hohen Albedo eine kritische, aber bisher nicht exakt quantifizierbare Rolle in der Energiebilanz der Erde spielen, bedarf es neuer Methoden, um ihren Einfluss auf das Klima genauer zu bestimmen. Verfahren dazu existieren zwar, werden bisher aber kaum eingesetzt. Eines davon macht sich zu Nutze, dass auch jener Teil des Mondes, den die Sonne nicht direkt bescheint, nachts sichtbar ist, weil von der Erde reflektiertes Sonnenlicht darauffällt. Astronomen sprechen vom aschgrauen Mondlicht. Es spiegelt die Albedo unseres Planeten wider. Wie Enric Pallé vom Instituto de Astrofísica de Canarias in La Laguna (Teneriffa) und Jiong Qiu von der Montana State University in Bozeman schon 2003 nachwies, eignet es sich deshalb dazu, Änderungen im Reflexionsvermögen der Atmosphäre durch den Klimawandel festzustellen, die unter anderem von Änderungen in der Bewölkung herrühren können.

Die Albedo des sonnenbelegten Teils der Erde ließe sich auch mit dem NASA-Satelliten DISCOVER messen und langfristig überwachen. Er sollte an einem festen Platz im Orbit – dem so genannten Lagrange-punkt 1 – stationiert werden. Leider verstaubt er in einer NASA-Lagerhalle, weil das Programm Budgetkürzungen zum Opfer fiel.

Immerhin kreisen seit wenigen Jahren Prototypen von Satelliten wie CloudSat im All, die dank aktiver Messverfahren – insbesondere Lidar und Radar – besser als alle Vorgänger geeignet sind, die dreidimensionale Verteilung von Aerosolpartikeln, Wolken und Niederschlag weltweit zu bestimmen. An ihren Ergebnissen müssen sich künftig alle Wetter- und Klimamodelle orientieren. Die nächste Generation von Satelliten, die momentan in Planung ist, soll die klassischen mit den neuen Messverfahren vereinen, um für jedes überflogene Gebiet ein Maximum an Informationen zur Bewölkung zu erlangen. Von ihr sind erhebliche Fortschritte beim Verständnis der Wolken zu erwarten, die auch die Genauigkeit von Wetter- und Klimamodellen deutlich verbessern dürften.

Ein begrenzender Faktor ist aber auch dann noch die Kapazität der verfügbaren Großrechner. Das derzeit einzige globale Wolkenmodell NICAM mit einer Auflösung von wenigen Kilometern befindet sich auf dem japanischen *Earth Simulator*, bis vor Kurzem der schnellste Rechner der Welt. Damit lassen sich wesentlich mehr Wolkenprozesse explizit – also ohne Rückgriff auf Näherungen – simulieren als zuvor. Laut



NACH: WOOD ET AL., TELLUS 51B, S. 401–421, 2000

Im Verlauf eines so genannten lagrangeschen Wolkenexperiments wurden bei drei Flügen an zwei Tagen die gleichen bewölkten Luftmassen vermessen. Sie waren durch Pilotballone markiert, so dass sich ihre Entwicklung verfolgen ließ.

William D. Collins von der University of California in Berkeley und Masaki Satoh von der Universität Tokio unterschieden sich die Ergebnisse erster Simulationsläufe, was den Zusammenhang zwischen Klimawandel und Bewölkung betrifft, beträchtlich von denen der übrigen, grobskaligen Modelle. Was das genau bedeutet, muss sich erst noch erweisen.

Auch auf experimentellem Gebiet gibt es ermutigende Entwicklungen. Das Leipziger Wolkenlabor LACIS, die Karlsruher Wolkenkammer AIDA und neue Messinstrumente ermöglichen immer detailliertere Laborsimulationen einzelner Prozesse in warmen und kalten Wolken. Sie liefern dabei auch ein genaueres Bild von bestimmten menschlichen Einflüssen. Allerdings begrenzen die Ausmaße der Wolkenkammern die Größenskala von Vorgängen, die sich im Labor simulieren lassen. Feldexperimente müssen also hinzukommen. Auch hier stehen neue Messverfahren wie das von einem Hubschrauber getragene Wolkenlabor ACTOS zur Verfügung. Holger Siebert vom Leibniz-Institut für Troposphärenforschung und seine Kollegen haben schon 2006 gezeigt, dass sich damit an genau definierten Wolkenorten Informationen über dynamische physikalische Vorgänge bis in den Zentimeterbereich hinunter gewinnen lassen, die traditionellen Messungen vom Flugzeug aus nicht zugänglich sind.

Auf der Größenskala ganzer Wolken und Wolkensysteme erscheinen vor allem zwei Typen von Feldexperimenten viel versprechend. Bei so genannten Schließungsexperimenten bestimmen Meteorologen mit einer Kombination von Boden-, Luft- und Weltraummessungen alle kritischen Zustandsgrößen und sonstigen Charakteristika einer Wolke, die dann mit einem Computermodell simuliert wird. Der Vergleich der gemessenen mit den errechneten Größen gibt schließlich Aufschluss über die Qualität der numerischen Ansätze wie auch der experimentellen Daten und liefert so Anhaltspunkte dafür, wo die Grenzen unserer Kenntnisse über die Vorgänge in Wolken liegen.

Beim zweiten Typ, dem so genannten lagrangeschen Ansatz, beobachten Forscher eine Luftmasse, in der Wolken entstehen und vergehen, über einen Zeitraum von mehreren Tagen hinweg. In dieser Zeit finden mit Flugzeugen wiederholt Messungen an bestimmten Stellen statt, welche durch Pilotballone, die mit der Strömung driften, festgelegt werden. Das erlaubt, den Lebenszyklus von Wolken in Abhängigkeit vom großräumigen meteorologischen Geschehen zu verfolgen.

Bei der Kernfrage, wie sich der anthropogene Klimawandel auf Bewölkung und Niederschlag auswirken wird und welche Folgen das wiederum für die globale Energiebilanz hat, sind wir von befriedigenden Antworten noch weit entfernt. Nur mit neuen experimentellen und theoretischen Ansätzen können wir ihnen näher kommen. Das erfordert zugleich ein hohes Maß an Zusammenarbeit von Forschern aus vielen Disziplinen. Deutlich genauere Prognosen zum Ausmaß der globalen Erwärmung sind nur zu erwarten, wenn wir das komplizierte Zusammenspiel der Wolken mit den übrigen Teilen des Erdsystems wesentlich besser verstehen als bisher. ~

DIE AUTOREN



Jost Heintzenberg ist emeritierter Professor für Physik der Atmosphäre an der Universität Leipzig und ehemaliger Direktor des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung. **Julia Lupp** ist Programmdirektorin des Ernst-Strüngmann-

Forums, einer Konferenzreihe über bedeutende wissenschaftliche Gegenwartsprobleme, die sie 2006 mitbegründete. Dieser Artikel basiert im Wesentlichen auf den Diskussionen und Ergebnissen des Ernst-Strüngmann-Forums »Clouds in the Perturbed Climate System«.

QUELLEN

- Heintzenberg, J., Charlson, R.J. (Hg.):** Clouds in the Perturbed Climate System: Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation. MIT Press, Cambridge 2009
- Pallé, E. et al.:** Earthshine and the Earth's Albedo: 2. Observations and Simulations over 3 Years. In: Journal of Geophysical Research 108, S. 4710, 2003
- Sassen, K., Wang, Z.:** Classifying Clouds around the Globe with the Cloudsat Radar: 1-Year of Results. In: Geophysical Research Letters 35, L04805, 2008
- Schwartz, S.E.:** Uncertainty in Climate Sensitivity: Causes, Consequences, Challenges. In: Energy & Environment Science 1, S. 430, 2008
- Siebert, H. et al.:** Probing Fine-Scale Dynamics and Microphysics of Clouds with Helicopter-Borne Measurements. In: Bulletin of the American Meteorological Society 87, S. 1727–1738, 2006
- Stratmann, F. et al.:** Laboratory Studies and Numerical Simulations of Cloud Droplet Formation under Realistic Super-Saturation Conditions. In: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 21, S. 876–887, 2004

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1072109

Cornelis Drebbel:

Ein vergessener Pionier der Moderne

Er baute das erste Unterseeboot, den ersten Thermostat und eines der ersten Mikroskope. Wer war dieser rastlose Erfinder, den im 17. Jahrhundert ganz Europa kannte, aber heute kein Schulbuch mehr nennt?

Von Achim Clausing

Man nannte ihn den »holländischen Archimedes«, den »Meister der künstlichen und natürlichen Dinge«. Noch Jahrzehnte später schrieb der große Philosoph und Mathematiker Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) voller Achtung von »le fameux Drebbel«, dem berühmten Drebbel. Doch im Jahrhundert nach Cornelis Drebbels Tod – er starb 1633 – verblasste sein Ruhm. Ende des 18. Jahrhunderts widmete der Dresdner Oberbibliothekar Johann Christoph Adelung ihm schließlich in seiner achtbändigen »Geschichte der menschlichen Narrheit« ein Kapitel unter der Überschrift »Cornelius van Drebbel, ein Charlatan«.

Wer war dieser Cornelis Jacobszoon Drebbel, über den es in deutscher Sprache keine Biografie und keine wissenschaftliche Untersuchung gibt? Seine Gestalt, schillernd zwischen Genie und Hochstapler, trägt faustische Züge. Als mittelalterlicher Alchemist und moderner Erfinder, Erfolgsautor,

Unterhaltungskünstler und Unternehmer verkehrte er an den Höfen von Königen und Kaisern, wurde eingekerkert und angeblich einmal um ein Haar hingerichtet.

Die Liste der ihm zugeschriebenen Erfindungen ist eindrucksvoll (siehe Kasten S. 91). Er konstruierte das erste Unterseeboot der Welt und das erste Mikroskop sowie zahlreiche weitere chemische und optische Geräte. Eine Methode zur Herstellung von Sauerstoff entwickelte er ebenso wie den ersten Thermostat, mit dem er die Temperatur von Brutkästen regelte. An einem Sommertag im Jahr 1620 führte er dem englischen König Jakob I. eine künstliche Abkühlung vor – in Westminster Hall, Englands größtem Innenraum. »Artificiall Freezing« nannte es Francis Bacon, damals Lordkanzler von England. Drebbel konstruierte auch »ein herrliche Invention von ClaviCymbaln / oder Musicalischen Instrumenten / so bey scheinender Sonnen eine liebliche Harmonia von sich geben« und erfand das drebbelsche Rot, dessen Leuchtkraft so manchen englischen Soldaten noch im amerikanischen Unabhängigkeitskrieg zur leichten Zielscheibe gemacht hat. Hochfliegende Pläne entwarf er: etwa wie London mit Sonnenenergie beheizt werden könnte und wie die Sümpfe um Cambridge und in East Anglia zu entwässern wären. Und schließlich verfasste er einen »Kurzen Traktat von der Natur der Elemente«, der in vier Sprachen und über 20 Ausgaben erschien – die letzte noch 150 Jahre nach seinem Tod.

»Ewige Bewegung«

Die eigentliche Quelle seines Ruhms aber war etwas anderes. Im Jahr 1605 wurde der Handwerker Cornelis Drebbel aus der holländischen Kleinstadt Alkmaar an den englischen Hof gerufen, weil ihm scheinbar das Unmögliche gelungen war: Er hatte ein Perpetuum mobile konstruiert. Ein »unaufhörlich

AUF EINEN BLICK

GENIE ODER SCHARLATAN?

1 Cornelis Jacobszoon Drebbel (1572–1633) aus Alkmaar in den Niederlanden war zu Lebzeiten ein in ganz Europa berühmter **Erfinder**, der an den Höfen von London und Prag für Aufsehen und Unterhaltung sorgte.

2 Vor allem Drebbels »**Perpetuum mobile**« – eine atmosphärische Uhr, die Ebbe und Flut anzeigte – begründete seinen europaweiten Ruf. Daneben baute er unter anderem ein **Unterseeboot** und eines der ersten **Mikroskope**.

3 Doch schon bald nach Drebbels Tod verblasste sein Ruhm. Die Nachgeborenen sahen in ihm bloß einen **Scharlatan**. Heute ist der ungemein kreative Erfinder fast völlig vergessen.



Die Allegorie der »Logik« (links) stammt aus einer Serie von Kupferstichen, die Cornelis Jacobszoon Drebbel in der Werkstatt seines Schwiegervaters Hendrick Goltzius um 1595 ausführte. Sie gibt einen Eindruck von Drebbels faustisch-dämonischem Selbstverständnis als Naturforscher und Erfinder. Näher an der Realität dürfte Drebbels Porträt auf einem zeitgenössischen Stich von Christoph van Sichem sein (unten).



ALLE ABBILDUNGEN MIT FÜHLEN VON ACHIM CILJUSING

bewegtes« Gerät stand als letztes Ziel der Wissenschaft auf gleicher Höhe mit dem Stein der Weisen und der Quadratur des Kreises.

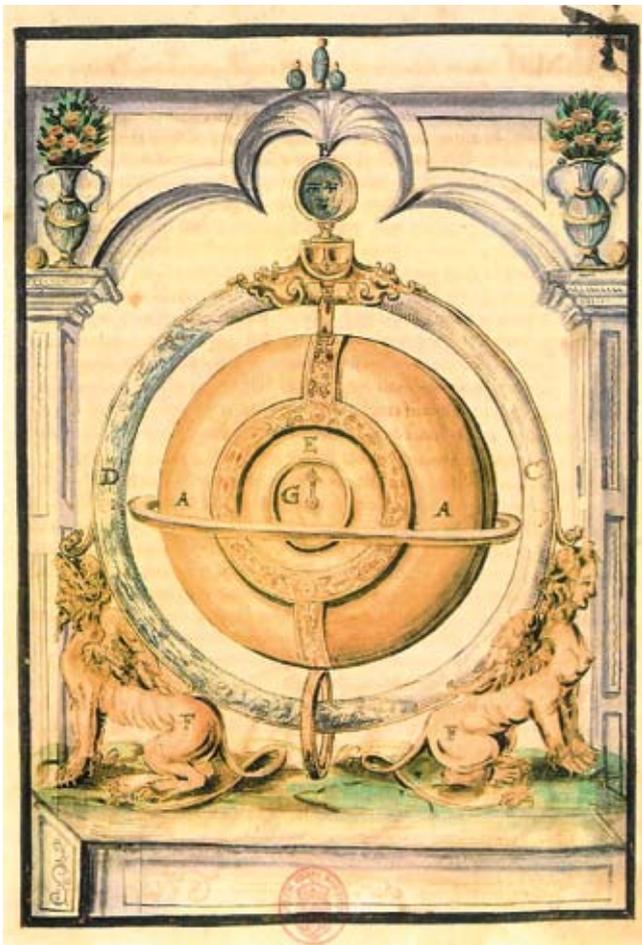
Drebbels Perpetuum mobile war keineswegs ein Schwindel. Es handelte sich offenbar um eine durch Luftdruckschwankungen in Bewegung gehaltene Uhr, die nicht Stunden anzeigte, sondern – was weniger Genauigkeit erforderte – Ebbe und Flut. Eine solche atmosphärische Uhr war zu Beginn des 17. Jahrhunderts eine absolute Neuheit. Erst um 1770 entdeckte der Londoner Uhrmacher James Cox die Idee von Neuem; auch er war davon überzeugt, ein Perpetuum mobile erfunden zu haben.

Nach einem ähnlichen Grundprinzip funktioniert noch heute die Beverly-Uhr, die in der Eingangshalle des Physik-Instituts der Universität von Otago in Dunedin (Neuseeland) seit 1864 läuft, ohne dass man sie je hätte aufziehen müssen. Uhren, in denen ein durch Temperaturschwankungen

veränderliches Gasvolumen die Uhrfeder spannt, werden auch heute noch hergestellt.

Die Zahl der vermeintlichen Perpetua mobilia nahm in den Jahren nach Drebbel stetig zu, bis sich 1775 die Französische Akademie der Wissenschaften weigerte, weitere Arbeiten zu diesem Thema auch nur anzusehen. Über Drebbels Konstruktion urteilte 1765 der Erfurter Pastor Georg Heinrich Büchner, dahinter müsse entweder Alchemie oder »Prahlererei« gesteckt haben. Schnell stand das postume Urteil fest: Der Mann sei ein »Windmacher« und »een grote Ezel« gewesen.

Cornelis Jacobszoon Drebbel (1572–1633) wurde in der holländischen Provinzstadt Alkmaar in den Spanisch-Niederländischen Krieg hineingeboren, der von 1568 bis 1648 andauerte und damit sein gesamtes Leben überdeckte. In Cornelis' erstem Lebensjahr rückte ein spanisches Heer auf Alkmaar vor und belagerte die Stadt. Die siegreiche Verteidigung am 8. Oktober wird in Alkmaar bis heute gefeiert.



Drebbels Perpetuum mobile, nach Hiesslerle von Chodau (1575–1665)

Drebbels genaues Geburtsdatum ist nicht bekannt. Die Eltern, wohlhabende Landbesitzer, ermöglichten ihrem Sohn den Besuch einer Lateinschule und anschließend eine Lehre beim berühmtesten Kupferstecher der Zeit, Hendrick Goltzius in Haarlem. Von Drebbels Hand sind nur wenige Blätter überliefert, darunter eine Karte von Alkmaar und eine Serie von Kupferstichen der sieben freien Künste – eine Allegorie des klassischen Bildungskanons. Während man über ihren künstlerischen Wert streiten kann, zeigen sie zumindest, dass Drebbel ein detailbewusster, äußerst präzise arbeitender Mann war.

Die Lehrjahre bei Goltzius waren für den jungen Cornelis in zweierlei Hinsicht folgenreich. Zum einen heiratete er 1595 Sophia, eine der Schwestern seines Meisters, mit der er dann zwei Töchter und zwei Söhne hatte. Zum anderen lernte Cornelis von seinem Schwager nicht nur das Handwerk des Kupferstechens, sondern wurde wohl auch in die Kunst der Alchemie eingeführt. Goltzius selbst hatte bei chemischen Experimenten ein Auge verloren und den rechten Arm so schwer verletzt, dass ihm zum Zeichnen und Malen nur die linke Hand blieb. Jedenfalls ergriff Drebbel nach Ende seiner Lehrzeit nicht den Beruf des Kupferstechers, sondern befass-

te sich zunehmend mit technischen Dingen. Ab April 1600 baute er ein Jahr lang am Hafen von Middelburg in Südholland einen Brunnen, für den ihm die Stadt eine beträchtliche Summe bezahlte.

Er erhielt Patente auf ein verbessertes Pumpsystem, einen »Schornstein mit gutem Zug« und – entscheidend für seinen weiteren Weg – am 21. Juni 1598 das Patent auf eine »Uhr, die fünfzig, sechzig, ja hundert Jahre lang gebraucht werden kann«. Dabei handelte es sich um nichts anderes als das spätere »Perpetuum mobile«, noch ohne den Namen und die alchemistische Verbrämung.

Was macht ein junger, einfallreicher Familienvater, der ein paar Patente für Erfindungen bekommen hat? Er versucht, auf dieser Grundlage für sich und die Seinen eine Existenz aufzubauen. Doch statt im heimischen Alkmaar oder im nahe gelegenen Haarlem ein Gewerbe zu gründen, beschließt Drebbel, mit seiner Familie nach England auszuwandern. Er dient sich Jakob I. von England als dienstbarer Geist an. Jakob ist ein ungewöhnlicher Monarch: friedliebend, an theologischen, literarischen und alchemistischen Dingen interessiert, ein Intellektueller und Autor mehrerer Bücher.

Seine Bewerbung stützt Drebbel auf die zum Perpetuum mobile mutierte atmosphärische Uhr und eine kleine, 1604 in Haarlem verlegte Schrift mit einem großen Titel. »Ein kurtzer Tractat von der Natur Der Elementen Und wie sie den Windt / Regen / Blitz und Donner verursachen / und vvar zu sie nutzen« heißt die 1608 zu Leiden erschienene deutsche Übersetzung. Das Büchlein ist mehr Titel als Inhalt, aber es tut seinen Dienst: Einen philosophischen Kopf, der die Geheimnisse der Natur nicht nur versteht, sondern in den Bau wunderbarer Instrumente umzusetzen weiß, will der König sich nicht entgehen lassen. Schon 1605 weilt Drebbel am königlichen Hof. Aus dem unbekanntem Handwerker ist ein geheimnisumwitterter »Meister der künstlichen und natürlichen Dinge« geworden.

Zusammen mit seiner Familie wohnt er in Eltham Palace, einem Schloss aus dem 14. Jahrhundert unweit von Greenwich, in dem gut 100 Jahre zuvor der spätere Heinrich VIII. aufgewachsen war. Inzwischen dient es zwar nicht mehr als königliches Quartier, aber die große Halle wird häufig für Festlichkeiten benutzt, und in den Seitenflügeln wohnen Gäste des Herrschers. Drebbel hat illustre Besucher, ist zeitweise das Tagesgespräch der besseren Kreise und figuriert, mit mildem Spott bedacht, in Theaterstücken von Ben Jonson – nach Shakespeare der bedeutendste Bühnenautor der Zeit.

Das Eltham-Ding

In der Komödie »Epiccene, or the Silent Woman« (1609) beklagt sich der alte Griesgram Morose: »Du weißt nicht, welch ein Sturm des Missgeschicks mich heut' hat durchgeschüttelt! Mein ganzes Haus dreht sich in dem Tumult! Ich wohne in einer Windmühle! Die ewige Bewegung ist hier und nicht in Eltham.« Auch das besonders erfolgreiche Stück »Der Alchemist« (1610) enthält manchen Seitenhieb auf Drebbel. Das »Eltham thing«, wie Jonson es einmal nennt, wird viel-

leicht nicht allzu ernst genommen, ist aber für die Zeitgenossen ein fester Begriff.

Prinz Ludwig Friedrich von Württemberg, der spätere Herzog von Württemberg-Mömpelgard, macht am 1. Mai 1610 einen Besuch in Eltham, um das Perpetuum mobile zu besichtigen, und zeigt sich beeindruckt. Sein Sekretär Hans Jacob Wurmsser von Vendenheim beschreibt in seinen Reise-notizen den »Inventeur Cornelius Trebel, natif d'Alkmar« etwas hochnäsiger als einen Menschen »von angenehmer Art, ganz anders als dergleichen Charaktere sonst«. Er vermerkt auch, dass Drebbel dem Prinzen ein Virginal – ein kleines Cembalo – zeigte, das »sich selber spielt«.

Schon bald nach Drebbels Ankunft in England lädt ihn der Kaiser des Heiligen Römischen Reichs, Rudolf II. von Habsburg, ein, nach Prag zu kommen. Davon wissen wir durch einen Brief vom 29. Juli 1607, den der Astronom Johannes Kepler (1571–1630), damals Hofmathematiker des Kaisers, an den Fürsten August von Anhalt schreibt. Darin nimmt Kepler zu der Frage des Fürsten Stellung, ob Drebbels Erfindung vielleicht für die Verwendung im Bergbau nützlich sei. Kepler lässt sich von dem Wirbel um die Wundermaschine nicht anstecken und antwortet, er »wollt nit gern zwehen Gulden drauf verwetten«.

Nach Prag zu gehen war riskant. Rudolf II. (1552–1612) war in den letzten Jahren seiner Herrschaft ein zutiefst gestörter

Mensch mit depressiven und schizoiden Zügen, in jeder Beziehung regierungsunfähig. Er befasste sich nur noch mit Goldschmiedearbeiten, Alchemie, Astrologie und okkulten Phänomenen. Mindestens seit 1600 betrieb sein Bruder, Erzherzog Matthias, die Absetzung Rudolfs – der legendäre Bruderzwist im Hause Habsburg war in vollem Gang.

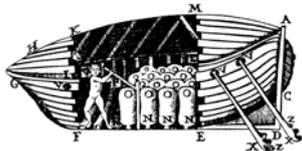
Riskante Abenteuer bei Hofe

In diese Hexenküche zu gehen, konnte Drebbel nicht gefallen, und zunächst hatte der Kaiser mit seinem Werben auch keinen Erfolg. Doch im Herbst 1610 ließ Jakob I. seinem Hofmechanicus keine Wahl mehr – er überließ ihn dem Kaiser. Schon am 18. Oktober berichtete der toskanische Gesandte Giuliano de' Medici an Galileo Galilei (1564–1642) in Florenz, dass ein Flame in Prag eingetroffen sei, der aus England komme und vorgebe, er habe ein Perpetuum mobile erfunden. Drebbel war in der Hexenküche gelandet.

Zuverlässige Angaben über seinen Aufenthalt in Prag sind rar; sicher ist nur, dass er abenteuerlich verlief. In den Aufzeichnungen des französischen Gelehrten – und Entdeckers des Orionnebels – Nicolas Claude Fabri de Peiresc (1580–1637) heißt es, Drebbel habe ein großes Perpetuum mobile für den Kaiser gebaut und mit der Konstruktion eines Brunnens begonnen, dessen Strahl einmal 1000 Fuß hoch steigen würde. Leider kam der Brunnen nicht zu Stande, denn Kaiser

Drebbels Erfindungen

► Am bekanntesten ist Drebbel heute als Konstrukteur des ersten **Unterseeboots** um 1620; es war wohl mehr als nur eine simple Taucherglocke. Nach späteren



Berichten fuhr es, ohne aufzutauchen, unter Wasser in drei Stunden vom Londoner Tower bis nach Greenwich. Constantijn Huygens schreibt 1631, dass der König und tausende Londoner zusahen, wie das Boot auf den Grund der Themse sank und wieder aufstieg. Der französische Physiker Denis Papin (1647–1712), der ebenfalls mit Erfolg ein Unterwasserfahrzeug konstruierte, notiert 1691: »Die Ruder müssen mit Lederstücken abgedichtet werden, so wie es schon in Drebbels Boot gewesen sein soll.«

► Die Tauchtiefe wurde möglicherweise mit einer Art **Barometer** gemessen. Constantijn Huygens jr. schreibt 1690 in seinem Tagebuch, »die alte Frau Kuffler« – Drebbels Tochter Catherine – habe ihm erzählt, ihr Vater hätte in seinem Tauchboot eine lange, mit Quecksilber gefüllte Röhre mitgeführt.

► Vielleicht wurde das Boot künstlich mit **Sauerstoff** versorgt. In Drebbels »Traktat« steht, dass sich beim Erhitzen von Salpeter »die Natur der Luft ändert«. Tatsächlich wird dabei Sauerstoff frei. Robert Boyle schreibt 1660, ein noch lebender Augenzeuge des Tauchversuchs habe ihm von Drebbels Überzeugung berichtet, nicht die gesamte Menge der Luft sei zur Atmung nö-

tig, sondern nur ein flüchtiger Teil davon; wenn diese Quintessenz verbraucht sei, müsse die Flamme des Lebens im Herzen ersticken. Drebbel könne diese Quintessenz gewinnen und in Form eines »chymical liquor« in Flaschen aufbewahren.

► In vielen alten Texten wird Drebbel als Erfinder des **Thermometers** genannt. Das muss man zwar bezweifeln, aber sicher hat er etwas Ähnliches entwickelt. Vom »drebbelschen Thermometer« ist noch im 19. Jahrhundert vielfach die Rede.

► Drebbel baute zahlreiche selbstregulierende Öfen, unter anderem einen **Inkubator** für Küken. Er ist damit der Erfinder des **Thermostats**.

► Drebbel schuf **Musikautomaten**, **Laternae magicae** und **Camerae obscurae**. Constantijn Huygens brachte eine drebbelsche Camera obscura nach Holland. Es gibt Spekulationen, dass die niederländischen Maler des »goldenen Zeitalters« und insbesondere Jan Vermeer (1632–1675) davon beeinflusst wurden.

► Offenbar konstruierte Drebbel auch eine Art **Torpedo**. Die Waffe kam nicht zum Einsatz, aber es gab eine erfolgreiche Demonstration ihrer Wirkung durch einen der Kuffler-Brüder. Die britische Marineverwaltung bezahlte ihm 100 Pfund dafür.



Rudolf wurde im März 1611 entmachtet und in den Hradschin, die Prager Burg, verbannt. Dabei wurde laut de Peiresc Drebbels Haus verwüstet, sein Werkzeug zerstört und er selbst in Haft genommen.

Die Fortsetzung der Geschichte ist vermutlich frei erfunden, aber zu schaurig-schön, um sie zu übergehen: De Peiresc erzählt, Matthias habe alle Räte seines Bruders zum Tode verurteilt und vor dem Hradschin ein Blutgerüst errichten lassen. Als Rudolf das sah, flehte er seinen Bruder um Gnade für Drebbel an, da sonst der »wichtigste Mann der Welt« stürbe – der Erfinder der Glaskugel mit der ewigen Bewegung. Woraufhin Matthias sich angeblich bei Drebbel entschuldigte, ihn freiließ und ihm anbot, zum doppelten Salär für ihn zu arbeiten – was dieser mit Bedauern ablehnen musste, da er »dem König von England gehöre«.

Diese Räuberpistole ist typisch für die maßlosen Übertreibungen, die sich im Lauf der Zeit um Drebbels Leben und Werk rankten. Sie hat aber doch einen realen Hintergrund, den man auf der Website <http://documenta.rudolphina.org> nachlesen kann: Rudolf starb am 20. Januar 1612, und tags

darauf ging ein Bericht darüber an Erzherzog Albrecht, den Bruder von Rudolf und Matthias, in dem es unter anderem heißt, gleich nach Rudolfs Tod sei »ain Hollender, genant Cornelius Tröhler, so den motum perpetuum gefunden, in arrest genommen worden«. In einem weiteren Bericht wird dem Erzherzog drei Wochen später gemeldet, dass »Cornelius so den modum perpetuum gemacht« im Schloss »hinter eüsen gättern gesezt« sei. Drebbels Haft dauerte also mehr als nur ein paar Tage, aber er kam mit einem blauen Auge davon.

1613 wohnte Drebbel wieder in London, in seinem vorherigen Quartier zu Eltham. Es war nicht ganz einfach für ihn, wieder in den Dienst des Königs aufgenommen zu werden; Jakob I. ließ sich offenbar bitten. In einem langen Brief pries Drebbel dem König seine Fähigkeiten an und versprach unter anderem, für ihn ein Instrument zu fertigen, mit dem man Dinge in zehn Meilen Entfernung so gut sehen könne, als seien sie im selben Raum. Das Fernrohr war allerdings schon 1608 von dem holländischen Brillenmacher Hans Lipperhey in Middelburg erfunden worden; möglicherweise hatte Drebbel in Prag die von Kepler verbesserte Version kennen gelernt.

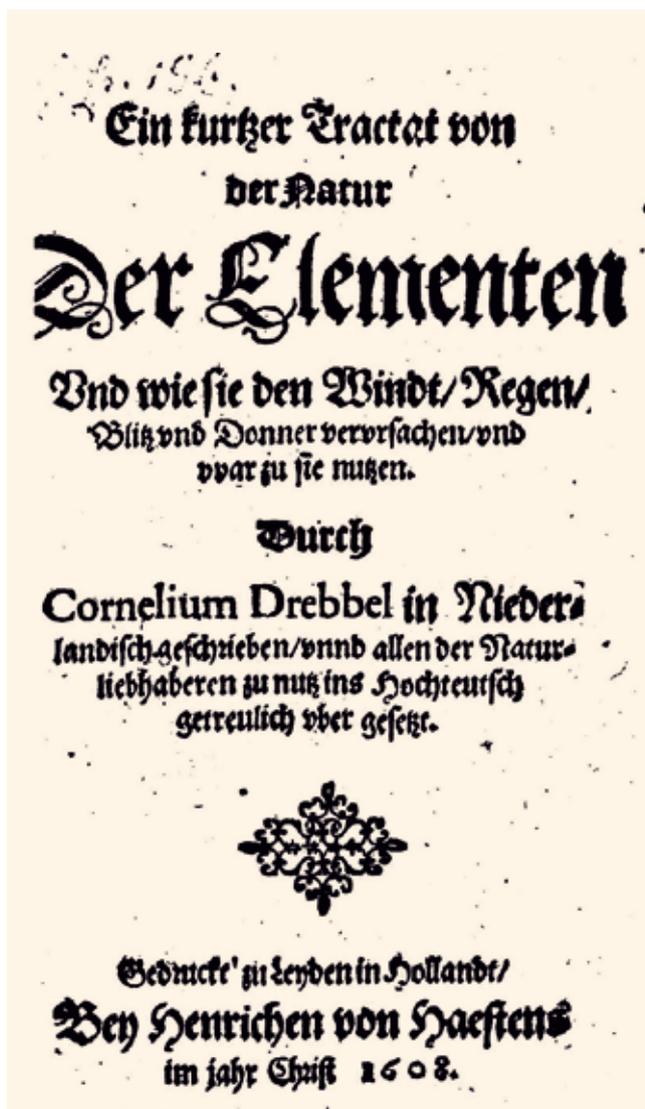
Die ersten Mikroskope

Kepler hatte durch Galilei vom holländischen Fernrohr erfahren, das aus einem konvexen Objektiv und einem konkaven Okular bestand. Anders als Galilei hatte er diese Erfindung gründlich theoretisch analysiert und dabei festgestellt, dass ein konvexes Okular ein deutlich größeres Gesichtsfeld ermöglicht. Kepler, der schlecht sah, hat selbst nie ein keplersches Fernrohr gebaut; aber er veröffentlichte seine Theorie in einem ebenso kurzen wie einflussreichen Buch, der »Dioptrice«, in dem er die Grundideen der geometrischen Optik entwickelte. Wer einmal im Physikunterricht den Strahlengang in Konvex- und Konkavlinse, in Teleskop und Mikroskop gelernt hat, wird sich an Bilder erinnern, die auf dieses Buch zurückgehen.

Es erschien vor genau 400 Jahren, 1611 – also in dem Jahr, das Drebbel in Prag verbrachte. Kontakte zwischen Kepler und Drebbel sind nicht überliefert, lediglich eine Bemerkung Keplers an den friesischen Astronomen David Fabricius aus dem Jahr 1615: »Was das Perpetuum mobile des Belgiers Drebbel und seine musikalischen Automaten angeht – das ist gut, das überzeugt mich, es findet meinen Beifall.«

Von Teleskopen ist nicht die Rede. Drebbel stellte sie aber tatsächlich her. Es ist überliefert, dass Constantijn Huygens (1596–1687), der Vater des Physikers Christiaan Huygens, in jungen Jahren als Sekretär des niederländischen Botschafters an den englischen Hof kam und für 40 Gulden ein Fernrohr von Drebbel kaufte. Von Huygens wissen wir auch, dass Drebbel noch andere optische Instrumente baute, vor allem

Titelseite der ersten deutschen Übersetzung von Drebbels Traktat. Die holländische Erstausgabe ist verschollen.





Der Palast von Eltham um 1800. Stich von J.C. Buckler, um 1820

Mikroskope. Er schreibt: »Nicht nur erschaffen durch die Hand dieses Mannes, sondern auch erdacht von seinem wunderbaren Erfindungsgeist ist ein Perspicillum, so will ich es nennen, mit zwei Linsen, deren untere, nah am zu betrachtenden Objekt, kaum die Größe des Nagels eines kleinen Fingers hat. Hätte er auch in seinem ganzen Leben nichts sonst geleistet, dieses wunderbare Glas allein würde seinen Namen unsterblich machen.«

Der Maler Peter Paul Rubens (1577–1640), 1629 als Diplomat in spanischen Diensten am englischen Hof, schrieb an de Peiresc: »Man versichert mir, dass Drebbel viele Jahre lang fast nichts anderes baute als dieses optische Gerät, dessen Röhre senkrecht steht und das alle darunterliegenden Objekte ungeheuer stark vergrößert.« De Peiresc selbst berichtet, dass er 1622 in Paris einer Vorführung einer »lunette de Drebbels« durch einen Mann namens Kuffler in den Gemächern von Maria de' Medici, der Mutter des französischen Königs, beigewohnt habe. Er gibt eine detaillierte Beschreibung des Instruments: Dieses ist aus Messing gefertigt, hat ein konvexes Okular und ein plankonvexes Objektiv. Der Tubus besteht aus zwei ineinander verschiebbaren Röhren und steckt seinerseits in einem Ring, der durch drei Beine mit einem Fuß verbunden ist. Zwischen Fuß und Tubus befindet sich ein kleiner, beweglicher Objekthalter. De Peiresc erwarb selbst zwei dieser Instrumente.

Jakob Kuffler war einer von vier aus Köln gebürtigen Brüdern, die eng mit Drebbel verbunden waren – zwei von ihnen heirateten später seine beiden Töchter. Jakob reiste von Paris weiter nach Rom, mit einer Empfehlung von de Peiresc an den Kardinal Barberini, den späteren Papst Urban VIII. Doch im November 1622 starb Jacob Kuffler an der Pest, und niemand wusste mit dem Gerät umzugehen, bis Galilei im Mai 1624 nach Rom kam und es mit Hilfe einer ihm von de Peiresc zugesandten Anleitung erfolgreich in Betrieb nahm. Der Kurator des botanischen Gartens im Vatikan, Johannes Faber aus Bamberg, erfand 1625 den Namen Mikroskop. Er schildert seine erste Begegnung mit dem neuen Instrument so:

»Vor Kurzem sah ich mit Verwunderung, ja fast hielt ich es für ein Wunder, ein Glas von erstaunlicher Klarheit, höchst einfallsreich konstruiert. Zwei Deutsche schenkten es mir. Man sollte ihm in Anlehnung an »Teleskop« den Namen »Mikroskop« geben, da es der Betrachtung der kleinsten Dinge dient.« Die beiden Deutschen waren die Kuffler-Brüder Abraham und Aegidius, die zu dieser Zeit Italien bereisten.

War nun Drebbel tatsächlich der Erfinder des Mikroskops? Nicht unbedingt. Sicher ist, dass alle frühen Mikroskope, von denen wir wissen, aus seiner Hand stammen. Die Frage ist, wer als Erster die Idee hatte. Schon bald, nachdem Galilei 1608 das holländische Fernrohr kennen gelernt hatte, war ihm aufgefallen, dass es kleine Dinge vergrößert, wenn man durch das Objektiv hineinsieht. In diesem Sinn ist Galilei der Erfinder des zusammengesetzten Mikroskops. Sehr wahrscheinlich hat er diese Verwendungsmöglichkeit auch Johannes Kepler mitgeteilt, und somit wusste Kepler – wenn auch nicht aus praktischer Erfahrung – um die Vergrößerungswirkung des umgedrehten keplerschen Fernrohrs. Nun war Drebbel 1611, als die »Dioptrice« erschien, wie Kepler am kaiserlichen Hof tätig. Deshalb ist plausibel, dass er die Anregung zum Bau seiner Mikroskope direkt oder über Dritte von Kepler erhalten hat. Anders als dieser war Drebbel mit der Bearbeitung von Glas gut vertraut, damit konnte er den Einfall in die Praxis umsetzen.

Das war keine kleine Leistung. Drebbel musste sein Glas und sogar die dafür notwendigen Schmelzöfen selbst herstellen. Er experimentierte mit verschiedenen Materialmischungen, um »Glas, so rein wie Kristall« zu gewinnen. Die Herstellungstechnik war damals noch sehr wenig entwickelt. Die Gläser hatten Blasen und Schlieren, waren durch Eisenbeimengungen grünlich verfärbt, und die Qualität war nicht gleich bleibend. Bei Teleskoplinsen, die mit zunehmender Leistung der Fernrohre immer größer wurden, störte das bei Weitem nicht so wie beim Mikroskop, dessen Objektive mit stärkerer Vergrößerung immer kleiner werden. Für das Schleifen der Linsen konstruierte Drebbel eine eigene Vorrichtung. Wie Huygens und de Peiresc berichten, konnte man darauf nicht nur Linsen mit großer Genauigkeit schleifen, sondern sie war auch so zuverlässig, dass ein Lehrling sie bedienen konnte.

Verschollene Prototypen

Drebbel hat Dutzende Mikroskope gebaut, aber keines ist erhalten geblieben. Aus den ersten Jahrzehnten des Mikroskops hat auch kein Exemplar von anderer Hand überlebt, nicht einmal Abbildungen davon gibt es. Erst ab etwa 1650 findet man einfache Darstellungen, zum Beispiel in der vierbändigen »Magia universalis naturae et artis« des Würzburger Jesuiten Caspar Schott aus dem Jahr 1658. Das früheste wirklich informative Bild eines Mikroskops bietet die 1665 erschienene »Micrographia« des englischen Physikers Robert Hooke (1635–1703). Dieses Werk, der erste naturwissenschaftliche Bestseller der Neuzeit, löste ein ungeheures Interesse an der Mikroskopie in ganz Europa aus.

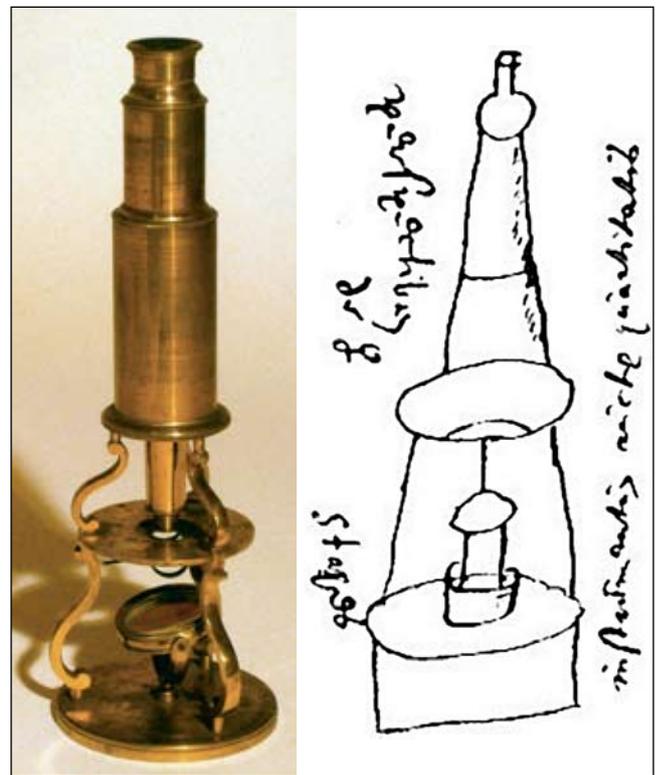
Die Erfindung selbst war damals schon mehr als 40 Jahre alt. Es grenzt fast an ein Wunder, dass wenigstens eine Skizze eines Mikroskops von Drebbel existiert. Sie stammt aus dem Jahr 1630 und ist in den Tagebüchern des holländischen Naturforschers Isaac Beeckman (1588–1637) enthalten. Beeckman, der ähnlich wie de Peiresc mit fast allen Naturphilosophen seiner Zeit in Briefkontakt stand, hat viele Erfindungen Drebbels gekannt und in Skizzenform festgehalten. Das Mikroskop heißt bei ihm noch »perspectivus dr[ebbel]« und »instrumentum auctae quantitatis«, Vergrößerungsgerät. Die Zeichnung zeigt ein dreibeiniges Mikroskop, und so ungenau erscheinen mag – es ist die einzige erhaltene Abbildung des Urahnen aller Mikroskope! Die dreibeinige Bauweise blieb mehr als 200 Jahre lang in Gebrauch.

Das World Wide Web der frühen Neuzeit

Als vor Kurzem die britische Royal Society of London for Improving Natural Knowledge ihren 350. Geburtstag feierte, wurde sie als erstes World Wide Web bezeichnet. Zu Recht: Sie war international ausgerichtet, diente dem schnellen Informationsaustausch über wissenschaftliche Fragen und war in einem gewissen Sinn egalitär. Der holländische Tuchhändler Antoni van Leeuwenhoek (1632–1723) konnte seine mikroskopischen Beobachtungen ebenso bei der englischen Royal Society publizieren wie später der Postmeister und Buchdrucker Benjamin Franklin (1706–1790) seine Experimente zum elektrischen Strom.

Doch ein europaweites Netzwerk der wissenschaftlich-technischen Pioniere bestand schon vor der Gründung der Royal Society, und Cornelis Drebbel war zu seiner Zeit eine prägende Figur in diesem Gewebe. Man versteht seinen Aufstieg, seinen Ruhm zu Lebzeiten und das Schwenden seines Ansehens im 18. Jahrhundert nur dann, wenn man ihn nicht allein als cleveren Urheber diverser Innovationen sieht, sondern als Akteur und Projektionsfigur für viele – manchmal naive – Hoffnungen zu Beginn der Moderne.

Drebbel hatte ein ausgeprägtes Talent zur Selbststilisierung und -vermarktung. Sein Traktat über die Natur der Elemente und der Werbetext seines Freundes Gerrit Pieterszoon Schagen »Wonder-Vondt van de eeuwighe bewegingh / die den Alckmaersche Philosooph Cornelis Drebbel / door een eeuwigh bewegende gheest / in een Cloot besloten / te weghe gebrocht heeft« (Wunder-Erfindung eines Perpetuum mobile, die der Alkmaarer Philosoph Cornelis Drebbel durch ein in einer Kugel eingeschlossenes Gas zu Wege gebracht hat) machten ihn zu einem Träger exklusiven Wissens, dem mit wachsender zeitlicher und räumlicher Entfernung immer mehr magische Fähigkeiten zugeschrieben wurden. Entsprechend warnten etwa die Eltern von Constantijn Huygens ihren Sohn vor dem Umgang mit einem solchen »Zauberer«. Die Kunde von den vielen größeren und kleineren Erfindungen, mit denen er an den Höfen zu Prag und London die abergläubischen Majestäten beeindruckte, verbreitete sich – verzerrt und übertrieben – mit Windeseile über ganz Europa. Drebbel wurde hochstilisiert zur Ikone einer neuen Zeit. Be-



Die Bauweise des links abgebildeten Mikroskops um 1820 ähnelt noch der von Drebbel. Neu ist nur der Spiegel zur Beleuchtung von unten. Rechts davon die Zeichnung eines dreibeinigen Mikroskops in den Tagebüchern von Isaac Beeckman um 1630, die älteste Abbildung eines solchen Geräts

sonderen Anteil daran hatte der englische Naturphilosoph und Politiker Sir Francis Bacon (1561–1626), zeitweilig Drebbels Nachbar im Schloss von Eltham und von 1618 bis 1621 Lordkanzler von England. Durch seine Schriften förderte Bacon den großen Umschwung weg von der mittelalterlichen, auf die Autorität der griechisch-römischen Philosophen begründeten Sicht der Welt hin zu einer modernen, sich auf Empirie stützenden Naturwissenschaft. Seine Vorstellung von Wissenschaft war in erster Linie auf die praktische Anwendung ausgerichtet: Bacon war Politiker, seine Ideale und Hoffnungen galten sehr konkreten, weltlichen Zielen.

Nirgendwo wird das deutlicher als in »Nova Atlantis«, Baccos 1627 erschienener Utopie einer modernen Gelehrten-gesellschaft. Auf der mythischen Insel Bensalem, dem neuen Atlantis, gibt es eine wissenschaftliche Institution, Salomons Haus genannt, die »das wahre Auge dieses Königreichs« ist. Nur die Klügsten und Besten des Landes werden dort aufgenommen. Der Präfekt des Hauses beschreibt dessen Ressourcen so: »Wir haben künstliche Brunnen und Fontänen ... Wir haben Öfen von großer Verschiedenheit, mit denen man die Hitze konstant halten kann ... Wir haben Mittel, weit entfernte Dinge zu sehen, im Himmel und an fernliegenden Plätzen ... Wir haben Gläser, um kleine und kleinste Körper perfekt und detailliert zu betrachten, zum Beispiel die Form

und Farbe kleiner Fliegen und Würmer, Getreidekörner und Fehler in Edelsteinen, die man sonst nicht sehen kann, und für Beobachtungen in Blut und Urin ... Wir haben verschiedene seltsame Uhren und Geräte, mehrere Ewige Bewegungen ...«

Bacon nennt Drebbel nicht, aber seine Zeitgenossen konnten ihn anhand der Beschreibung seiner Erfindungen unschwer identifizieren. Da Drebbels Ideen auf praktischen Nutzen zielten, passten sie perfekt zu Bacons Philosophie einer nützlichen Wissenschaft.

Bacons Schriften hatten immensen Einfluss auf die Entwicklung der Wissenschaften im 17. Jahrhundert. Unter expliziter Berufung auf die Parabel von Salomons Haus gründete sich in London der Hartlib-Kreis, ein informeller Zirkel um den deutschstämmigen Universalgelehrten Samuel Hartlib (1600–1662), der das Ziel anstrebte, »alles menschliche Wissen aufzuzeichnen und es überall zur Erziehung der Menschheit verfügbar zu machen«. Dem Zirkel gehörten Kapazitäten wie der irische Universalgelehrte Robert Boyle (1627–1692), Robert Hooke und der Architekt Christopher Wren (1632–1723) an. Erstaunlicherweise gehörten auch mehrere »chymical women« dazu, unter ihnen Drebbels Tochter Catherine, die wie ihr Vater, ihr Ehemann Sibertus Kuffler (einer der vier Brüder) und wohl auch die anderen Mitglieder des Hartlib-Kreises an Alchemie interessiert war.

Aus diesem Kreis ging die Royal Society hervor. Deren Motto »Nullius in verba« (Nach niemandes Worten) steht für die Abkehr von der mittelalterlichen Berufung auf Autoritäten und für die Hinwendung zur Empirie. Es meint dasselbe wie später der deutsche Philosoph der Aufklärung Immanuel Kant (1724–1804) mit der Aufforderung »Habe Mut, dich deines eigenen Verstandes zu bedienen«. Wenn man im Licht dieser Entwicklung das folgende Zitat aus Drebbels Traktat von den Elementen liest, erkennt man den Vorläufer der Moderne: »Verhoffe, lieber leser, du werdest gegenwärtiges Büchlein nicht mit unverstant verachten noch mich verdenken / das ich dis mein schreiben mit den alten scribenten nicht beweisse und bekräftige / dan ich / die warheit zu sagen / keinen hierüber gelesen / sondern ich gebe dir solches / wie ich es von der Natur empfangen habe.«

Kuriosa in den Wunderkammern des Barocks

Drebbel war kein Wissenschaftler. Bei allem Respekt, den er in weiten Kreisen genoss, sollte er in London vornehmlich für Unterhaltungen bei Hof sorgen – je »magischer« und unerklärlicher, desto besser. Drebbel umgab seine Erfindungen mit der Aura des Geheimnisvollen; zu keiner lieferte er eine schriftliche Darstellung. Das sicherte ihm zu Lebzeiten seine Stellung; dem Nachruhm war es nicht förderlich.

Zu Beginn der wissenschaftlichen Revolution des 17. Jahrhunderts waren Drebbels Kuriosa gesuchte Objekte in den Kunst- und Wunderkammern des Barocks. Sie dienten dem Zweck, Staunen und Bewunderung für die scheinbar unbegrenzten Möglichkeiten der neuen Zeit zu erregen. Doch mit fortschreitender Aufklärung verlor man das Interesse an

Dingen, die eher an den schnellen Affekt als an die Vernunft der Betrachter appellierten; sie erfüllten mit ihrem okkultistischen Touch nicht mehr die Erwartungen eines zunehmend kritischen Publikums. Der Übergang geschah nicht abrupt: Selbst Isaac Newton (1643–1727), der sicherlich bedeutendste Kopf dieser Epoche, war noch stark von alchemistischen Traditionen beeinflusst. Er besaß eine große Sammlung einschlägiger Bücher, darunter auch ein Exemplar von Drebbels »Traktat«.

Das 18. Jahrhundert blickte dann aber mit zunehmender Verachtung auf alles herab, was nach vorwissenschaftlicher Naturerklärung aussah. Darum fügte Drebbels mystisch raunendes Buch – das Einzige, was am Ende von seinen Schöpfungen übrig blieb – seinem Andenken schweren Schaden zu. Und einer, dessen Ruhm auf einer Narretei wie dem Perpetuum mobile beruhte, musste ja sowieso ein Windmacher gewesen sein.

Der schon erwähnte Pastor Büchner schrieb 1765: »Drebbelius, ein großer Windbeutel und Charlatan.« In dieselbe Kerbe schlug 1786 Adelung in seiner viel gelesenen »Geschichte der menschlichen Narrheit oder Lebensbeschreibungen berühmter Schwarzkünstler, Goldmacher, Teufelsbanner, Zeichen- und Liniendeuter, Schwärmer, Wahrsager, und anderer philosophischer Unholden«. Wer einmal einer solchen Gesellschaft zugerechnet wird, dessen Ruf erholt sich so schnell nicht wieder. Dennoch ist erstaunlich, wie ein so einfallsreicher Kopf derart vollständig aus dem öffentlichen Bewusstsein verschwinden konnte. ~

DER AUTOR



Achim Clausing ist Professor für Informatik an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Neben seiner Arbeit fasziniert ihn Drebbels Leben und Werk.

QUELLEN

Harris, L. E.: The Two Netherlanders: Humphrey Bradley and Cornelis Drebbel. E.J. Brill, Leiden 1961

Jaeger, F. M.: Cornelis Drebbel en zijne Tijdgenooten. P. Noordhoff, Groningen 1922

Keller, V.: Cornelis Drebbel (1572–1633): Fame and the Making of Modernity. Dissertation, Princeton 2008

Tierie, G.: Cornelis Drebbel. Dissertation, Amsterdam 1932

WEBLINKS

www.drebbel.net

Die definitive Website zu Drebbel wird von der Tweede Drebbel Genootschap unterhalten. Dort findet man zahlreiche Informationen über den Erfinder und weiterführende Links. Der besondere Dank des Autors gilt Hubert van Onna, dem Vorsitzenden der Genootschap, für seine freundliche Unterstützung.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/107210

Gefriertrocknung auf dem Vormarsch

»Die Gefriertrocknung wird seit Jahrzehnten für besonders hochwertige Produkte wie Arzneistoffe eingesetzt. Die Qualität des Ausgangsproduktes bleibt wie bei keinem anderen Trocknungsverfahren erhalten. In den vergangenen Jahren sind wesentliche technische Verbesserungen erzielt worden, so daß die Gefriertrocknung in großem Stil bei der Lebensmittelkonservierung eingesetzt werden kann.« (beispielsweise zur Herstellung von Instantkaffee; die Red.) Die Umschau, Juli 1961, S. 428

Computer übertrifft Ingenieure

»Ein Elektronenrechner, der für die Planungsarbeiten zum Bau einer Fabrik eingesetzt wurde, löste die Aufgabe nicht nur schneller, sondern auch besser als eine Gruppe von Entwicklungsingenieuren. Die gesamten rechnerischen Planungsarbeiten wurden dabei in etwa 16 Stunden durchgeführt. Die mit der gleichen Aufgabe betraute Gruppe von Ingenieuren konnte nach einjähriger Arbeit lediglich drei Alternativentwürfe erarbeiten.« Automatik, Juli 1961, S. 277

Tiefsee-Tauchkapsel

»Wie ein Forschungsballon, den man in große Höhen schickt, verhält sich der neue ›Meeressatellit‹ der amerikanischen Marine – nur in umgekehrter Richtung. Deep Dip, wie das Gerät heißt, wird in die See geworfen und sinkt rasch mit einer Ladung aus Meßfühlern und Anzei-



geräten auf den Meeresboden. Ein mit Benzin gefüllter Schwimmsack drückt die Kugel wieder an die Oberfläche, damit sie geborgen werden kann.« Populäre Mechanik, Juli 1961, S. 21



Deep Dip: Ein Sputnik für die Welt der Meere



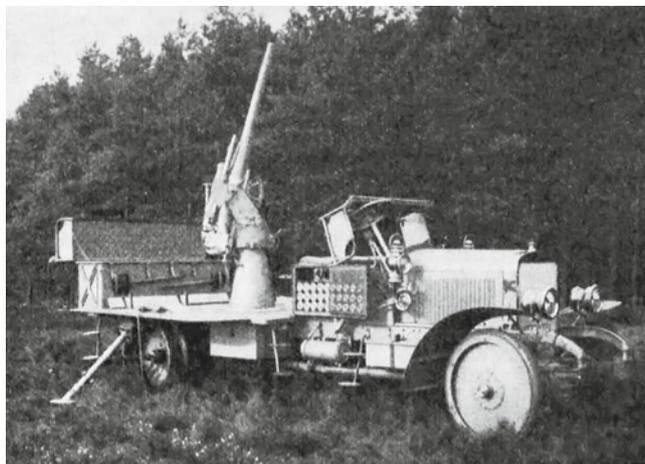
Lebendig begraben

»Auf seiner Durchquerung Afrikas hatte Leo Frobenius Gelegenheit, festzustellen, daß afrikanische Naturvölker noch bis in die jüngste Zeit Lebende als Totenopfer

mit ins Grab gegeben haben. Bei Grabungen nach Skeletten für ethnologische Studien stieß er in der Nähe der französischen Station Baniagara auf ein Grab, das Spuren dieses grausamen Kultus aufwies. Er schreibt: Aus den Fetzen eines Gewandes leuchteten die gekrümmten Glieder und der aufgerissene Mund des Skelettes.« Die Umschau, Juli 1911, S. 568–570

Nahrhafter Bohnenkäse

»Landwirtschaftliche Fachblätter haben sich in letzter Zeit mit einer Nutzpflanze beschäftigt, die in Ostasien eine wichtige Rolle spielt, bisher aber in Europa noch nicht in größerem Umfang angebaut worden ist. Das ist die Sojabohne. Neue Untersuchungen haben den Nachweis erbracht, daß diese Bohnenart an Nährwert allen übrigen Feldfrüchten überlegen ist. In China wird eine Art von weißem Käse daraus bereitet. Außerdem wird aus dieser Bohne noch ein treffliches Öl gepreßt, und der Rückstand kann als Viehfutter und Düngemittel benutzt werden. Endlich ist der Sojabohnenessig als Zusatz für Saucen höchst geschätzt.« Kosmos, Juli 1911, S. 272



Ballone besser als Motorluftschiffe

»Der Deutsche Luftschiffer-Verband stellt der Heeresverwaltung im Kriegsfall seine Ballone zur Verfügung. Ende 1909 betrug die Zahl 100. Der Freiballon wird im Festungs- und Feldkriege immer seine Bedeutung behalten, weder Motorluftschiffe noch Flugmaschinen werden ihn verdrängen können. Gründe: gleich dem Drachenballon beansprucht der Freiballon geringen Raum zur Beförderung und kann auch bei ungünstigem Wetter aufsteigen. Zur Bekämpfung sind Kanonen konstruiert.« Technische Monatshefte, Juli 1911, S. 213–217

Zur Abwehr von Spionageballonen wurden Geschütze auf Kraftwagen montiert.

Auf dem Weg zur Atomphysik: die Röhren des Philipp Lenard



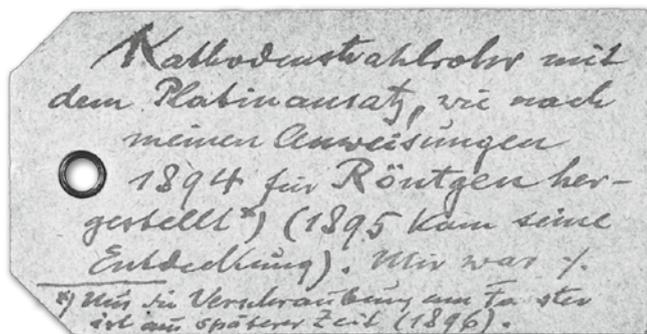
FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

Ein Fenster mit einer Metallfolie (auf der Unterseite) ermöglichte es dem Physiker Philipp Lenard, mit dieser Entladungsröhre um 1892 die Teilchennatur der Kathodenstrahlen nachzuweisen.

Am Ende des 19. Jahrhunderts stand der Physik ein Umbruch bevor, der bis heute nachwirkt: die Geburt der Atomphysik, der bald darauf die Entwicklung von Quantenmechanik und Relativitätstheorie folgten. Zu den drängenden Fragen der Zeit gehörte auch die nach der Struktur der Materie. Philipp Lenard (1862–1947), Sohn eines Tiroler Weinhändlers, hat zur Antwort wesentlich beigetragen; dafür wurde ihm 1905 der Nobelpreis verliehen. Wenig später freilich verlor er den Anschluss an die moderne Physik, geblendet von massivem Antisemitismus, der ihm im NS-Staat zweifelhafte höchste Ehren einbrachte.

Heinrich Hertz hatte 1892 bei elektrischen Entladungen in evakuierten Glasröhren eine Strahlung beobachtet, sein neuer Assistent Lenard entwickelte noch im gleichen Jahr das später nach ihm benannte Fenster: Durch eine dünne Metallfolie

Zum Nachlass Lenards gehört auch dieser Zettel, mit dem er seinen Anteil an der Entdeckung der Röntgenstrahlen dokumentieren wollte – hatte er doch die Röhren hergestellt.



leitete er den Strahl aus der Vakuumröhre in eine gasgefüllte Kammer, um dort Streuexperimente durchzuführen. Indem er etwa die Stärke der Folie und ihr Material variierte, gelang Lenard der Nachweis, dass es sich um eine Teilchenstrahlung handelt. Deren Natur erkannte aber zu seinem großen Ärger der Brite Joseph John Thomson. Dieser identifizierte die Partikel als die schon lange vorhergesagten Elektronen.

Thompsons Atommodell, wonach die Elektronen wie Rosinen in einem Kuchenteig in die positive Atommasse eingebettet seien, widerlegte Lenard 1903 anhand seiner Messdaten. Vielmehr gäbe es Wirkungszentren, die nur einen Bruchteil des Volumens einnehmen. Er trug so zur Entwicklung des rutherfordischen Atommodells bei, das einen positiv geladenen Atomkern und eine Elektronenhülle postulierte.

Weil Lenard eine seiner Röhren Conrad Wilhelm Röntgen überlassen hatte, reklamierte er für sich – vergeblich – einen Anteil an dessen Entdeckung der »X-Strahlen«. Röntgens Mitarbeit beim Aufbau des Deutschen Museums wie auch die üppige Präsentation seiner Apparaturen veranlassten Lenard deshalb, alle Bitten der Museumsleitung um seine Originalröhren abzulehnen. Erst 1956, neun Jahre nach Lenards Tod, ging sein Nachlass an das Museum.

Dazu gehören auch Dokumente, die ein unrühmliches Kapitel beleuchten: Lenard gehörte in den 1920er Jahren zu den Mitbegründern der Bewegung »Deutsche Physik«, die Entdeckungen jüdischer Forscher wie die Relativitätstheorie Albert Einsteins ablehnte, die Quantenmechanik bestritt und für die arische Rasse eine natürliche Überlegenheit in den Naturwissenschaften reklamierte.

Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Ulrich Eberl

Zukunft 2050*Wie wir schon heute die Zukunft erfinden*

Beltz, Weinheim und Gelberg, Basel 2011.

240 S., € 17,95

TECHNIK

Ein Parforceritt durch die nächsten 40 Jahre

Ulrich Eberl bewältigt die Zukunft: mit großem Sachverstand, raschen Szenenwechseln und Produkten der Firma Siemens.

Futuristische Illustrationen, spektakuläre Fotos und übergroße, ins Auge stechende Überschriften machen beim ersten Blättern klar: Es geht um Visionen für die Zukunft. Das ist nicht jedermanns Sache. Um diejenigen Leser, die es in dieser Hinsicht mit Altkanzler Helmut Schmidt halten («Wer Visionen hat, sollte zum Arzt gehen»), nicht gleich zu verlieren, stellt Ulrich Eberl an den Anfang seines Werks ein Kapitel über die Zukunftsforschung. Nicht um unseriöse Prophezeiungen gehe es, sondern darum, mit Blick auf Kommendes in die heutigen Labore zu lugen: »An welchen Technologien die Entwickler heute arbeiten, das bestimmt zum großen Teil die Welt, in der wir leben werden.« Und er zitiert Einstein: »Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich den Rest meines Lebens zu verbringen.«

Eberl versteht sein Metier. Ist er doch im Hauptberuf »Leiter Kommunikation Innovation & Technik« beim Branchenriesen Siemens und Chefredakteur des hauseigenen Zukunftsmagazins »Pictures of the Future«. Sein neues Buch basiert zum großen Teil auf seinen dort veröffentlichten Beiträgen – woraus er keinen Hehl macht. Insofern gerät das Buch nebenbei zur willkommenen Marketingaktion für seinen Arbeitgeber.

Die Inhalte entsprechen der Produktpalette des Konzerns: Energie und Klima nehmen gut die Hälfte des Buchs ein. Hinzu kommen Automatisierung, Chipwendungen und Sensorik, Halbleiter-, Antriebs-, Beleuchtungs-, Gebäude-, Medizin-, Informations- und Kommunikationstechnik, Mobilität und Finanzdienstleistungen. Ein auf den privaten Kunden zugeschnittenes Kapitel bietet einen bunten Strauß von innovativen Haushaltsgeräten und Energie sparender Beleuchtung über Sicherheitstechnik bis hin zu internationalen Geldanlagen. Immer wieder legt Eberl ein Thema vorübergehend ab, um es an anderer Stelle fortzuentwickeln.

Vielleicht ist das Kapitel »Bauernhof im Wolkenkratzer« typisch für die Vor-

gehensweise des Autors. Eingangs geht es darum, wie die Ernährung für die 6,5 Milliarden Menschen bereitzustellen ist, die 2050 in Städten leben werden. Hier sieht Eberl großzügig über die technischen Probleme der 30-stöckigen Hochhäuser hinweg, die Essbares un-mittelbar in der Nähe des Konsumenten produzieren sollen (Bild; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/2010, S. 72), und stürzt sich lieber mit Pestiziden, Hormonen und Gammelfleisch auf ethisch-soziale Probleme. Aus einer Diskussion über die Lebensmittelpreise von 1970 bis heute leitet er einen Trend zum Billignahrungsmittel her und kommt dann über Ausbeutung in den Entwicklungsländern und marktbeherrschende Konzerne schließlich zum fairen Handel. »Zwar ist kaum anzunehmen, dass 2050 der Großteil der Waren unter fairen Bedingungen produziert werden wird«, prophezeit Eberl, doch müsse und könne darüber der Verbraucher entscheiden.

Handfester, technischer ist der nachfolgende Abschnitt, in dem es um RFID-Tags geht. Mit ihrer Hilfe würde sich die Nahrungsmittelkette vom Tier bis auf den Teller verfolgen lassen (Spektrum der Wissenschaft 5/2008, S. 92, und 6/2009, S. 92). Der Siemens-Kommunikator erläutert zwar den Begriff RFID, verschweigt aber, dass die Abkürzung (»Ahreffeidih«) für *radio frequency identification* steht. Da hilft auch das grundsätzlich lobenswerte Stichwortverzeichnis nicht weiter.

Im selben Kapitel ergeht Eberl sich noch im Welthandel, vergleicht die Wirtschaftleistung der großen Weltregionen und landet (für den Leser unerwartet, aber irgendwie schlüssig) bei Terrorismus, Klimawandel und den »Zockern im Weltfinanzkasino«. Für 2050 fordert er mehr Kontrolle und Transparenz der globalen Finanzströme. Und die Menschen sollen »Social Business« treiben und andere mit Leidenschaft und Überzeugung mitnehmen. Das nimmt man dem Autor ab, steht er doch selbst als Beispiel dafür.

In atemlosem Galopp streift er Klima und Energie, Wirtschaft, Produk-



Vision des Architektenbüros Vincent Callebaut: Schwimmende Inseln und vertikale Gärten liefern frische Nahrung am Ort des Verbrauchs.

tion, Dienste und Geld, Computer, Roboter, Autos, Ernährung und Gesundheit, Bildung und soziales Miteinander. Und immer hat er eine Erklärung bei der Hand, wie etwas im Prinzip funktioniert und wie es damit weitergehen könnte.

Offensichtlich hat alles mit allem zu tun. Da verschmäht der Autor auch scheinbar Nebensächliches nicht und erklärt, dass zum Durchbruch einer Innovation nicht nur die blanke Idee vonnöten ist, sondern auch moderne Maschinen und Anlagen einschließlich einer leistungsfähigen Informations- und Kommunikationstechnologie, ein innovationsfreundliches Klima in Politik und Öffentlichkeit sowie begabte und gut ausgebildete Menschen. Und diese Menschen haben wieder ihre ganz eigenen Probleme. Sie besitzen jeder für sich nur das eine Leben und wollen es lange und rechtschaffen nutzen. Dafür müssen sie gesund älter werden. Womit wir beim nächsten Themenkreis sind ...

Eberl kennt sich einfach mit allen Themen aus und will auch keines auslassen. Das ist nicht nur von Vorteil. So schlägt er dem Leser oft Begriffe um die Ohren, die dem Technikliebhaber zwar schon mal untergekommen sind, einem Jugendlichen oder gar einem Kind eher nicht. Themenfülle geht manchmal vor Tiefgang. Hin und wieder sehnt man sich nach einer Hintergrundinformation oder einem Literaturhinweis.

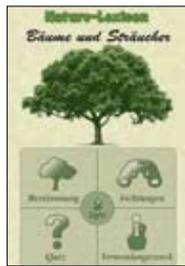
Wie auch andere Vertreter des Genres befließt sich dieses Buch einer sachlich-objektiven, technischen und bisweilen trockenen Sprache. Da vermisst man gelegentlich etwas Lockerheit und einen plaudernden Tonfall.

Meinem 13-jährigen Neffen würde ich das Buch nicht auf den Tisch legen – es würde seine Geduld überfordern. Aber mir selbst schon, um hin und wieder darin herumzublättern, meine

Überzeugung bestätigt zu sehen, wie sehr doch die Probleme der Gegenwart miteinander zusammenhängen, und mich daran zu erfreuen, wie (bei Siemens!) an Lösungen und Auswegen für die Zukunft getüftelt wird.

Reinhard Löser

Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Berlin.



Nature-Lexicon Bäume und Sträucher, Version 1.0

InnoMoS GmbH, Bielefeld 2010.

Online zu beziehen über

www.nature-lexicon.de/baeume.html, € 6,99

BOTANIK

Elektronisches Bestimmungsbuch mit Tücken

Wochenend und Sonnenschein und mit dem iPad im Wald allein ...
Etwas mehr braucht es doch noch zum Glücklichein.

Eigentlich ist ein dichotomer Bestimmungsschlüssel (»Hat der Baum Nadeln? Weiter bei Nummer 7. Blätter? Weiter bei Nummer 16«) nichts anderes als ein Computerprogramm mit Abfra-

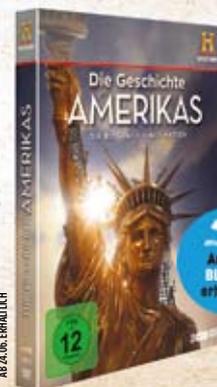
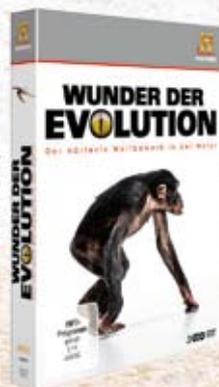
gen und bedingten Sprüngen – auf Papier und deswegen sehr unflexibel. Wer Frage A nicht beantworten kann (»Hat die Pflanze ein oder zwei Keimblätter?«), kommt nicht weiter, obgleich die

ANZEIGE



HISTORY GESCHICHTE ERLEBEN!

Die besten Dokumentationen von HISTORY - jetzt auch auf DVD und Blu-ray!



www.polyband.de

| www.history.de



BESUCHEN SIE UNS AUF
www.facebook.de/polyband

© 2011 A&E Television Networks. All Rights Reserved. HISTORY and the "H" logo are trademarks of A&E Television Networks. All Rights Reserved. Art and Design © 2011 A&E Television Networks. All Rights Reserved © 2011 Polyband Medien GmbH. Alle Rechte vorbehalten.



Verschiedene Fruchttypen zum Ankreuzen

Eigenschaften C, D, K und L einfach zu bestimmen sind und die Pflanze eindeutig charakterisieren. Was liegt näher, als ein geeigneteres Programm auf einen echten Computer zu bringen, vor allem seit man ein solches Gerät in Form von iPhone oder iPad bequem in den Wald mitnehmen kann?

Rita Lüder, ausgewiesene Expertin für Pflanzenbestimmung, hat sich dieser Aufgabe angenommen und das Material für ein Bestimmungsprogramm (eine »App«) bereitgestellt. Es umfasst 143 mitteleuropäische Baum- und Straucharten, darunter auch solche, die nicht einheimisch, aber oft in Gärten und Parks anzutreffen sind. Der Baumführer richtet sich explizit an den interessierten Laien.

Der wichtigste unter den fünf Unterpunkten des Startbildschirms ist die Funktion »Bestimmung«. Der Benutzer ist eingeladen, zu der gesuchten Pflanze in den Kategorien Umgebung, Blattform, Frucht, Blüte und Baumform das jeweils Zutreffende anzukreuzen. Je nach Merkmal kann die Charakterisierung mehr oder weniger detailreich ausfallen; jede Merkmalsausprägung ist mit farbigen Zeichnungen illustriert. So gibt es für die »Baumform« »klettern, rankend, windend«, »Strauch«

und »Baum«, wobei noch eine Größenklasse ausgewählt werden kann. Die meisten Optionen sind für Blatt- und Nadelformen verfügbar.

Nach Eingabe der verschiedenen Merkmale erhält man eine Liste mit passenden Pflanzenarten präsentiert, wahlweise nach deutschen oder lateinischen Artnamen oder nach deutschen oder lateinischen Familiennamen geordnet. Innerhalb der Liste kann man durch Texteingabe weitersuchen – oder mit dem Index auf der rechten Seite, wenn man genau weiß, was man sucht.

Antippen einer Art führt zu Detailinformationen mit allgemeinen Angaben, Beschreibung, ähnlichen Arten, Verwechslungsmöglichkeiten und Vorkommen sowie einem Link auf die zugehörige deutsche Wikipedia-Seite. Ein weiterer Reiter unten an der Seite bringt eine Reihe von Fotos von Habitus, Blättern, Blüten, Knospen und anderem, ein dritter allerlei Wissenswertes zu Kulturgeschichte und Verwendungszwecken. Immer hat man dabei die Möglichkeit, direkt zur vorherigen oder nachfolgenden Art in der Liste der Suchresultate zu springen, ohne dabei den Umweg über die Liste nehmen zu müssen. Ein vierter und letzter Reiter erlaubt es dem Benutzer, zur gefundenen Pflanze den Standort einzugeben – leider nicht von Hand, obwohl eine Karte von Google-Maps eingeblendet wird. Man muss den Ortungsdienst für die App freischalten, was viele nicht wollen, und kann keine Eintragung nachträglich vornehmen, etwa wenn man zu Hause die Pflanze genauer bestimmt hat.

So weit die gute Idee. An der Ausführung fehlt jedoch noch allerlei. So sind die Bilder in den Suchresultaten offensichtlich dem kleinen Display eines iPhone angepasst worden. Bei der auf iPad-Größe hochgerechneten Darstellung beginnen die Augen wegen der Unschärfen zu schmerzen. Auch bei den Fotos in den Detailinformationen kommt man bald an die Auflösungsgrenze der Bilder. Hineinzoomen, um Details anzuschauen, ist oft zwecklos.

Der Bestimmungsschlüssel ist so stark vereinfacht worden, dass er häufig seinen Zweck nicht erfüllt. Da kann

man nur entweder sehr präzise eingrenzen – und dann häufig den falschen Baum oder gar nichts finden – oder ungenau bleiben und dann aus einer größeren Resultatliste den richtigen Baum herausuchen. Manche hilfreichen Eigenschaften werden gänzlich ignoriert, wie die Blattbehaarung beim Wolligen Schneeball oder die Drüsen am Blattstiel bei *Prunus*-Arten.

Beispiel Esskastanie: Wählt man als Blattform nun besser »schmal« oder doch eher »eiförmig«? Die Auswahl »Blatt schmal, mit gezähntem oder gesägtem Rand, spitzer Spitze« in der Umgebung »sonstige Orte« ergibt sechs Baumarten, allesamt Nadelbäume! Ändert man die Blattform auf »eiförmig«, erhält man 33 Suchresultate und immer noch 27, wenn man die Nadelbäume ausschließt. Und wer der Meinung ist, die Blattspitzen »seines« Bergahorns seien spitz, wird nie und nimmer die Art korrekt bestimmen können.

Zu viel Blättern nach den Blättern

Wer die angebotenen Alternativen vergleichen will, hat es schwerer als bei einem Buch. Von dem Bild einer Blattform bis zum nächsten sind es viel zu viele Klicks, als dass man die erste im Kopf behalten könnte. Hier haben die Entwickler der Applikation nicht weit genug mitgedacht.

Auch andernorts wurden die Möglichkeiten des Mediums nicht ausgenutzt. Warum bietet das Programm zum Beispiel bei den Verwechslungsmöglichkeiten die anderen Arten nicht gleich als direkte Links an? Oder die Suchfunktion in der Artenliste: Erstens wandert das Suchfeld nach oben aus dem Bildschirm, wenn man in der Liste nach unten scrollt, und zweitens kann lediglich nach Namen und nicht etwa nach Beschreibungen gesucht werden.

Häufig vorkommende Arten wie Winterlinde, Apfel- und Birnbaum fehlen ebenso wie einige geläufige umgangssprachliche Namen. So gibt es zwar für *Carpinus betulus* die »Hainbuche«, aber nach »Weißbuche« oder »Hagebuche« sucht man vergeblich.

Zurück im Startbildschirm kann man über »Info« einiges Allgemeine

NEUES AUS DEM LESERSHOP

Kalender »Himmel und Erde 2012«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2012« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2012 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

www.spektrum.com/kalender2012



Spektrum CD-ROM 2010

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-941205-69-7

www.spektrum.com/recherche

Spektrum-Sammelordner

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



Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

🌐 online: spektrum.com/lesershop
@ E-Mail: service@spektrum.com
☎ Tel.: +49 6221 9126-743

📠 Fax: +49 6221 9126-751
✉ Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg



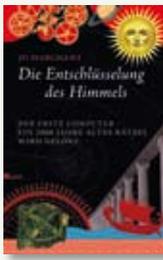
Barbara Strauch

Da geht noch was. Die überraschenden Fähigkeiten des erwachsenen Gehirns

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel. Berlin Verlag, Berlin 2011. 272 S., € 19,90

Sport tut dem Gehirn gut, auch und gerade in der zweiten Lebenshälfte. »Laufend« gewinnt es neue Zellen, und zwar besonders in Strukturen, die das Gedächtnis unterstützen. Barbara Strauch, Wissenschaftsredakteurin der »New York Times«, hat zahlreiche namhafte amerikanische Hirn- und Gedächtnisforscher im Labor besucht und fleißig neue Literatur zur Leistungskraft des Gehirns in mittleren und späteren Jahren studiert. Das Fazit: Erfreulicherweise legt unsere Geisteskraft im Lauf der Jahrzehnte durchaus zu. Ein erfrischend geschriebenes, mit vielen Anekdoten gespicktes Buch, das das Altwerden mit viel geistiger und sportlicher Betätigung attraktiv macht – was die Mitarbeiter der besuchten Forschungsstätten deswegen auch eifrig praktizieren.

ADELHEID STAHNKE



Jo Marchant

Die Entschlüsselung des Himmels. Der erste Computer – ein 2000 Jahre altes Rätsel wird gelöst

Aus dem Englischen von Monika Niehaus. Rowohlt, Reinbek 2011. 298 S., € 22,95

Die britische Wissenschaftsjournalistin Jo Marchant erzählt mitreißend und leichtfüßig eine spannende Geschichte: Der Metallklumpen, den Schwammtaucher 1901 vor der Insel Antikythera westlich von Kreta entdeckten, war nichts weniger als eine mechanische astronomische Uhr aus dem 2. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung. Erst mehr als 100 Jahre später gelang es, den Mechanismus fast vollständig zu entschlüsseln (Spektrum der Wissenschaft 5/2010, S. 62). Drei Wissenschaftler haben ihr ganzes Forscherleben dem antiken Computer gewidmet. Nebenbei stellt die Autorin den Fund in seinen geschichtlichen und astronomischen Kontext. Ein verständlich erklärtes Stück Wissenschaftsgeschichte – und wenn es zum Schluss darum geht, wer die Lösung zuerst veröffentlicht, wird es sogar richtig spannend!

BARBARA WOLFART



Michael Schmidt-Salomon und Lea Salomon

Leibniz war kein Butterkeks. Den großen und kleinen Fragen der Philosophie auf der Spur

Pendo, München 2011. 288 S., € 17,95

Lea Salomon (geboren 1990) ist nicht nur außergewöhnlich hübsch, sondern auch bemerkenswert scharfsinnig – und kooperativ. Jedenfalls gibt sie ihrem Vater, dem freischaffenden Philosophen Michael Schmidt-Salomon (geboren 1967), stets mit einer intelligenten Frage das richtige Stichwort, so dass dieser mit seinen Antworten eine runde Darstellung seiner persönlichen Philosophie liefern kann: humanistisch, hedonistisch, religionskritisch, freiheitsliebend, zahlreiche Ergebnisse der Natur- (vor allem Neuro-)wissenschaften aufgreifend und mit einer interessanten, wenn auch noch nicht ganz überzeugenden Denkfigur zur Willensfreiheit, die er in »Jenseits von Gut und Böse« (Pendo 2009) in einem ganzen Buch ausgebreitet hat. Kein Vergleich mit dem Kultbuch »Sofies Welt« von Jostein Gaarder; aber der Forderung seiner Tochter, sich doch endlich mal in verständlichem Deutsch auszudrücken, ist der Vater in vorbildlicher Weise nachgekommen.

CHRISTOPH PÖPPE



Don Lincoln

Die Weltmaschine. Der LHC und der Beginn einer neuen Physik

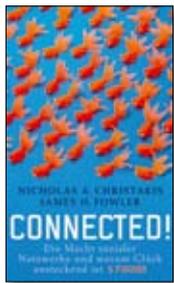
Aus dem Englischen von Thomas Filk. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011. 286 S., € 24,95

Schwierige Themen erfordern Vereinfachung. Darum reduzieren Berichterstatter den Large Hadron Collider bei Genf nicht selten auf eine Higgs-Maschine – als wäre das riesige Gerät nur gebaut worden, um ein lange gesuchtes Teilchen zu finden und damit unsere Weltsicht zu komplettieren. Hier jedoch fächert ein Teilchenphysiker die faszinierende Komplexität des Protonenbeschleunigers LHC und der in ihm erforschten Physik auf, ohne sein Laienpublikum allzusehr zu überfordern. Don Lincoln, der am Fermi National Accelerator Laboratory in der Nähe von Chicago arbeitet und selbst an einem der vier großen LHC-Experimente beteiligt ist, macht vor allem eins deutlich: Die Physik, die schon so viele große Entdeckungen verkündete, lebt bis in die Gegenwart davon, dass Unmengen grundlegender Fragen erst noch zu beantworten sind. Die Originalausgabe ist von 2009 und die deutsche Version nur leicht aktualisiert; aber das Paket ist so gut geschnürt, dass dies der Qualität des Buchs keinen Abbruch tut.

THILO KÖRKELE

finden, unter »Verwendungszweck« Pflanzen nach ihrer Nutzbarkeit als Salat, Tee oder Wildgemüse und ihrer Verwendung für Farbe, Heilung, Kosmetik, Likör, Marmelade und Öl auflisten lassen, unter »Sichtungen« Standorte eintragen und unter »Quiz« sein Wissen testen.

Dieser letzte Navigationspunkt macht wirklich Spaß. Man bekommt Bilder von verschiedenen Pflanzen präsentiert und muss aus drei vorgeschlagenen Artnamen den richtigen auswählen.



Nicholas A. Christakis und James H. Fowler

Connected!

Die Macht sozialer Netzwerke und warum Glück ansteckend ist

Aus dem Amerikanischen von Jürgen Neubauer.

S. Fischer, Frankfurt am Main 2010. 431 S., € 22,95

SOZIOLOGIE

Der Netzwerk Mensch

Wir sind in unseren Entscheidungen weniger frei, als wir denken. Denn Verhaltensmuster und Gefühle werden wie Infektionen über soziale Netze transportiert. Eine durchwachsene, aber lesenswerte Sammlung von Befunden aus der Soziologie.

Am 30. Januar 1962 brechen drei junge Mädchen in unkontrolliertes Gelächter aus. Kein ungewöhnlicher Vorfall auf dem Internat in Tansania. Aber der Lachzwang greift über: Acht Wochen später sind bereits drei Viertel der Schülerinnen von den Lachanfällen betroffen, was zur Schließung der Schule führt. Die Symptome der Krankheit übertragen sich jedoch weiter auf die Heimatdörfer der Mädchen. Die zur Studie dieser Lachepidemie angereisten Wissenschaftler vermerken in ihren Berichten trocken: »Glücklicherweise waren keine Todesfälle zu verzeichnen.«

Anhand dieser wahren Begebenheit zeigen Nicholas A. Christakis, Mediziner und Soziologe an der Harvard University, und sein Kollege James H. Fowler, Politikwissenschaftler an der University of California in San Diego, dass

len. Geschwindigkeit bringt Punkte, und mehrere Teilnehmer können um die Wette spielen.

Alles in allem macht die App einen noch unausgegorenen Eindruck. Warten wir lieber ab, ob die nächste Version besser wird.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplombiologe und arbeitet als IT Support Engineer beim Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg.

sich Informationen und Gefühle auf dieselbe Weise über soziale Netze verbreiten wie ansteckende Krankheiten. Das gelte nicht nur für Lachanfälle, sondern auch für die Neigung zum Übergewicht oder gar zum Selbstmord. Dem Einfluss der zwischenmenschlichen Geflechte kann sich überdies niemand entziehen – doch profitieren Menschen auch von diesen Verbindungen, etwa bei politischen Wahlen, der Partnersuche und auf dem Karriereweg.

In ihrem Buch analysieren die Autoren eine große Anzahl von Daten über derartige Beziehungsnetze, von amerikanischen Highschools über ganze Kleinstädte bis zu dem gigantischen Onlinenetz »Facebook«. Die kolossale Informationsmenge ist eine Stärke des Buchs – verleitet die Wissenschaftler jedoch auch zu der einen oder anderen

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

VIDEOS

AUS DER WISSENSCHAFT –
SPANNEND UND INFORMATIV

Astronomie

Uni(versum) für alle!



Halbe Heidelberg Sternstunden: In Kurzvorträgen beantworten Heidelberger Astronomen nach und nach 70 Fragen über unser Universum.

ÖKOLOGIE

Viel mehr als nur lästig



Die Befürchtungen sind nicht neu: Könnten Pinguine, die zu Forschungszwecken markiert wurden, unter den an ihren Flügeln angebrachten Metallbändern leiden? Nun hat eine Langzeitstudie Belege geliefert.

STREITGESPRÄCH

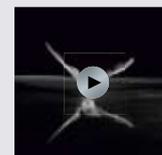
Der modellierte Patient



Vor welche ethischen Herausforderungen stellt uns die individualisierte Medizin? Ein kritischer Dialog mit dem Genetiker Hans Lehrach und dem Philosophen Urban Wiesing.

KOGNITIONSFORSCHUNG

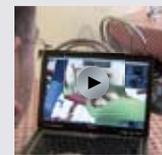
Der akustische Spiegel



Dass Fledermäuse ihre Beute per Echoortung identifizieren, ist lange bekannt. Doch woher wissen sie, ob unter ihnen eine ausgedehnte Wasserfläche liegt?

BIOCHEMIE

Foldit – das Onlinespiel zur Proteinfaltung



Erst die dreidimensionale Struktur, zu der sich ein Protein faltet, entscheidet darüber, welche Funktion es im Körper übernimmt. Doch wie findet man anhand der DNA-Sequenz des Proteins heraus, welche Struktur es einnehmen wird?

Übertreibung. Beispielsweise proklamieren sie das »Gesetz der drei Schritte«: Jeder von uns hat einen Einfluss auf durchschnittlich 20 »Freunde« (unter dieser Bezeichnung fassen die Autoren Familienangehörige, Freunde und Kollegen zusammen). Über seine 20 Freunde hinaus übt ein Mensch einen indirekten Einfluss auf deren 400 Freunde aus, und in der dritten Stufe beeinflusst angeblich jeder mit seinem Handeln und seiner Lebensweise 8000 Personen. Ob es nun genau drei Schritte sein müssen, wage ich zu bezweifeln. Und das simple Rechenbeispiel berücksichtigt nicht, dass unter den Freunden meiner Freunde die meisten auch miteinander bekannt sind. Aber die Vorstellung ist aufregend und erschreckend zugleich: Nicht nur ich übe Einfluss auf eine große Anzahl von unbekanntem Menschen aus – ich selbst bin diesem ebenso ausgesetzt.

In der Tat ist das globale soziale Netz dichter geknüpft, als man denkt. »Die Welt ist ein Dorf«: Ich treffe im letzten Sommerurlaub am anderen Ende der Welt einen Fremden, der mit einem Schulfreund aus der Heimat bekannt ist. Christakis und Fowler bestätigen durch ihre Studien die alte Weisheit, dass das kein Einzelfall ist: Jeder Mensch ist mit jedem anderen über durchschnittlich sechs Schritte verbunden.

Sehr interessant liest sich im weiteren Verlauf, wie Partnersuche in Zeiten der globalen Vernetztheit stattfindet, auf welche Weise eine Finanzkrise durch die über das Netz vermittelte Panik noch verschlimmert wird und wie ein Suizid eine Welle von Nachahmungstaten anregt. Der Abschnitt, in dem die Autoren die Beziehungsflechte amerikanischer Politiker aufdröseln, liest sich etwas mühsam, da die zahlreichen Namen beim europäischen Leser keinen Aha-Effekt hervorrufen. Aufschlussreich, jedoch nicht zur

Gänge neu, beschreiben die Autoren aber, wie soziale Netze Massen von Menschen mobilisieren. So wirke ein Gang zur Wahlurne über die schlichte Stimmabgabe hinaus als Ansporn auf bis zu 100 andere Wähler.

»Warum Glück ansteckend wirkt« ist das einzige Kapitel, in dem es um das auf dem Buchtitel angepriesene Glücksversprechen geht. Aus ihrer Studie über 12000 Einwohner eines amerikanischen Orts ziehen Christakis und Fowler den Schluss, dass das Wonnegefühl

Wie misst man nach, ob mein glücklicher Freund mich 15 Prozent glücklicher macht?

glücklicher Menschen abfärbe und man sich deshalb in ihrer räumlichen Umgebung aufhalten solle, und zwar in einem Radius von eineinhalb Kilometern. Glückliche Freunde machen uns demnach um 15 Prozent glücklicher. Die Freunde unserer Freunde liefern immerhin noch einen Glückszuwachs von zehn Prozent, und das Glück eines Freundes des Freundes unseres Freundes hat noch einen Einfluss von sechs Prozent auf uns – das »Gesetz der drei Schritte« lässt grüßen. So versetzt uns das Glück eines unbekanntem Menschen in einen freudigeren Zustand als ein zusätzliches Jahreseinkommen von 10000 Dollar, das, so die Autoren, nur eine Glückssteigerung von zwei Prozent ausmacht. Da drängt sich die Frage auf, wie die Forscher das Glück der einzelnen Probanden gemessen haben wollen. Bin ich von einem geselligen Sonntagsfrühstück mit einem glücklichen Freund 15 Prozent glücklicher nach Hause gekommen? Und wenn ja, wie habe ich das bemerkt? Wie ist mein Maßstab für Glück mit dem anderer Menschen vergleichbar?

Sehr viel glücklicher gelingt den Autoren dann kurz vor Schluss noch die Geburt eines neuen Menschentyps, auch wenn sie mit zwei Seiten zu kurz ausfällt. Dem bekannten »Homo oeconomicus«, dem selbstsüchtigen, gewinnorientierten, autonomen Menschen der Wirtschaftswissenschaftler, stellen sie den »Homo dictyous« gegen-

über, den Netzwerkmenschen, nach dem lateinischen Wort *homo* für Mensch und dem griechischen *diktyon* für Netzwerk. Menschen handeln nach Ansicht der Autoren viel öfter im Interesse ihres sozialen Netzwerks als nur in ihrem eigenen. Damit verändern sie das Leben anderer – mit einem Ergebnis, das der klassischen Wettbewerbstheorie widerspricht. Beispielsweise wenn die Leute »aufgrund der menschlichen Tendenz, das zu wollen, was andere wollen, und die Entscheidung an-

derer als Orientierungshilfe zu verstehen«, ihre Entscheidungen nicht mehr unabhängig voneinander treffen.

Am Ende bleibt die Erkenntnis, dass jeder Einzelne nicht so frei über sein Leben entscheidet, wie er annimmt, wenn er dem ständigen Einfluss seines sozialen Netzes ausgesetzt ist. Während die Abhandlung über die Ausbreitung von Geschlechtskrankheiten im ersten Teil des Buchs überlang geraten ist, knausern Christakis und Fowler am Ende leider bei der Aufarbeitung dieser zentralen These. Ihnen geht es eher um die Prozesse, die in sozialen Netzen ablaufen. So wollen sie zur Lösung gesellschaftlicher Probleme wie Infektionskrankheiten, Armut, Trink- und Spielsucht beitragen, indem sie die Zentren der Ausbreitung ausfindig machen.

Da die Themen kaum aufeinander aufbauen, gestaltet sich das Buch nicht zur fesselnden Lektüre. Man erfährt jedoch eine Menge über die Vorgehensweise bei soziologischen Studien. Insgesamt bietet »Connected« in neun Kapiteln einen bunten Blumenstrauß an Netzwerkanalysen: vom Wahlkampf des Barack Obama über die virtuelle Welt des Internet-Rollenspiels »World of Warcraft« bis zurück zum Mädcheninternat in Tansania.

Sabrina Hüttermann

Die Rezensentin studiert in Aachen Georessourcenmanagement und ist freie Journalistin im Netz der Wissenschaft.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Die Explosion nach dem Urknall

Nach Überzeugung der meisten Kosmologen hat sich das Universum unmittelbar nach dem Urknall extrem rasch aufgebläht. Doch dieses Szenario der »kosmischen Inflation« stürzt die Theoretiker in neue Probleme



MALCOLM GODWIN

Neue Waffen gegen Malaria

Nach jahrelanger Entwicklung stehen endlich viel versprechende Impfstoffe vor der Einführung. Daneben verfolgen Forscher aber auch noch andere, oft skurril anmutende Strategien gegen die tödliche Seuche: Sie impfen die krankheitsübertragenden Mücken – und analysieren deren Geruchsrezeptoren

Live dabei dank Röntgenlicht

In Hamburg entsteht die wohl längste Lichtquelle der Welt: ein 3,4 Kilometer langer, unterirdischer Röntgenlaser. Der XFEL eröffnet besseren Zugang zur Welt des Lebendigen. Mit ihm lassen sich binnen Tagen 3-D-Strukturen komplexer Biomoleküle aufklären oder chemische Reaktionen live verfolgen



GREAT APPE TRUST

Intelligenz bei Tieren

Viele Tiere, allen voran Schimpansen und Delfine, erbringen eindrucksvolle kognitive Leistungen, die manchmal sogar auf menschenähnliche Intelligenz hindeuten. Erst jetzt beginnen Forscher ihre komplexen Fähigkeiten und sozialen Interaktionen richtig zu verstehen



DPA / AIR PHOTO SERVICE / HD

Fukushima-Katastrophe

Das japanische Erdbeben löste in mindestens drei Reaktorblöcken eine Kernschmelze aus – und führte zu erhitzten Debatten in Japan und Deutschland. Wir vergleichen die unterschiedlichen Sicherheitskonzepte beider Länder

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter