

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SEPTEMBER 2011

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT  
9/11

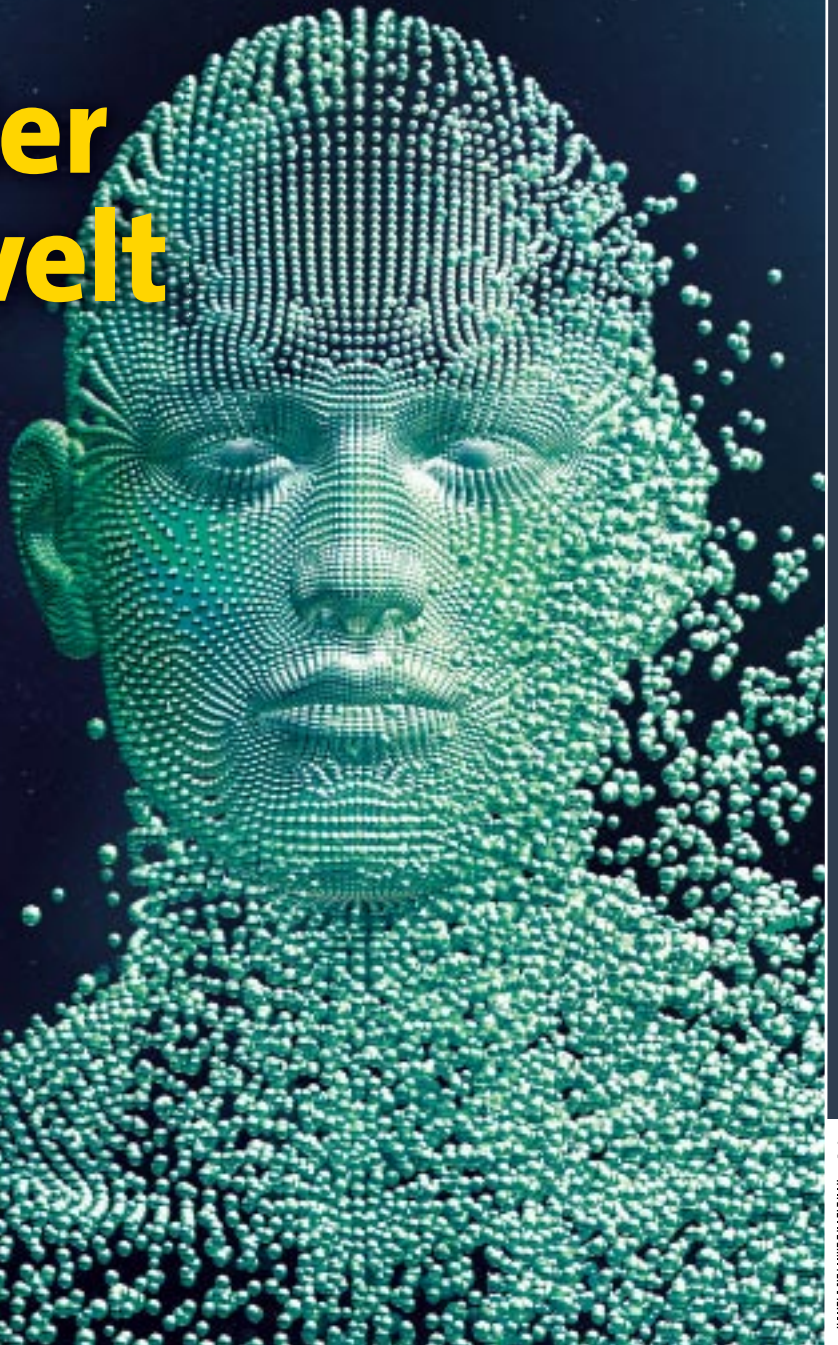
KROKODILE  
Die Sprache  
der Panzerechsen

GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ  
Die meisten Werke des Universal-  
genies harren noch ihrer Publikation

XENOHORMONE  
Weichmacher und Pestizide  
stören Zellfunktionen

## Leben in der Quantenwelt

Gelten die  
Gesetze des Mikro-  
kosmos auch im  
großen Maßstab?



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







Carsten Könneker  
Chefredakteur  
koenneker@spektrum.com

## Neue Ideen, neue Horizonte

Das Titelthema dieses Hefts sorgte unter uns Redakteuren für einige Diskussion: Wie spekulativ darf ein »Spektrum«-Artikel sein? Es geht um die fundamentale Frage, ob die Gesetze der Quantenmechanik auch in lebenden Organismen wirksam sind. In makroskopischen Kristallen hatten Forscher bereits Quantenphänomene nachgewiesen – doch in Pflanzen und Tieren? Vlatko Vedral, Physikprofessor in Oxford und ein Spezialist für Quantenverschränkung in Vielteilchensystemen, erläutert ab S. 32, warum möglicherweise etwa die Magnetfeldwahrnehmung von Vögeln und die Fotosynthese auf Quanteneffekten beruhen – ein sehr anregender Beitrag, finde ich!



### Nicht minder spannend ist ein neues Projekt der Redaktion:

Ihr »Spektrum der Wissenschaft« hat Nachwuchs bekommen! In den vergangenen Monaten haben wir gemeinsam mit Didaktikexperten des Leibniz-Instituts für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN) in Kiel eine Themenheftreihe entwickelt, die Kindern und Jugendlichen zwischen 10 und 14 Jahren Wissenschaft authentisch nahebringen soll: »Spektrum neo«. Jede Ausgabe präsentiert ein ausgewähltes Wissenschaftsgebiet auf dem neuesten Stand der Forschung – natürlich speziell für diese Zielgruppe in Szene gesetzt. Das allein wäre noch nichts Besonderes. Doch darüber hinaus erklären wir den jungen Leserinnen und Lesern auch, wie Wissen-

schaft funktioniert: wie Forscher ihre Ideen entwickeln, Hypothesen aufstellen, Experimente ersinnen, Ergebnisse prüfen und interpretieren. Hier ist »Spektrum« ganz bei sich selbst. Denn auch im vorliegenden Mutterblatt sind wir unmittelbar dran an den führenden Protagonisten der Forschung; diese sind schließlich unsere Autoren.

Rund 300 000 Wissenschaftler gibt es in Deutschland. Was sie machen, welche Beiträge sie zur Entwicklung unserer Gesellschaft, unseres alltäglichen Lebens, unseres Wohlstands leisten, welche Probleme sie angehen – und vor welche neuen ethischen und technologischen Schwierigkeiten sie dabei gestellt werden –, all das ist noch immer zu wenig allgemein bekannt. Wenn Kinder über die neue Reihe Einblicke in diese verborgene Welt der Labors und Institute erhalten, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler als Rollenvorbilder entdecken und obendrein Spaß haben, ihre natürliche Neugier zu befriedigen, dann erreicht »Spektrum neo«, was ich mir von dem Projekt erhoffe.

Herzlich Ihr

*Carl Mönzel*

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



Brüllen, brummen, quaken – um sich zu verständigen, nutzen Krokodile ein erstaunliches Repertoire an Lauten. Die Neuroethologen **Nicolas Mathevon** von der Universität de Saint-Étienne und **Amélie Vergne** von der Universität de Montpellier stellen es ab S. 22 vor.



Der Physiker **Vlatko Vedral** von der University of Oxford vermutet, dass die Gesetze der Quantenmechanik auch in lebenden Organismen zum Tragen kommen (S. 32).



Kaum zu glauben: Noch immer wartet der Großteil der Schriften von Gottfried Wilhelm Leibniz auf seine Erstpublikation. Warum, erklärt der Leibniz-Herausgeber und Wissenschaftshistoriker **Eberhard Knobloch** ab S. 48.



BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

► 22 Ruf der Krokodile

*Nicolas Mathevon, Amélié Vergne*

Die gefürchteten Panzerechsen kommunizieren mit ihresgleichen über ganz verschiedene Töne: Sie quaken, grollen, bellen und zischen in allerlei Nuancen. Das beginnt schon im Ei, setzt sich zwischen Müttern und ihrem Nachwuchs fort und äußert sich eindrucksvoll im Revierkampf und beim Paarungstanz

► 32 Leben in der Quantenwelt

*Vlatko Vedral*

Nicht nur im Mikrokosmos gelten quantenmechanische Gesetze. Vielleicht machen sich sogar Pflanzen bei der Fotosynthese oder Zugvögel bei der Orientierung Quanteneffekte zu Nutze

SCHLICHTING!

40 Spiegelwelt mit Fehlern

*H. Joachim Schlichting*

Der Sonnenreflex in einem Fenster zeigt sich in dessen Spiegelbild an unerwarteter Stelle

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

42 Das Alabaster-Suppenhuhn

*Thomas Rubitzko*

Infrarotfotografie mit der Digitalkamera

► 48 Die Kunst, Leibniz herauszugeben

*Eberhard Knobloch*

Fast 300 Jahre nach seinem Tod ist der umfangreiche Nachlass des letzten Universalgenies Gottfried Wilhelm Leibniz noch immer nicht vollständig veröffentlicht; doch inzwischen gibt es Fortschritte

58 Ein neues Standbein für die statistische Physik

*Daniel Meyer, Dierk Schleicher*

Für die theoretische Fundierung physikalischer Modelle für Magnetismus und poröse Medien erhielt der russische Mathematiker Stanislav Smirnov die renommierte Fields-Medaille

Titelmotiv: Kenn Brown, Mondolithic Studios [M]

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet

## TITELTHEMA

# Leben in der Quantenwelt



## ERDE &amp; UMWELT

## ► 66 Hormonhaushalt in Gefahr

Marie Tohmé, Jean-Pierre Cravedi, Vincent Laudet

Hormonelle Störenfriede, auch endokrine Disruptoren genannt, lauern in vielen Kunststoffen. Sie bedrohen die Natur und darüber hinaus unsere Gesundheit

SONDERTEIL NACH SEITE 88



### Die Zukunft des Gehirns

Von der Vermessung der Gedanken bis zum optimierten Menschen

## TECHNIK &amp; COMPUTER

## ► DIE ZUKUNFT DER MOBILITÄT

### 76 Ein nationaler Fahrplan aus dem Computer

Christoph Pöppe

Der Eisenbahnbetrieb der Niederlande wurde mit mathematischer Software völlig neu entworfen

### 82 Der simulierte Stau

Martin Treiber

Verkehrsforscher erklären kollektive Phänomene aus dem individuellen Verhalten der Autofahrer

### 86 Die Autobahn als Fließband

Martin Lauer

Elektronisch gekoppelte Fahrzeuge im dichten Pulk nutzen die Straße weit effizienter

## SPEKTROGRAMM

8 Neutrinos enthüllen radioaktive Heizung des Erdinneren • Plutos vierter Mond • Magmablase beschleunigte Indien und bremste Afrika • Schnecken überleben Darmassage • Aggressive Sauerstoffverbindungen bremsen Tumoren • Meeresgrund steckt voller Seltener Erden

## BILD DES MONATS

## 11 Turbulente Szenen

## FORSCHUNG AKTUELL

## 12 Völlig losgelöst

Population von Exoplaneten ohne Zentralstern entdeckt

## 14 Makrophagen blockieren Chemotherapie

Immunzellen im Dienst des Tumors

## 17 Knockout für Gendoping

Neuer Dopingtest erkennt eingeschleuste Gene

## 19 Gravitation unterm Mikroskop

Mit ultrakalten Neutronen vermessen Physiker die Schwerkraft bei kleinsten Abständen

## 20 Springers Einwürfe

Wozu sind Männchen gut?

## WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

89 Rezensionen

Leonard Susskind:

Der Krieg um das Schwarze Loch

Johann Caspar Rüegg:

Mind & Body

Paul Murdin:

Die Kartenmacher

Helmut Zander:

Rudolf Steiner

u. a.

98 Wissenschaft im Rückblick

Vom Wellenkraftwerk zum Roboter

99 Exponat des Monats

Höhensonne dank Wirtschaftswunder

102 Vorschau



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

## Cartesisches Dilemma nicht lösbar

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)

**Christian Krippenstapel, Heiligenhafen:** Wie Brendel richtig bemerkt, konnte das cartesische Dilemma, ob tatsächlich irgendetwas außer dem Selbst

existiert, bis heute nicht gelöst werden. Das wird nicht nur in der genannten »Matrix«-Trilogie thematisiert, sondern gilt allgemein als Grundübel der Philosophie, der viele gar keine Relevanz für das tägliche Leben zuerkennen, weil sie nach wie vor darüber streitet, ob die Welt wirklich existiert, während andere versuchen, Übel wie Kriege, Hunger, Klimawandel von ihr abzuwenden. Hilfreich finde ich dabei das genannte »Gehirn im Tank«-Experiment von Putnam, in dem das (carte-

sische) Selbst in einem Gehirn mit der Außenwelt lediglich über Nervenimpulse interagiert. Obwohl wir nicht einmal sicher sein können, dass besagtes Gehirn nicht auch bloß eine Illusion ist, müssen wir als Materialisten dennoch davon ausgehen, dass es irgendetwas Stoffliches geben muss, in dem die zu Grunde liegenden Vorgänge ablaufen und dem wir getrost die Qualität »Gehirn« zuerkennen dürfen.

**Gerhard Taake, Paderborn:** Elke Brendel setzt sich in ihrem Artikel mit den Skeptikern auseinander, die es für möglich halten, dass die Welt, die wir mit unseren Sinnen aufnehmen, nur eine Täuschung ist.

Meine These lautet: Es gibt keine ernst zu nehmenden Skeptiker. Hier der Beweis:

1. Ich selbst bin kein Skeptiker.
2. Aber in meiner Umwelt könnte es Skeptiker geben. Dann gibt es zwei Möglichkeiten: Sie haben Recht, und die von mir wahrgenommene Welt ist lediglich eine Täuschung; oder sie haben nicht Recht.
3. Wenn sie nicht Recht haben, sind sie nicht ernst zu nehmen.
4. Wenn sie Recht haben, gehören sie zu der vorgetäuschten Welt, die ich mit meinen Sinnen wahrnehme. Die Skep-

## 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 (Spektrogramm), 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 Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Redaktionsassistenten:** 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 wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Michael Springer  
**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 5dW zum Vorzugspreis.  
**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenvertretung:** Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: 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, branchenteam@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 Inchoombe, 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.



tiker sind dann selbst eine Täuschung, und es gibt sie gar nicht.

**Thomas Schmidt, Pullach:** Den Vertretern des Skeptizismus fehlt die empirische Basis für ihre Behauptung, dass wir in einer Scheinwelt leben. Es ist eine reine Fantasieannahme, die zwar in gewisser Weise amüsant ist, für die es aber keine Beweise gibt. Solche Fantasieannahmen lassen sich allerdings auch nicht widerlegen, da es erkenntnistheoretisch unmöglich ist, einen positiven Beweis für eine Nichtexistenz (hier die Nichtexistenz der postulierten Scheinwelt) zu führen.

Deshalb stimme ich der Autorin zu, dass dann, wenn objektiv nichts für eine globale Täuschung spricht, also wenn keine reproduzierbaren Daten für eine Täuschung vorliegen, eine von uns unabhängige Außenwelt angenommen werden darf und ein Wissen darüber möglich ist. Wozu haben wir denn unsere Sinnesorgane, wenn es außerhalb unseres Selbst nichts geben soll, das sinnlich wahrnehmbar ist?

## Sind Windkraftwerke die Ursache?

*Der Meteorologe Sven Titz beschrieb die Suche nach Erklärungen, warum der Wind über dem Meer zunimmt – und über dem Land ab. (»Umzug der Winde«, Juli 2011, S. 14)*

**Eduard Heindl, Furtwangen:** Wenn man beobachtet, dass die Windgeschwindigkeit an Land abnimmt, und zugleich weiß, dass inzwischen fast für 200 Gigawatt Windkraftwerke weltweit installiert sind, dann erhebt sich die Frage, ob das einen merklichen Einfluss auf die Windgeschwindigkeit an Land hat. Insbesondere, wenn man auf See das Gegenteil misst.

Nach meiner Beobachtung gibt es nicht sonderlich viele Hochhäuser mit über 100 Metern, und auch die umfangreichen Aufforstungen, die als Grund genannt werden, überzeugen nicht, wenn man gleichzeitig den Ausbau der Windkraft unberücksichtigt lässt.

## Emotion als vorweggenommene Reaktion

*Sabina A. Döring versuchte, der Natur der Gefühle auf den Grund zu gehen. (»Gefühl und Vernunft«, Mai 2011, S. 64)*

**Georg Tatzel, Winnenden:** Meiner Meinung nach extrapoliert unser Hirn nicht eine einzige Zukunft, sondern verschiedene Zukünfte mit verschiedenen Gewichtungen der Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieser Zukünfte. Wenn nun »im Licht besseren Wissens« diese Zukunft widerlegt ist, heißt das noch nicht, dass ihre Repräsentanz im Hirn gelöscht ist. Sie lebt weiter, je stärker sie war. Sie hat sozusagen Trägheit. Unser Hirn hat ja Erfahrung mit mehreren Repräsentationen, und das sogenannte bessere Wissen ist zunächst, in diesem Sinn, nur eine weitere Repräsentation von Zukunft, wenn auch, für die meisten Menschen, eine besonders starke. Mit diesem Ansatz kann man auch erklären, dass »eine Emotion uns dazu bewegt, ein Werturteil zu fällen, das wir andernfalls nicht gefällt hätten«.

Im »Huckleberry Finn«-Beispiel wird das sehr deutlich. Die reine Vernunft kann sich nur auf Bekanntes beziehen. Sie geht von Prämissen aus und versucht aus diesen Prämissen Folgerungen zu ziehen. Zu diesen Prämissen zählt, dass Jim als Sklave kein Recht auf Freiheit hat. In den extrapolierten Zukünften als Teil der vom Hirn vielleicht unbewusst wahrgenommenen Realitäten liegen aber andere Prämissen vor. In der Extrapolation liegt für Huckleberry ein anderes Leben, ein Leben in Freundschaft mit einem freien Jim, im Hirn vor.

## DNA dreht sich rechts

*Das Titelbild der Juli-Ausgabe zeigte eine linksdrehende DNA-Helix, da die Grafik aus optischen Gründen gespiegelt wurde.*

**Siegfried Krainer, Österreich:** Auf der Titelseite des Hefts 7/2011 ist eine linksdrehende DNA abgebildet (im Heft ist

FOLGEN SIE UNS  
IM INTERNET



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



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



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



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

sie rechtehend dargestellt). Es gibt in der Natur eine linksdrehende Form von DNA, die Z-DNA (von Zig-Zag). Man findet sie in GC-reichen Sequenzabschnitten; ich nehme aber nicht an, dass diese metastabile Form gemeint war.

Übrigens ist die Frage der Bevorzugung der rechten Drehrichtung bei Nucleinsäuren nicht hinreichend geklärt, und es ist möglich, synthetisch spiegelsymmetrische Nucleinsäuren zu erzeugen (nicht Z-DNA, sondern echt linksdrehende A-DNA und B-DNA-Strukturen). Die Natur dreht zwar rechts, es scheint aber eine psychologische Bevorzugung im künstlerischen Bereich für linksdrehende Strukturen zu geben: Linksdrehende DNA findet sich sogar in High Impact Journals, auf Titelseiten von Fachbüchern und in Firmenlogos.

## BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://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](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

GEOTHERMIK

# Neutrinos enthüllen radioaktive Heizung des Erdinneren

Die Erde strahlt rund 44 Terawatt (Billionen Watt) Wärme ins All ab. Gut die Hälfte davon stammt von zerfallenden Radioisotopen, errechneten jetzt japanische Forscher auf der Basis von Neutrinodaten des Detektors KamLAND (Kamioka Liquid Scintillator

Antineutrino Detector) bei Kamioka in Japan. Das Wissenschaftlerteam zählte Antineutrinos aus dem Erdinneren, die beim Zerfall von Uran-238 und Thorium-232 entstehen, und leiteten daraus die Konzentration der beiden Elemente ab. Insgesamt erzeugen diese Radioisotope demnach 20 Terawatt Wärme; hinzu kommen etwa vier Terawatt, im Wesentlichen von Kalium-40. Die restlichen 20 Terawatt, welche die Erde abstrahlt, dürften wohl noch von der Entstehung des Planeten herrühren.

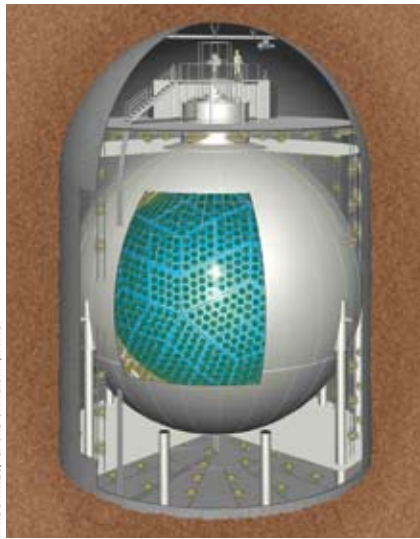
Der KamLAND-Detektor ist ein kugelförmiger Tank mit einem speziellen, einen Fluoreszenzfarbstoff enthaltenden Mineralölgemisch, in dem

die seltenen Zusammenstöße von Neutrinos mit Protonen Lichtblitze erzeugen. Zwischen März 2002 und November 2009 registrierten die Detektoren in der Wand des Tanks insgesamt 841 Antineutrinos. Der Großteil stammt von den Uran- und Plutoniumisotopen der Atomreaktoren Japans. Anhand der bekannten Leistungsdaten der Kraftwerke gelang es den Forschern jedoch, dieses Signal herauszurechnen. Übrig blieben rund 100 Ereignisse, die ihren Ursprung im Erdinneren haben. Das genügte, um die Konzentration der Radioisotope hinreichend genau zu bestimmen.

Die Ergebnisse könnten die Kenntnis über das Erdinnere erweitern, insbesondere über die Dynamik des Erdmantels. Dort trägt die Zerfallswärme beträchtlich zur Konvektion bei, die geophysikalische Phänomene wie die Plattentektonik antreibt (siehe rechts).

*Nature Geosci. 10.1038/ngeo1205, 2011*

**Der kugelförmige Tank des KamLAND-Detektors enthält 1000 Tonnen Szintillatorflüssigkeit. Insgesamt 1879 Fotodetektoren in der Wand nehmen die Neutrinospinale auf.**



ITARU SHIMIZU, TOHOKU-UNIVERSITÄT, MIYAGI

PLANETEN

# Plutos vierter Mond

Bei der Suche nach möglichen Ringen um den Zwergplaneten Pluto stieß ein Forscherteam um Mark Showalter am SETI Institute in Mountain View, US-Bundesstaat Kalifornien, mit dem Weltraumteleskop Hubble auf einen bislang unbekanntem Mond. P4 oder S/2011 P1, so die provisorischen Bezeichnungen des Begleiters, ist zwischen 13 und 34 Kilometer groß und umrundet Pluto in einem Abstand von 59 000 Kilometern innerhalb von 32 Tagen. Damit zieht er seine Bahn zwischen den Umlaufbahnen der bereits 2005 ebenfalls mit Hubble entdeckten Monde Nix und Hydra.

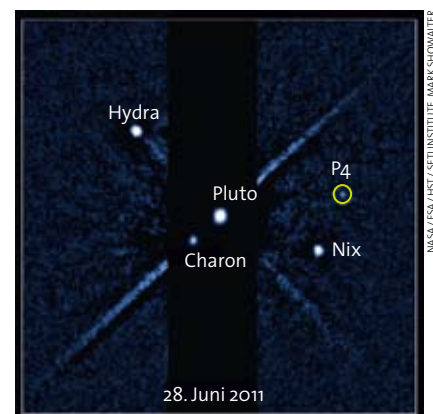
Der neue Trabant war den Beobachtern zum ersten Mal am 28. Juni 2011 aufgefallen. Auf früheren Bildern von Hubble hatte man den Mond nicht entdeckt, da die Belichtungszeiten zu kurz waren. Weil die Forscher aber

diesmal nach äußerst lichtschwachen Staubringen um Pluto suchten, wurden die neuen Bilder wesentlich länger belichtet – und P4 zeigte sich auf ihnen als unauffälliger Punkt.

Bereits 1978 entdeckte James Walter Christy den ersten Plutomond Charon, der mit rund 1200 Kilometer Durchmesser etwa halb so groß wie Pluto selbst ist. Die Durchmesser der Monde Nix und Hydra dürften zwischen 40 und 160 Kilometer liegen. Experten gehen davon aus, dass alle Monde des Zwergplaneten das Ergebnis einer heftigen Kollision in der Frühzeit des Sonnensystems vor mehr als 4,5 Milli-

arden Jahren sind. Damals könnte ein größeres Objekt mit dem Protopluto kollidiert sein, wobei rund ein Achtel seiner Masse herausgesprengt wurde. Aus ihr entstanden dann die Monde – und eben vielleicht ein Ring aus feinen Partikeln um Pluto. Darauf allerdings fanden sich auch auf den neuen Bildern keinerlei Hinweise.

**Neben dem großen Charon und den kleineren Monden Nix und Hydra zieht auch der neu entdeckte P4 (im gelben Kreis) seine Bahn um den Zwergplaneten Pluto.**



NASA / ESA / HST / SETI INSTITUTE, MARK SHOWALTER



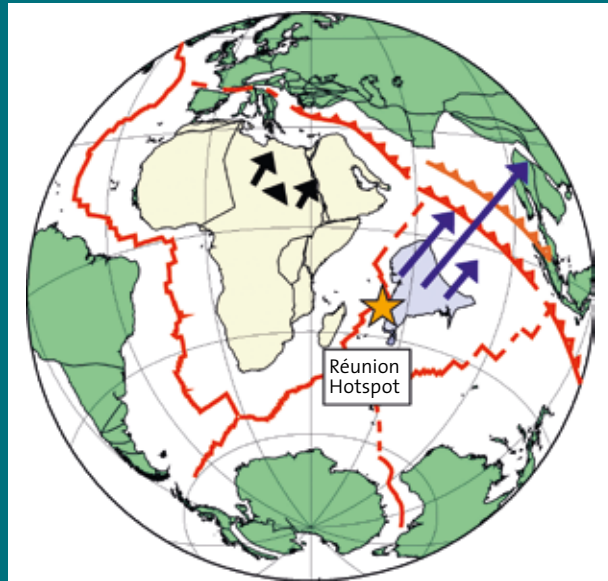
## PLATTENTEKTONIK

## Magmablase beschleunigte Indien und bremste Afrika

Vor rund 150 Millionen Jahren brach der Superkontinent Gondwana auseinander, und Indien begann nach Norden Richtung Asien zu driften. Auf diesem Weg beschleunigte sich die Platte vor etwa 70 Millionen Jahren ziemlich rasant, während sich gleichzeitig enorme Mengen Lava auf das heutige Hochland von Dekkan ergossen. Beides hängt wohl eng miteinander zusammen, stellten nun Steve Cande von der Scripps Institution of Oceanography an der University of California in San Diego und seine Kollegen fest. Denn der Subkontinent bewegte sich damals über einen neu entstandenen so genannten Mantel-Plume (Manteldiapir) im Indischen Ozean hinweg. Dabei handelt es sich um eine Blase aus heißem und geschmolzenem Gestein, die in abgeschwächter Form auch heute noch aktiv ist: Sie speist den aktiven Vulkanismus auf der Insel Réunion.

Die Wanderung des Subkontinents beschleunigte sich damals zusätzlich durch konvektive Kräfte im Réunion-Plume: Statt mit nur zwei Zentimetern pro Jahr bewegte sich die Platte über einen Zeitraum von knapp 20 Millionen Jahren zehnmal so schnell nach Nordosten. Zugleich drang Magma bis an die Oberfläche der Landmasse vor. Es ergoss sich über eine halbe Million Quadratkilometer und umfasste rund 500 000 Kubikkilometer Material. Nach Auswertung ihrer Gesteinsdaten sind sich die Forscher sicher, dass beide Ereignisse ursächlich zusammenhängen.

Umgekehrt sorgte der Plume dafür, dass sich Afrikas Tempo verlangsamte – vor allem die gegen den Uhrzeigersinn gerichtete Drehbewegung dieser Platte Richtung



Vor 63 Millionen Jahren: Die indische Platte driftet nordwärts.

Eurasien erlahmte und kam fast zum Erliegen. Der Kontinent wurde zwischen dem Plume und drei Spreizungszonen im mittleren und südlichen Atlantik sowie im Indischen Ozean eingeklemmt und lagestabil gehalten. Erst nachdem Indien über den Plume hinweggedriftet war und dessen konvektive Kräfte nachließen, bewegte sich auch Afrika wieder langsam nach Nordwesten. Zugleich nahm die Geschwindigkeit der Indischen Platte ab, auf Werte zwischen drei und fünf Zentimeter pro Jahr.

*Nature 475, S. 47–52, 2011*

## BIOLOGIE

## Schnecken überleben Darmassage

Die japanische Schneckenart *Tornatellides boeningi* besitzt eine für landlebende Mollusken höchst außergewöhnliche Ausbreitungsstrategie: Sie überlebt in nennenswerter Zahl im Darm von Vögeln und wird so großflächig über ihre Heimat, die Insel Hahajima, verbreitet, wie Biologen um Shinihiro Wada von der Tohoku-Universität entdeckten. Die Forscher hatten zuvor festgestellt, dass die genetische Vielfalt der nur 2,5 Millimeter großen Tiere im gesamten Verbreitungsgebiet außerordentlich hoch ist. Normalerweise kommen Schneckenarten auf der Insel

nur in isolierten und daher genetisch verarmten Populationen vor.

Mindestens 15 Prozent der bevorzugt von Japan-Brillenvögeln (*Zosterops japonicus*) gefressenen *T. boeningi* überleben nach Zählungen der Biologen die Passage durch den Verdauungstrakt: Weder die Salzsäure im Drüsenmagen noch der anschließende kräftige Muskelmagen oder die Reise durch den Darm können diesen Tieren etwas anhaben. Eine der im Labor probeweise verfütterten Schnecken gebar anschließend sogar Nachwuchs – die Art legt keine Eier, sondern bringt lebende

Jungtiere zur Welt. Damit konnten die Biologen erstmals nachweisen, dass Landschnecken Flugreisen im Vogeldarm antreten und in nennenswerter Zahl überleben. Bislang war eine ähnliche Ausbreitungsstrategie nur von Wasserschnecken bekannt, die von Fischen aufgenommen werden. Ob *T. boeningi* spezielle Anpassungsstrategien entwickelt hat, um die Tortur im Vogelleib zu überstehen – etwa säureresistente Gehäuse –, wollen die Wissenschaftler als Nächstes klären.

*J. Biogeogr. 10.1111/*

*j.1365-2699.2011.02559.x, 2011*

KREBS

## Aggressive Sauerstoffverbindungen bremsen Tumoren

So genannte Reaktive Sauerstoffspezies (ROS) greifen in Zellen unter anderem das Erbgut an, was Krebs hervorrufen kann. Zudem stehen die aggressiven Substanzen im Verdacht, einem bereits wachsenden Tumor zu nützen, etwa indem sie Entzündungen auslösen. Daher suchen Mediziner nach Wegen, die ROS im Körper abzufangen. Genau diese Vorgehensweise könnte aber wiederum manche Krebsformen unter bestimmten Bedingungen fördern, entdeckten nun Forscher um David Tuveson vom britischen Cambridge Research Institute.

Die Wissenschaftler haben herausgefunden, dass einige Krebs auslösende Gene in Mäusen die Produktion des Transkriptionsfaktors Nrf2 ankurbeln. Dieses Protein galt zuvor eigentlich als Verbündeter gegen Tumorentstehung, denn es aktiviert die körpereigene ROS-Entgiftung – die reaktiven Stoffe werden also abgefangen. Doch als die Forscher Nrf2 in Tumoren versuchsweise lahmlegten, kam deren weitere Entwicklung zum Stillstand.

Demnach können ROS zwar einerseits Krebs auslösen, schaden andererseits aber auch Tumoren. Im Besonde-

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie auf [spektrumdirekt.de](http://spektrumdirekt.de)

ren gilt das wohl für noch junge Krebsgeschwüre, wie weitere Experimente belegen: Wird die Nrf2-Produktion dort verhindert, so sammeln sich in ihnen besonders große Mengen an ROS an, und das Tumorwachstum stoppt. Behandelt man den Tumor aber mit Antioxidanzien, entwickelt er sich wieder ungehemmt. Es könnte sich also lohnen, genauer zu untersuchen, wie verwundbar junge Krebszellen durch oxidativen Stress sind – und wie sie reagieren, wenn ihre eigenen Entgiftungsprozesse ausgeschaltet werden.

*Nature* 475, S. 106–109, 2011

ROHSTOFFE

## Meeresgrund steckt voller Seltener Erden

Der weltweite Bedarf der Hightechindustrie an so genannten Selten-erdmetallen, etwa Lanthan oder Neodym, wird momentan zu 97 Prozent durch China gedeckt – ein teures Quasimonopol. Japanische Forscher um Yasuhiro Kato von der Universität Tokio sind nun allerdings auf eine sehr

ergiebige Ersatzquelle gestoßen: Tiefseesedimente enthalten bisweilen so hohe Konzentrationen der begehrten Metalle, dass bereits der Abbau auf fünf Quadratkilometer Fläche den derzeitigen Jahresbedarf der Menschheit deckt.

Die Geowissenschaftler hatten an 78 verschiedenen Stellen rund 2000 Sedimentproben aus dem Tiefseeboden des Pazifiks gezogen und chemisch analysiert: Die Konzentrationen an Seltenen Erden reichten von 0,1 Prozent rund um die Hawaii-Inseln bis 0,2 Prozent im südöstlichen Pazifik bei Tahiti. Das entspricht Werten, wie sie auch in einigen Minen in China vorkommen. Zudem steckten in den Proben relativ große Mengen von schwereren Seltenen Erden, die besonders begehrt sind.

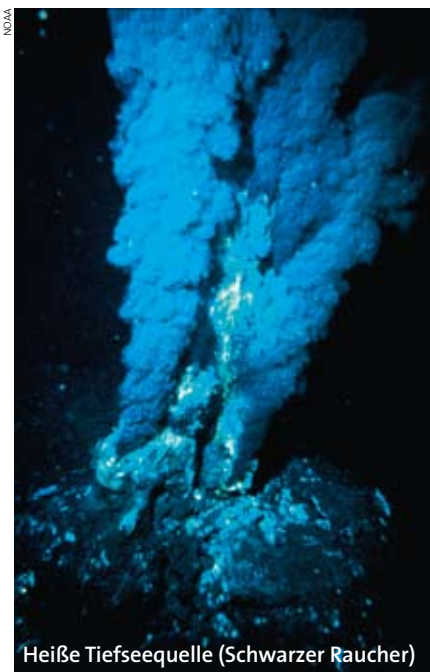
Da einige der mineralreichen Ablagerungen mancherorts bis zu 70 Meter mächtig sind, errechneten Geologen reichlich abbauwürdige Vorkommen: Ein Quadratkilometer mit metallhaltigem Schlamm könnte demnach mindestens 25000 Tonnen Seltene Erden liefern. Insgesamt dürften sich nach Katos Schätzungen etwa 110 Millionen Tonnen der Schätze im Meeresgrund

verbergen – der gegenwärtige jährliche Weltbedarf beläuft sich auf rund 130000 Tonnen.

Die Lagerstätten entstehen vor allem rund um heiße Tiefseequellen (»Schwarze Raucher«): Hier strömt extrem mineralreiches Wasser aus, dessen Bestandteile als Feststoffe ausfallen oder von Mikroben aufgenommen werden und nach deren Absterben auf den Meeresboden rieseln. Aus den Sedimenten können die Seltenen Erden mit Hilfe von Säure relativ leicht gewonnen werden.

Noch steht der Abbau allerdings vor hohen technischen und ökologischen Hürden, denn die Vorkommen lagern in 3500 bis 6000 Meter Tiefe. Außerdem gehören Schwarze Raucher zu den artenreichsten und empfindlichsten Ökosystemen der Tiefsee und erholen sich nur langsam von Eingriffen. Kato weist allerdings darauf hin, dass sein Team die höchsten Metallkonzentrationen etwas entfernt von den aktiven Hydrothermalquellen gefunden hat, so dass Umweltschäden geringer ausfallen könnten als befürchtet.

*Nature Geo.* 10.1038/NGeo1185, 2011



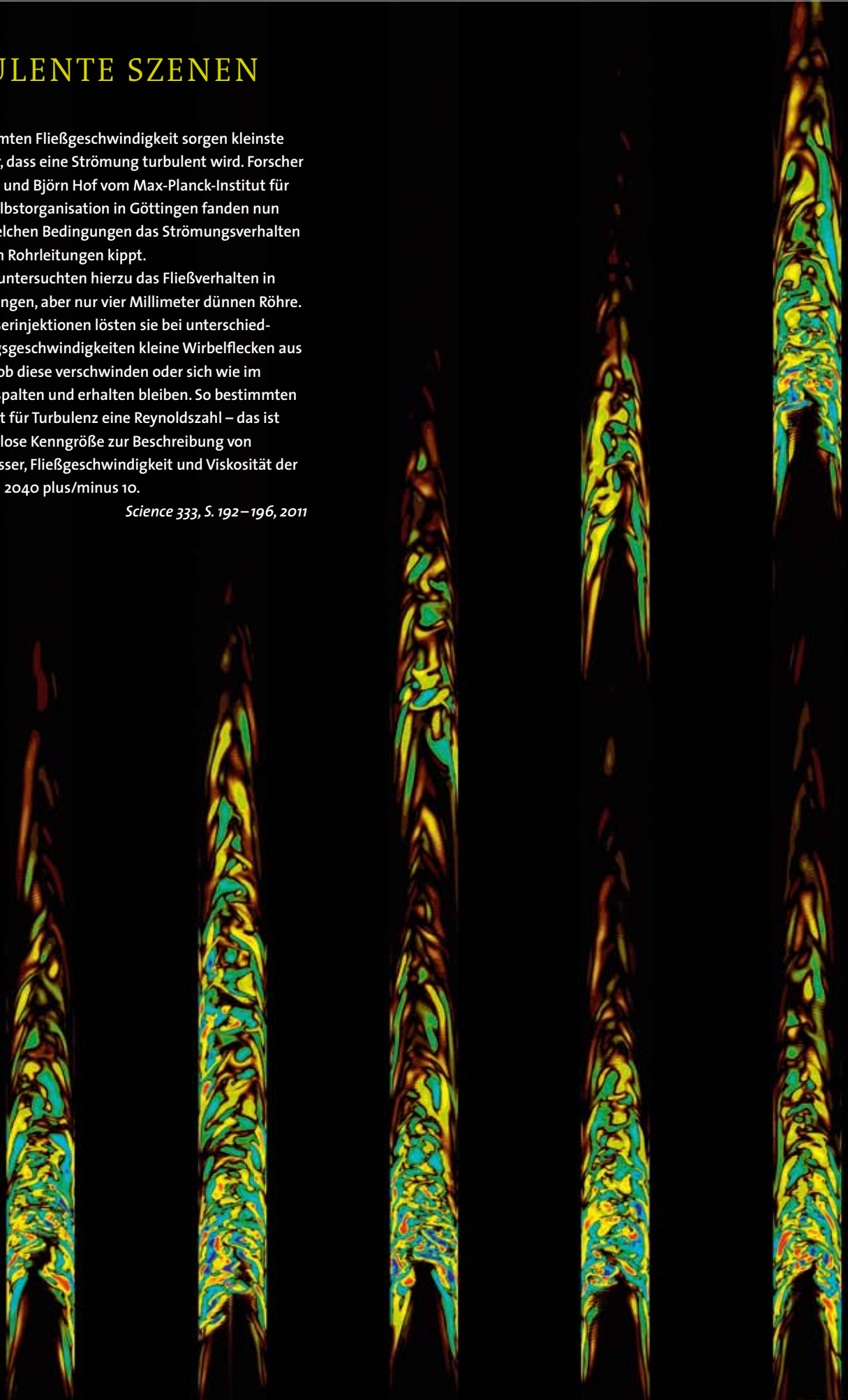
Heiße Tiefseequelle (Schwarzer Raucher)

## TURBULENTE SZENEN

Ab einer bestimmten Fließgeschwindigkeit sorgen kleinste Störungen dafür, dass eine Strömung turbulent wird. Forscher um Kerstin Avila und Björn Hof vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen fanden nun heraus, unter welchen Bedingungen das Strömungsverhalten in geschlossenen Rohrleitungen kippt.

Die Forscher untersuchten hierzu das Fließverhalten in einer 15 Meter langen, aber nur vier Millimeter dünnen Röhre. Mit kurzen Wasserinjektionen lösten sie bei unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten kleine Wirbelflecken aus und verfolgten, ob diese verschwinden oder sich wie im Bild gezeigt aufspalten und erhalten bleiben. So bestimmten sie als Grenzwert für Turbulenz eine Reynoldszahl – das ist eine dimensionslose Kenngröße zur Beschreibung von Röhrendurchmesser, Fließgeschwindigkeit und Viskosität der Flüssigkeit – von 2040 plus/minus 10.

*Science 333, S. 192–196, 2011*



NEUE POPULATION VON EXOPLANETEN

# Völlig losgelöst

Bei der Suche nach Exoplaneten entdeckten Astronomen mit dem Mikrogravitationslinseneffekt eine neue Population von Himmelsobjekten. Die Planeten weisen ungefähr die Masse des Jupiters auf und kreisen in ungewöhnlich großer Entfernung um ihre Heimatsonne – oder sie gehören gar nicht zu einem Stern.

JOACHIM WAMBSGANSS

Noch vor zwei Jahrzehnten wusste niemand, ob es überhaupt Planeten außerhalb unseres Sonnensystems gibt. Heute hat sich die Suche nach extrasolaren Planeten zu einem florierenden Zweig der modernen Astronomie entwickelt. Daten über mehr als 500 Exemplare füllen mittlerweile die Kataloge. Inzwischen verfügen die Astronomen sogar über Techniken, um die Gaschichten einiger dieser Exoplaneten oder gar die dort herrschenden Wetterbedingungen zu erforschen (siehe »Auf der Suche nach der zweiten Erde«, Spektrum der Wissenschaft 4/2011, S. 46).

Nun sorgten zwei internationale Wissenschaftlergruppen, das japanisch-neuseeländische MOA-Team (»Microlensing Observations in Astrophysics«) und die polnische OGLE-Gruppe (»Optical Gravitational Lensing Experiment«), für eine Überraschung auf diesem Gebiet. Im Fachmagazin »Nature« berichteten sie gemeinsam über die Entdeckung einer völlig neuen Population von Exoplaneten. Diese besitzen ungefähr die Masse des Jupiters und umkreisen ihre Zentralsterne – wenn sie denn überhaupt um einen Stern kreisen – in einer Entfernung von mindestens zehn Astronomischen Einheiten (AE, die mittlere Distanz Erde–Sonne). Jupiter ist von der Sonne etwa fünf AE entfernt.

Der Fund gelang mit Hilfe der so genannten Mikrogravitationslinsentechnik. Sie nutzt die Tatsache, dass die Schwerkraft eines Sterns und gegebenenfalls seiner Planeten das Licht eines anderen Sterns ablenken, der von der Erde aus gesehen hinter diesem System liegt. Dadurch wird das Abbild des hin-

teren Sterns aufgehellt. Die beiden wichtigsten Ergebnisse der Forscher: Zum einen existieren in unserer Heimatgalaxie etwa ebenso viele Planeten mit Jupitermasse wie Sterne. Zum anderen sind diese neu gefundenen Exoplaneten sehr weit von ihren Zentralsternen entfernt. Einige, so die Autoren, dürften sogar ganz ohne Bindung an einen Stern gleichsam frei fliegend durch die Milchstraße wandern.

## Stellares »Vergrößerungsglas« lässt weit entfernte Planeten erkennen

Exoplaneten lassen sich mit unterschiedlichen Techniken aufspüren, darunter die Transit- oder die Radialgeschwindigkeitsmethode. Jede dieser Techniken hat ihre Stärken und misst unterschiedliche physikalische Eigenschaften, so dass sie sich gut ergänzen.

Die meisten der Verfahren eignen sich gut, um Exoplaneten in unserer kosmischen Nachbarschaft nachzuweisen. Anders die Gravitationslinsenmethode, die das System aus Exoplanet und Zentralstern quasi als Vergrößerungsglas nutzt. Sie funktioniert am besten bei weiter entfernten Planeten. Der gesuchte Effekt tritt ein, wenn Exoplanet und Stern vor einen anderen, weiter entfernten Hintergrundstern treten und dessen Helligkeit für kurze Zeit verstärken. Grafisch darstellen lässt sich dieses Phänomen in Form einer so genannten Lichtkurve (siehe Grafiken rechts). Diese ist durch die Stärke der Aufhellung sowie deren Dauer charakterisiert, wobei Letztere unter anderem von der Masse des Linsensterns bestimmt wird: Je größer die Masse der Linse, desto länger hält die Aufhellung an.

Ursprünglich hatten die Forscher das Verfahren ersonnen, um nach einer bestimmten Variante dunkler Materie zu fahnden. Diese unsichtbare Materieform hätte sich dann durch ihre Schwerkraft verraten. Bald wurde aber klar, dass sich solche Beobachtungen auch zur Jagd nach Exoplaneten eignen. Denn wenn der Vordergrundstern von einem planetaren Begleiter umkreist wird, kann dieser in der Lichtkurve als spitzer sekundärer Peak auftauchen (Grafik rechts, b).

Gegenüber anderen Verfahren hat der Mikrolinseneffekt zwei Vorteile. Zum einen repräsentieren die Funde die tatsächliche Planetenpopulation in der Milchstraße recht gut. Bei anderen Suchverfahren für Exoplaneten konzentriert man sich beispielsweise nur auf die Umgebung bestimmter Sterne oder auf die nähere Nachbarschaft der Sonne. Zum anderen genügt für die Mikrolinsenmethode – zumindest im Prinzip – schon die Empfindlichkeit heutiger Instrumente, um erdähnliche Exoplaneten aufzuspüren. Andere Verfahren tun sich oft schwerer damit, solche kleinen Gesteinsplaneten zu entdecken, die sich in moderater Entfernung von ihrem Stern bewegen.

Allerdings steht den Vorteilen ein gravierender Nachteil gegenüber: Mikrolinsenereignisse sind extrem selten. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt wird weniger als ein Millionstel aller Sterne im Zentralbereich der Milchstraße durch ein Objekt im Vordergrund aufgehellt. Und sollte in wenigen Astronomischen Einheiten Abstand von einem solchen Linsenstern tatsächlich ein Begleiter kreisen, der die Masse des Jupiters auf-

weist, so können die Forscher nur etwa jeden hundertsten davon entdecken. Denn damit das Verfahren zum Erfolg führt, müssen der Hintergrundstern, das Exoplanetensystem sowie der irdische Beobachter nahezu auf einer perfekten Geraden zu liegen kommen.

So gleicht die Planetensuche via Mikrolinsen der Suche nach der Nadel im Heuhaufen. Doch eine Hand voll Forschergruppen hat mittlerweile die nötigen Techniken entwickelt, um alle paar Tage die Helligkeiten von rund 100 Millionen Milchstraßensternen zu messen. Routinemäßig stoßen sie so auf etwa 1000 stellare Mikrolinseneffekte jährlich. Zwar wurde bisher nur ein Dutzend Exoplaneten auf diese Weise entdeckt. Gleichwohl gelangten die Forscher zu anderen beeindruckenden Resultaten. Bereits im vergangenen Jahr berichteten sie, dass etwa je-

der sechste Milchstraßenstern ein Planetensystem wie das unsere aufweist. Zudem stellten sie fest, dass Exoplaneten, die etwa die Masse des Neptuns aufweisen und wie dieser auf äußeren Bahnen kreisen, in der Milchstraße weit verbreitet sind.

Die neuesten Ergebnisse entstammen einer speziell konzipierten zweijährigen Studie. In dieser überwachte das MOA-Team die Helligkeit von 50 Millionen Milchstraßensternen und interessierte sich dabei besonders für sehr kurze Aufhellungen. Mindestens einmal pro Stunde maßen die Forscher die Helligkeit der Objekte. In der nachfolgenden Analyse korrigierten sie in den Messdaten alle bekannten Fehlerquellen. Zehn der 474 Mikrolinseneignisse, welche sie identifizierten, dauerten weniger als zwei Tage (Grafik c und d). Diese unerwartet hohe Zahl las-

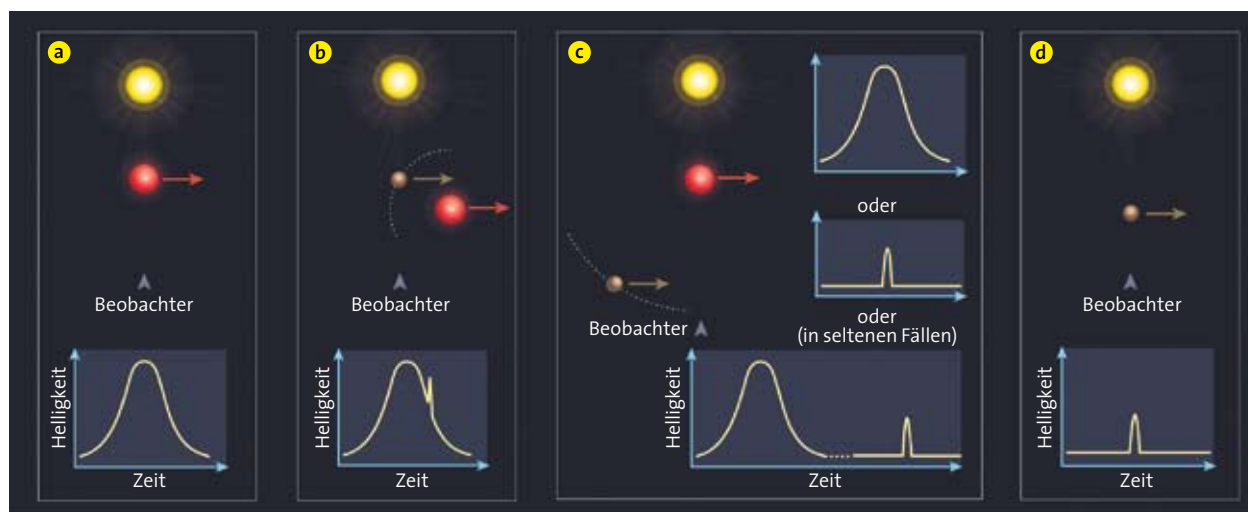
se sich durch die Häufigkeit von Sternen geringer Masse und von Braunen Zwergen in der Milchstraße allein nicht erklären, so die Forscher. Sie deuten den Überschuss daher als bislang unbekannte Population von Exoplaneten, die ungefähr die Masse des Jupiters besitzen. Mit unabhängig erhobenen Daten ihrer polnischen OGLE-Kollegen konnten sie diese Schlussfolgerung noch erhärten.

Weil die Lichtkurven der zehn Kurzzeitereignisse keinerlei Hinweise auf mögliche Zentralsterne geben, vermuten die Autoren, dass die neu entdeckten Exoplaneten mindestens zehn Astronomische Einheiten von diesen entfernt sein müssen. Die Häufigkeit der neuen jupiterartigen Exemplare übersteigt allerdings die oberen Grenzen für die Häufigkeit von Exoplaneten auf weiten Umlaufbahnen, die durch direk-

## Der Mikrolinseneffekt

- a** Ein Stern im Vordergrund (rot) passiert einen weiter entfernten Stern (gelb). Dessen Lichtstrahlen werden durch den Vordergrundstern gekrümmt; ein Beobachter auf der Verbindungslinie der beiden Himmelskörper sieht eine charakteristische »Lichtkurve«, der Hintergrundstern erscheint vorübergehend heller.
- b** Besteht das Vordergrundsystem aus einem Stern und einem Exoplaneten (braun) auf enger Umlaufbahn, kann sich der Trabant als scharfer Peak in der ansonsten breiten Lichtkurve des Sterns offenbaren.

- c** Wenn der Exoplanet seinen Zentralstern in großer Entfernung umkreist, wird die Lichtkurve meist nur den breiten Peak des Sterns oder aber den kurzen, schmalen Peak des Exoplaneten aufweisen. Sehr selten erlauben es die geometrischen Verhältnisse, dass die Forscher beide Ereignisse registrieren. Diese können Jahre auseinanderliegen.
- d** Die Lichtkurve eines isolierten Exoplaneten ohne Zentralstern besitzt stets die Form eines isolierten kurzen, scharfen Peaks.



NATURE 473, S. 389–390, 2011, FIG. 1, NACH: J. WAMBSGANS

te Beobachtungen ermittelt wurden. Dies erlaubt einen überraschenden Schluss: Höchstwahrscheinlich sind die meisten neu entdeckten Planeten sogar ungebunden, also unabhängig von einem Sternsystem.

Hinweise auf eine Klasse ungebundener planetenähnlicher Objekte waren schon vor über einem Jahrzehnt aufgetaucht. In diesen Fällen handelte es sich allerdings um Exemplare, die nur in jungen Sternentstehungsgebieten vorkommen und etwa das 8- bis 20-Fache der Jupitermasse besitzen. Gleichwohl hatten auch sie schon die Frage aufgeworfen: Planet oder nicht Planet? – Schließlich ist dieser Begriff aufs Engste mit einem Zentralstern verbunden.

In der hitzigen Debatte um die korrekte Nomenklatur wurden dann Begriffe wie »frei fliegende Planeten«, »isolierte Objekte mit Planetenmasse«, »einst Planeten genannte Objekte« oder schlicht »Ausreißer« (*rogue planets*) vorgeschlagen. Doch noch heute ist die Frage unbeantwortet, ob die Namensgebung nur Masse und dynamischen Zustand berücksichtigen soll oder auch die Art des Entstehungsprozesses. Immerhin konnte sich die Internationale Astronomische Union 2006 auf eine Neudefinition des Planetenbegriffs im Sonnensystem einig. Ihr fiel

unter anderem Pluto zum Opfer, welcher seitdem nur noch als Zwergplanet gilt, während die genaue Klärung des Begriffs »Exoplanet« vertagt wurde. Insbesondere im Licht der jetzigen Erkenntnisse wird man das Thema nun erneut in Angriff nehmen müssen.

### Tatsächlich frei oder nur fast frei?

Die entscheidende Frage lautet indes: Fliegen die Neuentdeckungen tatsächlich frei, oder kreisen sie auf besonders weiten Orbits um bisher unentdeckte Zentralsterne? Antworten können nur weitere Beobachtungen geben. Sollten sich die Objekte als ungebunden erweisen, gilt es zu klären, wie sie in diese Lage gerieten. Die Forscher der MOA- und der OGLE-Gruppe haben bereits plausible, aber sehr unterschiedliche Erklärungsansätze vorgeschlagen.

Falls hingegen Zentralsterne existieren, könnten sich einige von ihnen im Lauf der Zeit noch verraten. Denn in seltenen Fällen folgt dem durch einen Planeten hervorgerufenen Peak eine zweite Aufhellung, wenn auch dessen Zentralstern vor dem Hintergrundstern vorbeizieht. In der Lichtkurve zeigt sich dies als breiterer Peak. Für ein solches Ereignis müssen die Astronomen jedoch Geduld beweisen, weil es durchaus erst Jahre nach (oder auch vor) dem

spitzen, kurzen Planetenpeak auftreten kann. Ein weiteres Indiz für an Sterne gebundene Exoplaneten wäre der so genannte astrometrische Mikrolinseneffekt, bei dem eine winzige Positionsveränderung des Hintergrundsterns gemessen wird.

Dieser erste Blick auf eine neue Population planetarer Objekte stellt unser bisheriges Bild von der Milchstraße in Frage. Nun geht es darum, Häufigkeit, Bewegungszustände und die Entstehungsgeschichten der Objekte zu klären. Wie bisher werden bodengestützte Mikrolinsenbeobachtungen eine wichtige Aufgabe übernehmen. Die entscheidende Rolle kommt jedoch Satellitenteleskopen zu, die auf den Mikrolinseneffekt spezialisiert sind und große Himmelsausschnitte ins Visier nehmen können. Entsprechende Konzepte wie der ESA-Satellit Euclid und das WFIRST-Teleskop (Wide-Field Infrared Survey Telescope) der NASA sind weit fortgeschritten. Mit ihrer Hilfe werden die Astronomen ein neues Kapitel im Geschichtsbuch der Galaxis schreiben.

---

**Joachim Wambsganz** ist Direktor des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg.

---

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 473, S. 289–290, 19. Mai 2011

---

KREBS

## Makrophagen blockieren Chemotherapie

Bestimmte weiße Blutzellen – die Makrophagen – dringen in großer Zahl in Tumoren ein. Dort fördern sie nicht nur die Erkrankung, sie beeinträchtigen sogar die Wirksamkeit von Krebsmedikamenten.

MICHELE DE PALMA UND CLAIRE E. LEWIS

**B**ösartige Tumoren enthalten zahlreiche Zellen des Immunsystems, darunter so genannte Makrophagen und neutrophile Granulozyten. Ursprünglich vermuteten Forscher, dass der Körper sie in die Wucherungen schickt, um den Krebs zu bekämpfen. Neueren Erkenntnissen zufolge unter-

drücken jedoch die Bedingungen im Tumor die normale Funktion von Makrophagen und anderen Immunzellen, so dass diese die Krebserkrankung sogar fördern: Mit ihrer Unterstützung entstehen neue Blutgefäße im Tumor – was sein Wachstum begünstigt –, dringen Krebszellen vermehrt in umliegen-

des Gewebe ein und bilden sich Tochtergeschwülste (Metastasen) in anderen Organen.

David DeNardo, Assistant Professor an der University of Washington in St. Louis, und seine Kollegen berichteten nun kürzlich, dass diese Zellen sogar die Resistenz von Tumoren gegen Che-

motherapeutika verstärken (Cancer Discovery 1, S. 54–67, 2011). Normalerweise verteidigen Makrophagen und neutrophile Granulozyten den Körper an vorderster Front: Sie beseitigen Krankheitserreger sowie tote und sterbende Zellen und sind an der Wundheilung beteiligt. Die beiden Typen von Fresszellen gehören zu den weißen Blutkörperchen (Leukozyten) und sind auch in Tumoren aktiv. Daneben befinden sich dort auch andere Immunzellen, die T- und B-Lymphozyten, die für die spezifische Abwehr von Eindringlingen zuständig sind. Bereits vor einiger Zeit fand die Arbeitsgruppe von DeNardo heraus, dass bestimmte Leukozyten, darunter Makrophagen, im Tumorgewebe zusammenarbeiten und so das Krebswachstum begünstigen. Beispielsweise setzen in Labormäusen so genannte CD4<sup>+</sup>-T-Helferzellen den Signalstoff Interleukin-4 frei, während B-Lymphozyten Antikörper bilden. Im Team stimulierten die Zellen so die tumorfördernde Aktivität der Makrophagen.

DeNardos aktuelle Studie liefert nun den ersten Hinweis darauf, dass so genannte tumorassoziierte Makrophagen (TAM) und Lymphozyten in menschlichen Tumoren zusammenwirken. Die Wissenschaftler identifizierten in chirurgisch entnommenem Brustkrebsgewebe ein spezifisches Merkmal, an dem

sich die Überlebenschancen der Patientinnen vorhersagen ließen: Frauen mit Tumoren, die viele TAMs und CD4<sup>+</sup>-Helferzellen, aber wenige zytotoxische T-Zellen (zellzerstörende, so genannte T-Killerzellen) aufwiesen, erlitten mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Rückfall und starben daher auch eher.

### Einwanderungsstopp für Zellen

Zudem sprechen solche Tumoren relativ schlecht auf eine Chemotherapie an – möglicherweise, weil die Behandlung die Krebszellen dazu anregt, ein Protein namens CSF1 (*colony stimulating factor 1*) freizusetzen. Bei Mäusen mit Milchdrüsenkrebs erhöht Chemotherapie tatsächlich die CSF1-Produktion der Tumorzellen, was wiederum zahlreiche Makrophagen mit passenden CSF1-Rezeptoren in das Krebsgewebe lockt. Wie stark dieser Effekt ist, dürfte von mehreren Faktoren abhängen, darunter von der Art des Chemotherapeutikums, vom Tumortyp und vom Zustand des Immunsystems des Individuums. Das zeigte etwa eine Untersuchung bei Mäusen ohne T-Zellen: Hier vermehrte eine Chemotherapie nicht die Anzahl der TAMs in menschlichen Brustkrebstumoren, die den Nagern zuvor eingepflanzt worden waren.

DeNardo und seine Kollegen blockierten mit geeigneten Substanzen



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Makrophagen (blau eingefärbt)



**Internationale Fachmesse**  
 ■ Ideen ■ Erfindungen ■ Neuheiten  
**27.–30. Okt. 2011**

*Die No. 1 im Kontakt zur Erfindung!*



- **Neue Ideen für den Markt.**  
Die iENA 2011 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.
- **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.
- **iENA-Symposium**  
29. Oktober 2011, 10 – 13 Uhr  
„Innovationsmarketing – von der Kreativität/Erfindung zum Weg in den Markt“  
(Teilnahme im Eintritt enthalten)
- **Fachberatung und Information**

**Messe Nürnberg · Halle 12**



International Federation of Inventors' Associations

In Kooperation mit:



Kompetenzpartner:



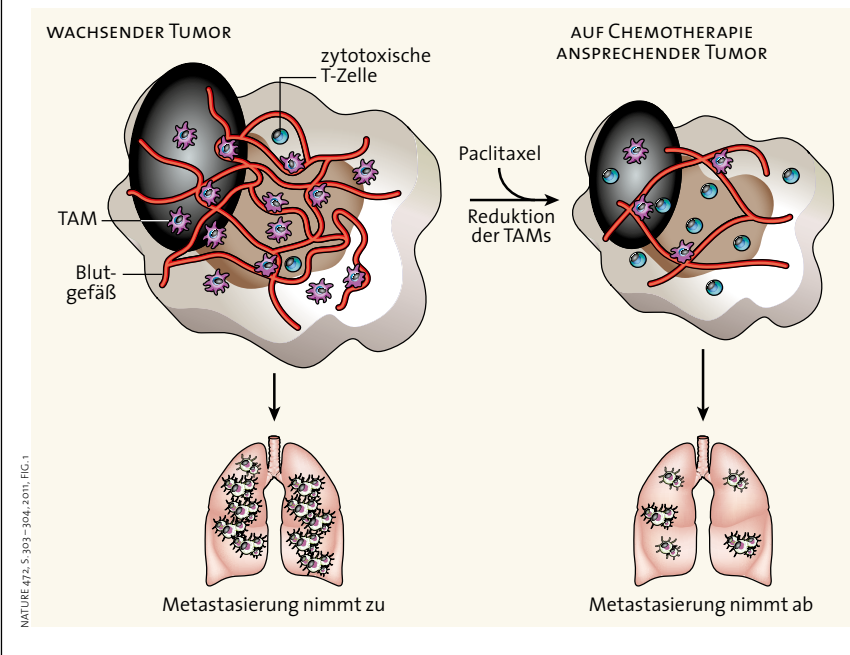
Ein Programm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie



**Veranstalter/Organisation**  
 AFAG Messen und Ausstellungen GmbH  
 Projektmanagement iENA 2011  
 Messezentrum 1, 90471 Nürnberg  
 ☎ 09 11 – 9 88 33 – 570  
 ☎ 09 11 – 9 88 33 – 579

**iena@afag.de · www.iena.de**

## Der Makrophagen-Effekt – experimentell belegt



**Makrophagen fördern die Resistenz von Tumoren** gegen Chemotherapeutika. Im Tierexperiment enthielten wachsende Tumoren der Milchdrüse verschiedene Leukozyten, darunter tumorassoziierte Makrophagen (TAMs) und zytotoxische (zellzerstörende) T-Zellen. Eine Reduktion der TAMs verstärkte die Antitumorwirkung des Medikaments Paclitaxel; dieses ließ dann die Gewebemasse schrumpfen. Solche Tumoren wiesen eine geringere Gefäßdichte auf, enthielten mehr zytotoxische T-Zellen und zeigten stärkere Anzeichen von Gewebeerstörung. Zudem entstanden weniger Tochtergeschwülste in der Lunge.

das Einwandern der Makrophagen in die Tumorregion, worauf das Chemotherapeutikum Paclitaxel das Wachstum der Tumoren wie auch das von Metastasen wesentlich effektiver verlangsamte (siehe Kasten oben). Die Forscher nehmen an, dass dies zumindest zum Teil daran liegt, dass TAMs die zytotoxischen T-Zellen davon abhalten, den Tumor zu bekämpfen. TAMs und zytotoxische T-Zellen würden also gemeinsam beeinflussen, wie Tumoren auf eine Chemotherapie ansprechen. Noch haben die Forscher jedoch das komplexe Zusammenspiel der Immunzellen in Tumoren nicht entschlüsselt, und es bedarf weiterer Studien, um die Bedeutung dieses Phänomens für die Krebstherapie zu verstehen.

Blockierten DeNardo und sein Team die CSF1-Rezeptoren, gelangten die TAMs selektiv nicht mehr in jenes Tumorgewebe, das weiter entfernt von Blutgefäßen lag. Die TAMs in unmittelbarer Umgebung der Gefäße (»perivaskuläre TAMs«) blieben davon jedoch unbeeinflusst. Bereits diese nur teilweise Reduktion der TAMs erhöhte aber offenbar die Wirksamkeit der Chemotherapie. Möglicherweise sind es daher gerade die TAMs in gering durchbluteten

Bereichen, welche die Tumoren vor dem Medikament schützen.

### Schlecht durchströmte Blutgefäße in Tumoren

Die Forscher beobachteten außerdem, dass sich die Dichte an Blutgefäßen im Tumor halbierte, wenn sie die Chemotherapie bei verringerter TAM-Anzahl durchführten. Dass TAMs die Gefäßbildung in Tumoren anregen, ist schon länger bekannt. Sie setzen fortwährend Signalmoleküle wie zum Beispiel VEGF (*vascular endothelial growth factor*) frei, wodurch abnormale, schlecht durchströmte Blutgefäße entstehen, über die Medikamente nicht gut in den Tumor eindringen können.

In einer anderen aktuellen Untersuchung entdeckte ein Forscherteam um Charlotte Rolny am Vesalius Research Center in Löwen, Belgien, dass so genanntes histidinreiches Glykoprotein (HRG) die Antitumorfunktion der TAMs verstärkt und dabei auch die Blutgefäße normalisiert (Cancer Cell 19, S. 31–44, 2011). Vielleicht hat der TAM-Mangel abseits der Gefäße ja eine ähnliche Folge, so lautet eine Spekulation: Die übrig gebliebenen Makrophagen würden dann die Gefäßbildung womöglich

nicht mehr fördern, sondern hemmen. Das könnte die Struktur und die Funktion der Blutgefäße im Tumor wieder normalisieren; das Gewebe würde dadurch vorübergehend stärker durchblutet, womit Chemotherapeutika effektiver ins Tumorgewebe eindringen und dieses besser bekämpfen könnten.

Die neuen Beobachtungen von DeNardo und seinen Kollegen unterstreichen, wie wichtig es ist, die komplexe Rolle der Leukozyten in Brustkrebstumoren besser zu verstehen. Daraus ließen sich dann möglicherweise individuelle Vorhersagen zur Wirksamkeit verschiedener Chemotherapien ableiten. Zudem könnten sich molekulare Angriffspunkte für Therapien ergeben, welche die Wirkung der TAMs hemmen oder sogar ihre ursprüngliche Antitumorwirkung wiederherstellen.

**Michele DePalma** forscht am San-Raffaele-Thelethon-Institut für Gentherapie (HSR-TIGET) in Mailand, Italien. **Claire E. Lewis** arbeitet in der Onkologieabteilung der University of Sheffield Medical School in Großbritannien.

© Nature Publishing Group  
www.nature.com

Nature 472, S. 303–304, 21. April 2011



# Knockout für Gendoping

Die Dopingtricks im Sport werden immer raffinierter – jetzt ließe sich sogar schon das Erbgut des Athleten verändern. Neuartige Tests können Gendoping-Sünder jedoch überführen.

VON RICHARD E. SCHNEIDER

Dopingfälle machen regelmäßig bei großen Sportereignissen Schlagzeilen – wie gerade wieder bei der Frauenfußballweltmeisterschaft, bei der die halbe nordkoreanische Mannschaft überführt wurde. Im Leistungssport herrscht längst eine Art Wettlauf zwischen neuartigen Dopingmethoden und den Werkzeugen, mit denen sich solche Betrugsmanöver aufdecken lassen.

Als eine Grauzone gilt bisher das Gendoping – die gezielte Manipulation der Leistungsfähigkeit des Körpers über die Beeinflussung von Genen. Nun kann man dazu Substanzen verabreichen, die bestimmte Gene im eigenen Erbgut ankurbeln helfen oder die Produktion etwaiger hinderlicher Stoffe durch Hemmung eines störenden Erbfaktors unterbinden. Derartigen Missbrauch nachzuweisen, ist oft nicht leicht, weil der Organismus daraufhin lediglich eigene Moleküle herstellt, die Tests nicht als körperfremd erkennen –

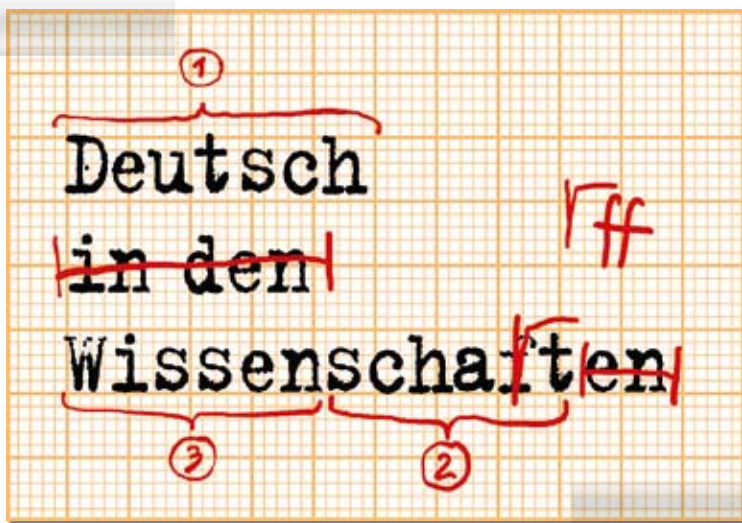
auch wenn deren hohe Mengen unter Umständen verwundern.

Ein besonders gerissener Weg wäre allerdings, dem Athleten von vornherein fremde Gene zusätzlich zu seinen eigenen zu verpassen, die sich in sein Erbgut integrieren und somit vor der Kontrolle quasi verstecken. Denn dann gäbe es nicht einmal mehr jene fremde Substanz, die auf das Zielgen einwirkt. Zudem wäre das Ergebnis von solchem Doping im Erfolgsfall dauerhaft – eine einmalige Manipulation könnte genügen. Gerade deshalb birgt Gendoping auch große gesundheitliche Gefahren: Die manipulierten Zellen produzieren die gewünschte Substanz möglicherweise lebenslang im Übermaß. Wie der Körper nach Jahren darauf reagiert, ist noch nicht abzusehen. Weil die Welt-Antidopingagentur WADA im Gendoping ein Potenzial für Missbrauch erkannte, hat sie es im Sport schon 2003 in jeder Form verboten und unterstützt ver-

schiedene Forschungsprojekte, in denen Nachweistests entwickelt werden.

Die Ansätze des Gendopings stammen aus der Gentherapie. Eigentlich sollen davon Schwerkranke profitieren, die zum Beispiel unter Blut- oder Muskelerkrankungen oder körperlichem Verfall leiden. So bilden die meisten Dialysepatienten das die Blutbildung fördernde Epo (Erythropoietin) nur noch in unzureichenden Mengen. Viele Krebspatienten leiden unter körperlichen Abbauerscheinungen, denen Ärzte therapeutisch entgegenzutreten möchten. Zwar liegt mittlerweile eine Anzahl Studien zur somatischen Gentherapie an Menschen vor, doch dem routinemäßigen Einsatz stehen noch schwer kalkulierbare, teils sogar lebensgefährliche Nebenwirkungen entgegen. Manche Athleten und ihre Betreuer nehmen allerdings, wie die Erfahrung zeigt, medizinische Bedenken und schlechte Erfahrungen anderer Sportler nicht

ANZEIGE



**Konferenz 10. bis 12. November 2011**  
**im Casino auf der Zeche Zollverein, Essen**

Welche Rolle erfüllen Sprachen im Erkenntnisprozess? | Wie wird deutschsprachige Wissenschaft im internationalen Kontext wahrgenommen? | Welche Bedeutung hat die Sprache der Wissenschaft für die Gesellschaft? | Wie lässt sich Mehrsprachigkeit in Forschung und Lehre umsetzen?

Diese Fragen diskutieren u.a. Peter Colliander, Iris Danowski, Ludwig M. Eichinger, Peter Eisenberg, Christian Fandrych, Peter Göllitz, Karl-Heinz Göttert, Randall Hansen, Marianne Hepp, Jochen Hörisch, Stefan Hornbostel, Andreas Kelletat, Karin Kleppin, Heinz L. Kretzenbacher, Georges Lüdi, Ralph Mocikat, Sonja Neef, Klaus Reichert, Krzysztof Ruchniewicz, Annette Sabban, Paulo Astor Soethe, Pramod Talgeri, Jürgen Trabant, Sigrid Weigel, Susanne Weigel-Schwiedrzik. Mehr Informationen unter [www.wissenschaftssprache-deutsch.de](http://www.wissenschaftssprache-deutsch.de)



GOETHE  
INSTITUT

DAAD

Deutscher Akademischer Austausch Dienst  
German Academic Exchange Service



INSTITUT FÜR  
DEUTSCHE SPRACHE



DREAMTIME / JUAN MANUEL MORENO

Vor allem der Radsport macht mit Doping immer wieder von sich reden.

wirklich ernst und sind bereit, ein hohes Risiko einzugehen – womöglich auch mit Gendoping.

Technisch ist es für Mediziner nicht mehr besonders schwierig, fremde Gene in Zellen einzubringen, und auch die dazu benötigten Präparate stehen im Prinzip vielerorts zur Verfügung. Meist wird das fremde Erbgut mit Hilfe einer Genfähre, eines so genannten Vektors, in die Zellen geschleust. Gern verwendet man dafür ein harmloses Virus, etwa ein Adeno- oder Retrovirus. Es wird beispielsweise in einen Muskel gespritzt und dringt dann mit seiner Fracht in die Zellen ein. In diesen vermehrt es sich rasch und kann sich nun mitsamt dem von ihm transportierten Gen schnell auch auf andere Zellen ausbreiten.

Aber Viren sind winzig, und die Fracht, die sie mitschleppen können, ist daher begrenzt. Im Vergleich dazu sind menschliche Gene riesig. Bei der Herstellung solcher Gentherapie-Präparate macht man sich aber zu Nutze, dass nur Teile eines Gens tatsächlich für ein Protein kodieren – der Rest, die Introns genannten Abschnitte seiner DNA, wird beim natürlichen Vorgang vor der Pro-

teinsynthese herausgeschnitten und verworfen. Für eine Gentherapie genügt es deswegen, nur diese abgespeckte Version der DNA-Sequenz des gewünschten Erbfaktors in die Genfähre einzubauen.

### Steckbrief der Virusfracht

Diesen Unterschied zwischen dem natürlichen langen Gen und der intronlosen, kürzeren Version soll ein neuer Dopingtest erkennen. Auch hier hatten die Wissenschaftler zunächst wieder gentherapeutisch behandelte Patienten im Blick, weil sie bei Gentransfers Erfolgskontrollen benötigen. Eine Forschergruppe an der Universität Tübingen um die Mediziner Perikles Simon und Michael Bitzer – Letzterer arbeitet heute als Sportmediziner an der Universität Mainz – entwickelte einen speziellen Bluttest, mit dem fremdes genetisches Material im Körper zuverlässig und relativ einfach nachgewiesen werden könnte.

Der neue Test spürt in Blutproben auch winzigste Spuren der fremden DNA auf. Dass sich solche transgene oder t-DNA im Blut findet, obwohl sie

mit dem Virus in die Muskulatur gespritzt wurde, entdeckten die Tübinger Forscher schon vor einigen Jahren. Inzwischen gelingt es ihnen, die t-DNA mit speziell zugeschnittenen so genannten Primern aus wenigen Mikrolitern Blut herauszufischen und zu vermehren, so dass sie sich nachweisen lässt.

Um das neue Nachweisprinzip auszutesten, arbeiteten Simon und Bitzer zunächst mit Mäusen. Sie übertrugen den Nagern mit einem Virus das intronlose Gen für einen Wachstumsfaktor, der die Neubildung von Blutgefäßen anregt – und konnten die t-DNA noch bis zu zwei Monate später im Blut der Tiere aufspüren.

Für die Anwendung beim Menschen weiteten sie den Ansatz auf die intronlosen Versionen von sechs Erbfaktoren aus, die als Kandidaten für Gendoping besonders in Frage kommen dürften: darunter die Gene für mehrere Wachstumsfaktoren, für Epo sowie für ein Gen, dessen Produkt – Follistatin – das Muskelwachstum fördert, weil es als Gegenspieler von Myostatin wirkt. Das Protein Myostatin sorgt dafür, dass Muskeln nicht unkontrolliert wachsen. Ein Defekt des zugehörigen Gens etwa bei Mäusen bedingt muskelbepackte Tiere, weswegen sich dafür die Bezeichnung »Schwarzenegger-Gen« einbürgerte.

Das Team aus Tübingen und Mainz entwickelte für die potenziellen Dopinggene ein praktikables Testset und prüfte dessen Zuverlässigkeit an freiwilligen Hobbysportlern und Profis. Dabei wurden über 300 Blutproben untersucht. Wie erhofft, gab es keine fälschlich positiven Resultate. Damit käme das neue Verfahren auch Athleten zugute, die von vornherein eine günstige Genausstattung mitbringen, denen das aber keiner glaubt. Das ehrgeizige Ziel ist nun, solche Tests schon zur nächsten Olympiade 2012 in London bereitzustellen. Das wäre ein weiterer wichtiger und wünschenswerter Schritt auf dem Weg zu sauberem Sport.

---

**Richard E. Schneider** ist Medizijnjournalist in Tübingen.

© Gene Therapy 18, S. 225–231, 2011. doi:gt.2010.122

# Gravitation unter dem Mikroskop

Physiker präparieren extrem kalte Neutronen in gebundenen Quantenzuständen. Damit wollen sie Newtons Gravitationsgesetz bei winzigen Abständen überprüfen.

VON HARTMUT ABELE

Patienten, die sich heutzutage in die Röhre eines Magnetresonanztomografen (MRT) begeben, werden meist nicht an Physik denken. Und wer wie selbstverständlich seine Uhr stellt, wird ebenfalls kaum über die Vorgänge sinnieren, die in einer Atomuhr ablaufen. Doch sowohl die MRT-Diagnose, die hochauflösende Bilder weicher Gewebestrukturen liefert, als auch die hochpräzisen Atomuhren fußen auf quantenphysikalischen Gesetzen. Letztlich sind es diese Gesetze, die Resonanzspektroskopieverfahren zu den genauesten Messwerkzeugen der Physik machen (Nature Physics 7, S. 468–472, 2011).

Entscheidend dabei ist, dass nicht beliebige, sondern nur bestimmte, durch die Quantenmechanik beschriebene Energieniveaus möglich sind. Beim MR-Tomografen bestimmt ein starkes äußeres Magnetfeld, meist von supraleitenden Spulen erzeugt, die Energieaufspaltung der magnetischen Momente der Atomkerne. Bei der Atomuhr spalten sich die Energieniveaus der Zäsiumatome im eigenen Magnetfeld auf. Tritt nun eine zweite Quanteneigenschaft hinzu, so ist die Grundlage für die Präzisionsmessungen geschaffen. Diese Eigenschaft besteht in der Möglichkeit, Übergänge zwischen den Energieniveaus zu erzeugen. Dabei ist die Energiedifferenz zwischen den beteiligten Niveaus die entscheidende Größe. Man strahlt eine genau zu dieser Differenz passende Hochfrequenzstrahlung ein, was Strahlungsübergänge bewirkt. Die Präzision hängt dann davon ab, wie genau die Übergangsfrequenz messbar ist.

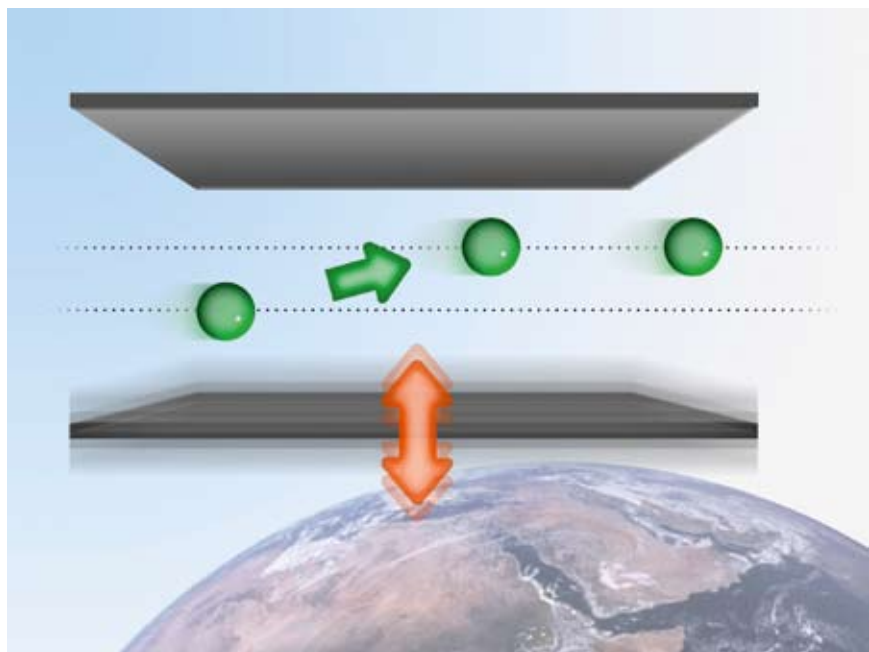
Während alle bisherigen Resonanzverfahren elektromagnetische Felder verwenden, ist unsere Arbeitsgruppe an der Technischen Universität Wien

nun einen neuen Weg gegangen, der ohne die Elektrodynamik auskommt. Anders als bei den Zäsiumatomen der Atomuhr geht es bei unserem Experiment nicht um negativ geladene Elektronen, die durch die elektromagnetischen Kräfte an den positiven Atomkern gebunden sind. Ihre Rolle spielen elektrisch neutrale Neutronen, und diese können im Schwerfeld der Erde gefangene (»gebundene«) Zustände einnehmen. Verglichen mit allen anderen fundamentalen Naturkräften ist die Schwerkraft allerdings viel schwächer. Um die Neutronen trotzdem in gebundenen Zuständen zu präparieren, müssen diese sehr energiearm sein, man spricht von »ultrakalten« Neutronen.

Zusammen mit Peter Geltenbort vom Institut Laue-Langevin (ILL) führten wir das Experiment im französischen Gre-

noble durch. Der Forschungsreaktor dort erzeugt weltweit die größten Neutronenflüsse. Zunächst entstehen sehr heiße Neutronen, ihre Temperatur beträgt mehr als zehn Milliarden Grad Celsius. Für unser Experiment benötigen wir jedoch Neutronen, die auf ein tausendstel Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt abgekühlt sind.

Anders gesagt: Die Energie der Neutronen aus dem Reaktor entspricht zwei Millionen Elektronvolt (eV), für die gebundenen Zustände im irdischen Schwerfeld darf ihre Energie jedoch nur etwa ein Pikoelektronvolt ( $10^{-12}$  eV) betragen. Diese gewaltige Reduktion um 18 Zehnerpotenzen erhält man durch mehrere Kühlprozesse und das Aussortieren von Neutronen mit zu hoher Energie. Die ersten sieben Größenordnungen gelingen ohne Anstren-



Neutronen zwischen zwei Platten können im Schwerfeld der Erde unterschiedliche Quantenzustände einnehmen. Eine vibrierende Platte (unten) hebt sie von einem Zustand in den anderen – das erlaubt eine hochpräzise Energiemessung.

## Wozu sind Männchen gut?

**Die rote Königin weiß die Antwort.**

Über geschlechtliche Liebe sinnen Menschen nach, seit es sie gibt. Wenn man Schlagern lauscht oder Freud liest, könnte man meinen, es gebe nichts Wichtigeres auf der Welt. Höchstes Glück und tiefste Qual, selbstlose Hingabe und abscheuliche Verbrechen, stets ist Liebe mit im Spiel. Nur eine Berufsgruppe – von der dünn gesäten Schar der Hagestolze und Einsiedlermönche einmal abgesehen – hegt grundsätzliche Zweifel am Nutzen des Geschlechtslebens: die Evolutionsbiologen.

Von ihrem Standpunkt aus sind männliche Samenspender nämlich ein unnützer Aufwand bei der Fortpflanzung. Ein Volk von asexuellen Weibchen vermehrt sich einfacher und effektiver, denn es erspart sich das ganze Theater der Partnerwahl unter einander sich übertrumpfenden Männchen sowie die umständliche Begattung.

Doch angesichts der Tatsache, dass Sex nun einmal in Flora und Fauna weit verbreitet ist, muss das Spiel der Geschlechter biologische Vorteile haben. Eine Erklärung besagt: Indem die sexuelle Fortpflanzung das Erbmateriale zweier Eltern durchmischt, vermögen die Individuen sich rascher an wechselnde Umweltbedingungen anzupassen – insbesondere an schnell mutierende Parasiten.

Diese Hypothese geht von einer Koevolution von Wirt und Parasit aus, einer Art biologischem Wettrennen. Demnach kann der Wirtsorganismus besser bestehen, wenn er den immerfort wechselnden Tricks des Schmarotzers mit sexueller beschleunigter Variabilität des eigenen Erbguts begegnet. Biologen sprechen von der Red-Queen-Hypothese, benannt nach einer Episode aus »Alice im Wunderland«: Die Rote Königin erklärt Alice, in ihrer Welt müsse man so schnell wie möglich rennen, um am selben Fleck zu bleiben.

Das klingt plausibel, aber wo bleibt der Beweis? Ihn zu führen, ist jetzt der US-Biologe Levi T. Morran von der Indiana University in Bloomington angetreten. Er hat sich seit Längerem auf das zwischen Zweigeschlechtlichkeit und Selbstbefruchtung changierende Treiben des winzigen Fadenwürmchens *Caenorhabditis elegans* spezialisiert und bereits gezeigt, dass es zu heterosexueller Vermehrung übergeht, wenn man es besonders feindlichen Umweltbedingungen aussetzt (Nature 462, S. 350–352, 2009; siehe auch meinen Einwurf im Januarheft 2010).

**Doch nun wollte Morran die Red-Queen-Hypothese testen.** Seiner Absicht kam zugute, dass das Tierchen unter einem Krankheitserreger namens *Serratia marcescens* leidet – das Bakterium ist der Parasit, der Wurm der Wirt im koevolutionären Wettrennen. Zunächst konnte Morran zeigen, dass durch genetische Manipulation asexuell gemachte Wurmpopulationen schnell aussterben, sobald der Erreger sie befällt.

Setzt man nun normale Würmer eingefrorenen Erregern aus – und unterbindet dadurch die Koevolution des Parasiten –, treten zwar vorübergehend Wurmmännchen auf; doch nach deren Beitrag zum Sieg über den Parasiten kehrt der Wurm wieder zur sparsameren Selbstbefruchtung zurück. Nur wenn sowohl Bakterien als auch Würmer ungehindert ihrem natürlichen evolutionären Wettstreit überlassen werden, dominiert die sexuelle Fortpflanzung der Würmchen auf Dauer (Science 333, S. 216–218, 2011).

Evolutionsbiologische Theorien streng zu beweisen, ist nur ausnahmsweise möglich, denn die untersuchten Anpassungsvorgänge brauchen viele Generationen und dauern in der Regel entsprechend lange. Darum ist Morrans Experiment ein glänzender Erfolg. Wie es zeigt, sind Männchen nur nötig, wenn die Art durch ständig variierende Umweltbedingungen laufend Anpassungsstress ausgesetzt ist. Die Rote Königin hat also doch Recht.



Michael Springer

gung: Das Brennelement des Reaktors, wo die heißen Neutronen durch Kernspaltung entstehen, befindet sich nämlich in einem Tank mit schwerem Wasser ( $D_2O$ ). In diesem Bad, das Zimmertemperatur hat, stoßen die schnellen Spaltneutronen mit den  $D_2O$ -Molekülen zusammen. Wie bei einem idealen Gas wird die Temperaturverteilung der Moleküle auf die Neutronen übertragen.

### Neutronen im Radlertempo

Als Nächstes kommen die vorgekühlten Neutronen mit schwerem Wasserstoff bei einer Temperatur von minus 253 Grad in Kontakt. Wiederum übernehmen sie durch Zusammenstöße mit dem schweren Wasserstoff dessen Temperaturverteilung. Zwar können sie nun für andere Experimente genutzt werden, für uns ist der brauchbare Anteil unter diesen kalten Neutronen jedoch sehr gering: Auf zehn Millionen kommt gerade eines, das langsam genug ist; alle anderen müssen ausgesondert werden. Das geschieht, indem man sie im Gravitationsfeld durch einen gekrümmten Neutronenleiter führt, der sie absorbiert. Dessen Ende verlassen nur noch Neutronen mit einer Geschwindigkeit von höchstens 50 Metern pro Sekunde. Schließlich sorgen mehrere Blenden dafür, dass unsere Apparatur nur Neutronen durchfliegen, die nicht schneller als ein Radfahrer sind, nämlich sechs bis sieben Meter pro Sekunde. Diese ultrakalten Neutronen werden unter allen Auftreffwinkeln von den Wänden des Neutronenleiters reflektiert.

Bereits vor einem knappen Jahrzehnt gelang uns zusammen mit französischen und russischen Kollegen an der ILL-Neutronenquelle die erste Beobachtung eines gravitativ gebundenen Quantensystems (Nature 415, S. 297–299, 2002). Mit unserem neuen Versuchsaufbau folgt nun der nächste logische Schritt: Wir erzeugen Übergänge zwischen den einzelnen gebundenen Zuständen und können diese sehr genau vermessen. Dazu reflektieren wir die ultrakalten Neutronen mit einem so genannten Neutronenspiegel. Ein solcher Spiegel ist eine besonders ebene, etwa drei Zentimeter dicke, polierte

# Das Merkel-Syndrom

Was das Volk über die Kanzlerin denkt



Die ganze Welt der Politik!

Jetzt Gratisheft anfordern!

JA, ICH WILL CICERO GRATIS TESTEN! Bestellnr.: 779255

**\*Angebotsbedingungen:** Bitte senden Sie mir zunächst ein kostenloses Abo-Probeheft. Wenn mir Cicero gefällt, brauche ich nichts weiter zu tun. Ich erhalte Cicero dann monatlich frei Haus zum Abo-Vorzugspreis von zurzeit 7,- EUR pro Ausgabe und spare somit über 10 % gegenüber dem Einzelkauf. Falls ich Cicero nicht weiterlesen möchte, teile ich Ihnen dies innerhalb von zwei Wochen nach Erhalt des Gratisheftes mit. Auch danach gehe ich kein Risiko ein, denn ich kann mein Abonnement jederzeit kündigen. Preis im Inland inkl. MwSt. und Versand, Abrechnung als Jahresrechnung über zwölf Ausgaben, Auslandspreise auf Anfrage. Cicero ist eine Publikation der Ringier Publishing GmbH, Friedrichstraße 140, 10117 Berlin, Geschäftsführer Rudolf Spindler.

Vorname, Name ..... Geburtsdatum .....

Straße, Nr. ....

PLZ, Ort .....

Telefon .....

E-Mail .....

Ich habe die Angebotsbedingungen\* gelesen und akzeptiert.

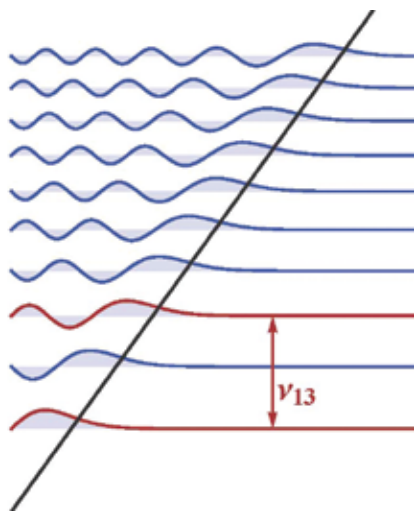
Ja, ich bin damit einverstanden, dass Cicero und der Ringier Verlag mich künftig per Telefon oder E-Mail über aktuelle Angebote des Verlages informieren.

Datum .....  Unterschrift .....

**Cicero-Leserservice** Per Fax: **20080 Hamburg** **0800 77 88 790**  
Per E-Mail: **abo@cicero.de** Gratis per Telefon: **0800 282 20 04**

[www.cicero.de/probe](http://www.cicero.de/probe)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN



Energieunterschiede zwischen Quantenzuständen messen Forscher schon seit Langem – etwa in Atomen. Doch die Unterschiede zwischen den Energieniveaus, die durch die Gravitationskraft entstehen, sind eine Million Millionen Mal kleiner als die elektronischen Energieübergänge in der Atomhülle.

Glasscheibe. Die Geschwindigkeitskomponenten der Neutronen auf die Scheibe zu oder von ihr weg sind winzig, sie liegen im Bereich von Zentimetern pro Sekunde. Derart langsam dringen sie nicht in das Glas ein – das verhindert das stufenartige Potenzial der starken Wechselwirkung der Atomkerne an der Scheibenoberfläche. Die Neutronen sind nun im Gravitationspotenzial gefangen. Bei solch kleinen Neutronenenergien sorgt das Zusammenspiel von Gravitation und Quantenmechanik dafür, dass nur bestimmte Energiewerte angenommen werden können. Dies ist eine genuine Eigenschaft gebundener quantenmechanischer Systeme. Der erste erlaubte Zustand, also der Grundzustand, hat eine Energie von 1,4 Piko-elektronvolt, der zweite entspricht 2,4 Piko-elektronvolt. Die Stärke der Gravitation bestimmt die Größe dieser Energieaufspaltung.

Für die Übergänge zwischen den Niveaus lassen wir den Neutronenspiegel vibrieren. Sobald der Energiebetrag der Vibration genau zu der Energiedifferenz zwischen zwei Quantenniveaus passt (wenn also der Resonanzfall ein-

tritt), springen die Neutronen in den höheren Energiezustand. Wenn wir die Frequenz dieser Vibration messen, erhalten wir also ein präzises Maß für die Größe des Energieunterschieds beider Niveaus. Wie von gebundenen Elektronen gewohnt, lassen sich auch bei gebundenen Neutronen bezüglich des Aufenthaltsorts Wahrscheinlichkeitsaussagen treffen. Diese Wahrscheinlichkeiten erhält man aus den in der Grafik dargestellten Zuständen. Für die konkreten Messungen wird 27 Mikrometer (millionstel Meter) über dem Spiegel ein Absorber angebracht. Nun können nur die Grundzustand-Neutronen den Detektor erreichen, der die eintreffenden Teilchen zählt. Die Neutronen in höheren Energiezuständen werden vom Absorber herausgestreut. Die Folge dieser Anordnung: Tritt Resonanz auf, treffen weniger Teilchen auf den Detektor. So lässt sich auf winzigen Längenskalen von weniger als zehn Mikrometern höchst präzise die Stärke der Gravitation ermitteln.

Newtons Gravitationsgesetz ist sehr gut überprüft, und zwar auf Maßstäben von Millimetern bis hin zu kosmischen Distanzen. Zukünftig werden solche Experimente diese Prüfung auch auf der Mikrometerskala erlauben. Dabei geht es einerseits darum, hypothetische Kräfte kurzer Reichweite aufzuspüren. Andererseits sind auch kosmologische Themen wie Dunkle Materie und Dunkle Energie tangiert. So könnten beispielsweise die hypothetischen Axione, die als Dunkle-Materie-Teilchen gehandelt werden, Abweichungen vom Gravitationsgesetz bewirken. Ein weiterer Bereich sind konkrete Konstruktionen zur mehrdimensionalen Feldtheorie, die ebenfalls die Gravitation bei kleinen Abständen modifizieren, um so die kleine kosmologische Konstante zu erklären. Damit eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten, fundamentale Theorien auf den Prüfstand zu stellen – 21 Größenordnungen unterhalb der Energieskala des Elektromagnetismus.

**Hartmut Abele** leitet die Neutronen- und Quantenphysikgruppe am Wiener Atominstitut und ist Professor an der Technischen Universität Wien.

# Ruf der Krokodile

Die gefürchteten Reptilien benutzen verschiedene Laute zur Kommunikation mit Artgenossen – manchmal sogar in ganz ähnlicher Weise wie die verwandten Vögel: etwa Rufe aus dem Ei. Möglicherweise handelt es sich dabei um ein gemeinsames Erbe mit den Dinosauriern.

Von Nicolas Mathevon und Amélie Vergne

**K**rokodile – Sinnbild des Schreckens tropischer Gewässer. Wer würde ihnen ein feines Ohr für die Stimmen ihrer Jungen zutrauen? Und doch richtet die Krokodilmutter danach ihr Verhalten aus. Sie merkt, ob ihnen Gefahr droht, und hört sogar, wann die Brut schlüpfen will.

Die »Panzerrechen«, wie sie auch heißen, stellen heute mit 23 übrig gebliebenen Arten nur noch den kümmerlichen Rest einer einst blühenden Gruppe der Reptilien dar. Ihre große Zeit war das Erdmittelalter, als sie neben den Dinosauriern

die Tierwelt dominierten. Aber im Unterschied zu diesen starben sie vor rund 65 Millionen Jahren nicht aus.

Biologen zählen die Krokodile wie auch die Dinosaurier und die Flugsaurier zu den Archosauriern, den Herrscherreptilien (nach griechisch *arche*: »Anfang«, »Führung«, »Herrschaft«). Zur selben Ordnung gehören die Vögel, die von Dinosauriern abstammen. Diese alte Verwandtschaft mag das in mancher Hinsicht recht ausgeprägte Sozialleben von Krokodilen und ihr Repertoire an Kommunikationsmöglichkeiten erklären, dabei vor allem auch die Verwendung



SHUTTERSTOCK/TREVOR KELLY



ISTOCKPHOTO / TREVOR KELLY

Direkt nach dem Schlüpfen geben Krokodile Quaktöne von sich. Die Mutter erkennt sie daran zwar vermutlich nicht individuell, sieht sich aber veranlasst, ihre Jungen zum Wasser zu bringen und zu beschützen.

von je nach Situation unterschiedlichen Lautäußerungen. Das erinnert teils tatsächlich an Verhalten von Vögeln.

Die Linie der Krokodile trat schon vor 240 Millionen Jahren in Erscheinung, im frühen Erdmittelalter. Anfangs waren es wohl noch reine Landtiere, aber schon bald entwickelten sich Formen, die sich gern im Wasser aufhielten und heutigen Vertretern in wesentlichen anatomischen Merkmalen ähnelten. Sogar »moderne« Krokodile gab es schon zur Zeit der Dinosaurier. Heute existieren 23 Arten, die Systematiker in drei Familien gliedern: Echte Krokodile, Alligatoren und Gaviale (siehe Kasten S. 24). Alle heutigen Arten leben in den Tropen und Subtropen, die meisten in und bei Binnengewässern. Nur die größte Art, das Leistenkrokodil aus Südostasien und Australien, bevorzugt Salz- und Brackwasser und schwimmt manchmal weit in den Ozean hinaus.

Soweit bisher überhaupt genauer erforscht, ähnelt sich das Sozial- und Fortpflanzungsverhalten der einzelnen Spezies in vielem, selbst das von Echten Krokodilen und Alligatoren. Mit den Rufen und Schreien scheint es sich ähnlich zu verhalten. Konkurrenz um Ressourcen wie Sexualpartner, Territorien

oder Beutetiere wird gern lautstark und mit demonstrativen Haltungen und Bewegungen ausgefochten. Dadurch ergeben sich Hierarchiekonstellationen, wobei das größte und aggressivste Männchen die Dominanz zu erringen pflegt.

Territoriumsbesitzer verteidigen ihr Revier besonders in der Fortpflanzungszeit heftig. Sie kontrollieren auch immer wieder den eigenen Uferabschnitt. Kommt es zu einer Konkurrenzsituation, nehmen sie markante Körperhaltungen ein und geben weithin hörbare Rufe von sich, oft ein Brüllen, das mindestens einen Kilometer weit schallt. Diese Schreie sind individuell unterscheidbar. Vielleicht signalisieren die Tiere damit ihre Größe und Kraft, und zwar nicht nur potenziellen

#### AUF EINEN BLICK

##### REDESELIGE REPTILIEN

**1** Krokodile verständigen sich mit **verschiedenen Rufen** – was sonst bei Reptilien ungewöhnlich ist. Je nach Anlass brüllen, zischen, brummen oder quaken sie: bei Revierkämpfen, beim Hochzeitstanz, bei der Brutpflege.

**2** Schon die **Jungen im Ei** geben kurz vor dem Schlüpfen Töne von sich – zur gegenseitigen Synchronisation und für die Mutter, die ihnen ans Tageslicht hilft.

**3** Die **Lautverarbeitung** in Ohr und Gehirn erinnert in vielem an Prozesse bei Vögeln. Insgesamt wurden die gefährlichen Panzerechsen jedoch noch sehr wenig erforscht.

## Die letzten ihrer Sippe

**Drei Krokodilfamilien existieren heute noch**, mit insgesamt 23 Arten. In Amerika leben vier Echte Krokodile – unter anderem das Orinoko-Krokodil (*Crocodylus intermedius*) – sowie sieben Alligatoren: etwa der Mississippi-Alligator (*Alligator mississippiensis*) und der Mohrenkaiman (*Melanosuchus niger*). In Afrika gibt es drei Echte Krokodile – darunter das Nilkrokodil (*C. niloticus*). In Asien kommen sieben Echte Krokodile vor: zum Beispiel das Sumpfkrokodil (*C. palustris*) und der Sunda- (Falsche) Gavial (*Tomistoma schlegelii*); ein Alligator: der China-Alligator (*A. sinensis*) sowie der einzige Vertreter der Gaviale: der Gangesgavial



SHUTTERSTOCK / SPECTRAL-DESIGN (M)

(*Gavialis gangeticus*). In Australien leben nur zwei Echte Krokodile: das Leisten- (Salzwasser-)krokodil (*C. porosus*) und das Australien-Krokodil (*C. johnsoni*).



**ALLIGATORIDAE: ALLIGATOREN UND KAIMANE**  
4 GATTUNGEN, 8 ARTEN

**Kennzeichen:** ovale Schnauze; vierter unterer Zahn bei geschlossenem Maul nicht sichtbar  
**Länge:** Alligatoren bis 3,5 Meter; Kaimane bis 7 Meter

**CROCODYLIDAE: ECHE KROKODILE**  
3 GATTUNGEN, 14 ARTEN

**Kennzeichen:** lange, dreieckige Schnauze; vierter unterer Zahn bei geschlossenem Maul sichtbar  
**Länge:** bis 7 Meter

**GAVIALIDAE**  
1 ART

**Kennzeichen:** lange, schmale Schnauze; Zähne gleichartig; Augen ragen hervor  
**Länge:** Männchen bis 7 Meter

Konkurrenten, sondern auch dem anderen Geschlecht. Vor allem bei Arten, die Sumpfbereiche bevorzugen, ist die territoriale Abgrenzung oft recht stark ausgeprägt. Manche anderen, wie das Nilkrokodil, geben sich geselliger. Zudem sind Alligatoren wesentlich lautfreudiger als die Echten Krokodile.

Die in der Regel deutlich kleineren Weibchen scheinen nicht unbedingt eine feste Beziehung zu einem bestimmten Territoriumsmännchen zu haben. Aber sie können untereinander Dominanzen etablieren, und auch sie behaupten, besonders zur Brutzeit, ein Gebiet. Dann stoßen sie ebenfalls raue Rufe aus, nur insgesamt weniger als die Männchen. Ihr Nest verteidigen sie mit kurzen, leiseren Zischlauten.

### Lärmige Balz

Selbst die Paarung ist keineswegs eine stille Angelegenheit. Das Balzzeremoniell, das im Wasser abläuft und sich bis zu einer Stunde hinzieht, begleiten Männchen wie Weibchen mit Grunzen und Bellen. Die Weibchen geben teils auch leises, drohendes Zischen von sich und die Männchen Lockrufe, die wohl zugleich Konkurrenten abschrecken. In der ersten Phase stoßen beide brüllende und grollende Laute aus. Schließlich schwimmen die Partner zueinander. In einer Art Hochzeitstanz blasen sie nun Wasser aus den Nüstern, schlagen den Kopf trommelnd auf die Oberfläche, und sie erzeugen niederfrequente Vibrationen, die unter Wasser weit

tragen; das alles begleitet von auffälligen Körperhaltungen. Dazu übermitteln sie aus Moschusdrüsen, die im Bereich des Unterkiefers und der Kloake sitzen, intensive Duftsignale, die den Effekt ihrer Berührungen sicherlich verstärken. Mississippi-Alligatoren etwa reiben am Ende meist die Rücken aneinander.

Die Tiere trennen sich gleich nach der Begattung wieder. Bei manchen Arten legt das Weibchen erst Monate später mehrere Dutzend Eier ab, um deren weiteres Schicksal es sich in der Regel offenbar allein kümmert. Es brütet sie zwar nicht selbst aus, legt sie aber in eine Art Nest, das es streng bewacht. Das Nilkrokodil beispielsweise gräbt dazu am Ufer eine tiefe Mulde, die es später wieder zuscharrt und auch mit Pflanzenresten bedeckt. Eine Reihe anderer Arten, etwa die Alligatoren, bauen einen Haufen aus Laub, Gras und Zweigen. Die darin aufkommende Gärwärme mag im schattigen Wald die passende Bruttemperatur erzeugen. Ort und Nestbeschaffenheit, das Verhältnis von Sonne und Beschattung müssen gut gewählt sein, auch sorgt die angehende Mutter regelmäßig für Befeuchtung. Denn der Wärmegrad im Ei bestimmt das spätere Geschlecht der Jungen: Bei etwa 34 Grad Celsius entwickeln sich männliche, unterhalb von etwa 31 Grad weibliche Tiere. Da die Schichten im Nest unterschiedlich warm sein können, entschlüpfen einem Gelege nach zwei bis drei Monaten meist Tiere beider Geschlechter.



Weniger gesellige Arten, wie der im Amazonasgebiet heimatische Mohrenkaiman, pflegen ihre Brutnester weit voneinander entfernt anzulegen. Dagegen nutzen beim Nilkrokodil oft viele Weibchen dasselbe günstige Gebiet. Ihre Jungen brauchen bis zum Schlüpfen knapp drei Monate.

Kurz vorher wird die Mutter geschäftig. Mit ihren Vorderbeinen schaufelt sie die Eier frei. Die frisch geschlüpfte Brut, der sie manchmal wohl sogar aus dem Ei hilft, lockt sie mit Grunzlauten, woraufhin die Jungen ihr folgen. Sie nimmt ihre Kinder vorsichtig ins Maul, trägt sie zum Wasser und setzt sie dort ab.

Die Kleinen fressen zwar gleich selbstständig, bleiben aber zunächst noch eng mit der Mutter zusammen, von der sie vehement beschützt werden und die sie mit Grunzen in ihrer Nähe hält. Diese Phase dauert bei einigen Krokodilarten ein paar Wochen, bei anderen mehrere Monate.

### **Weckruf aus dem Ei**

Wenn die Jungen ein Stück gewachsen sind, vertreibt die Mutter sie manchmal, bevor ihre nächste Brut schlüpft. Oder ein Naturereignis wie Hochwasser trennt sie voneinander. An ein und demselben Ort trifft man unterschiedliche Altersklassen von Jungtieren – wie überhaupt verschieden große Individuen – normalerweise nicht an. Die Gefahr, dass größere Tiere die kleineren fressen, wäre wohl zu groß. Auch erwachsene Männchen erbeuten gelegentlich ein Jungkrokodil.

Den Kontakt mit der Mutter nehmen die Jungen schon einige Stunden, manchmal auch ein paar Tage vor dem Schlüpfen mit quäkenden Rufen auf. Das erinnert an Vogelküküen,

die sich piepsend bereits im Ei melden. Erst in den 1960er und 1970er Jahren entdeckten britische und amerikanische Zoologen ein vergleichbares Verhalten bei Krokodilen. Auch später, vor allem in den ersten Lebenswochen, halten die Jungen mit verschiedenen Quaklauten Kontakt zur Mutter wie auch zueinander. Mit zunehmendem Alter werden die Rufe dann seltener.

Allerdings ist das Lautrepertoire junger Krokodile recht begrenzt. Auch darin ähneln sie Vogelküküen. Grob haben wir vier übergeordnete Ruftypen ausgemacht (siehe Kasten S. 26): Den Quakton beim Schlüpfen; einen Kontaktlaut in den ersten Lebenswochen; einen lauten Klageschrei bei Angst oder Verlassenheit; und einen besonderen zischenden Drohlaut bei akuter Gefahr, den sie äußern, wenn sie sich wehren.

Wir haben die speziellen Eigenarten dieser verschiedenen Rufe der Jungen auf der Krokodilfarm von Pierrelatte im Rhönetal an Nilkrokodilen genauer untersucht. Besonders der Laut beim Schlüpfen interessierte uns. Was die kleinen Krokodile vor und gleich nach der Geburt äußern, klingt etwas verschieden. Tatsächlich sind die Quaktöne aus dem Ei ein wenig kürzer und dunkler als die Rufe gleich nach der Geburt. Erstere haben wir Küküen im Ei per Lautsprecher vorgespielt – daraufhin wurden sie unruhig und begannen

**Eine Nilkrokodilmutter wühlt den Sand auf, als sie unter sich Jungenrufe hört – von einem dort vorher vergrabenen Lautsprecher. Sie hatte hier Eier in einem Loch abgelegt, sie zugedeckt und drei Monate lang beschützt.**



NICOLAS MATHEVON UND AMÉLIE VERGÈNE

selbst zu rufen. Ähnlich wie bei vielen Vögeln dürften diese Laute somit das Schlüpfen des Geleges synchronisieren, was gerade bei Nestflüchtern wichtig sein kann.

Aber die frühen Schreie haben noch eine weitere Funktion: Sie machen die Mutter offenbar darauf aufmerksam, dass es jetzt an der Zeit ist, das Gelege wieder frei zu graben. Auch hierzu gibt es eine Parallele bei Vögeln: Die Eltern merken am Gepiepse in den Eiern, dass der Schlüpfzeitpunkt naht.

In Pierrelatte betreuen jeden Frühsommer einige Nilkrokodilweibchen Nester mit Eiern. Es gelang uns dort, Verhaltensreaktionen von insgesamt zehn werdenden Müttern zu erfassen. Dazu haben wir ihre Gelege kurz vor dem Ende der dreimonatigen Brutphase gegen Lautsprecher ausgetauscht, die wir einen halben Meter tief eingruben. Notgedrungen mussten wir die Weibchen vorher kurz von ihren Nestern entfernen. Als wir sie wieder hinließen, kehrten neun von ihnen binnen fünf Minuten genau zu der Stelle zurück.

20 Minuten später schalteten wir den Lautsprecher ein. Wir spielten nun entweder eine Folge von Eilauten ab – oder aber, teils zuerst, teils als Zweites, ein Rauschen gleicher Länge und Frequenzbreite. Die Reaktionen der werdenden Mütter auf die Töne von unten waren eindeutig: Beim Quaken regten sich alle Weibchen unverzüglich und bewegten den Kopf oder auch den Körper. Acht von ihnen begannen gleich den Sand aufzugraben (Bild S. 25). Dagegen rührten sich bei dem Geräusch nur vier Tiere überhaupt – und das eher gemächlich, während sie auf die Jungenrufe schnell und lebhaft ansprachen.

Wir haben auch eine Erklärung dafür gefunden, warum die Quaklaute der eben geschlüpften Jungen etwas anders klingen als die Rufe aus dem Ei. Offensichtlich wird die Mutter von ihnen zum nächsten Verhaltensschritt angeregt: Sie muss die Brut nun ins Wasser tragen.

Später, während der ersten Lebenswochen, äußern die Krokodilbabys sehr oft einfach Kontaktrufe – zum Beispiel wenn sie miteinander auf Fresstour sind oder sich als Gruppe auf den Weg machen. Diese Kontaktrufe ähneln zwar den Schlüpfrufen in der Frequenzbreite und Modulation, sind aber kürzer und leiser.

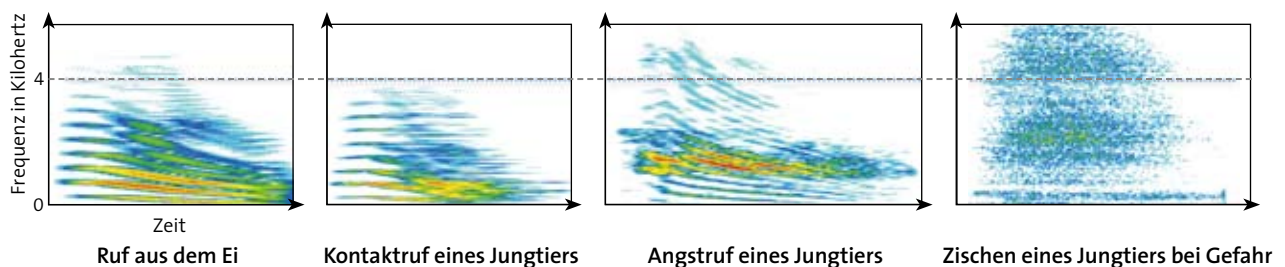
Als eine Abwandlung des Eirufs erscheint gleichfalls das laute, intensive Angstgeschrei, das die Jungen bei akuter Gefahr von sich geben, etwa wenn man sie am Schwanz festhält. Dieser Schrei fällt durch die noch stärker schwankende Tonhöhe auf, zudem durch seine längere Dauer, höhere Frequenz und Intensität. Dagegen ist der drohende Zischlaut völlig unmelodisch und gliedert sich auch nicht in deutlich abgrenzbare Frequenzbänder.

### Bei den Kaimanen im Dschungel

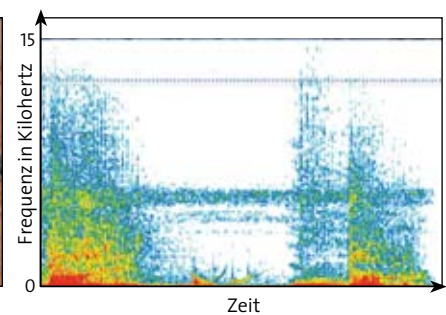
Wir wollten die soziale Bedeutung des Kontaktrufs und des Angstschreis im Freiland experimentell untersuchen. Dazu testeten wir in Guyana (dem einstigen Britisch-Guayana) Mohrenkaimane, die größten südamerikanischen Wirbeltiere. Diese Krokodile aus der Verwandtschaft der Alligatoren werden bis zu sieben Meter lang. Zu unserem Forscherteam

## Die Palette – mal zart, mal stimmgewaltig

Einige typische Lautäußerungen sind hier als Sonogramm dargestellt, um die physikalischen Eigenschaften zu erkennen: Man sieht, wie sich Grundfrequenz und Oberschwingungen im Zeitverlauf ändern. Die Farben geben die Intensität (Lautstärke) wieder; Rot bedeutet hohe, Blau geringe Intensität.



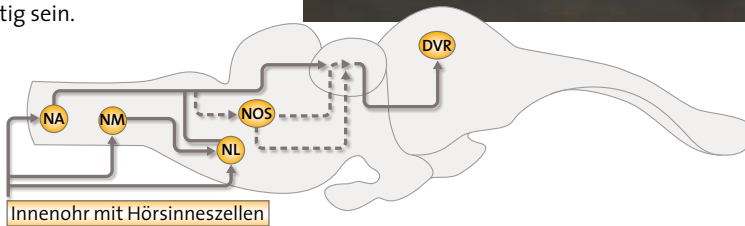
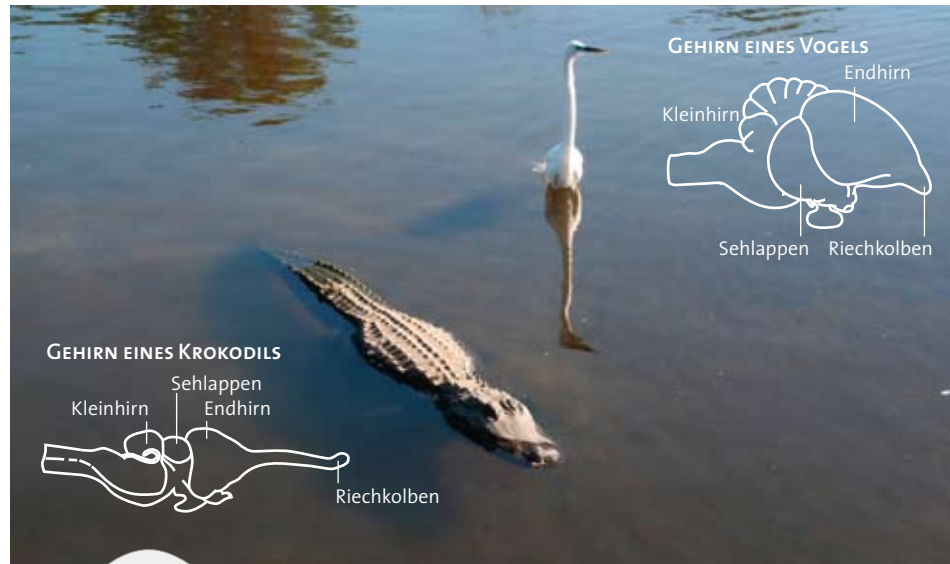
Krokodile geben bei vielen sozialen Anlässen Laut, sogar schon im Ei.



Brüllen eines erwachsenen Krokodils

## Reptil mit gut entwickeltem Hirn

Ein Krokodilgehirn gleicht in seinem Aufbau in vielem dem von Vögeln, auch wenn die Proportionen andere sind. Hörsignale aus dem Innenohr gelangen zu zwei Kernen im Mittelhirn (NA und NM). Über verschiedene Schaltstationen kommt die Information auch ins Endhirn an eine Stelle, die der primären Hörrinde von Säugetieren entspricht. Weitere im Schema bezeichnete Hirnkerne könnten für die Lokalisation der Töne wichtig sein.



- NA Nucleus angularis
- NM Nucleus magnocellularis
- NL Nucleus laminaris
- NOS Nucleus olivaris superior
- DVR dorsaler ventrikulärer Kamm

gehörten Thierry Aubin, Forschungsdirektor an der Universität Paris Sud, wo er eine Arbeitsgruppe leitet, die akustische Kommunikation untersucht, und der amerikanische Reptilienkundler und Krokodilexperte Peter Taylor, der unter anderem in Guyana vor Ort arbeitet.

Eine Kaimanmutter hat pro Brut etwa 20 bis 50 Junge. Während die Babys sich nah beieinander in Ufernähe tummeln, liegt sie reglos, aber höchst wachsam ein Stück entfernt. An ihrem Uferabschnitt duldet sie sonst keinen anderen Artgenossen.

Zunächst haben wir die normalen Kontaktrufe der Jungen aufgezeichnet, die sie von sich geben, wenn sie keine Gefahr verspüren. Danach provozierten wir Angstschreie, indem wir sie am Schwanz packten – was ihnen übrigens nicht schadete. Nach dem Klangeindruck und den Klanganalysen verwenden auch junge Kaimane für die beiden Situationen klar unterscheidbare Laute, deren Struktur sich aber voneinander herleiten lässt.

Wie würden die Muttertiere und die Jungkrokodile auf diese Aufnahmen reagieren? Wir bauten den Lautsprecher auf der Uferböschung gut zehn Meter von den Jungen entfernt auf – natürlich in gebührendem Abstand zur Mutter. Und wirklich verhielten sich die Tiere passend: Die Mütter zeigten auf reine Kontaktlaute hin keine Regung. Ertönte aber Angstgeschrei, waren sie sofort zur Stelle, das heißt, sie rasten zum Lautsprecher hin, oft unter Gebrüll. Die Jungen verhielten sich anders: Sie näherten sich dem Lautsprecher

bei vorgespielten Kontaktrufen. Hörten sie Angstschreie, so verharren sie an Ort und Stelle und begannen selbst ängstlich zu quaken. Zur Kontrolle erzeugten wir Geräusche, die den verschiedenen Rufen in Länge und Frequenzbreite ähnelten. Das ignorierten unsere Versuchstiere vollkommen.

Erwachsene Krokodile verhalten sich insgesamt viel stiller als Jungtiere – abgesehen von den Kontaktlauten (Locktönen) im Umgang mit den Jungen, den Drohschreien bei der Paarung, Revierverteidigung und der Nestbewachung oder dem Zischen, wenn ein Weibchen auf ein Männchen stößt. Im Vergleich zu anderen Reptilien besitzen sie allerdings ein geradezu reiches Lautrepertoire für verschiedene Situationen. Zwar geben auch manche Schlangen und Eidechsen mitunter ein paar Töne von sich, und Schildkröten stöhnen laut bei der Kopulation – aber die Krokodile ähneln mit ihren unterschiedlichen vokalen Äußerungen in diversen sozialen Zusammenhängen eher den Vögeln.

### Brutpflege als uraltes Erbe

Somit ist anzunehmen, dass die Neigung der Vögel wie der Krokodile, Laute für soziale Zwecke zu gebrauchen, von gemeinsamen Vorfahren stammt, die vor über 200 Millionen Jahren lebten. Gleiches dürfte für die ausgeprägte Brutpflege in beiden Gruppen gelten. Zwar gibt es vom Verhalten dieser Vorfahren keine entsprechenden Zeugnisse – doch immerhin belegen Fossilfunde, dass zumindest manche Dinosaurier schon Brutpflege betrieben, nämlich auf ihren Nestern

saßen oder zumindest ihre Eier und später selbst die Jungen bewachten. Das scheint für mehrere ihrer Linien zu gelten. Vielleicht hüteten sogar alle Archosaurier, somit auch alle Dinosaurier, ihre Eier und verständigten sich mit ihren Jungen durch Laute.

Nun gehört zu einer akustischen Kommunikation nicht nur die Lauterzeugung, sondern auch der Empfang und die Entschlüsselung der Rufe, also entsprechende Sinnesleistungen mit den zugehörigen Hirnzentren. Über das Hörvermögen von Krokodilen wissen die Forscher leider noch nicht allzu viel, doch immerhin zeichnet sich ab: Krokodile können offenbar recht differenziert hören. Sowohl die Sinnesstrukturen im Ohr als auch die Verarbeitungsinstanzen im Gehirn erweisen sich als ziemlich ausgefeilt.

### Feine Ohren für den Nachwuchs

Nilkrokodile hören nach elektrophysiologischen Messungen Töne zwischen 100 und 10 000 Hertz, erfassen also einen recht großen Frequenzbereich. Am empfindlichsten sind sie aber für Töne zwischen 800 und 1500 Hertz – passend zu den Rufen ihrer Jungen, deren lauteste Frequenz normalerweise um 900 Hertz liegt.

Krokodilohren gleichen im inneren Aufbau denen der höheren Wirbeltiere, insbesondere der Vögel. Auch sie bestehen aus einem Außenohr, einem Mittelohr mit einem wie bei den Vögeln einzigen Gehörknöchelchen (nur die Säugetiere haben drei) und einem Innenohr mit den Hörsinneszellen, die wegen feiner herausragender Zilien auch Haarsinneszellen heißen. Die äußere Ohröffnung liegt – eine Anpassung an die amphibische Lebensweise – auf gleicher Höhe wie Augen und Nasenlöcher, so dass von einem an der Oberfläche schwimmenden Tier nichts weiter aus dem Wasser ragt als diese drei Strukturen. Zudem besitzen Krokodile Ohrlider, mit denen sie beim Tauchen die Ohrlöcher verschließen. Die Nasenklappen gehen dann ebenfalls zu.

Wenn Schallwellen auf das Trommelfell am Ende des äußeren Gehörgangs auftreffen, überträgt das luftgefüllte Mittelohr sie mit Hilfe des Gehörknöchelchens zum Innenohr, das mit einer Flüssigkeit gefüllt ist. Diese gerät in Schwingung und mit ihr eine im Innenohr befindliche Membran mit den Hörsinneszellen, die nun über einen komplexen Prozess erregt werden. Wiederum wie bei den Vögeln verbindet ein Kanal das Mittelohr mit den Atemwegen und mit dem Ohr der anderen Seite, was bei der Lokalisation von Tönen hilft.

## Stimmbildung für Panzerechsen

Ein differenziertes Organ zur Lauterzeugung scheinen Krokodile nicht zu besitzen. Ihr Kehlkopf trägt keine Stimmlippen, die unterschiedlich stark und zeitlich fein abgestimmt in Schwingung versetzt werden können. Offenbar verändern Muskelkon-

traktionen die Spannung in der Kehlwandung. Zudem haben Krokodile im Rachen ein Gaumensegel, das sie unter Wasser verschließen können. Die Rufe klingen bei geöffnetem Segel wesentlich lauter.



Die Sinneszellen des Innenohrs sitzen auf einer lang gestreckten so genannten Basilarmembran. Bei den Vögeln und Krokodilen ist diese Membran leicht gebogen, bei den Säugern schneckenförmig gewunden. Ebenfalls mit den Säugern und den Vögeln vergleichbar ist die Ausstattung mit zwei schon äußerlich verschiedenen Typen von Hörsinneszellen, die sich an der Basilarmembran verschieden verteilen und mit dem Hörnerv unterschiedlich verdrahtet sind. Beide Typen arbeiten in einer Weise zusammen, die vermutlich die Hörschärfe verbessert. Bei den Krokodilen spricht man von großen und kleinen Haarzellen. Die kleine Sorte erfasst besonders gut hohe Frequenzen. Sie ist insgesamt zahlreicher, vor allem aber am Anfang der Membran nah am Mittelohr, wo die höheren Töne registriert werden. Zum Endabschnitt der Membran hin, der für die tieferen Töne zuständig ist, häuft sich der größere Sinneszelltyp.

Im Detail sehen die Sinnesstrukturen des Innenohrs bei den Krokodilen, Vögeln und Säugern etwas verschieden aus, doch lässt sich aus der Funktionsweise besonders bei den Vögeln vielleicht auch auf einige Leistungen des Krokodilgehörs schließen. Bei den Vögeln sind die beiden Zelltypen aber nicht so klar in zwei Fraktionen sortiert, sondern bilden Übergangsformen. Die kleinen Zellen dienen allein Signalen, die ins Gehirn gehen, während die großen auch von dort Informationen aufnehmen, quasi eine Rückmeldung erhalten – was der Hörgenauigkeit und -empfindlichkeit insgesamt zugutekommen dürfte.

### Unterschätzte Krokodile

Folgt man bei Krokodilen dem Hörnerv ins Gehirn, finden sich wiederum manche Ähnlichkeiten zu den Vögeln. Das betrifft sowohl anatomische Strukturen als auch offenbar einige der Verarbeitungsschritte (siehe Kasten S. 27). Der Hörnerv leitet die Signale zu zwei Kerngebieten im Mittelhirn (den Nuclei cochleares angulares und Nuclei cochleares magnocellulares), wo sie in einem räumlichen Muster eintreffen, das der Verteilung der Sinnesreize an der Basilarmembran entspricht, wie bei Vögeln. Über weitere Schaltstationen gelangt die Information auch zum Endhirn, und zwar zum dorsalen ventrikulären Kamm, dort immer noch nach der Herkunft räumlich sortiert. Funktionell dürfte diese Struktur der primären Hörrinde der Säugetiere entsprechen. An anderen Stellen im dorsalen ventrikulären Kamm der Krokodile treffen überdies Seh- und Fühlsignale ein.

Ob Krokodile, wie es bei Vögeln geschieht, die Hörsignale im Mittelhirn zur weiteren Analyse in zwei verschiedene, parallel arbeitende Schaltkreise schicken, ist noch nicht bekannt. Auch ob Krokodile im Endhirn etwas den sekundären Lautverarbeitungsarealen der Vögel Vergleichbares besitzen, bleibt zu erforschen. Ebenso wissen die Forscher noch nicht, ob sie über besondere für die Lautproduktion zuständige Hirnzentren verfügen.

Auch wenn die Vögel und die Säugetiere die größten Stimm- und Hörspezialisten hervorgebracht haben, bis hin zur Traditionsbildung von Lauten und Gesängen, so kommt



akustische Kommunikation doch schon bei Fischen vor. Über die Krokodile ist in der Hinsicht noch allzu wenig bekannt. Immerhin wissen wir bereits, dass Krokodile Artgenossen und fremden Arten mit ihren Rufen und Schreien verschiedenartige Inhalte übermitteln. Anscheinend teilen Erwachsene damit ihre Artzugehörigkeit mit, aber wohl auch zumindest ihr Geschlecht und ihre Körpergröße. Junge Tiere drücken in Lauten ihr Befinden aus, etwa Angst, und die Geschwister sowie die Mutter reagieren dann entsprechend. Individuelles Erkennen der eigenen Jungen anhand ihrer Rufe erfolgt aber offenbar nicht.

Wie sich in der Evolutionsgeschichte der Wirbeltiere die akustische Kommunikation zusammen mit dem Gehirn und dem Sozialleben entwickelt hat, bleibt ein spannendes Forschungsfeld. Eines ist inzwischen klar: Die Krokodile haben wir bisher unterschätzt. ~

### DER AUTOR



**Nicolas Mathevon** ist Professor an der Université de Saint-Étienne und Mitglied des Institut Universitaire de France (IUF). Am Zentrum für Neurowissenschaften Paris-Süd leitet er die Abteilung für Sensorische Neuroethologie (ENES). **Amélie**

**Vergne** promovierte 2009 an der Université de Saint-Étienne über die Lautäußerungen von Krokodilen. Jetzt forscht sie an der Université de Montpellier.

### QUELLEN

**Cirulli, E.T., Goldstein, D.B.:** Uncovering the Roles of Rare Variants in Common Disease through Whole-Genome Sequencing. In: Nature Reviews Genetics 11, S. 415–425, Juni 2010

**Feero, W.G. et al.:** Genomic Medicine – An Updated Primer. In: New England Journal of Medicine 362, S. 2001–2011, 27. Mai 2010

**McClellan, J., King, M.-C.:** Genetic Heterogeneity in Human Disease. In: Cell 141, S. 210–217, 16. April 2010

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen, auch Links zu Film- und Lautaufnahmen, finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/116463](http://www.spektrum.de/artikel/116463)

# Leben in der Quantenwelt

Die Gesetze der Quantenmechanik beherrschen nicht nur den Mikrokosmos, sondern liegen in größerem Maßstab auch der Natur zu Grunde. Vielleicht machen sich sogar Pflanzen bei der Fotosynthese oder Zugvögel bei der Orientierung typische Quanteneffekte zu Nutze.

Von Vlatko Vedral

Für die Physiklehrbücher ist die Sache klar: Die Quantenmechanik beschreibt die Gesetze des Mikrokosmos. Sie liefert die Theorie für Teilchen, Atome und Moleküle – während für Billardkugeln, Menschen und Planeten die klassische Physik gelten soll. Irgendwo zwischen Molekülen und Billardkugeln liegt damit eine Grenze, an der das seltsame Verhalten der Quantenobjekte in die vertraute Alltagsphysik übergeht. Doch wo liegt diese Grenze? Der Physiker Brian Greene von der Columbia University in New York etwa schreibt auf der ersten Seite seines Buchs »Das elegante Universum«, die Quantenmechanik liefere die theoretische Grundlage zum Verständnis des Universums im kleinsten Maßstab. Die gesamte übrige »klassische« Physik inklusive der einsteinschen Relativitätstheorien behandle die Makrowelt – die Natur, wie wir sie erleben.

Doch diese Aufteilung der Welt ist allzu simpel. Heute glauben nur wenige Physiker, dass die klassische Physik den gleichen Rang wie die Quantenmechanik beanspruchen darf; sie ist nur eine nützliche Näherung für eine Welt, die in allen Größenordnungen Quanteneigenschaften aufweist. Dass Quanteneffekte in der Makrowelt schwieriger zu erkennen sind, hat nichts mit Größe zu tun, sondern mit der Art und Weise, wie Quantensysteme wechselwirken. In den letzten Jahren haben Physiker mehrfach experimentell belegt, dass auch in makroskopischen Größenordnungen Quantenverhalten auftreten kann.

Dieser Gedanke ist selbst für Forscher, die solche Effekte systematisch studieren, nicht leicht zu akzeptieren. Die Quantenmechanik widerspricht der Alltagserfahrung und zwingt uns, unser Weltbild zu revidieren.

## AUF EINEN BLICK

### MAKROSKOPISCHE QUANTENEFFEKTE

**1** Die **Quantenmechanik** gilt allgemein als Theorie für mikroskopisch kleine Gegenstände – Moleküle, Atome, subatomare Teilchen. Doch viele Physiker glauben heute, diese Theorie treffe auf alles zu, ob groß oder klein.

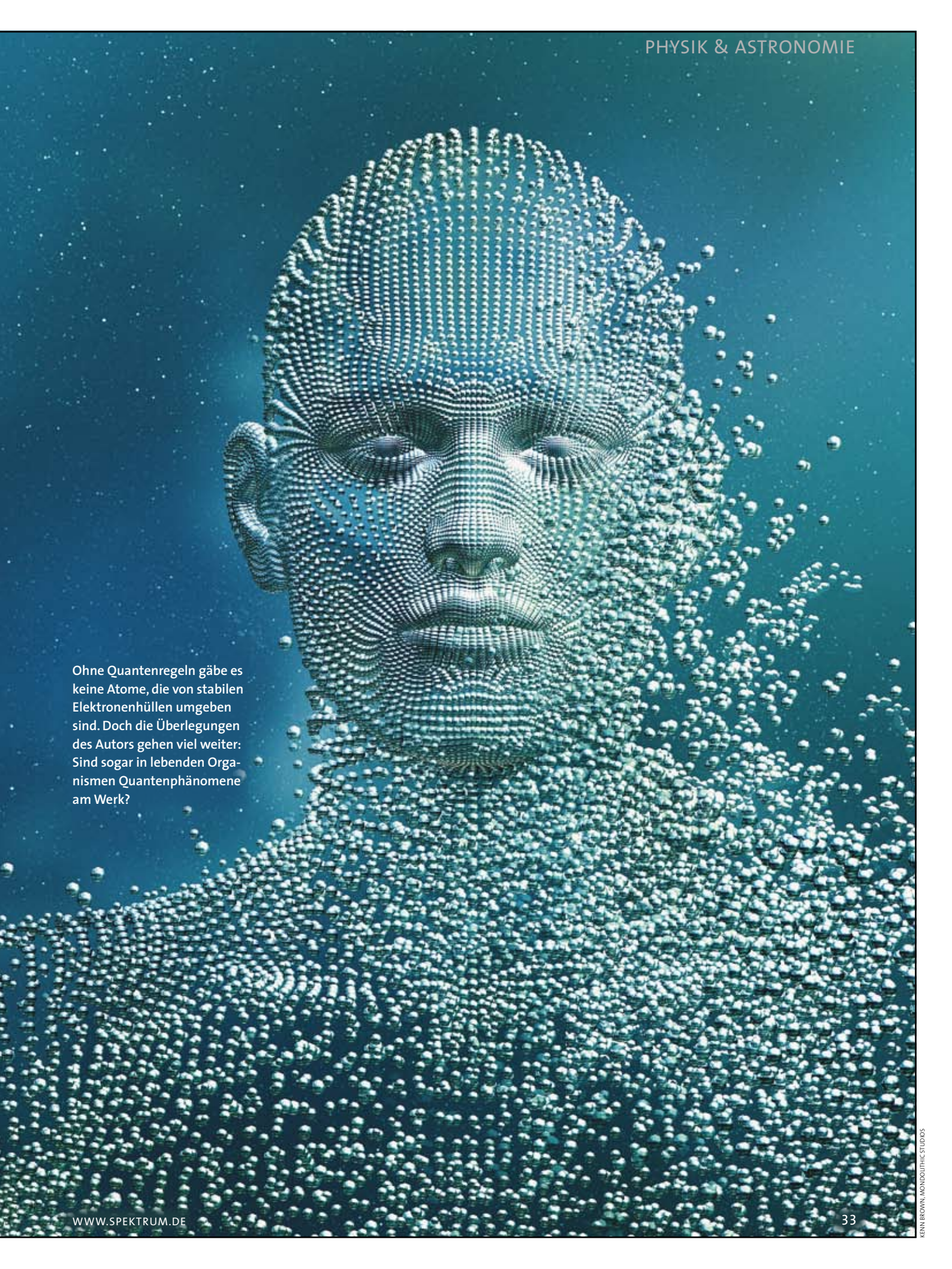
**2** In den letzten Jahren haben mehrere Experimente Quantenphänomene auch in **makroskopischen Systemen** beobachtet, beispielsweise in Salzkristallen.

**3** Vor allem die **Verschränkung**, ein typischer Quanteneffekt, kann auch in großen Systemen auftreten – vielleicht sogar in lebenden Organismen. Kandidaten für makroskopische Verschränkungen sind die **Fotosynthese** der Pflanzen und die **Magnetfeldwahrnehmung** von Vögeln.

### Auf die Größe kommt es nicht an

Für Quantenphysiker gleicht die klassische Physik dem Schwarzweißbild einer bunten Welt. Unsere Alltagsbegriffe vermögen diese Welt nicht in all ihrem Reichtum zu erfassen. Den Lehrbüchern zufolge verblassen mit zunehmender Größe der Objekte die vielfältigen Farbtöne – einzelne Partikel verhalten sich quantengemäß, große Mengen klassisch. Doch erste Indizien dafür, dass die Größe nicht entscheidet, lieferte schon 1935 ein berühmtes Gedankenexperiment: Schrödingers Katze.

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) wollte damit zeigen, dass Mikro- und Makrowelt eng zusammenhängen und dass es nicht möglich ist, sie zu trennen. Gemäß der Quantenmechanik kann ein radioaktives Atom zugleich einen zerfallenen und einen nicht



Ohne Quantenregeln gäbe es keine Atome, die von stabilen Elektronenhüllen umgeben sind. Doch die Überlegungen des Autors gehen viel weiter: Sind sogar in lebenden Organismen Quantenphänomene am Werk?

zerfallenen Zustand einnehmen. Setzt der Atomzerfall über einen Mechanismus Gift frei und tötet eine Katze, gerät das Tier in denselben quantenmechanisch bedingten Zwischenzustand wie das Atom. Dabei spielt die Größe keine Rolle. Das Gedankenexperiment wirft die Frage auf, warum wirkliche Katzen stets entweder lebendig oder tot sind, nie beides zugleich.

Nach moderner Ansicht verbergen die komplexen Wechselwirkungen zwischen einem Objekt und seiner Umgebung die Quanteneffekte in der Makrowelt vor uns. Die Information über den Gesundheitszustand der Katze verteilt sich in Form von Photonen und Wärmeaustausch blitzartig in die Umgebung. Quantenphänomene sind Überlagerungen mehrerer möglicher Zustände – zum Beispiel zugleich lebend und tot –, und diese so genannten Superpositionen haben die Tendenz, sich aufzulösen. Ein solcher Informationsverlust wird als Dekohärenz bezeichnet (siehe »100 Jahre Quan-

tentheorie« von Max Tegmark und John Archibald Wheeler, Spektrum der Wissenschaft 4/2001, S. 68).

Große Objekte neigen eher zu Dekohärenz als kleine. Das erklärt, warum die Quantenmechanik gemeinhin als Theorie der Mikrowelt gilt. Doch in vielen Fällen lässt sich der Informationsverlust verlangsamen oder anhalten – und dann offenbart die Quantenwelt all ihre Pracht durch die so genannte Verschränkung. Diesen Begriff prägte Schrödinger 1935 in demselben Artikel, in dem er seine paradoxe Katze vorstellte. Die Verschränkung verknüpft einzelne Teilchen zu einem untrennbaren Ganzen. Ein klassisches System ist immer teilbar, zumindest im Prinzip: Seine kollektiven Eigenschaften entstehen aus den Eigenschaften der Bestandteile.

Doch ein verschränktes System lässt sich nicht in dieser Weise aufspalten. Das hat seltsame Konsequenzen. Selbst wenn die verschränkten Teilchen beliebig weit voneinander entfernt sind, verhalten sie sich dennoch als eine einzige

## Ein Quantenparadox: Der beobachtete Beobachter

**Die Idee, die Quantenmechanik gelte für alles im Universum,** sogar für uns Menschen, hat seltsame Konsequenzen. Das zeigt eine Variante von Schrödingers Katze, erdacht 1961 vom ungarisch-amerikanischen Nobelpreisträger Eugene P. Wigner (1902–1995) und 1986 aufgegriffen von dem britischen Theoretiker David Deutsch von der University of Oxford.

Angenommen, die Experimentalphysikerin Alice sperrt ihren Freund Bob in einen Raum, der eine Katze, ein radioaktives Atom und ein bei dessen Zerfall freigesetztes Tiergift enthält. Aus Alices Sicht gerät das Atom in einen zugleich zerfallenen und nicht zerfallenen Zustand, und darum ist die Katze zugleich tot und lebendig. Doch Bob beobachtet die Katze direkt. Alice schiebt nun unter der Tür einen Zettel durch mit der Frage, ob die Katze in einem eindeutigen Zustand ist. Bob antwortet Ja.

Wohlgemerkt, Alice fragt nicht, ob die Katze lebt oder tot ist, denn das würde für sie das Ergebnis erzwingen – in der Sprache der Physiker den »Kollaps der Wellenfunktion« herbeiführen. Da Alice das vermeidet, kann sie ihre Frage rückgängig machen und die von Bob erhaltene Information wieder aus ihren Notizen streichen. Damit wäre der vorige Zustand wieder erreicht: Die Katze wäre sowohl tot als auch lebendig.

Doch eine Spur bleibt zurück: der Zettel. Alice kann die Beobachtung aus ihren Unterlagen streichen, ohne die Notiz auf dem Zettel zu löschen. Es bleibt also ein Beweis dafür, dass Bob die Katze als eindeutig tot oder lebend beobachtet hat.

Das führt zu einem verblüffenden Schluss. Alice konnte die Beobachtung umkehren, weil sie, soweit es sie betraf, den Zustandskollaps vermied; für sie war Bob in einem genauso unbestimmten Zustand wie die Katze. Doch in der Sichtweise ihres Freundes im Zimmer war der Zustand kollabiert. Er sah ein eindeutiges Ergebnis; der Zettel beweist das. Somit demonstriert das Experiment zwei scheinbar unvereinbare Prinzipien. Für

Alice gehorchen makroskopische Objekte der Quantenmechanik: Nicht nur Katzen, sondern auch Menschen können unbestimmte Quantenzustände bilden. Bob hingegen ist der Meinung, dass Katzen nur entweder tot oder lebendig sind.

Mit einem ausgewachsenen Menschen lässt sich dieses Experiment schlecht durchführen, aber mit einfacheren Systemen gelingt es durchaus. Anton Zeilingers Team an der Universität Wien schießt ein einzelnes Photon auf einen kleinen halbdurchlässigen Spiegel. Wenn es reflektiert wird, erleidet der Spiegel einen Rückstoß; wird es durchgelassen, bleibt der Spiegel ruhig. Das Photon spielt die Rolle des radioaktiven Atoms; es kann gleichzeitig mehr als einen Zustand einnehmen. Der aus Milliarden Atomen bestehende Spiegel entspricht der Katze und Bob. Die Entscheidung, ob er einen Rückstoß erfährt oder nicht, gleicht dem Leben oder dem Tod der Katze beziehungsweise Bobs entsprechender Beobachtung. Der Vorgang lässt sich nun rückgängig machen, indem das Photon von einem weiteren Spiegel zum ersten Spiegel zurück reflektiert wird. In kleinerem Maßstab haben Rainer Blatt von der Universität Innsbruck und David J. Wineland vom National Institute of Standard and Technology in Boulder (Colorado) die Messung vibrierender Ionen in einer Ionenfalle rückgängig gemacht.

Bei der Entwicklung dieses vertrackten Gedankenexperiments sind Wigner und Deutsch der Überzeugung Erwin Schrödingers, Albert Einsteins und anderer Theoretiker gefolgt, die Quantenmechanik sei noch nicht wirklich verstanden. Jahrzehntlang haben sich die meisten Physiker kaum darum gekümmert, denn die grundlegenden Fragen hatten keinen Einfluss auf die praktischen Anwendungen der Theorie. Doch seit wir solche Experimente im Labor zu realisieren vermögen, gibt es keinen Grund mehr, die Suche nach einer Antwort aufzuschieben.



Gesamtheit. Einstein nannte dieses Phänomen abschätzig »spukhafte Fernwirkung«.

Veranschaulichen lässt sich das etwa an zwei Elektronen. Man kann sich diese Teilchen grob als kleine Kreisel vorstellen, die entweder im Uhrzeigersinn (vorwärts) oder entgegengesetzt (rückwärts) rotieren, wobei die Drehachse beliebige Orientierungen haben kann: horizontal, vertikal, um 45 Grad geneigt und so fort. Um den Drehsinn – den so genannten Spin – eines Teilchens zu messen, muss man erst eine Richtung wählen und dann nachsehen, ob der Spin in diese Richtung weist oder entgegengesetzt.

Nehmen wir einmal an, die Elektronen würden sich klassisch verhalten. Man könnte einem Elektron in horizontaler Richtung Vorwärtsspin verleihen und dem anderen einen horizontalen Rückwärtsspin; ihr Gesamtspin ist dann null. Ihre Achsen stehen räumlich fest – und wenn man eine Messung durchführt, hängt das Ergebnis davon ab, ob die gewählte Messrichtung mit den Partikelachsen übereinstimmt. Misst man beide Teilchen horizontal, ergeben sich entgegengesetzte Spins; bei vertikaler Messung wird gar kein Spin angezeigt.

Doch quantenmechanische Elektronen verhalten sich ganz anders. Man kann den Teilchen selbst dann den Gesamtspin null verleihen, wenn man ihre individuellen Spins nicht festgelegt hat. Misst man eines der beiden, ergibt sich zufällig Spin vorwärts oder rückwärts, als würde das Teilchen selbst darüber entscheiden. Dennoch beobachtet man für beliebig gewählte Messrichtungen – vorausgesetzt, sie sind für beide Teilchen gleich – entgegengesetzte Spins: Wenn das eine Elektron Vorwärtsspin hat, zeigt das andere Spin rückwärts. Woher die beiden das wissen, bleibt ein Rätsel. Es kommt noch schlimmer: Wenn man ein Teilchen horizontal misst und das andere vertikal, entdeckt man für jedes einen gewissen Spin; anscheinend haben die Teilchen keine festen Drehachsen. Darum sind die Ergebnisse in einem Ausmaß aufeinander abgestimmt, das die klassische Physik nicht zu erklären vermag.

### Verschränkung vieler Teilchen

Bei den meisten Verschränkungsexperimenten sind nur wenige Teilchen im Spiel. Größere Systeme lassen sich nicht so einfach von der Umgebung isolieren, denn ihre Einzelteilchen verschränken sich unkontrolliert und äußerst bereitwillig mit vagabundierenden Partikeln. In der Sprache der Dekohärenz: Zu viel Information geht an die Umgebung verloren, und das System benimmt sich klassisch. Diese Anfälligkeit der Verschränkung macht es so schwierig, sie praktisch zu nutzen – etwa für künftige Quantencomputer.

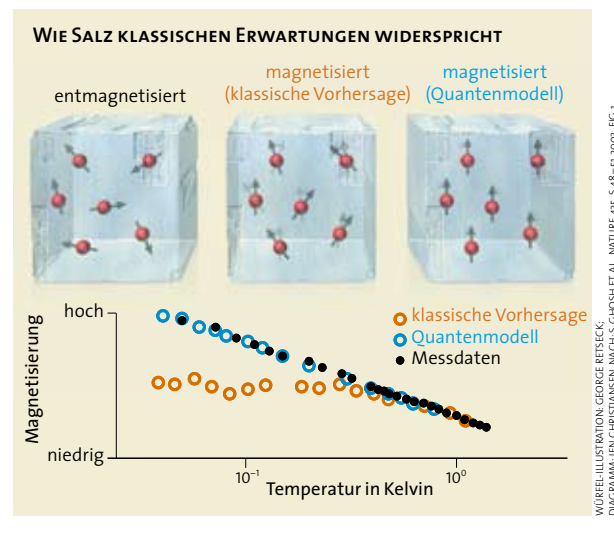
Doch 2003 zeigte ein Experiment, dass auch recht große Systeme für längere Zeit verschränkt bleiben können. Ein Team um Gabriel Aeppli vom University College London setzte ein Stück Lithiumfluorid einem Magnetfeld aus. Dieses Salz ist magnetisierbar. Man kann sich die Atome im Salz als kleine Magnete vorstellen, die bestrebt sind, sich längs des äußeren Felds auszurichten. Die Kräfte, welche die Atome

aufeinander ausüben, wirken wie eine Art Gruppendruck, sich schneller zu ordnen. Die Forscher variierten die Stärke des Magnetfelds und maßen, wie schnell die Atome sich ausrichteten. Wie sich zeigte, reagierten die Atome viel schneller, als die Stärke ihrer Wechselwirkung erwarten ließ. Offenbar half ihnen ein zusätzlicher Effekt, sich gleichsinnig zu verhalten. Die Forscher sind überzeugt, Verschränkung sei die Ursache dafür. Wenn das zutrifft, bildeten die rund  $10^{20}$  Atome des Salzstücks einen riesigen verschränkten Zustand.

Um Störungen durch wärmebedingte Zufallsbewegungen zu vermeiden, führte Aeppli die Versuche bei extrem tiefen Temperaturen durch – bei einigen Millikelvin (tausendstel Grad über dem absoluten Nullpunkt). Doch seither hat Alexandre Martins de Souza vom Brasilianischen Zentrum für Physikalische Forschung in Rio de Janeiro makroskopische Verschränkung in Kupferkarboxylat sogar bei Raumtemperatur entdeckt. In solchen Systemen ist die Wechselwirkung

## Der quantenverschränkte Salzkrystall

**Die meisten Physiker meinten**, typische Quantenphänomene würden nur auf der Ebene einzelner Teilchen wirksam; große Teilchencluster benähmen sich klassisch. Doch neue Experimente besagen etwas anderes. Zum Beispiel zeigen die magnetischen Momente der Atome in einem Salzkrystall normalerweise in beliebige Richtungen (unten links). In einem äußeren Magnetfeld richten sie sich parallel aus – und zwar schneller als von der klassischen Physik vorhergesagt (Mitte). Anscheinend werden die Spins durch das Phänomen der Verschränkung – die »spukhafte Fernwirkung« zwischen Quantenteilchen – besonders wirksam geordnet (rechts). Eine Messung der magnetischen Eigenschaften des Kristalls offenbart in Abhängigkeit von der Temperatur die Rolle der Verschränkung (Diagramm).



zwischen den Teilchenspins stark genug, dem thermischen Chaos zu widerstehen. In anderen Fällen wehrt eine äußere Kraft die thermischen Effekte ab. Physiker haben inzwischen Verschränkung in immer größeren und wärmeren Systemen gefunden – von Ionen in elektromagnetischen Fallen über ultrakalte Atome in Kristallgittern bis zu supraleitenden Quantenbits (siehe Kasten unten).

Diese Systeme gleichen Schrödingers Katze. Die Elektronen eines Atoms oder Ions können sich nahe dem Kern oder weiter weg aufhalten – oder beides zugleich. Ein solches Elektron verhält sich wie das zerfallene und nicht zerfallene radioaktive Atom in Schrödingers Gedankenexperiment. Unabhängig vom Verhalten des Elektrons kann das gesamte Atom beispielsweise nach links oder rechts wandern. Diese Bewegung spielt die Rolle der lebendigen oder toten Katze. Mittels Lasern können Physiker das Atom manipulieren und die beiden Eigenschaften koppeln: beispielsweise das Atom veranlassen, sich nach links zu bewegen, wenn das Elektron sich nahe dem Kern aufhält, und nach rechts, wenn das Elektron weiter entfernt ist. Der Zustand des Elektrons ist mit der Bewegung des Atoms genauso verschränkt wie der radioaktive Zerfall mit dem Zustand der Katze. Ihr Schweben zwischen Leben und Tod entspricht einem Atom, das zugleich nach links und nach rechts wandert.

Andere Experimente realisieren diese Grundidee in größerem Maßstab: Zahlreiche Atome werden verschränkt und

bilden Zustände, die in der klassischen Physik als unmöglich gelten. Und wenn sogar große und warme Festkörper verschränkt werden können, darf man den Gedanken wagen, ob das Gleiche vielleicht auch für ein sehr spezielles großes, warmes System gelten könnte – einen lebenden Organismus.

### Schrödingers Vögel

Rotkehlchen sind pfliffige kleine Vögel. Im Herbst übersiedeln sie vom frostigen Skandinavien ins warme Afrika und kehren im Frühling wieder zurück. Die gut 10 000 Kilometer lange Rundreise bewältigen sie, ohne sich zu verirren.

Die Menschen haben sich lange gefragt, ob Vögel und andere Tiere einen eingebauten Kompass besitzen. In den 1970er Jahren fing das Forscherehepaar Roswitha und Wolfgang Wiltschko von der Universität Frankfurt Rotkehlchen ein und setzte sie künstlichen Magnetfeldern aus. Seltsamerweise nahmen die Tiere eine Umkehr der Feldrichtung nicht wahr, konnten also Nord nicht von Süd unterscheiden. Hingegen reagierten sie auf die Inklination des Erdmagnetfelds, das heißt auf den Winkel der Feldlinien zur Erdoberfläche. Das genügt ihnen zur Navigation. Wurden ihre Augen zugeklebt, reagierten die Rotkehlchen jedoch überhaupt nicht auf ein Magnetfeld; somit nehmen die Vögel das Feld irgendwie mit diesen wahr.

Im Jahr 2000 behauptete der Physiker Thorsten Ritz, damals an der University of Florida, diesem Phänomen liege

## Immer größer, immer wärmer

**Quanteneffekte treten nicht nur** bei subatomaren Teilchen nahe dem absoluten Nullpunkt auf. Sie werden nun auch in Experimenten mit größeren und wärmeren Systemen beobachtet.

Was	WANN	WIE WARM	WER
Doppelspaltversuche mit Fullerenen demonstrierten erstmals, dass auch große Moleküle sich wie Wellen verhalten.	1999	900–1000 Kelvin	Markus Arndt, Anton Zeilinger et al. (Universität Wien)
Die magnetische Suszeptibilität von Metallcarboxylaten lässt Verschränkung von Billionen Atomen vermuten.	2009	630 Kelvin	Alexandre Martins de Souza et al. (Brasilianisches Zentrum für Physikalische Forschung)
Quanteneffekte erhöhen den Wirkungsgrad der Fotosynthese bei zwei Arten von Meeresalgen.	2010	294 Kelvin	Elisabetta Collini et al. (University of Toronto, University of New South Wales und Universität Padua)
Beobachtung von Quanteneffekten in Riesenmolekülen aus 430 Atomen	2011	240–280 Kelvin	Stefan Gerlich, Sandra Eibenberger et al. (Universität Wien)
Verschränkung von drei Quantenbits in einem supra-leitenden Stromkreis. Das Verfahren kann beliebig große Quantensysteme erzeugen.	2010	0,1 Kelvin	Leonardo DiCarlo, Robert Schoelkopf et al. (Yale University und University of Waterloo)
Eine 0,04 Millimeter lange Metallfeder vibrierte mit zwei Frequenzen gleichzeitig.	2010	25 Millikelvin (tausendstel Kelvin)	Aaron O'Connell, Max Hofheinz et al. (University of California in Santa Barbara)
Verschränkung von acht Kalziumionen in einer Ionenfalle. Heute gelingt das mit 14 Ionen.	2005	0,1 Millikelvin	Hartmut Häffner, Rainer Blatt et al. (Universität Innsbruck)
Verschränkte Schwingung von Beryllium- und Magnesiumionen	2009	0,1 Millikelvin	John D. Jost, David J. Wineland et al. (National Institute of Standards and Technology)

GEORGE RETSECK



quantenphysikalische Verschränkung zu Grunde. Nach seinem Modell, das auf früheren Arbeiten des Biophysikers Klaus Schulten an der University of Illinois aufbaut, enthält das Vogelauge einen Molekülyp, in dem zwei Elektronen ein verschränktes Paar mit Gesamtspin null bilden. Wenn dieses Molekül sichtbares Licht absorbiert, gewinnen die Elektronen genügend Energie, sich zu trennen und für externe Einflüsse wie das Erdmagnetfeld empfänglich zu werden. Bei Inklination beeinflusst das Magnetfeld die beiden Elektronen unterschiedlich und erzeugt ein Ungleichgewicht, das die chemische Reaktion des Moleküls verändert. Im Auge wird dieser chemische Unterschied in neuronale Impulse übersetzt; so entsteht schließlich im Vogelgehirn eine Repräsentation des Magnetfelds.

Der von Ritz vorgeschlagene Mechanismus ist zunächst nur eine Hypothese, doch Christopher T. Rogers und Kiminori Maeda von der University of Oxford haben ähnliche Moleküle im Labor untersucht und gezeigt, dass sie tatsächlich auf Grund von Elektronenverschränkung für Magnetfelder empfindlich sind.

Nach Berechnungen, die meine Kollegen und ich durchgeführt haben, bleiben Quanteneffekte im Vogelauge für rund 100 Mikrosekunden (millionstel Sekunden) bestehen. Das ist in diesem Zusammenhang sehr lange; der Rekord für künstlich verschränkte Elektronspins liegt bei rund 50 Mikrosekunden.

Wir wissen noch nicht, wie ein natürliches System Quanteneffekte so lange aufrechtzuerhalten vermag, doch die

Antwort könnte uns helfen, künftige Quantencomputer besser vor Dekohärenz zu schützen.

Ein weiterer biologischer Vorgang, an dem möglicherweise Verschränkung mitwirkt, ist die Photosynthese, mit der Pflanzen Sonnenlicht in chemische Energie umwandeln. Das einfallende Licht setzt in den Pflanzenzellen Elektronen frei, die daraufhin alle zu ein und demselben Ort gelangen – zum chemischen Reaktionszentrum, wo sie ihre Energie abgeben und die Reaktionen in Gang setzen, welche die Pflanzenzellen mit Energie versorgen. Die klassische Physik kann die nahezu perfekte Effizienz dieses Vorgangs nicht erklären.

Experimente mehrerer Forschergruppen, darunter jener von Graham R. Fleming und Mohan Sarovar an der University of California in Berkeley sowie Gregory D. Scholes von der University of Toronto (Kanada), legen nahe, dass dieser hohe Wirkungsgrad quantenmechanische Gründe hat. In der Quantenwelt ist ein Teilchen nicht darauf festgelegt, zu einer bestimmten Zeit genau einen Weg einzuschlagen; es vermag alle möglichen Wege auf einmal zu nehmen. Die in den Pflanzenzellen herrschenden elektromagnetischen Felder könnten dafür sorgen, dass einige dieser Pfade einander auslöschen, während sich andere gegenseitig verstärken – und zwar so, dass für das Elektron die Wahrscheinlichkeit eines verlustreichen Umwegs sinkt, während die Chance steigt, dass es schnurstracks zum Reaktionszentrum geführt wird.

Die hypothetische Verschränkung würde nur einen Sekundenbruchteil andauern und Moleküle betreffen, die rund



100 000 Atome umfassen. Gibt es in der Natur Beispiele für noch größere und dauerhaftere Verschränkung? Das wissen wir nicht, aber allein schon die Frage hat den Anstoß zu einem neuen Forschungsfeld namens Quantenbiologie gegeben.

### Über Raum und Zeit hinaus

Schrödinger fand die Idee absurd, Katzen könnten zugleich am Leben und tot sein; eine Theorie, die solche Aussagen macht, war für ihn unvollständig. Generationen von Physikern haben dieses Unbehagen geteilt und angenommen, die Quantenmechanik würde nur in gewissen Grenzen gelten. In den 1980er Jahren spekulierte der englische Mathematiker und Physiker Roger Penrose von der University of Oxford, die Gravitation verursache bei Massen oberhalb 20 Mikrogramm (millionstel Gramm), dass die Quantenmechanik in die klassische Physik übergeht.

Drei italienische Physiker – GianCarlo Ghirardi und Tomaso Weber von der Universität Triest sowie Alberto Rimini von der Universität Pavia – postulierten schon früher, große Teilchengruppen würden sich stets spontan klassisch verhalten. Doch neuere Experimente widersprechen diesen Annahmen. Offenbar gibt es keine fundamentale Kluft zwischen Quantenwelt und Alltagsphysik. Je raffinierter die Experimente werden, desto mehr verstärkt sich der Eindruck, dass die klassische Physik in keiner Größenordnung ein echtes Comeback erleben wird. Eher herrscht die Meinung vor, dass eine umfassendere Theorie, die vielleicht eines Tages die Quantenphysik ablösen könnte, noch weiter von der Alltagserfahrung entfernt sein müsste.

Falls die Quantenmechanik in allen Größenordnungen gilt, hat dies weit reichende Konsequenzen. Zum Beispiel gehören Raum und Zeit zu den fundamentalsten klassischen Begriffen, aber gemäß der Quantenmechanik sind sie sekundär. Primär sind die Verschränkungen; sie verknüpfen Quantensysteme ohne Bezug auf Raum und Zeit. Gäbe es eine Trennlinie zwischen beiden Welten, könnten wir den klassischen Rahmen von Raum und Zeit zur Beschreibung von Quantenprozessen nutzen. Doch ohne eine solche Trenn-

linie – und ohne eine wirklich klassische Welt – geht uns dieser Rahmen verloren. Wir müssen Raum und Zeit als etwas erklären, das irgendwie aus raum- und zeitloser Physik hervorgeht.

Diese Erkenntnis wiederum hilft uns vielleicht, die Quantenphysik mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie zu versöhnen, welche die Gravitation als Geometrie der Raumzeit beschreibt. Die allgemeine Relativitätstheorie unterstellt, dass Objekte stets eindeutig definierte Orte einnehmen und sich niemals an zwei Stellen gleichzeitig aufhalten – in direktem Widerspruch zur Quantenphysik. Stephen Hawking von der University of Cambridge und viele andere Physiker glauben, dass die Relativitätstheorie einer fundamentalen Theorie weichen muss, in der es weder Raum noch Zeit gibt. Die klassische Raumzeit geht demnach durch den Vorgang der Dekohärenz aus quantenmechanischen Verschränkungen hervor.

Noch interessanter ist die Möglichkeit, dass die Gravitation gar keine eigenständige Kraft ist, sondern durch Quantenfluktuationen der übrigen Naturkräfte entsteht. Diese Idee der »induzierten Gravitation« geht auf den sowjetischen Physiker und Dissidenten Andrei Sacharow (1921–1989) zurück. Sie würde nicht nur die Gravitation ihres fundamentalen Rangs berauben, sondern auch allen Versuchen, die Schwerkraft zu »quantisieren«, den Boden entziehen.

Vielleicht existiert die Gravitation – die typische »klassische« Kraft – auf der Quantenebene überhaupt nicht. Dann wäre die Welt komplett von den typisch quantenphysikalischen Mechanismen Verschränkung und Dekohärenz beherrscht. Es gäbe im Kleinen wie im Großen nur die eine Quantenwelt. ~

### DER AUTOR



**Vlatko Vedral** studierte Physik am Imperial College London und ist seit Juni 2009 Professor an der University of Oxford sowie an der National University of Singapore. Er entwickelte eine neuartige Methode, den Grad der Quantenverschränkung in makroskopischen Vielteilchensystemen zu messen.

### QUELLEN

- Amico, L. et al.:** Entanglement in Many-Body Systems. In: *Reviews of Modern Physics* 80, S. 517–576, 2008
- Gosh, S. et al.:** Entangled Quantum State of Magnetic Dipoles. In: *Nature* 425, S. 48–51, 2003
- Vedral, V.:** Quantifying Entanglement in Macroscopic Systems. In: *Nature* 453, S. 1004–1007, 2008
- Vedral, V.:** *Decoding Reality: The Universe as Quantum Information.* Oxford University Press, 2010

### WEBLINKS

[www.ScientificAmerican.com/jun2011/quantum](http://www.ScientificAmerican.com/jun2011/quantum)  
Liste von Links zum Thema Quantenverschränkung (auf Englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116464](http://www.spektrum.de/artikel/1116464)



# Weniger Neben. Mehr Wirkung.

Jeder Mensch ist anders – auch genetisch. Deshalb setzen wir auf Personalisierte Medizin: Unsere Bereiche Pharma und Diagnostics arbeiten gemeinsam an Tests und Wirkstoffen, um Therapien besser auf die Bedürfnisse von Patienten abzustimmen.

Unsere Innovationen helfen Millionen Menschen, indem sie Leid lindern und Lebensqualität verbessern. Wir geben Hoffnung.

[www.roche.de](http://www.roche.de)



*Innovation für die Gesundheit*

»Eine komische Stadt, senkrecht zu ihrer Spiegelung. Es gibt Stunden, in denen das Wasser sich beruhigt und plötzlich der Schein sich bildet. Das harte, trockene Venedig steigt aus einer platten Spiegelung, eine auf einen Spiegel gestellte Stadt ... Die Architektur ist nicht wahnsinnig, sie hat alle Sinne beisammen, ihre Vernunft ist die Schwerkraft, ihre Einsicht die Gerade, die man zieht, die Gerade, der kürzeste Weg von einem Punkt zum andern. Ihre Leichtigkeit ist die besiegte Schwerkraft. Die Mauer steht, weil sie vernünftig ist. Beschränktes, beschränktes Denken, Reize geometrischer Denkweise.«

Jean-Paul Sartre (1905–1980)

# Spiegelwelt mit Fehlern

Manche vermeintlichen Rätsel lassen sich erst lösen, wenn wir stillschweigend Vorausgesetztes auf den Prüfstand stellen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Jean-Paul Sartre sah die Architektur im Spiegel, so erfahren wir im obigen Zitat, und entdeckte darin Vernunft, Einsicht und Geometrie. Eines Tages, als ich auf dem Bahnhofsvorplatz einer norddeutschen Stadt die Wartezeit auf einen verspäteten Zug überbrückte, erinnerte ich mich der Sätze des Philosophen. Mein Blick wurde nämlich von der Spiegelwelt in einem Wasserbecken gefangen. Ein nicht ungewöhnliches Bild: Wie in einem Spiegel wird ein hell erleuchtetes Gebäude im ruhigen Wasser reflektiert (1). Aber etwas stimmte nicht. Ist die Architektur, zumindest die gespiegelte, doch wahnsinnig geworden?

Spiegel sollten eigentlich naturgetreue Abbilder von Gegenständen liefern. In diesen bleiben Längen und Winkel erhalten, nur die dem Spiegel zugewandte Seite ist mit der abgewandten vertauscht. Doch der Sonnenreflex in

Der gespiegelte Reflex zeigt sich notwendigerweise in einem niedrigeren Stockwerk als das Original (a). Es sei denn, ein Fenster ist gekippt (b).

der zweiten Fensterreihe des Gebäudes strahlt in der Spiegelwelt des Wassers aus einem anderen Stockwerk heraus, nämlich dem nächsthöheren! («Höher» soll auch im Spiegelbild das bezeichnen, was näher am Dach oder Himmel liegt.)

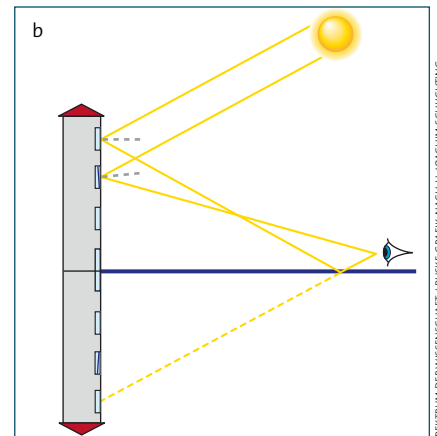
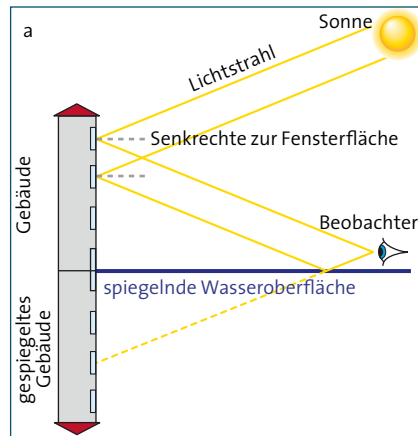
Schon für sich genommen ist dieses Phänomen recht erstaunlich. Der Mathematiker Lewis Carroll, der Autor von »Alice im Wunderland«, hätte seine Freude daran gehabt. Und für Alice' Katze wäre es eventuell ein Hinweis gewesen, dass in der Spiegelwelt doch einiges anders ist: »Wie gefiele dir das, Mieke«, fragt Alice leicht drohend ihre



Der gespiegelte Reflex kommt überraschend aus einem »zu hohen« Stockwerk (1). Skizze b (unten) erklärt, warum. Er kann

kleine schwarze Katze, »wenn du in dem Haus hinterm Spiegel wohnen müsstest? Ob sie dir dort auch deine Milch zu trinken gäben? Aber vielleicht schmeckt Spiegelmilch nicht besonders gut ...«

Die naheliegende Frage lautet: Muss der Sonnenreflex, den wir im realen Fenster sehen, tatsächlich auch aus dessen Spiegelbild strahlen? Dies ist zwar eine hartnäckige Intuition, wie sich im Gespräch mit Mitmenschen leicht feststellen lässt – doch trifft sie nicht zu. Skizze 1 stellt die Situation dar. Sonnenstrahlen treffen parallel auf die Fenster und werden spiegelnd reflektiert. Das



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BÜCKEBÄRK, NACH H. JOACHIM SCHLICHTING



FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

auch in einem »zu niedrigen« Stockwerk zu sehen sein (2). Laut Skizze a ist das Fenster im 2. Obergeschoss dann geschlossen.

Licht der im oberen Fenster gespiegelten Sonne fällt dabei gemäß dem Gesetz »Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel« ins Auge des Beobachters. Das im darunterliegenden Fenster reflektierte Licht hingegen fällt zunächst auf die Wasseroberfläche und wird erst von dort ins Auge geworfen. Wie bei jeder Spiegelung kann das Auge von dieser Umlenkung des Lichts nichts »wissen«. Das zweimal reflektierte Sonnenlicht scheint daher von einem Ort zu stammen, der auf der geradlinigen Verlängerung des eintreffenden Lichtstrahls liegt.

Unsere stillschweigende Voraussetzung ist also tatsächlich falsch, der gespiegelte Reflex kommt sogar zwangsläufig aus dem »falschen« Fenster. Doch das Rätsel um Foto 1 ist damit noch keineswegs gelöst. Denn die Skizze zeigt überraschenderweise auch, dass der Reflex nicht aus einem *höheren*, sondern

Ein neues Rätsel? Mit Hilfe der Skizzen auf der linken Seite finden auch die Reflexe auf diesem Foto eine ganz natürliche Erklärung.

aus einem *niedrigeren* Fenster der Spiegelwelt kommen müsste! Hat sich die Natur also vertan?

Wohl kaum. Beruhigend ist zunächst, dass sich der zuletzt beschriebene Fall tatsächlich beobachten lässt (2). Ziehen wir also erneut die Geometrie zu Rate, um die in 1 beobachtete Situation aufzuklären. Welche Wege müssten denn Lichtstrahlen einschlagen, damit ein solches Bild zu Stande kommt? Offenbar müssten sich dann die von den Fenstern reflektierten Lichtstrahlen überkreuzen, denn nur so kann es zu einer »Vertauschung« der Reflexe kommen (Skizze b). Andererseits wissen wir bereits aus der Schule, dass Lichtstrahlen, die aus derselben Richtung kommen und an parallelen Spiegelflächen reflektiert werden, einander nie überschneiden.

Nach Lage der Dinge bleibt uns nun nichts anderes übrig, als abermals unsere stillschweigenden Voraussetzungen zu überprüfen. Wenn wir nicht gleich die Gesetze der Lichtausbreitung in Zweifel ziehen wollen, ist es am einfachsten anzunehmen, dass die Fenster möglicherweise doch nicht parallel zueinander orientiert sind. Und siehe da: Plötzlich ist es nicht mehr schwierig, sich die Situation vorzustellen (siehe Skizze b). Das spiegelnde Fenster in 1 ist offenbar gekippt, also ins Innere des Gebäudes geneigt.

Wer noch an dieser Erklärung zweifelt, kann sie sogar auf direktem Weg



überprüfen. Betrachten wir Foto 1 im Licht der gesammelten Erkenntnisse erneut, erkennen wir am oberen Ende des angestrahlten Fensters einen rudimentären Schattenstreifen. Genau dieser Schattenstreifen tritt bei anderen Fenstern in den oberen Stockwerken ebenfalls auf: bei jenen nämlich, die auch einen seitlichen Schatten aufweisen, der sich wiederum unmittelbar mit ihrer Kippstellung erklären lässt.

Was wir hier mit einfachen geometrischen Mitteln an einer Fensterfront erprobt haben, ähnelt in mancher Hinsicht dem, was auch Oberflächenphysiker tun. Sie bestrahlen eine unbekannte Oberfläche mit Licht oder Teilchen aus einer bekannten Quelle. Die Modifikation der Strahlung, deren Reflexe sie registrieren, gibt ihnen dann Aufschluss über die mikroskopische Beschaffenheit der Oberfläche. Und wie man an unserem Beispiel sieht, erfordert die Lösung der Probleme nicht nur die Kenntnis der physikalischen Gesetze, sondern auch kreatives Vermögen. Denn nur so lassen sich stillschweigende Voraussetzungen erkennen und, falls sie in der Realität nicht zutreffen, auch überwinden.

Zwar ist das physikalische Denken außer Stande, die ästhetischen Reize zu erfassen, die in einer durch Spiegelung verdoppelten und variierten Welt liegen. Auch Assoziationen, wie sie Sartre angesichts der Spiegelungen venezianischer Baukunst im Wasser hatte, liegen dieser Denkweise fern. Aber gerade durch ihre selbst gewählte Beschränkung gelangt die Physik zu Ergebnissen, die anders nicht zu haben sind. Und das ist mindestens ebenso faszinierend. ~

#### 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.

# Das Alabaster-Suppenhuhn

Infrarotfotos mit einer ganz gewöhnlichen Digitalkamera machen? Das geht!

VON THOMAS RUBITZKO

Manche Situationen sind schlicht unwürdig. Ich sitze bei ausgeschaltetem Licht auf dem – geschlossenen – Klodeckel, die Fernbedienung des Beamers zwischen die Knie geklemmt, neben mir die digitale Spiegelreflexkamera, und betrachte laut jubilerend das Display eines Handys. Kein Wun-

der, dass der hereinkommende Kollege die Augenbrauen hebt. Dabei ist meine Verrichtung rein dienstlicher Natur. Wo sonst kommt man in unserem Bürogebäude ohne großen Aufwand an einen verdunkelbaren Raum?

Das sichtbare Licht muss für diesen Versuch vorübergehend draußen blei-

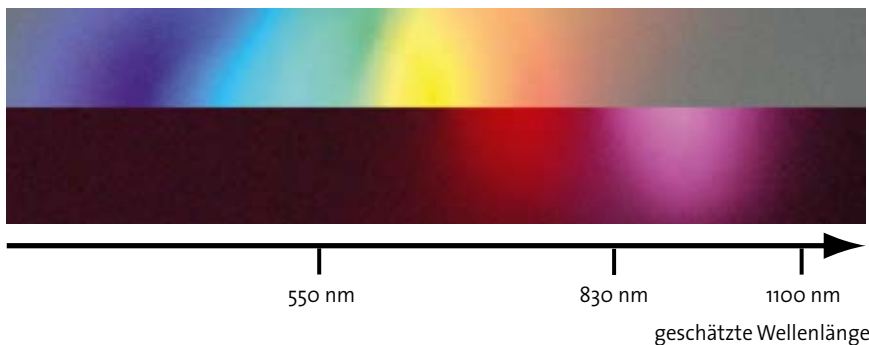
ben, damit ich die Wirkung der Infrarotstrahlung ungestört beobachten kann. Fernbedienungen wie die zwischen meinen Knien schicken mit ihrer Hilfe ihre Anweisungen an die zugehörigen Geräte. Da die Wellenlänge des Infraroten größer ist als die des sichtbaren Lichts, können wir es nicht wahrnehmen – wohl aber kann das eine Digitalkamera, und zwar paradoxerweise umso besser, je schlechter sie ist. Die Handykamera zeigt an der entsprechenden Stelle der Fernbedienung einen strahlend hellen Leuchtfleck, das teure Spiegelreflexgerät dagegen nur ein trübes Funzeln.

Wie kommt das? Die üblichen Sensoren digitaler Kameras, die Silizium als Halbleiter verwenden, haben ihre maximale Empfindlichkeit im Infrarotbereich und verarbeiten sichtbares Licht eigentlich nur nebenbei. Genauer: Während Menschen elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen etwa 380 (violett) und 750 Nanometern (rot) sehen können, registriert ein Siliziumsensor Strahlung ungefähr zwischen 400 und 1100 Nanometern. Eine digitale Kamera ist daher grundsätzlich auch zur Fotografie im nahen Infrarotbereich geeignet.

Zur Wärmebildkamera reicht es übrigens nicht. Gegenstände bei Raumtemperatur senden Infrarotstrahlung weit größerer Wellenlänge aus, was Lichtquanten weit geringerer Energie entspricht; sie erfordert andere Halbleiterbauelemente sowie eine spezielle Optik, da sie von den üblichen Gläsern absorbiert wird. Dagegen ist das Glas der Linsen für nahes Infrarot fast vollständig transparent.

Um das einfallende Licht in die Komponenten Rot, Grün und Blau zu zerlegen, bringen Kamerahersteller ein Mosaik entsprechender Farbfilter vor

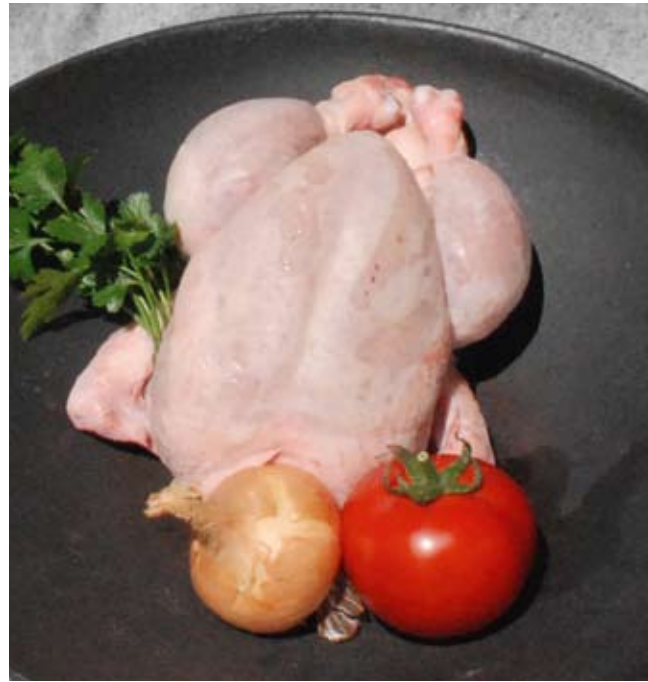
Der obere Bildteil zeigt das Spektrum des Sonnenlichts nach dem Durchgang durch ein Glasprisma, aufgefangen auf einem weißen Papierschirm und fotografiert mit einer digitalen Spiegelreflexkamera (1/125 Sekunde, keine Filter). Unten dasselbe Objekt mit einem Filter, der für Wellenlängen unterhalb von 830 Nanometern (nm) weitgehend undurchlässig ist; Belichtungszeit 30 Sekunden. Der Filter sperrt rotes Licht nicht vollständig, was an dem rötlichen Bereich halbrechts zu sehen ist. Der rosafarbene Lichtfleck rechts gibt den Anteil des Infrarots wieder, den sowohl der in die Kamera eingebaute Sperrfilter als auch die Farbfilter durchlassen.



## Der Weg zum Infrarot-Durchlassfilter

- »Guten Tag, ich hätte gern einen abgelaufenen Diafilm, wenn der billiger ist.«  
 »Die sind alle abgelaufen. Macht drei Euro.«  
 »Entwickeln Sie ihn gleich.«  
 »Bitte?«  
 »Entwickeln, aber nicht rahmen.«  
 »Wollen Sie nicht zuerst fotografieren?«  
 »Nein, erst hinterher.«  
 »??? – Sie wissen schon, dass der schwarz wird.«  
 »Ja, aber nur im sichtbaren Bereich.«  
 »??? – macht mit Entwicklung 6,20 Euro. Wollen Sie vielleicht Abzüge eines völlig unbelichteten Schwarz-Weiß-Films? Sagen wir einen Euro pro Abzug bei Abnahme von zehn Abzügen. Die sind auch sichtbar schwarz.«  
 »Danke, nur den Diafilm.«





ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS (SOfern NICHT ANDERS ANGEZEIGT) THOMAS RUBITZKO

In der Infrarotaufnahme mit einem Filter von 720 Nanometer Grenzwellenlänge erscheint die Haut des Suppenhuhns alabasterartig makellos. Tomate und Petersilie dagegen sehen eher ungesund aus. Lebende menschliche Haut wäre zwar ein reizvolleres Motiv, hätte aber größere Schwierigkeiten, über die lange Belichtungszeit hinweg stillzuhalten.

den eigentlichen Sensor. Diese ergeben rote, grüne und blaue Bildpunkte, die miteinander verrechnet werden. Allerdings lassen alle diese Farbfilter nicht nur Licht ihres »eigenen« Farbbereichs durch, sondern auch etwas im nahen Infrarot (Bild links).

Wegen dieses Infrarotanteils würde die Digitalkamera eine Szene deutlich anders »sehen« als ein Mensch, was sehr merkwürdige Bilder ergäbe. Deswegen legen die Hersteller unmittelbar vor die Farbfilter noch einen Sperrfilter, der je nach Qualität einen mehr oder minder großen Anteil der Infrarotstrahlung absorbiert.

Was übrig bleibt, ist normalerweise so wenig, dass es gegenüber dem sichtbaren Licht nicht ins Gewicht fällt. Wer also Infrarotaufnahmen anfertigen will, muss das sichtbare Licht mit einem geeigneten Filter aussperren und dann mit dem kleinen Rest vorliebnehmen, den der Infrarot-Sperrfilter durchlässt. Dieser Rest ist umso größer, je schwächer der Filter ist. Deswegen gelingen Infrarotbilder mit vielen Handykameras ohne größere Probleme. Wer dagegen die bessere Optik einer teuren Ka-

mera nutzen will, muss einen entsprechend hochwertigen Infrarot-Sperrfilter und damit sehr lange Belichtungszeiten in Kauf nehmen.

### Technik und Tücken

Wie kommt man an einen Infrarot-Durchlassfilter, der sichtbares Licht absorbiert? Ein preiswertes und brauchbares Material ist unbelichtet entwickelter Diafilm (Kasten links unten). Im durch-

fallenden sichtbaren Licht erscheint er je nach Marke mehr oder weniger graubraun und doppelagig verwendet fast völlig schwarz. Für nahes Infrarot ist er nahezu transparent. Kleben Sie die Filme auf eine kleine Scheibe und befestigen Sie diese vor dem Objektiv oder kleben Sie die Filme bei sehr kleinen Objektiven mit Tesafilm direkt vor die Linse.

Für hochwertige Aufnahmen gibt es Schraubfilter für verschiedene Wellen-

## Dialog zur IR-Fotografie

»Du, Liebling, ich bräuchte eine Infrarot-Aktfotografie von dir für einen Artikel.«  
 »Wüstling! Ich hätte auf meine Mutter hören sollen.«  
 »Rein wissenschaftlich natürlich! Wäre schön, wenn du irgendwo 'n dicken Pickel hättest, so dass man sieht, dass man den dann nicht sieht!«  
 »Natürlich!«  
 »Also ja?«  
 »Natürlich nein!«  
 »Dann fotografier ich meine nette Kollegin. Das passt dir auch wieder nicht.«

»Fotografier von mir aus das gerupfte Huhn, wenn du Haut mit Rötungen brauchst.«  
 »Meine Kollegin ist kein gerupftes Huhn.«  
 »Nicht deine Kollegin, ich meine das Suppenhühnchen für heute Abend.«  
 »Geniale Idee, Liebling! Darf ich es vorher mit Lippenstift bemalen, um zu zeigen, dass man den dann auch nicht sieht?«  
 »Schmink doch das Huhn besser mit Tomate und etwas Petersilie.«

JENNIFER KÜLLUSSINGEN; MIT FREDL GEN; VON THOMAS RUBITZKO



Die Kamera des Handys Nokia 6300 mit Diafilmen als Filter liefert ohne großen Aufwand einen Infrarot-Schnappschuss von einem Gartenhäuschen (links). Die Infrarotaufnahme von Schloss Monrepos bei Ludwigsburg (rechts) zeigt die typischen Merkmale: dunkler Himmel (auch im Wasser gespiegelt) und weiße Blätter.

längen und Objektivgrößen zu kaufen. Mit einem Filter, der Licht ab etwa 720 Nanometer Wellenlänge durchlässt, erscheinen gewisse Motive schon merklich anders als gewohnt (Bilder oben und rechts); für stärkere Verfremdungen empfiehlt sich eine Grenzwellenlänge von etwa 800 Nanometern.

Da Infrarot ebenso wie sichtbares Licht das Auge schädigen kann, sollte man die Filter nicht testen, indem man sie gegen die Sonne hält und durchschaut.

### Automatiken abschalten

Für einen ersten Eindruck ist ein Handy oder eine alte Kompaktkamera geeignet, weil diese oft schlechte Infrarot-Sperrfilter haben. Halten Sie einfach die Diafilmfilter vor das Objektiv (Bild oben, links).

Bessere Geräte liefern zwar bessere Bilder, haben aber für die Infrarotfotografie spezielle Tücken. So fehlt den Spiegelreflexkameras der Sucher, durch den man das Motiv auch bei aufgeschraubtem Filter noch sehen könnte. Und die Automatiken, mit denen eine gute Kamera die Bildqualität zu heben pflegt, führen im Infrarot in die Irre. Schalten Sie sie ab, soweit möglich.

So funktioniert der Autofokus mit einem lediglich Infrarot durchlassenden Filter häufig nicht mehr. Da Infrarotlicht von der Objektivlinse weniger stark gebrochen wird als sichtbares Licht, müssen Sie zur Kompensation die Entfernung etwas zu kurz einstellen. Manche Objektive haben zu diesem Zweck neben dem normalen Skalenpunkt einen Infrarotpunkt (Bild unten, rechts). Wo er nicht angegeben ist, lässt er sich durch Probieren ermitteln: Machen Sie mit geöffneter Blende – um die Schärfentiefe niedrig zu hal-

Auf dieser Wand (unten) leuchtet nichts – die Kamera hat in der Mitte einen Punkt übermäßiger Lichtstärke (Hotspot). Bei manchen Objektiven ist auf der Entfernungseinstellung der Infrarotpunkt markiert (rechts, Pfeil).



ten – eine Serie von Testbildern von einem weit entfernten Objekt, zum Beispiel einer Hausecke, die sich kontrastreich gegen den Himmel abzeichnet. Drehen Sie die Einstellung beginnend bei unendlich so lange auf kürzere Entfernungen, bis das schärfste Bild entsteht, und markieren Sie diese Position mit wasserfestem Stift.

Zur Sicherheit und zur Erhöhung der Schärfentiefe können Sie die Blende schließen, allerdings um den Preis einer noch längeren Belichtungszeit. Und die ist bei einem guten Infrarot-Sperrfilter im Kamerarinneren ohnehin ungefähr 500-mal so lang wie im Normalbetrieb. Da muss das Motiv stillhalten, und Sie brauchen ein Stativ.

Bei Belichtungszeiten von einer halben Minute und mehr überlagern Störungen, die nur einzelne Pixel betreffen (»Rauschen«), das Bild. Auch unbeleuchtete Sensoren geben nämlich auf Grund ihrer thermischen Energie, die ihrerseits der absoluten Temperatur proportional ist, zufällige Signale ab, und zwar schon bei Zimmertemperatur. Diese machen sich bemerkbar, wenn nur sehr wenig Licht pro Zeiteinheit auf den Sensor fällt. Kürzere Belichtungszeiten erreichen Sie, indem Sie die Filmempfindlichkeit höher einstellen. Die Kamera simuliert dies durch größere Verstärkung des Signals. Am Verhältnis von »richtigen« (durch externe Photonen ausgelöst) und »falschen« (zufälligen thermischen) Signalen und damit am Rauschen ändert



sich dadurch allerdings nichts. Nur die Bewegungsunschärfe verringert sich.

Manche Objektive, die für den sichtbaren Bereich optimiert sind, zeigen im Infrarotbereich auf Grund von Bauart und Entspiegelung der Gläser eine übermäßig hohe Lichtstärke im Bildmittelpunkt. Ob Ihr Objektiv einen solchen Hotspot hat, erkennen Sie, indem Sie – mit Filter – eine gleichmäßig beleuchtete, strukturlose Fläche fotografieren (Bild S. 44 unten, links).

Das Rohprodukt Ihrer Bemühungen ist in aller Regel ein Farbbild mit überstarken Rottönen. Da diese Farbtöne mit der Realität nichts zu tun haben, empfiehlt sich eine Konvertierung in Graustufen am Computer. Zuvor sollte eine automatische Tonwertkorrektur durchgeführt werden. Aber auch am Rechner manipulierte Falschfarbendarstellungen mit scheinbar blauem Himmel haben ihren Reiz (Bild rechts unten).

### Interessante Motive

Ein wolkenloser Himmel erscheint uns hellblau, weil kurzwelliges blaues Licht beim Weg von der Sonne durch die Erdatmosphäre stärker gestreut wird als langwelliges rotes Licht. Bei Infrarotaufnahmen fehlt das blaue Streulicht, und der Himmel erscheint dunkel, quasi als »unbeleuchteter Weltraum«. Dagegen haben Wolken, die aus Wassertropfchen oder Eiskristallen bestehen, im nahen Infrarotbereich gute Reflexionseigenschaften. Gewitterwolken am ansonsten blauen Himmel erscheinen besonders dramatisch.

Wasser verhält sich wie bei der normalen Fotografie. Aufgeschäumt erscheint es weiß, glatte Oberflächen spiegeln vor allem bei flachem Lichteinfall.

Gesunde Grünpflanzen erscheinen bei der Infrarotfotografie schneeweiß. Dies wird nach seinem Entdecker Robert Williams Wood (1868–1955) als Wood-Effekt bezeichnet. Das Chlorophyll, das für die grüne Farbe der Blätter verantwortlich ist, wird ab dem Grenzbereich zwischen Rot und Infrarot transparent. Infrarotstrahlung dringt in die Zellen der Blätter ein und wird an deren internen Grenzflächen mehrfach reflektiert, bis sie wieder aus-



Der Feuersee in Stuttgart: unbearbeitete Infrarot-Aufnahme (oben), daraus hergeleitetes Graustufenbild (Mitte) und Falschfarbendarstellung (unten, aus anderer Perspektive)



Außen ein Blick von Schloss Solitude nach Norden im herkömmlichen Schwarz-Weiß-Bild. In der Infrarotaufnahme (im Kreis) werden auch entfernte Landschaftsteile klar abgebildet.



MIT FRIEDRICH VON KLAUS MANGOLD / WWW.EYE.DE

»Glückliche Kühe«, mit einer umgebauten Kamera fotografiert von Klaus Mangold aus Tübingen (<http://eye.de/gal/nagold/index.shtml>)



Es ist nicht Schnee, der so hell vor Schloss Favorite in Ludwigsburg auf dem Boden liegt. Der Rasen reflektiert Infrarotstrahlung so intensiv.

tritt. Dabei werden nur geringe Anteile absorbiert. Ganz ähnlich geht es dem sichtbaren Licht in einem Schneekristall.

Dunst scheint sich bei der Infrarotfotografie geradezu aufzulösen. Denn der Blauschleier über Bildteilen in großer Entfernung kommt dadurch zu Stande, dass kurzwelliges Licht an Luft- und Staubteilchen stark gestreut wird – und genau dieses wird ausgefiltert (Bild links, oben).

Menschliche (oder auch tierische) Haut, am besten mit dem »milden« 720-Nanometer-Infrarotfilter zu fotografieren, wirkt wie Alabaster, denn da ausschließlich langwelliges rotes Licht oder Infrarotlicht durch den Filter tritt, werden gerötete Hautstellen ebenso hell abgebildet wie weiße Stellen, von denen Licht aller Farben ausgeht (Bild S. 43). Roter Lippenstift erscheint weiß!

Für besonders ambitionierte Infrarotfotografen stehen übrigens Spezialfirmen bereit, die – zu einem stolzen Preis – den Infrarot-Sperrfilter sorgfältig vom Sensorfeld abkratzen. Eine derart umgebaute Kamera ist danach für die Fotografie im sichtbaren Bereich nur mit einem zusätzlichen Infrarot-Sperrfilter verwendbar. Der Vorteil besteht darin, dass sich die Belichtungszeit deutlich verkürzt. So kann man bewegte Objekte ohne Stativ fotografieren und hat keine Probleme mit dem Bildrauschen (Bild links, Mitte). ~

DER AUTOR



**Thomas Rubitzko** lehrt Physik und Physikdidaktik an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg. Er hat von 1995 bis 2006 das Preisrätsel für »Spektrum der Wissenschaft« bearbeitet.

QUELLEN

- Finney, A.:** The Wood Effect. In: Royal Photographic Society Journal 147 (10), S. 66, 2007
- Girwidz, R., Rubitzko, T.:** Einblicke in die Welt der nahen Infrarotstrahlung. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik 57 (8), S. 31–37, 2008
- Nijland, W.:** Infrared Photography, 2011. <http://www.ir-photo.net>



# Die Kunst, Leibniz herauszugeben

Es gibt kaum eine Wissenschaft, die ihm nicht entscheidende Anstöße, Fortschritte und Impulse verdankt. Dabei hat Gottfried Wilhelm Leibniz, der vielleicht letzte Universalgelehrte Europas, zu Lebzeiten nur sehr wenig publiziert. Und selbst knapp drei Jahrhunderte nach seinem Tod ist der Nachlass des genialen Denkers noch immer nicht vollständig erschienen.

Von Eberhard Knobloch

» Wenn man auf sich zurückkehrt und die Talente, die man empfangt, mit denen eines Leibniz vergleicht, wird man versucht, die Bücher von sich zu werfen und in irgendeinem versteckten Weltwinkel ruhig sterben zu gehen.« Das schrieb der berühmte französische Enzyklopädist Denis Diderot (1713–1784) über den deutschen Universalhistoriker, Mathematiker, Theologen und Philosophen Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716). Als der gebürtige Leipziger Professorensohn und promovierte Jurist 1716 in Hannover starb, wurde davon von seinem Arbeitgeber, dem hannoverschen Herzog, kaum Notiz genommen. Wieder war es ein Franzose, der ständige Sekretar der Académie des Sciences in Paris, Bernard Le Bo-

vier de Fontenelle, der für Leibniz' Verdienste eintrat und einen großartigen Nachruf auf den Verstorbenen verfasste.

Da nimmt es nicht mehr wunder, dass Diderot 1758, mehr als 40 Jahre nach Leibniz' und ein Jahr nach Fontenelles Tod, erstaunt und verärgert feststellte: »Es hat vielleicht nie ein Mensch so viel gelesen, so viel studiert, mehr nachgedacht, mehr geschrieben als Leibniz. Es ist erstaunlich, dass Deutschland, dem dieser Mann allein so viel Ehre macht wie Platon, Aristoteles und Archimedes ihrem Heimatland zusammen, noch nicht das gesammelt hat, was aus seiner Feder hervorgekommen ist.«

Kein Zweifel: Hätte Deutschland wie Paris ein Panthéon mit der Aufschrift »Aux grands hommes – La patrie reconnaissante« (Für die bedeutenden Männer – Das dankbare Vaterland), dann müsste auch Leibniz dort seine letzte Ruhestätte haben. So aber wird lediglich in Hannover jedes Jahr an seinem Todestag, dem 14. November, an seinem Grab in der Neustädter St. Johanniskirche ein Kranz niedergelegt.

Auch heute noch liegt eine Gesamtausgabe der leibnizschen Schriften mindestens einige Jahrzehnte in der Zukunft. Warum tun sich die Deutschen so schwer damit, einem ihrer bedeutendsten Geistesheroen diese Würdigung zuteilwerden zu lassen? Wieso ist dies etwa den Niederländern mit Christiaan Huygens, den Dänen mit Tycho Brahe, den Italienern mit Galileo Galilei, den Franzosen mit René Descartes schon seit Langem gelungen?

Die Antwort findet man in Leibniz' Briefwechsel mit dem acht Jahre jüngeren Schweizer Mathematiker Jakob Bernoulli aus dem Jahr 1697. Darin schreibt Leibniz wahrheitsgemäß: »Ich habe Unzähliges über Unzähliges geschrieben, aber nur Weniges über Weniges veröffentlicht.« Tatsächlich hat der

## AUF EINEN BLICK

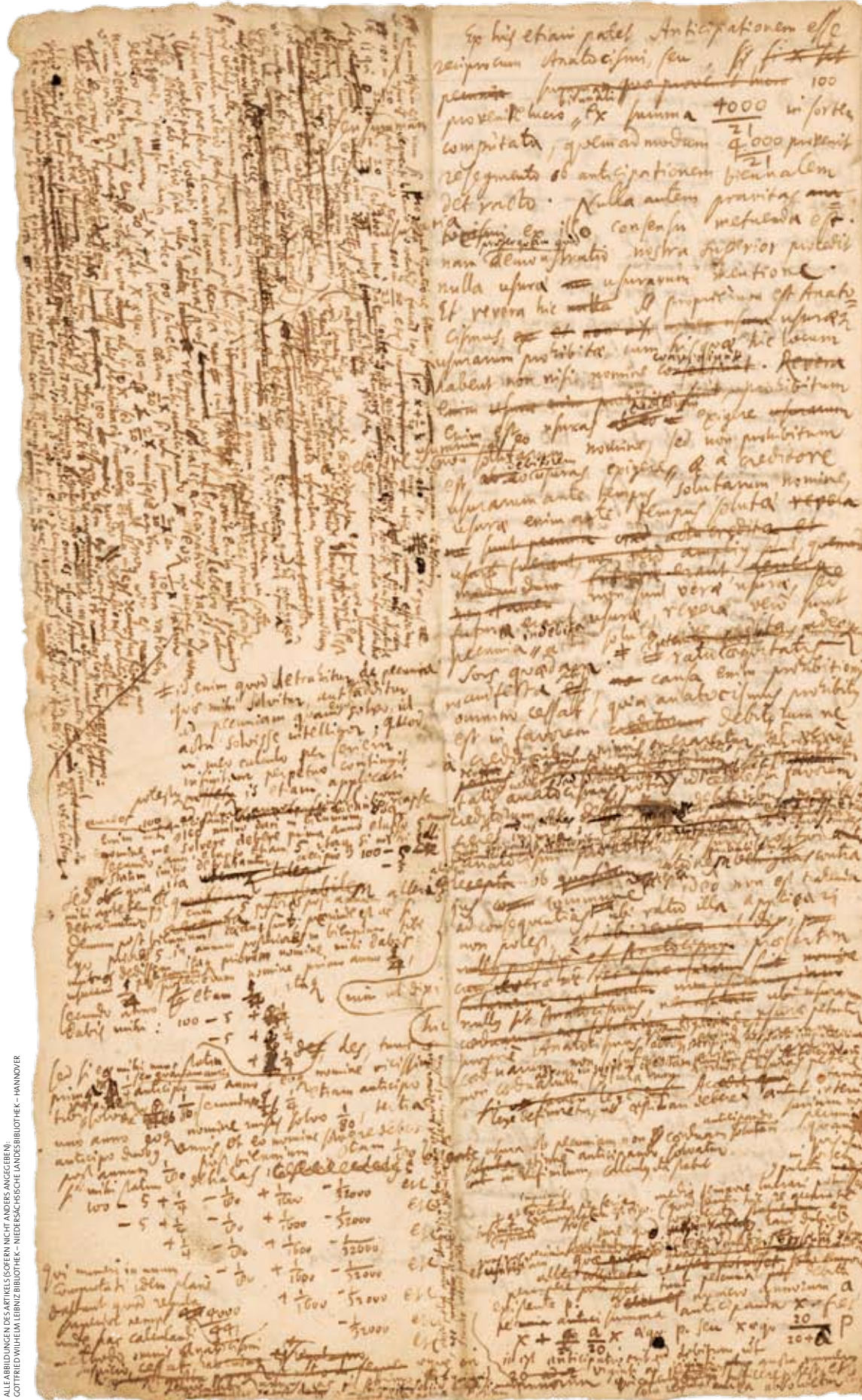
### UNIVERSALGENIE IM VERBORGENEN

**1** Gottfried Wilhelm Leibniz gilt als letzter Universalgelehrter der Geschichte. Von ihm stammen zahlreiche fundamentale Impulse für die Wissenschaft, so die **Infinitesimal- und Integralrechnung**, die er unabhängig von Newton entwickelte. Er legte Grundlagen der **Kombinatorik** und **Determinantenrechnung**, **Logik**, **Philosophie**, **Theologie**, **Sprach- und Geschichtsforschung** – auch wenn er nur das Allerwenigste selbst publizierte.

**2** Leibniz war ein eifriger Erfinder. Er ersann das **Dualsystem** mit 0 und 1, mit dem heute Computer arbeiten, konzipierte ein **Windmessgerät**, Pläne für ein **Unterseeboot** sowie die Staffelmwalze für eine **mechanische Rechenmaschine**.

**3** Fast 300 Jahre nach seinem Tod sind seine – hauptsächlich nachgelassenen – umfanglichen **Werke, Schriften und Tausende von Briefen** noch immer erst zum kleineren Teil herausgegeben.

Leibniz scheute sich nicht, auch die letzten Restflächen eines Bogens noch dicht zu beschreiben – denn Papier war kostbar. Leider datierte er die wenigsten seiner Schriften. Auf diesem Faksimile findet sich unten die Berechnung des Barwerts einer Geldsumme, die Leibniz etwa 1683 anstellte (Faksimile der Leibniz-Handschrift LH II,5,1 Bl. 16v).



ALLE ABILDUNGEN DES ARTIKELS SOFERN NICHT ANDERS ANGEGBEN: GOTTFRIED WILHELM LEIBNIZ BIBLIOTHEK – NIEDERSÄCHSISCHE LANDESBIBLIOTHEK – HANNOVER

hannoversche Hofbeamte zu Lebzeiten nur 1710 ein einziges großes Werk herausgegeben, die »Studien zur Theodizee über die Güte Gottes, die Freiheit des Menschen und den Ursprung des Übels«, kurz »Theodizee«. Die französischen Originalfassungen der anderen umfangreichen philosophischen Schriften, wie etwa der »Metaphysischen Abhandlung« (1686), der »Neuen Studien über den menschlichen Verstand« (1704) oder der »Monadologie« (1714), erschienen



Genie mit übergroßer Perücke: Leibniz im Alter von 56 Jahren, hier auf einem Gemälde von A. Scheit dem Jahre 1703

erst in den Jahren 1846, 1765 respektive 1840. Seine mit mehr als 100 Druckseiten umfangreichste mathematische Abhandlung zur exakten Grundlegung der Infinitesimalgeometrie, die »Arithmetische Quadratur des Kreises, der Ellipse und der Hyperbel, deren Folge eine Trigonometrie ohne Tafeln ist« (1675/76), wurde gar erst 1993 zum ersten Mal veröffentlicht.

### Über 15 000 Briefe und 50 000 Abhandlungen auf 200 000 Blättern in sieben Sprachen

Eine Ausgabe seiner »Sämtlichen Schriften und Briefe« muss noch seinen gewaltigen Nachlass erschließen, der in jeder Hinsicht einen Ausnahmefall darstellt. Dass dieser überhaupt weit gehend erhalten geblieben ist, verdankt sich einem politischen Umstand. Da Leibniz für den Kurfürsten in Hannover (ab 1714 König von England), den Herzog von Wolfenbüttel, und immer wieder auch für den preußischen König in Berlin, den Kaiser in Wien sowie den Zaren in Sankt Petersburg tätig war, ließ der hannoversche Hof seinen Nachlass unmittelbar nach seinem Tod versiegeln. Er wollte damit vor allem sicherstellen, dass keine möglichen Interna, die in dem gewaltigen Konvolut schlummern mochten, an die Öffentlichkeit gelangten.

Es handelt sich dabei um einen der umfangreichsten Gelehrtennächlässe überhaupt: über 15 000 Briefe an mehr als 1100 Adressaten, über 50 000 Abhandlungen, Aufzeichnungen, Exzerpte auf rund 200 000 Blättern und rund 100 Bände mit Anmerkungen. Leibniz hat seine Schriften und Briefe überwiegend auf Lateinisch (rund 40 Prozent), Französisch (30 Prozent) und Deutsch (15 Prozent) abgefasst, zum kleineren Teil auch auf Englisch, Niederländisch, Italienisch oder Russisch. Doch damit nicht genug: Der Inhalt seiner Aufzeichnungen betrifft so gut wie alle Wissensgebiete, sämtliche Geistes- und Naturwissenschaften des 17. und beginnenden

## Versicherungs- und Finanzmathematik

Leibniz bezeichnete sich gern als **Pacidius**, Friedensstifter, der als Philosoph, Politikberater und Mathematiker zur öffentlichen Wohlfahrt beitragen wollte. Dazu gehörten sozialpolitische Probleme wie die Verschuldung des Staats, eine gerechte Rentenberechnung oder ein rationales Risikoverständnis, das heißt ein mathematisch begründetes Versicherungswesen – auch heute überaus aktuelle Themen. Der Einzelne kann ein Risiko oft nicht allein tragen, das aber eine Gemeinschaft von Versicherten sehr wohl zu schultern in der Lage ist.

Es liegt auch im Interesse eines Herrschers, dass seine Bevölkerung etwa durch Feuer oder Naturgewalten nicht ihr Hab und Gut verliert. Denn wer nichts mehr hat, kann auch keine Steuern zahlen. Deshalb sollte der Regent ein Versicherungswesen unterstützen, das sich zu Leibniz' Zeiten erst zu entwickeln begann. Die 1750 gegründete VGH Versicherungen/Landschaftliche Brandkasse Hannover sieht sich durchaus noch

in der Tradition dieses Denkens. So finanzierte sie im Jahr 2000 die überwiegend erstmalige Veröffentlichung seiner Schriften zur Versicherungs- und Finanzmathematik.

Diese enthalten Leibniz' korrekte Berechnung von Diskont und Barwert eines Geldbetrags aus dem Jahr 1683. Bis dahin wurde nach geltendem Recht in Sachsen dieser Betrag falsch berechnet. Er gibt an, wie viel ein geschuldeter Betrag (weniger) wert ist, wenn er vorzeitig gezahlt wird. Der Berechnung des Barwerts wurde Leibniz' Berechnung des Kaufpreises einer Rentenzahlung zu Grunde gelegt.

Da die Dauer der Rentenzahlung von der unbekanntenen Lebenserwartung eines Menschen abhängt, entwickelte er mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitstheorie Modelle für Zahlungen an Individuen oder Gesellschaften. Allerdings hat er seine Arbeiten darüber niemals publiziert. Gleichwohl kann er als Wegbereiter der Versicherungsmathematik bezeichnet werden.



den 18. Jahrhunderts sowie Theologie und Technik. Es ist der Nachlass eines Denkers, der die Universalität des Wissens praktizierte und proklamierte, wie es heute keinem Menschen mehr möglich wäre.

Das macht deutlich, welchen geistigen Schatz es heute noch zu heben gilt, aber auch, welcher großer Aufwand noch auf die Herausgeber wartet. Erst 1901 wurde mit der Katalogisierung des Nachlasses von Leibniz begonnen. Nach und

nach zeigte sich damit die Größe der Aufgabe, auch wenn diese weiterhin noch jahrzehntelang dramatisch unterschätzt wurde. 2007 wurde der Leibniz-Briefwechsel, der in der Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Bibliothek in Hannover liegt, zum UNESCO-Weltdokumentenerbe erklärt und damit als zehnter deutscher Eintrag ins Register Memory of the World aufgenommen, allerdings nicht der Rest des handschriftlichen Nachlasses. Tatsächlich beruht die überragende Bedeu-

## Differenzial- und Integralrechnung

**Der Philosoph und Mathematiker René Descartes** (1596–1650) hatte 1637 in seiner »Geometrie« behauptet, die Beziehung zwischen Geraden und Kurven sei unbekannt und könne von Menschen nicht erkannt werden. Mit der Erfindung seines *calculus differentialis et integralis*, seiner Differenzial- und Integralrechnung vom Oktober 1675, widerlegte Leibniz den zweiten Teil der cartesischen Behauptung. Sein entscheidender, noch heute gültiger Gedanke war, Kurven zu linearisieren. Demnach sind Kurven Polygone mit unendlich vielen, unendlich kleinen Seiten.

Um dieses Prinzip fruchtbar zu machen, bedurfte es einer sauberen Klärung des Begriffs »unendlich klein«. Entgegen allen anders lautenden, oft wiederholten Behauptungen in der Literatur ist dies Leibniz nach langen gedanklichen Anstrengungen auch gelungen. Zunächst hatte er die Definition erwogen, »unendlich klein« bedeute »kleiner als eine beliebig angebbare Größe«, wie es rund 80 Jahre später Leonhard Euler tat, ohne von Leibniz' Versuch zu wissen. Eine solche Größe muss freilich notwendiger Weise null sein, wie der Mathematiker – und später auch Euler – erkannte. Deshalb definierte er 1673 »unendlich klein« als »kleiner als eine beliebig gegebene Größe«. Diese Bestimmung weist dem Begriff »unendlich klein« keinen festen Wert zu, sondern verwendet implizit eine Abschätzung: Wenn eine beliebige positive reelle Zahl vorgegeben wird, dann kann die unendlich kleine (variable) Größe einen Wert annehmen, der kleiner als diese reelle Zahl ist. Der kleine Unterschied zwischen »angebbare« und »gegeben« ist entscheidend – eine Erkenntnis, die Euler verwehrt blieb.

Die moderne Mathematik hat die leibnizsche Begriffsbildung in eine explizite Abschätzungsmethode übersetzt. Die logisch einwandfreie und strenge Darstellung der heutigen Analysislehrbücher, die auf Karl Weierstraß (1815–1897) aus Berlin zurückgeht, lässt den unendlich kleinen Größen keinen Platz. Gleichwohl leben Leibniz' unendlich kleine Größen in Bezeichnungen wie  $dx$  und  $dt$  fort; diese müssen im Rahmen der modernen Mathematik nur anders interpretiert werden.

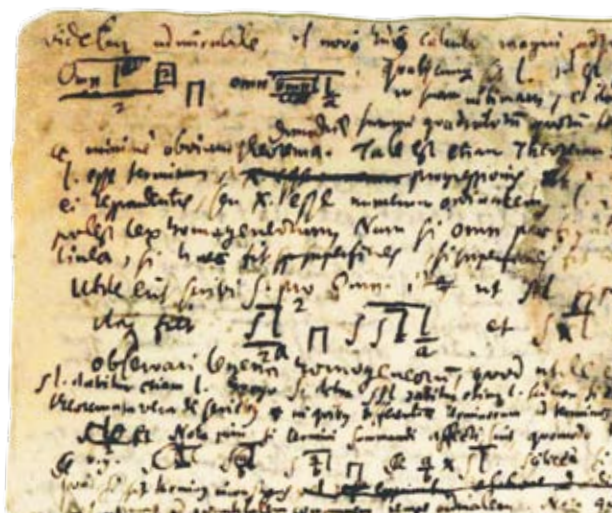
**Die leibnizsche Arbeit aus den Jahren 1675/76** zur Grundlegung der Infinitesimalgeometrie, die weitgehend kurz vor seiner Erfindung des Differenzial- und Integralkalküls und dessen Symbolik entstand, ist erst 1993 herausgegeben worden. Ihre Bedeutung erkennt man bereits daran, dass Leibniz mit ihrer Hilfe

Mitglied der Académie des Sciences werden wollte. Ohne selbst schon über den modernen Grenzwertbegriff zu verfügen, beweist der Gelehrte darin mit archimedischen Abschätzungsmethoden mathematisch präzise, dass sich die Fläche unter einer Kurve mittels eines geeigneten Polygonzugs exakt berechnen lässt. Er nimmt damit letztlich bereits den Integralbegriff Bernhard Riemanns aus dem 19. Jahrhundert vorweg.

Leibniz beweist in dieser Schrift auch das heute nach ihm benannte Konvergenzkriterium für alternierende Reihen – als erster in der Geschichte der Mathematik. 1673 hatte er die »alternierende Kreisreihe« gefunden. Es handelt sich um die von ihm so genannte arithmetische Kreisquadratur, weil in ihr nur rationale Zahlen, also Brüche auftreten:

$$\pi/4 = 1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + 1/9 - \dots$$

Die inzwischen veröffentlichten Bände VII 3 bis 5 der Leibniz-Edition beweisen, dass dieser um 1675 seinen Kalkül, der in allen mathematischen Natur- und Technikwissenschaften vielfältige Anwendung gefunden hat, selbstständig entwickelte. Wenn diese Bände schon zu seinen Lebzeiten vorgelegen hätten, wäre es nicht zu dem unerquicklichen Prioritätsstreit über die Erfindung der Infinitesimalrechnung mit Isaac Newton gekommen.



Hier passierte es: Im Jahr 1675 benutzte Leibniz zum ersten Mal das heute gebräuchliche Zeichen für das Integral, das vom Buchstaben S für Summe abgeleitet ist (unten rechts).

tung des leibnizschen Briefwechsels aber nicht nur auf der großen Zahl der als Adressaten involvierten Fürsten und führenden Wissenschaftler seiner Zeit. Sie fußt auch darauf, dass Leibniz am besten im Dialog in der Lage war, seine Positionen und Ideen zu vertreten. So verteidigte er seine relationale Auffassung von Raum und Zeit gegen Newtons Lehre eines absoluten Raums und einer absoluten Zeit lediglich in der Korrespondenz mit Newtons Sprecher Samuel Clarke.

### Erste Teileditionen im 18. Jahrhundert

Die Reihe der Werkausgaben begann im Jahr 1768 in Genf mit der sechsbändigen »Opera omnia«-Ausgabe von Louis Dutens. Die Bezeichnung »Alle Werke« meinte freilich nur alle bereits veröffentlichten, dem Schriftsteller und Akademiemitglied Dutens zugänglichen Schriften. Die Herausgeber entsprechender Ausgaben im 19. Jahrhundert waren in diesem Punkt schon etwas vorsichtiger, auch wenn sie zusätzlich bereits nachgelassene Schriften berücksichtigten. So betitelte Louis Alexandre Foucher de Careil seine siebenbändige Ausgabe nur »Oeuvres« (1859–1875), der Historiker Onno Klopp seine elfbändige Leibniz-Ausgabe »Werke« (1864–1884), ohne indessen über die erste Reihe »Historisch-politische und staatswissenschaftliche Schriften« hinauszukommen. Der Mathematikhistoriker Carl Immanuel Gerhardt schließlich edierte je sieben Bände »Mathematische Schriften« (1849–1863) sowie »Philosophische Schriften« (1875–1890). Diese Ausgaben sind bis heute – trotz ihrer Defizite – mangels einer tatsächlich vollständigen Ausgabe aller Schriften und Briefe von Leibniz unentbehrlich.

Seit Gerhardts Zeiten sind darüber hinaus aus dem Nachlass Hunderte von Einzelstücken, oft thematisch zusammengefasst, veröffentlicht worden. Sie haben das Bild von Leibniz' geistigem Schaffen erheblich verfeinert und zugleich gezeigt, wie unvollständig unser Wissen darüber ist und welche Schätze noch zu heben sind. Genannt seien etwa Louis Couturats »Opuscles et fragments inédits de

Leibniz« zur Logik (1903) und Ernst Gerlands Ausgabe von »Leibniz' nachgelassenen Schriften physikalischen, mechanischen und technischen Inhalts« (1906) sowie meine beiden Textbände »Die mathematischen Studien von G.W. Leibniz zur Kombinatorik« (1976) und »Der Beginn der Determinantentheorie, Leibniz' nachgelassene Studien zum Determinantenkalkül« (1980).

Den Grundstein zu einer umfassenden Leibniz-Ausgabe legte 1901 ein Beschluss der Association Internationale des Académies. Diese beauftragte die Académie des sciences, die Académie des sciences morales et politiques sowie die Preußische Akademie der Wissenschaften mit der Ausführung des gewaltigen Projekts. Die Preußische Akademie war insofern gegenüber Leibniz in der Pflicht, als sie auch seine Akademie war. Denn auf seinen Vorschlag hin und nach seinem Konzept stiftete Kurfürst Friedrich III. sie im Jahr 1700 als »Kurfürstliche Brandenburgische Sozietät der Wissenschaften«. Die unverzichtbare Vorarbeit für die Leibniz-Edition leistete in den Jahren nach 1901 zunächst Paul Ritter. In Zusammenarbeit mit den französischen Akademien erstellte der Historiker in Berlin erst einmal einen »Kritischen Katalog der Leibniz-Handschriften«. Von diesem wurden jedoch nur zwei Teilbände vervielfältigt, der erste 1908 handschriftlich, der zweite 1924 im Druck. Im Lauf der Editionsarbeiten wurden und werden die Angaben laufend ergänzt und verbessert. Heute ist der Katalog online zugänglich (<http://ritter.bbaw.de>).

Ritter wurde schließlich auch der erste Leiter der Leibniz-Ausgabe und blieb es bis 1939. Schon mit dem Ersten Weltkrieg brach freilich die deutsch-französische Kooperation an dieser Gemeinschaftsaufgabe wieder zusammen. 1920 beschloss die Preußische Akademie der Wissenschaften daher, das Projekt allein zu fortzusetzen. Betrüblinges Zwischenfazit: Auch nach 19 Jahren Arbeit war noch kein einziger Band erschienen. Die Ausgabe wurde aber nunmehr in sieben Reihen gegliedert – drei Brief- und vier Schriftenreihen:

- Allgemeiner, politischer und historischer Briefwechsel (I),
- Philosophischer Briefwechsel (II),
- Mathematischer, naturwissenschaftlicher und technischer Briefwechsel (III),
- Politische Schriften (IV),
- Historische und sprachwissenschaftliche Schriften (V),
- Philosophische Schriften (VI),
- Mathematische, naturwissenschaftliche und technische Schriften (VII).

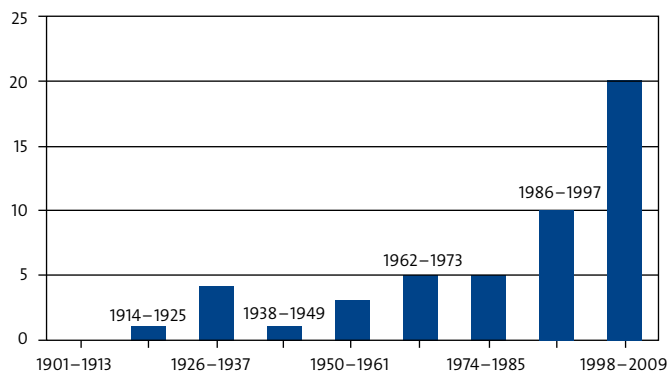
Diese Struktur der Gesamtausgabe blieb seitdem weitgehend gleich. Nur die siebte Reihe wurde aus pragmatischen Gründen 1976 nochmals in zwei weitere Reihen aufgeteilt:

- Mathematische Schriften (VII), mit voraussichtlich 30 Bänden, und
- Naturwissenschaftliche, medizinische und technische Schriften (VIII), mit voraussichtlich acht oder neun Bänden ([www.leibniz-edition.de](http://www.leibniz-edition.de)).

Die Arbeit an der Edition kam jedoch nur langsam voran. Denn Paul Ritter war an der Preußischen Akademie der Wis-

### ERSCHIEBENE BÄNDE DER LEIBNIZ-ÄKÄDEMIEÄUSGÄBE

(jeweils in zwölf Jahren erschienene Bände)

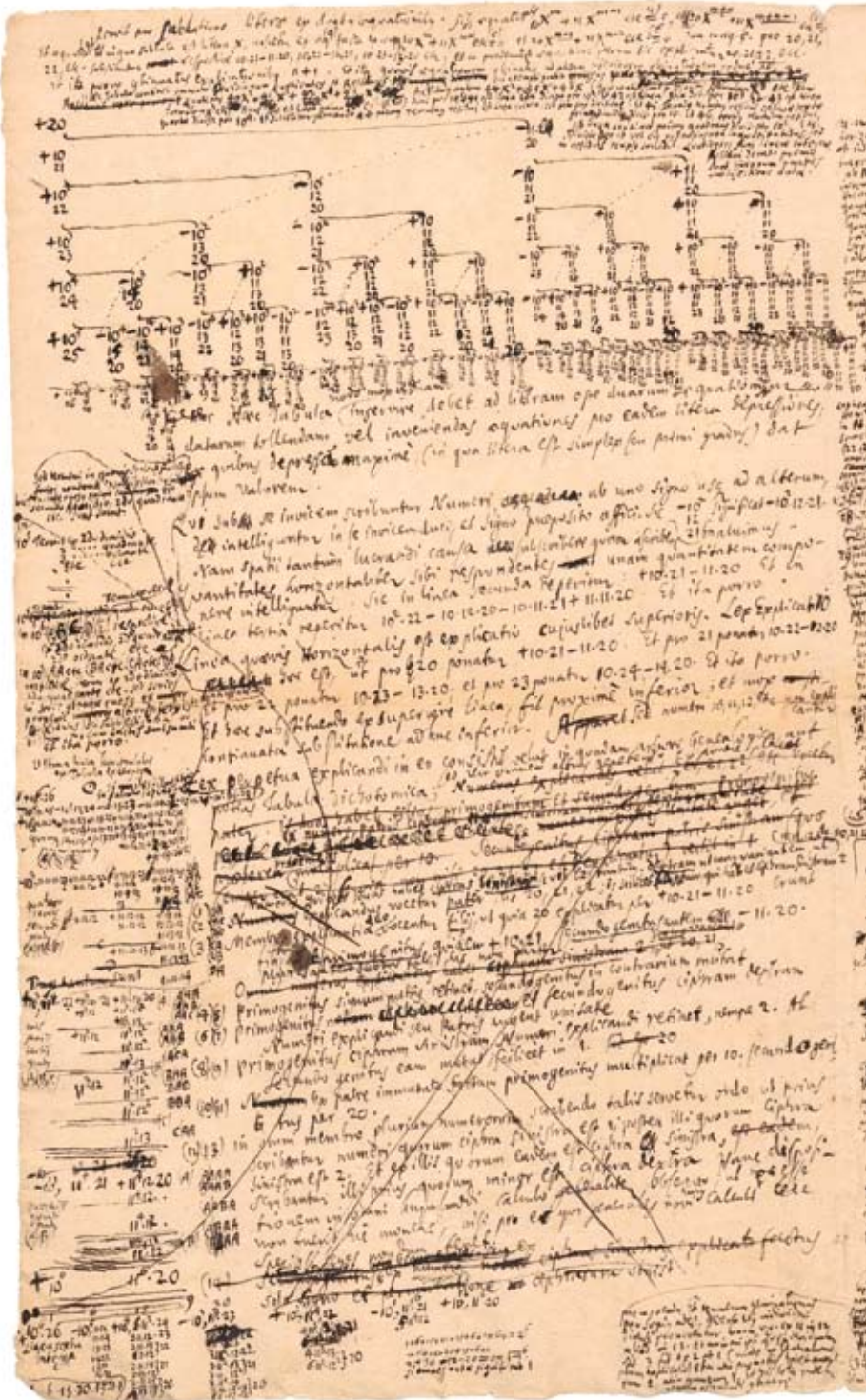


Die etwas mühsame Geschichte der Leibniz-Edition lässt sich an dieser Kurve ablesen: Erst in den letzten drei Jahrzehnten nahm die Herausgabe des Nachlasses an Fahrt auf.

# Kombinatorik und Determinanten

**Unter Kombinatorik verstand Leibniz** – anders als der heutige, wesentlich engere Sprachgebrauch – die Bereitstellung von Regeln, um mit geeigneten, neu geschaffenen Zeichen methodisch neues Wissen zu erzeugen. Dies war ihm mit den von ihm erfundenen Symbolen  $dx$ ,  $dy$  und dem Integralzeichen in der Differenzial- und Integralrechnung hervorragend gelungen. Sein Interesse an mathematischer Notation hat ihn auch in anderen Gebieten zu wichtigen Erkenntnissen geführt. Dank einer von ihm erfundenen algebraischen Indexschreibweise wurde er zum Begründer der Determinantentheorie – seiner Ansicht nach ein herausragendes Beispiel der Kombinatorik, eine Zuordnung, die noch Anfang des 20. Jahrhunderts von den Mathematikern beibehalten wurde.

1684 entdeckte Leibniz das kombinatorische Bildungsgesetz von Determinanten im Sinne der heutigen Kombinatorik und konnte lineare Gleichungssysteme mit Hilfe von Determinanten nach einer Regel lösen, die heute »cramersche Regel« genannt wird, da sie der Schweizer Gabriel Cramer 1750 zuerst publiziert hat. Leibniz antizipierte auch den so genannten Entwicklungssatz von Laplace zur Berechnung von Determinanten. Ebenso entdeckte er Verfahren zur Eliminierung der gemeinsamen Unbekannten aus zwei algebraischen Gleichungen höheren Grades. Im 18. und 19. Jahrhundert fanden die Mathematiker Leonhard Euler, Etienne Bézout und James Joseph Sylvester diese Resultate erneut.



Auch als Mathematiker war Leibniz seiner Zeit weit voraus: Er antizipierte den laplace'schen Entwicklungssatz zur Berechnung von Determinanten sowie die Behandlung von algebraischen Gleichungen höheren Grades. In dieser Handschrift entwickelte er die Lösung dieses Problems. Leibniz selbst publizierte nichts von seinen zahllosen Ergebnissen.

## Die Rechenmaschine



1671 präsentierte Leibniz in Paris seine erste Rechenmaschine – hier ein Nachbau des zweiten Modells.

**Für Leibniz war es würdelos**, dass hervorragende Männer ihre Zeit oft mit stupider Rechenarbeit vergeudeten. Auch verrechnete er selbst sich nur allzu leicht. Daher sann der Hofrat von Hannover schon 1671 auf Abhilfe. Sein Ziel war von vornherein, eine Rechenmaschine zu konstruieren, die addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren konnte, eine so genannte 4-Spezies-Rechenmaschine. Mit dieser Idee ging er über die älteren Rechenmaschinen von Wilhelm Schickard (1592–1635) und Blaise Pascal (1623–1662) hinaus, die Maschinen nur für Addition und Subtraktion gebaut hatten.

Sein erstes, noch nicht voll funktionsfähiges Modell stellte Leibniz 1673 in London der Royal Society vor. Sein gesamtes Leben lang war er bemüht, dessen feinmechanische Mängel abzustellen. 1693 begann er mit dem Bau des letzten Modells. Das Kernproblem war der Übertrag in die nächste Stelle des Dezimalsystems, also zum Beispiel die Zehnerziffer um eins hochzusetzen, wenn die Summe der Einerziffern mehr als zehn beträgt. Er erfand dazu ein neues Maschinenelement in zwei Ausführungen, ein Paar von Zahnrädern, bei denen die wirksame Anzahl der Zähne zwischen null und neun variiert werden kann, das so genannte Sprossenrad und die Staffelwalze.

Die Veröffentlichung der entsprechenden Handschriften wird es erlauben, die Geschichte dieser Erfindung genau nachzuvollziehen. Leibniz kann umso mehr Ahnherr der Computertechnik genannt werden, als er auch das binäre Zahlensystem entwickelte, das Zahlen mittels Potenzen von zwei darstellt und mit dem heute alle Computer arbeiten. Er gab auch als Erster einen mechanischen Zahlenwandler an, der es erlaubte, Zahldarstellungen von einem Stellenwertsystem ins andere umzuwandeln. Auf dieser Grundlage hat Ludolf von Mackensen die Voraussetzung dafür geschaffen, dass Rolf Paland 1984 eine funktionierende duale Rechenmaschine nach dem leibnizschen Entwurf baute.

senschaften der einzige Gelehrte, der sich ausschließlich dieser Herausgeberaufgabe widmen konnte. Alle anderen Editoren – Philosophen (Willy Kabitz, Erich Hochstetter, Liselotte Richter, Helfried Hartmann, Dietrich Mahnke), Germanisten (Waldemar von Olshausen, Kurt Müller), Archivare (Kurt Dülfer), Wissenschaftshistoriker (Anneliese Maier) und Mathematiker (Conrad Müller) – waren freie Mitarbeiter, oft außerhalb Berlins wohnhaft, mitunter nur mit einem Werkvertrag ausgestattet. 1923 erschien schließlich der erste Band (I,1), bis zum Beginn des Zweiten Weltkriegs lagen gerade mal sechs Bände vor (I,1 bis 3; II,1; IV,1; VI,1).

Von den mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Reihen erschien bis dahin kein Band – und dies sollte noch lange so bleiben. Nicht nur der Zweite Weltkrieg hatte für die Fortsetzung der Gesamtausgabe verheerende Folgen. Auch das Schicksal schien sich nun gegen die Leibniz-Edition verschworen zu haben. Der Philosoph und Mitherausgeber Dietrich Mahnke, zuständig für die Briefwechselreihe III, starb 1939 bei einem Verkehrsunfall und hinterließ ein Manuskript, das erst rund 40 Prozent des geplanten ersten Bands (III,1) umfasste. Ein ähnliches Unglück widerfuhr 1973 Joseph Ehrenfried Hofmann. Der Mathematikhistoriker hatte Mahnkes Arbeit an dem Band fortgesetzt und bereits weit gehend zu Ende geführt, so dass dieser Band drei Jahre später (1976) erscheinen konnte.

### Leibniz in der NS-Zeit

Ähnliches ließ sich für die mathematisch-naturwissenschaftlichen Reihen aus politischen Gründen zunächst nicht behaupten. 1938/39 wurde die Akademie unter den Nationalsozialisten nach dem Führerprinzip umgestaltet. Der zuständige Reichsminister für Wissenschaft, Bernhard Rust, setzte 1939 den ersten Gauleiter der NSDAP in Pommern, den Mathematiker Theodor Vahlen, als Akademiepräsidenten ein. Das geschah sogar gegen den Willen der Mehrheit der Akademiemitglieder. Zum vierköpfigen Präsidium gehörte neben Vahlen auch der stramm nationalsozialistische Mathematiker Ludwig Bieberbach. Als bekannteste Vertreter der »Deutschen Mathematik« verständigten sich Vahlen und Bieberbach darauf, die Leibniz-Ausgabe neu auszurichten, und zwar zu Gunsten der mathematisch-naturwissenschaftlichen Reihen. 1939 ernannte der Minister Joseph Ehrenfried Hofmann zum Leiter der Leibniz-Edition. Der renommierte Wissenschaftshistoriker war aber auch Parteimitglied, so dass er nach Kriegsende wieder entlassen wurde.

Hofmann wollte unbedingt mehr Mitarbeiter, weil er glaubte, »unter sachkundiger, kräftiger, aber niemals anmaßender Führung« die Ausgabe bis zum Jahr 1956 abschließen zu können. Diese Vorstellung erwies sich als utopisch. Mehrere Mitarbeiter verließen alsbald das Editorenteam. Hofmann selbst reiste 1940/41 zweimal in das besetzte Paris sowie nach Brüssel, um dort in Archiven nach Leibniziana zu suchen. Er kam mit rund 700 Blatt Kopien zurück. Bereits damals übte er scharfe Kritik an der bisher geleisteten Arbeit und meinte, durchaus zu Recht, es gelte, die schwer wie-

genden Mängel der bisherigen Gesamtplanung zu beseitigen. Im Grunde müsste die ganze Ausgabe neu aufgesetzt werden.

Daraus wurde aber zu Kriegszeiten nichts mehr. Während ab 1941 die eigentliche Editionsarbeit weit gehend zum Erliegen kam, wurden zumindest weitere Leibniz-Handschriften gesucht und katalogisiert. Bei Kriegsende 1945 war seit 1938 kein Band mehr erschienen. Der überfällige Neubeginn gestaltete sich nach dem Krieg als überaus schwierig. Ab 1946 stand wieder der Germanist Kurt Müller zur Verfügung; er übernahm die Leitung der Berliner Arbeitsstelle. Verschiedene Pläne, weitere Mitarbeiter zu gewinnen, zerschlugen sich jedoch. Auch scheiterten Bestrebungen, Joseph Ehrenfried Hofmann wieder als Herausgeber einzubinden. Die bis dahin zentral in Berlin angesiedelte Leibniz-Ausgabe wurde nun über verschiedene Standorte verteilt, denn 1956 entstand an der Universität Münster eine Leibniz-Forschungsstelle.

Die politische Situation in der Viersektorenstadt Berlin warf weitere Probleme auf. Kurt Müller wohnte in Berlin (West), während das Akademiegebäude und mit ihm die Leibniz-Arbeitsstelle im sowjetischen Sektor, das heißt in Berlin (Ost) lag. Die Akademie wurde zunächst in »Deutsche Akademie der Wissenschaften« umbenannt, da das Attribut »Preußisch« von nun an geächtet war. Bis zum Bau der Mauer im Jahr 1961 erschienen unter Müllers Leitung drei Bände der Reihe I mit dem politischen und historischen Briefwechsel. Neu gegenüber den Bänden der Vorkriegszeit war jeweils eine Beschreibung der Entstehung des gültigen Textes. Im Fall der Bände mit den Briefwechseln hatte das nur geringe Auswirkungen, spielte aber bei den Schriftenbänden eine wesentliche Rolle. Denn deren endgültige Texte verfasste Leibniz erst nach mühsamem Streichen, Hinzufügen und Ersetzen. Um diesen Prozess abzubilden, hatten sich die Editoren an der großen Stuttgarter Hölderlin-Ausgabe orientiert. Deren Technik des kritischen Apparats erlaubt es, den

## Die bestmögliche Welt

**Für Leibniz ist die Welt eine Schöpfung Gottes.** In seiner Vollkommenheit hat Gott aber auch die beste aller möglichen Welten geschaffen – etwas anderes widerspräche der Vollkommenheit Gottes. Wie aber ist dann das offensichtliche Vorhandensein von Übeln in der Welt möglich und erklärbar? Diese Grundproblematik der Religionsphilosophie wurde im Altertum von Epikur aufgegriffen, von Leibniz mit Rückgriff auf Ethik und Freiheitstheorie beantwortet. Er prägte den Begriff »Theodizee«. Voltaire hat diese in sich widerspruchsfreie Lehre falsch verstanden, als er sie in seinem »Candide« (1776 auf Deutsch unter dem Titel »Candide oder die beste aller Welten« erschienen) satirisch anprangerte.

Leibniz' rationale Ethik setzt voraus, dass der Mensch sich frei zwischen verschiedenen Handlungsmöglichkeiten entscheiden kann. Menschliche Freiheit besteht im vernünftigen Handeln. Dazu muss er das Gute erkennen, das dann notwendigerweise von ihm auch gewollt wird. Je mehr also der Mensch seine Erkenntnisfähigkeit verbessert, desto moralischer wird sein Handeln. Auf dieser rationalen Grundlage beruht Leibniz' »Optimismus«. Dass die bestmögliche aller Welten das Böse, also Nichtgute, zulässt und deshalb nicht unbedingt in allem gut sein muss, hat er selbst in seiner »Theodizee« betont. Übel sind nicht als Mängel, sondern in der Welt der Geister oder Monaden als Möglichkeit zur Vervollkommnung zu betrachten. In moralischer Hinsicht bedeutet danach Vollkommenheit der Welt gerade diese Möglichkeit.

Die »Güte Gottes« zu verstehen, der allmächtig und allliebend ist und dennoch das Böse in der Welt zulässt, beschäftigte auch Leibniz – in seinem einzigen zu Lebzeiten publizierten Werk.



Werdegang der Gedanken, die Leibniz schreibend festhielt, systematisch und übersichtlich nachzuvollziehen.

Der Bau der Mauer und die hermetische Abriegelung Berlins in zwei getrennte Teile erzwang eine Neuregelung der Herausgeberarbeit. 1962 entstand in Hannover an der Niedersächsischen Landesbibliothek, der heutigen Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Bibliothek, eine neue Arbeitsstelle, das Leibniz-Archiv. Die Buchreihen waren nunmehr auf die drei Orte der Edition aufgeteilt. In Berlin, bei der inzwischen in »Akademie der Wissenschaften der DDR« umbenannten Akademie, verblieb die Reihe IV Politische Schriften. Bis zum Ende der DDR erschienen dazu zwei weitere Bände. Die Arbeitsstelle Münster übernahm zusätzlich zu den beiden philosophischen Reihen die beiden mathematisch-naturwissenschaftlichen Reihen III und VII, ohne dass dies zunächst greifbare Folgen hatte. Das Leibniz-Archiv in Hannover betreute die beiden Briefwechselreihen I und III. Die Edition der Historischen und sprachwissenschaftlichen Schriften (Reihe V) ist bis heute noch nicht einmal begonnen worden.

Drei Jahre nach dem Tod Hofmanns, 1976, erschien nicht nur der erste Band des mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Briefwechsels, es gab auch andere Lichtblicke. Vertreten durch den Leiter der Münsteraner Forschungsstelle, Heinrich Schepers, dem heutigen Nestor der Leibniz-

Edition, beauftragte mich das Land Nordrhein-Westfalen mit der Bearbeitung der ersten vier Bände der Reihe VII, Mathematische Schriften. Damals arbeitete ich als Mathematik- und Wissenschaftshistoriker an der Technischen Universität Berlin. Vermutlich fiel die Wahl auf mich, weil ich über Leibniz' Kombinatorik promoviert und mehrere Bände mit nachgelassenen mathematischen Arbeiten von Leibniz publiziert hatte.

### **Heute können 45 000 Bilder von Leibniz' Handschriften bereits im Internet betrachtet und analysiert werden**

In Hannover, wo nunmehr die beiden Reihen III und VII angesiedelt waren, unterstützte mich ab 1976 ein neuer Mitarbeiter, Walter S. Contro. Der Mathematikhistoriker und ich mussten mit Planung und Transkription dieser Werkreihen ebenfalls von vorn anfangen. Das bisherige chronologische Ordnungsprinzip ließ sich nur in Verbindung mit einer Gruppierung der Handschriften nach Themen beibehalten. Rund 80 Prozent der betreffenden Leibniz-Handschriften sind leider nicht datiert. So füllt allein die mathematische Produktion eines halben Jahres während Leibniz' Aufenthalt in Paris (1672–1676) einen stattlichen Band von 800 bis 900 Seiten. Die Dokumente lassen sich – etwa anhand der Wasserzeichen im Papier – selten exakt datieren. Oft können wir die Papiere nur größeren Zeiträumen zuordnen. Der erste Band der Reihe VII erschien 1990, im Jahr der Wiedervereinigung. Inzwischen ist – dank Verstärkung unseres Teams durch weitere Mitarbeiter – die Reihe VII auf fünf Bände angewachsen, gerade ein Sechstel von Leibniz' mathematischen Aufzeichnungen.

2001 richtete die Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (BBAW) unter meiner Projektleitung in Berlin eine neue Arbeitsstelle ein. Sie übernahm die Bearbeitung der Reihe VIII, Naturwissenschaftliche, medizinische und technische Schriften, geleitet von dem Philosophen und Physiker Hartmut Hecht. Der erste Band erschien 2009. Es war der 49. Band der Leibniz-Edition, die, soweit wir dies abschätzen können, eines fernen Tages sicher mehr als 100 Bände umfassen wird.

Das Internet erlaubt es heute, in der Edition neue Wege zu beschreiten. So gibt heute die Webseite [www.leibniz-edition.de](http://www.leibniz-edition.de) der deutschen Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Gesellschaft laufend aktuelle Auskunft über neu erschienene Bände, die Arbeitsstellen der beiden Akademien sowie weitere Hilfsmittel zur Akademie-Ausgabe. Die Texte neu bearbeiteter Bände werden jeweils noch vor dem Erscheinen im Druck als PDF-Dateien ins Netz gestellt und damit weltweit leicht zugänglich gemacht.

Um zukünftig auch international mit französischen und russischen Wissenschaftlern zusammenzuarbeiten, mussten wir bei Reihe VIII neue Wege beschreiten. Alle dafür noch zu publizierenden Handschriften wurden digitalisiert und in drei verschiedenen Auflösungen online zugänglich gemacht. Die 45 000 Scans sind unter <http://ritter.bbaw.de> abrufbar und werden insbesondere von zwei freien Mitarbeitern in

## **Monadologie und prästabilisierte Harmonie**

**Wie sind Seele und Leib in Einklang zu bringen?** Diese Kernfrage der Philosophiegeschichte hat seit der Antike bis in unsere Tage die verschiedensten Antworten gefunden. Die Monadenlehre ist Leibniz' eigentümliche Lösung dieses Problems und zugleich seine bekannteste Lehre. Als monistische Substanztheorie wandte sie sich insbesondere gegen Descartes' entsprechende Theorie, gegen dessen dualistisches Weltbild mit Denken und Ausdehnung. Das Nichtmaterielle jedes Lebewesens bezeichnet Leibniz als einfache Substanz, als Monade oder Kraftzentrum, dem jeweils ein materieller Körper zugeordnet ist. Die exakte Entsprechung zwischen Monade und ihrem Körper hat Gott bei Erschaffung der Welt durch eine »prästabilisierte Harmonie« geregelt. Die Lösung zeigt erneut, wie bei diesem Denker untrennbar Philosophie und Theologie miteinander verwoben sind. Danach gibt es für Leibniz zwei Welten: die intelligible Welt der Substanzen sowie die sichtbare Welt der Körper. Die Harmonie zwischen den beiden Welten veranschaulicht er mit einer Uhrenmetapher. Zwei Uhren können immer synchron gehen, wenn sie einmal vom Meister (das heißt im vorliegenden Fall von Gott) zu Beginn exakt aufeinander eingestellt wurden. Die Welt der Monaden, die nach Vervollkommnung streben, ist durch Zwecke geregelt, die Welt der Körper durch das Kausalitätsgesetz.

## Akademien

**Leibniz plädierte für die Schaffung von Institutionen** (meist als Akademien bezeichnet), die durch Verbindung von Theorie und Praxis das bewerkstelligen, wozu der Einzelne nicht in der Lage ist: das menschliche Wissen in einer Enzyklopädie aufzuzeichnen und bereitzustellen sowie systematisch, vor allem anwendungsorientiert, zu erweitern. Zahlreiche, nach seinem Tod gegründete Akademien berufen oder beziehen sich auf Leibniz, so etwa die Russische, in Sankt Petersburg gegründete Akademie der Wissenschaften, die Österreichische Akademie der Wissenschaften in Wien, die Sächsische Akademie der Wissenschaften zu Leipzig, aber auch die nach dem Zweiten Weltkrieg gegründete Mainzer Akademie der Wissenschaften und der Literatur, auf deren Emblem »Genio Leibnitii« steht.



AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN UND DER LITERATUR, MAINZ

Im Zeichen von Leibniz: das Wappen der Mainzer Akademie der Wissenschaften und der Literatur

Paris und Moskau genutzt. Aber sie bilden auch für die Berliner Arbeitsstelle eine gute Grundlage. Denn die kostbaren Originalhandschriften können nicht von Hannover nach Berlin verliehen werden. Scans bieten – anders als etwa Papierkopien – die Möglichkeiten der Bildbearbeitung (Vergrößern, Kontraständerungen), um die meist schwer lesbaren Handschriften dennoch entziffern zu können. Zugleich bietet dieses Vorgehen einen konservatorischen Vorteil. Die Originale müssen nur in seltenen Sonderfällen eingesehen werden und bleiben so von unnötiger Abnutzung verschont.

### Die Effizienz der leibnizschen Akademie-Idee

Für den ersten, 2009 erschienenen Band der Reihe VIII gibt es neben der Druckversion eine elektronische Internetedition, die sich aller technischen Möglichkeiten dieses Mediums bedient: Die Zeichnungen sind animiert, die Zeilen entsprechen dem Original, die Textentstehung ist durch farblich unterschiedene Textvarianten nachzuvollziehen, inhaltliche Anspielungen können über eine Verlinkung mit der Herzog-August-Bibliothek in Wolfenbüttel verifiziert werden. Insbesondere lässt sich damit die Textgestaltung anhand der Scans direkt überprüfen. Die Internetedition findet sich unter <http://leibnizviii.bbaw.de>. Es hängt von der künftigen finanziellen und personellen Ausstattung der Arbeitsstelle ab, ob diese Doppelgleisigkeit auch für die künftigen Bände aufrechterhalten werden kann.

Noch wartet zwar mehr als die Hälfte der Editionsarbeit auf die Herausgeber. Aber 2008 stellte der Münchener Wissenschaftshistoriker Menso Folkerts zu Recht fest: Die Leibniz-Ausgabe befindet sich auf einem guten Weg und beweist darüber hinaus die Effizienz der leibnizschen Akademie-Idee (siehe Kasten oben). Denn solche langfristigen Vorhaben unter dem Dach wissenschaftlicher Akademien ermöglichen, was kurzfristig angelegte, universitäre Forschungsprogramme kaum zu leisten vermögen. ~

### DER AUTOR



**Eberhard Knobloch** studierte an der Freien sowie der Technischen Universität Berlin Mathematik, Klassische Philologie und Geschichte der exakten Wissenschaften und der Technik. Von 1976 bis 2008 war er Leiter der mathematischen Reihe der Akademie-Ausgabe der Werke von Gottfried Wilhelm Leibniz, seit 2001 ist er Leiter der naturwissenschaftlich-medizinisch-technischen Reihe.

Er ist Projektleiter der Leibniz-Arbeitsstellen in Berlin und Potsdam. Neben der Leibniz-Edition betreute er auch die Tschirnhaus-Edition der Sächsischen Akademie der Wissenschaften und wirkte an der Kepler-Edition mit. Seit 1981 ist er Professor für Geschichte der exakten Wissenschaften und der Technik an der Technischen Universität Berlin (seit 2009 emeritiert), seit 2002 auch Akademieprofessor an der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (BBAW). Knobloch ist Präsident der Académie Internationale d'Histoire des Sciences (Paris) sowie ehemaliger Präsident der European Society for the History of Sciences.

### QUELLEN

**Folkerts, M.:** Die Leibniz-Edition zwischen Wissenschaft und Politik. In: Hecht, H. et al. (Hg.): Kosmos und Zahl, S. 23–45, Stuttgart 2008

**Knobloch, E.:** Im freiesten Streifzug des Geistes (Liberrimo mentis discursu): Zu den Zielen und Methoden Leibnizscher Mathematik. In: Nowak, K., Poser, H. (Hg.): Wissenschaft und Weltgestaltung, S. 211–229, Olms, Hildesheim 1999

**Poser, H.:** Langzeitvorhaben in der Akademie. Die Geschichte der Leibniz-Edition zwischen Kaiserreich und geteiltem Deutschland. In: Fischer, W. (Hg.): Die Preußische Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1914–1945, S. 375–389, Berlin 2000

**Schepers, H.:** Zur Geschichte und Situation der Akademie-Ausgabe von Gottfried Wilhelm Leibniz. In: Wissenschaft und Weltgestaltung, S. 291–298, Olms, Hildesheim 1999

### WEBLINKS

[www.leibniz-edition.de](http://www.leibniz-edition.de)

Hier finden Sie alle Information rund um die Leibniz-Edition.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116469](http://www.spektrum.de/artikel/1116469)

# Ein neues Standbein für die statistische Physik

Der russische Mathematiker Stanislav Smirnov hat wichtige Modelle, die insbesondere den Magnetismus und poröse Medien beschreiben, auf solide mathematische Grundlagen gestellt. Dafür wurde ihm 2010 eine der höchsten Auszeichnungen seines Fachs verliehen: die Fields-Medaille.

Von Daniel Meyer und Dierk Schleicher

Eine der seltenen Gelegenheiten, zu denen die Mathematik die volle Aufmerksamkeit der Medien genießt, ist der Internationale Mathematikkongress, der alle vier Jahre an einem anderen Ort der Welt stattfindet, im letzten Jahr in Hyderabad (Indien). In der feierlichen Eröffnungsveranstaltung werden die Fields-Medaillen verliehen – relativ bescheiden dotiert, aber in ihrem Prestige einem Nobelpreis vergleichbar. Der Preisträger Stanislav («Stas») Smirnov, über den wir hier berichten, hatte sich auf den Medienrummel vorbereitet, der unmittelbar nach der Eröffnungsveranstaltung über ihn hereinbrechen würde. Aber die Fragen der russischen Journalisten überraschten ihn dann doch: »Werden Sie die Fields-Medaille ablehnen?« Das hatte Smirnovs russischer Landsmann Grigori Perelman

vor vier Jahren getan und es damit sogar in die »Bild-Zeitung« geschafft (Spektrum der Wissenschaft 10/2006, S. 108). Aber eine Fields-Medaille lehnt niemand ab, außer Perelman, und Smirnov hatte das natürlich auch nicht vor.

Daraufhin die nächste Frage: »Was werden Sie mit der Million Dollar tun?« Wieder daneben. Perelman hatte über die Fields-Medaille hinaus auch eine Million Dollar von der Clay-Stiftung zugesprochen bekommen, weil seine Arbeiten eines der sieben »Millenniums-Probleme« gelöst haben, nämlich die Poincaré-Vermutung (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 86). Und Perelman hatte auch die Million abgelehnt.

Aber die Arbeiten von Smirnov, so fundamental sie sind, lösen keines der Millenniums-Probleme. Sie bewegen sich – unter anderem – in einem Grenzgebiet zwischen Mathematik und Physik, das bei Vertretern beider Wissenschaften derzeit sehr intensive Zuwendung genießt: der statistischen Physik in zwei Dimensionen. Speziell geht es um das Thema Phasenübergänge. Hier haben Physiker viele bemerkenswerte Ergebnisse erzielt, allerdings konnten sie wichtige Eigenschaften nur postulieren und nicht beweisen. Smirnov hat für zwei besonders wichtige Modelle diese Beweise erbracht und damit viele Ergebnisse auf eine stabile mathematische Grundlage gestellt. Nicht nur das: Seine Methoden sind auch völlig anders (und einfacher) als die der Physiker und liefern leistungsfähige neue Werkzeuge und Einsichten.

Die Grundaufgabe der statistischen Physik besteht darin, die makroskopischen, beobachtbaren Eigenschaften eines Ensembles von sehr vielen Teilchen ausgehend von den mikroskopischen Eigenschaften und Wechselwirkungen dieser

## AUF EINEN BLICK

### NEUE ERGEBNISSE VON STAS SMIRNOV

**1** Die **statistische Physik** hat das Ziel, die makroskopischen Eigenschaften eines Systems durch die mikroskopischen Wechselwirkungen seiner Komponenten zu erklären.

**2** Zwei intensiv studierte Systeme sind das **Ising-Modell** für den Magnetismus und die Perkolations, die ein Modell für **poröse Medien** darstellt.

**3** Stas Smirnov hat bewiesen, dass beide Modelle in der Ebene im so genannten kritischen Fall wesentliche mathematische Gesetzmäßigkeiten erfüllen: Sie besitzen einen **Skalierungsgrenzwert**, der **konform invariant** und im Fall des Ising-Modells sogar **universell** ist.





IMO 2009

Stas Smirnov 2009 in Bremen bei der Feier zum 50. Jubiläum der Internationalen Mathematik-Olympiade

## Der Preisträger

**Stanislav Smirnov, meist »Stas« genannt,** wurde am 3. September 1970 in Leningrad (heute Sankt Petersburg, Russland) geboren. Schon zu Schulzeiten zeigte sich sein mathematisches Talent: Bei den Internationalen Mathematik-Olympiaden 1986 und 1987 gewann er Gold, beide Male mit voller Punktzahl.

Smirnov studierte zunächst in Sankt Petersburg; er promovierte 1996 am California Institute of Technology bei Nikolai Markarov mit einer Arbeit aus der holomorphen Dynamik (»Spectral Analysis of Julia Sets«). Im selben Teilgebiet arbeitete er auch in den folgenden Jahren. Nach befristeten Stellen in Yale, am Max-Planck-Institut für Mathematik in Bonn und am Institute for Advanced Studies in Princeton ging er 1998 nach Stockholm an die Technische Universität und die Akademie der Wissenschaften. Seit 2003 ist er Professor für Mathematik in Genf; gegenwärtig hat er ein Forschungsjahr in Sankt Petersburg.

Die Fields-Medaille bekam er 16 Tage vor seinem 40. Geburtstag überreicht. Die Regeln sehen vor, dass »junge« Mathematiker ausgezeichnet werden sollen, was üblicherweise, aber informell, interpretiert wird als »im Alter von unter 40 Jahren«. Ganz so knapp war es dann nicht; denn der Stichtag ist nicht der Tag der Überreichung, sondern der 1. Januar davor.

Zu seinen weiteren Auszeichnungen gehören der Salem-Preis (2001, mit Oded Schramm), der Clay-Forschungspreis (2001) und der Preis der Europäischen Mathematischen Gesellschaft (2004).

Teilchen zu verstehen und damit die Komplexität dieses Vielteilchensystems auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Das klassische Beispiel ist die Thermodynamik: Druck und Temperatur eines Gases sind einfache makroskopische Größen, die sich durch Mittelwertbildung aus der mikroskopischen Bewegung der einzelnen Gasmoleküle herleiten lassen.

### Magnetismus mikroskopisch: Das Ising-Modell

In der statistischen Festkörperphysik sind die kleinen Teilchen in der Regel Atome, die auf regelmäßig angeordneten Plätzen in einem (Kristall-)Gitter sitzen (Bild S. 60 unten). An Stelle eines echten, dreidimensionalen Kristalls betrachtet man Anordnungen solcher Teilchen in einer zweidimensionalen Ebene – nicht weil das der Realität besonders nahekäme, sondern weil sich nur so die Komplexität des Problems in handhabbaren Grenzen halten lässt. Zudem stehen in der Ebene anders als im Raum mächtige mathematische Hilfsmittel zur Verfügung, insbesondere die Theorie der konformen Abbildungen (Kasten S. 61).

Ein wichtiger und viel studierter Fall ist das so genannte Ising-Modell, das zur Erklärung des Magnetismus dient. Jedes Atom in diesem zweidimensionalen Kristall ist ein Elementarmagnet; sein Nordpol weist dabei stets in eine von zwei Richtungen, nach »oben« oder nach »unten« (diese Ein-

schränkung kommt aus der Quantenmechanik). Wenn viele Elementarmagnete in dieselbe Richtung zeigen, addieren sich ihre Felder, und das Material ist auf der makroskopischen Ebene magnetisch.

Benachbarte Elementarmagnete »wollen« in die gleiche Richtung zeigen. Natürlich meint diese Metapher nicht, dass diese Atome ein inneres Bedürfnis nach Anpassung an ihre Nachbarn hätten. Es ist noch nicht einmal zweckmäßig, sich irgendwelche Anziehungskräfte zwischen ihnen vorzustellen. Vielmehr steckt in der entgegengesetzten (»antiparallelen«) Ausrichtung zweier benachbarter Atome mehr Energie als in der parallelen; diese Energiedifferenz ist für alle Paare benachbarter Atome gleich groß, und das System neigt dazu, einen Zustand möglichst geringer Gesamtenergie anzunehmen. Genauer ausgedrückt: Ein Zustand ist umso wahrscheinlicher, je niedriger seine Gesamtenergie ist. Unter den ungeheuer vielen Zuständen, die das System annehmen kann, beobachtet man also vorzugsweise – in der Realität praktisch ausschließlich – solche mit niedriger Energie.

Infolgedessen ist die Ebene durch lauter kleinere oder größere Gebiete bedeckt, in denen alle Elementarmagnete jeweils in die gleiche Richtung zeigen. Wenn eine dieser Richtungen überwiegt, macht sich das makroskopisch als Magnetisierung bemerkbar. Das beobachtet man auch in echten



OSKARI AARANI / MIT FREI GEBEN VON DANIEL MEYER

Stas Smirnov (rechts) gemeinsam mit Wendelin Werner (Gewinner der Fields-Medaille 2006) bei einer Promotionsfeier

Magneten, wo diese Gebiete nach ihrem Erforscher Pierre-Ernest Weiss (1865–1940) weißsche Bezirke oder häufig auch kurz »Domänen« heißen. Ein hinreichend starkes äußeres Magnetfeld kann dem Material eine Magnetisierung aufprägen, die auch nach dessen Verschwinden erhalten bleibt; das geschieht – auf sehr kleinen Flächen – etwa beim Speichern von Informationen auf einer Festplatte.

Wie groß die Domänen im Durchschnitt sind, hängt von einer externen Größe namens »Temperatur« ab. Das ist die Energie, die jedem Elementarmagneten im Durchschnitt zur Verfügung steht. Bei hoher Temperatur ist es den einzelnen Teilchen gewissermaßen egal, ob sie mit ihren Nachbarn im Einklang stehen; sie haben ja genug Energie übrig. Je kühler das System ist, desto bedeutender ist der Energiegewinn, den ein Teilchen durch Ausrichtung an seinen Nachbarn erzielen kann.

Allerdings werden die Domänen nicht etwa mit steigender Temperatur allmählich kleiner. Vielmehr ändert sich das Verhalten plötzlich bei einer kritischen Temperatur, der »Curie-Temperatur«: Unterhalb gibt es makroskopische Gebiete parallel orientierter Elementarmagnete, oberhalb dagegen gar keine. Insbesondere verlieren ferromagnetische Materialien oberhalb der Curie-Temperatur diese Eigenschaft. Physiker

nennen eine solche plötzliche Änderung des Verhaltens einen Phasenübergang, in Analogie zu bekannteren Übergängen etwa beim Schmelzen von Eis zu Wasser. In der Nähe der kritischen Temperatur ist das Verhalten der Domänen bei Weitem am interessantesten.

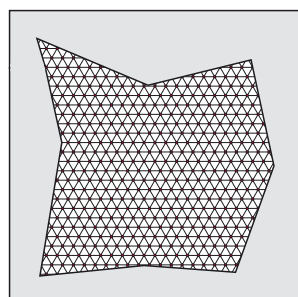
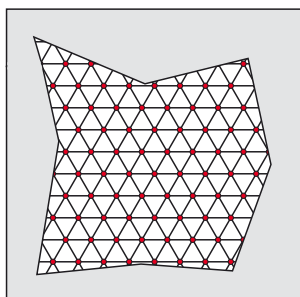
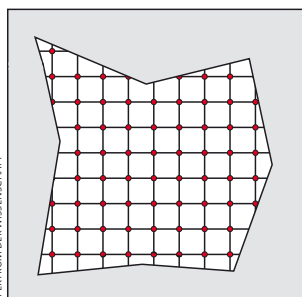
### Skalierungsgrenzwert: Der Atomabstand wird beliebig klein

Wovon hängt die Form dieser Gebiete bei der kritischen Temperatur ab? Die Physiker waren schon lange davon überzeugt, dass es auf die Feinheit des Gitters nicht ankommt: Einerlei wie eng benachbart die mikroskopischen Elementarmagnete sich wirklich befinden, die Gebiete gleicher Magnetisierung sollten stets ungefähr gleich aussehen. Mathematisch ausgedrückt: Wenn der gegenseitige Abstand der Elementarmagnete (die »Gitterkonstante«) und zugleich ihre Größe gegen null gehen, so dass das Gitter unendlich fein wird, dann streben die Formen der Domänen gegen einen Grenzwert, den »Skalierungsgrenzwert«: Für die makroskopische Verteilung der Magnetisierung sind die mikroskopischen Details unbedeutend. Genauer gesagt ist es die Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser Formen, die konvergiert.

Diese Eigenschaft hat ihr Vorbild in der klassischen Thermodynamik. Wir fassen die Temperatur in einem Gas als eine Funktion des Orts (und der Zeit) auf, das heißt, jeder Punkt im Raum hat eine Temperatur, einerlei ob da gerade ein Gasmolekül ist oder nicht. Das erscheint widersinnig, da Temperatur »eigentlich« definiert ist als mittlere kinetische Energie der Gasmoleküle. Sinnvoll und korrekt wird diese Definition nur dadurch, dass man – in Gedanken und entgegen der Realität – die Größe der Gasmoleküle und ihre Abstände gegen null schrumpfen lässt. Durch diesen Grenzwertprozess wird aus dem Gas ein Kontinuum, in dem in der Tat an jedem Punkt eine Temperatur definiert ist. Das Kontinuum ist sozusagen die ideale Ausprägung des realen, unvollkommenen physikalischen Systems.

Die Physiker sind glücklich über seine Existenz, die keineswegs selbstverständlich ist; denn mit dem Kontinuum lässt sich, im Gegensatz zum echten Gas, trefflich rechnen. Der Versuch, die Bewegungen sämtlicher Gasmoleküle zu berechnen, würde jeden Computer überfordern.

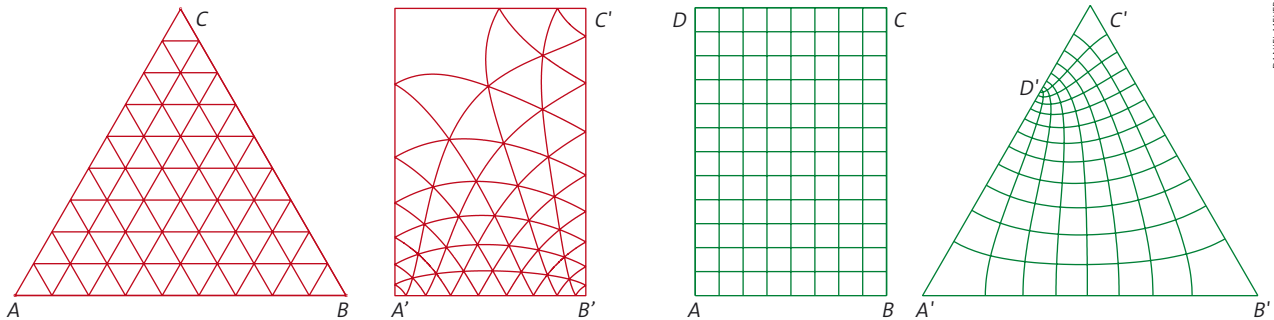
Darüber hinaus ist das Ergebnis des Grenzwertprozesses unabhängig von den Details der lokalen Wechselwirkungen. Für die Gleichungen der Thermodynamik kommt es nicht



Ein zweidimensionales Gebiet kann durch ein Rechteckgitter (links), ein reguläres Dreiecksgitter (Mitte) oder durch ein reguläres Dreiecksgitter mit viel kleinerer Gitterkonstante (rechts) gefüllt werden.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## Konforme Abbildungen: Bei aller Verzerrung winkeltreu



In der Ebene der komplexen Zahlen geht es wesentlich ordentlicher zu als auf der gewöhnlichen reellen Zahlengeraden oder auch im dreidimensionalen Raum. Man fasst einen Punkt der Ebene, der für gewöhnlich aus zwei reellen Zahlen  $x$  und  $y$  für die beiden Koordinaten besteht, als eine einzige »komplexe« Zahl  $x + jy$  auf;  $i$  ist die »imaginäre Einheit«; für sie gilt die Gleichung  $i^2 = -1$ .

Unter den Funktionen, die komplexe Zahlen auf komplexe Zahlen abbilden, gibt es eine spezielle Klasse, die »konformen Abbildungen«. Sie vereinigen in vorteilhafter Weise zwei Eigenschaften, die einander tendenziell widersprechen.

**Einerseits ist eine konforme Abbildung** in ihrem Verhalten sehr regelmäßig. Sie bildet ein Gebiet der komplexen Ebene auf ein anderes ab. (Ein »Gebiet« im mathematischen Sinn ist eine zusammenhängende Teilmenge der komplexen Ebene ohne ihren Rand, genauer: eine »offene zusammenhängende Teilmenge«.) Dabei werden gerade Linien in dem einen Gebiet im Allgemeinen zu krummen Linien im anderen (Bild oben). Aber der Winkel zwischen zwei solchen Linien bleibt stets erhalten: Eine konforme Abbildung ist winkeltreu. (Der Winkel zwischen zwei krummen Linien ist der Winkel zwischen den Tangenten an diese Linien in ihrem Schnittpunkt.) Eine Figur, die wir in das eine Gebiet einzeichnen, wird, in das andere Gebiet abgebildet, im Allgemeinen verzerrt aussehen. Aber wenn sie klein genug ist, kann man sie mühelos wiedererkennen, denn sie mag zwar verdreht, verkleinert oder vergrößert sein, ist aber ansonsten ungefähr ein Ebenbild ihrer selbst. Die Übereinstimmung ist umso besser, je kleiner die Figur ist.

**Andererseits sind konforme Abbildungen überaus flexibel.** Man darf zwei Gebiete der komplexen Ebene fast beliebig vorgeben; sie dürfen nur nicht die ganze Ebene umfassen und müssen einfach zusammenhängend sein, das heißt, sie dürfen keine Löcher haben. Dann gibt es eine konforme Abbildung, die jedem Punkt des einen Gebiets genau einen Punkt des anderen zuordnet. Diese sehr weit reichende Aussage folgt aus einem Satz der Theorie holomorpher Funktionen einer komplexen Veränderlichen (kurz »Funktionentheorie« genannt), dem »riemannschen Abbildungssatz«.

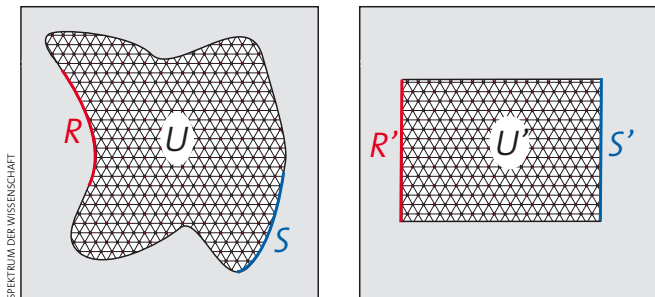
Man kann ein gleichseitiges Dreieck konform auf ein Rechteck abbilden (links) und umgekehrt (rechts). Dabei bleiben bei aller Verzerrung Winkel im Inneren erhalten: Die krummen Gitterlinien im Bild schneiden sich genau wie die geraden im Original stets unter 60 beziehungsweise 90 Grad.

Ein Beispiel möge dieses erstaunliche Resultat veranschaulichen. Das eine Gebiet sei die Landfläche der Insel Island; denken wir an ein Satellitenbild von »Google Maps«. Das andere Gebiet sei ein Rechteck; stellen wir uns ein gewöhnliches Blatt Papier vor. Dann sagt der riemannsche Abbildungssatz, dass es eine »Landkarte« von Island gibt, die das Blatt Papier bis zum Rand füllt, ohne ein Stück Meer zu zeigen.

Die zerklüftete Küstenlinie Islands wird »glatt gezogen« und den Rändern des Papiers angepasst. In Küstennähe ist die Karte stark verzerrt, vor allem da, wo die Küstenlinie einem langen, engen Fjord folgt oder auf dem Papier um die Ecke laufen muss. Aber sie bleibt winkeltreu – nicht an der Küste selbst, was unmöglich wäre, aber in allen Punkten des Landesinneren bis beliebig dicht an die Küste. Auch auf der verzerrten Landkarte bleibt eine rechtwinklige Straßenkreuzung rechtwinklig; Häuser und Autos sind von sehr unterschiedlicher Größe, aber mühelos wiederzuerkennen.

Physiker wissen konforme Abbildungen zu schätzen, unter anderem weil eine Funktion, die von einem Potenzial hergeleitet werden kann, wie zum Beispiel ein elektrisches Feld oder ein Gravitationsfeld, diese Eigenschaft unter einer konformen Abbildung beibehält.

Eine Abbildung, die ein Rechteck einfach in einer Richtung in die Länge zieht und in der anderen Richtung unverändert lässt, ist übrigens nicht konform; insbesondere treffen sich die Diagonalen und die Seiten des Rechtecks nicht unter denselben Winkeln wie zuvor. Selbstverständlich kann man diese beiden Rechtecke konform aufeinander abbilden; aber die Ecken des einen Rechtecks werden nicht auf die Ecken des anderen abgebildet, sondern irgendwo auf dessen Seiten, wie bei einem Spannbettuch der falschen Größe. Konforme Abbildungen zwischen einfachen Gebieten, etwa zwischen einem Dreieck und einem Rechteck, können ziemlich kompliziert sein.



Durch eine konforme Abbildung kann man ein Gebiet  $U$  mit ausgezeichneten Randstücken  $R$  und  $S$  stets auf ein Rechteck  $U'$  abbilden – und zwar derart, dass die Bilder von  $R$  und  $S$  gegenüberliegende Seiten des Rechtecks sind. Durch diese Eigenschaft ist das Seitenverhältnis von  $U'$  eindeutig bestimmt.

darauf an, aus wie vielen Atomen die Gasmoleküle bestehen und welche Kräfte sie aufeinander ausüben. Insbesondere kann auch ein zu grobes oder fehlerhaftes Modell im Grenzwertprozess ein richtiges Ergebnis liefern. Diese Universalitätseigenschaft ist von entscheidender Bedeutung. Dank ihr können die Physiker korrekte Thermodynamik betreiben, obgleich die Wechselwirkungen der Gasmoleküle nur sehr ungenau bekannt sind.

Eine ähnliche Universalitätseigenschaft vermuten die Physiker auch von ihren zweidimensionalen Kristallen: Die Formen der Domänen sind im Skalierungsgrenzwert nicht nur unabhängig von der Gitterkonstanten, sondern auch von der Art des Gitters, sie sind also etwa für Rechtecks- und Dreiecksgitter dieselben. Dagegen darf die kritische Temperatur bei Gittern verschiedener Art sehr wohl unterschiedlich sein.

Eine dritte Eigenschaft, die »konforme Invarianz«, hat zur Folge, dass man sich um eine eventuell komplizierte äußere Form des Gitters, in dem sich alles abspielt, keine Gedanken zu machen braucht. Es genügt, die Formen der Domänen für ein einfaches, gut beherrschbares Gitter etwa in Gestalt einer Kreisscheibe zu bestimmen.

Denn zwischen zwei verschiedenen einfach zusammenhängenden (lochfreien) Gebieten der Ebene gibt es stets eine konforme, das heißt lokal winkeltreue Abbildung, welche die Punkte des einen Gebiets umkehrbar eindeutig mit denen des anderen Gebiets verknüpft (Kasten S. 61). Konforme Invarianz bedeutet nun, dass diese Abbildung auch die Teilgebiete gleicher Magnetisierung (genauer: deren Wahrscheinlichkeitsverteilung) ineinander überführt. Wohlgedenkt: Es wird nicht verlangt, dass die Abbildung das erste Gitter auf das zweite abbildet; das tut sie im Allgemeinen auch nicht, und wenn sie es täte, gäbe es ohnehin nichts mehr zu beweisen.

Nach dieser langen Vorbereitung ist die Errungenschaft des Preisträgers schnell formuliert. Smirnov hat dreierlei bewiesen: Das Ising-Modell bei der kritischen Temperatur hat in der Tat einen Skalierungsgrenzwert, dieser Grenzwert ist universell, und er ist konform invariant. (An dem Beweis der Universalität war Dmitry Chelkak beteiligt.) Dies stellt das

wichtigste Modell zur Beschreibung von Magnetismus, das Ising-Modell, auf eine solide mathematische Grundlage. Manche Argumente von Smirnov sind sogar einfacher als die der Physiker zuvor.

Weitere fundamentale Arbeiten von Smirnov beziehen sich auf die so genannte Perkolation. Das englische Verb *to percolate* bedeutet »durchsickern« oder auch »filtrieren«. Ein *percolator* ist eine Kaffeemaschine. Nun steht das Sickersen von heißer Flüssigkeit durch ein gewöhnliches Filterpapier nicht wirklich im Zentrum der aktuellen Forschung. Aber wie Erdöl durch poröses Gestein vordringt oder Grundwasser mitsamt Verunreinigungen durch den Erdboden, ist durchaus von praktischer Bedeutung. Darüber hinaus formulieren die Mathematiker die Perkolation so abstrakt und damit allgemein gültig, dass sich damit auch die Ausbreitung von Krankheiten oder Gerüchten unter Menschen, von Waldbränden unter Bäumen oder von Elektronen in elektrischen Schaltkreisen modellieren lässt.

Wieder denken wir uns ein ebenes Gebiet, das mit gitterförmig angeordneten Atomen (Menschen, Bäumen ...) gefüllt ist. Dies beschreiben wir durch einen großen Graphen: Die Atome bilden die Ecken, und Kanten verbinden benachbarte Atome. Jede Ecke kann einen von zwei Zuständen einnehmen: »offen« oder »geschlossen«, zu interpretieren als »durchlässig« beziehungsweise »undurchlässig« für Flüssigkeit, elektrischen Strom oder was auch immer. Wir interessieren uns für Gruppen unmittelbar benachbarter offener Ecken. Das heißt, man kommt von jeder Ecke dieser Gruppe zu jeder anderen auf einem Weg, der nur offene Ecken berührt. Wenn beispielsweise »offen« als »elektrisch leitend« interpretiert wird, dann interessieren wir uns für elektrisch leitende Teilgebiete.

### Perkolation: Wird der Brunnen vergiftet werden?

Nehmen wir nun an, ein Zufallsprozess bestimmt für jede Ecke unabhängig von allen anderen, ob sie mit Wahrscheinlichkeit  $p$  offen oder (mit Wahrscheinlichkeit  $1-p$ ) geschlossen ist. Denken wir an zwei körnige Materialien, eines elektrisch leitend und das andere isolierend beziehungsweise wasserdurchlässig und -undurchlässig. Beide werden im Verhältnis  $p$  zu  $1-p$  zusammengeschüttet und sorgfältig verrührt. Ist das Gemisch dann durchlässig oder nicht?

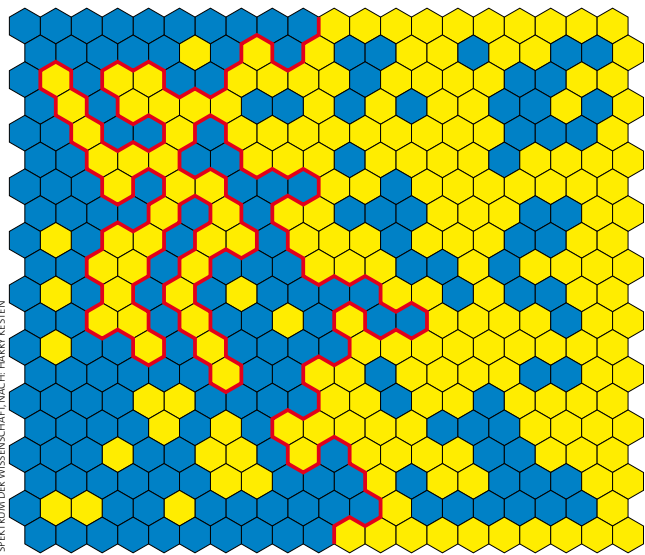
Hier tritt wieder ein Phasenübergang auf: Unabhängig von der speziellen Verteilung der Körner ist das Gemisch genau dann durchlässig, wenn der Anteil  $p$  der durchlässigen Komponente oberhalb eines kritischen Werts  $p_{\text{crit}}$  liegt – höchstwahrscheinlich. Denn wieder kann man keine bedingungslos gültige Aussage treffen; es ist möglich, wenn auch mit zunehmender Eckenzahl beliebig unwahrscheinlich, dass eine kleine Minderheit undurchlässiger Ecken eine Sperrschicht bildet. Die genaue mathematische Formulierung ist deshalb etwas gewunden und bezieht sich wieder auf einen Skalierungsgrenzwert: Es gibt eine kritische Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{crit}}$ , so dass für alle  $p > p_{\text{crit}}$  die Wahrscheinlichkeit dafür, dass es ein einziges großes, zusammenhän-

gendes Gebiet offener Ecken gibt (und daneben viele kleine), im Grenzfalle großer Eckenzahlen gegen 1 strebt. Ist hingegen  $p < p_{\text{crit}}$ , dann gibt es lediglich viele kleine derartige Gebiete.

Ein für die Anwendungen interessanter Spezialfall ist die Frage, ob ein Streifen Material mit zwei Anschlüssen an seinen beiden Enden elektrisch leitet oder nicht. Oder man stelle sich ein Stück Boden vor, der aus einem Gemisch von Sand und Lehm besteht, mit einem Teil seines Rands an eine Schadstoffquelle grenzt und mit einem anderen Teil an einen Trinkwasserbrunnen. Wird der Brunnen vergiftet werden?

Für die mathematische Formulierung nennen wir das Gebiet, um dessen Leitfähigkeit es geht,  $U$ , den Teil seines Rands mit dem Zufluss  $R$  und den mit dem Abfluss  $S$ . Sei also  $U$  ein einfach zusammenhängendes Gebiet der Ebene, das durch ein Gitter gefüllt ist (sagen wir, ein reguläres Dreiecksgitter), und seien  $R$  und  $S$  zwei zusammenhängende Teilmengen des Rands von  $U$ , die keinen Punkt gemeinsam haben (Bild S. 62, links). Können  $R$  und  $S$  durch einen Weg im Gitter verbunden werden, der nur durch offene Ecken läuft? Wie zuvor interessieren wir uns für den Skalierungsgrenzwert, wenn die Gitterkonstante gegen null geht (wenn also die Korngröße sehr klein ist im Vergleich zur Ausdehnung von  $U$ ). Falls  $p < p_{\text{crit}}$ , dann ist die Verbindungswahrscheinlichkeit im Grenzwert gleich 0, während sie für  $p > p_{\text{crit}}$  gleich 1 ist. Der interessante Fall ist  $p = p_{\text{crit}}$ . Wie sieht die kritische Perkolation aus?

Smirnov hat nicht nur die alles andere als offensichtliche Tatsache bewiesen, dass der Skalierungsgrenzwert existiert,



**Perkolation auf einem Dreiecksgitter:** Alle Ecken sind durch Sechsecke maximaler Größe dargestellt, so dass die Sechsecke gerade die Ebene füllen und miteinander verbundene Ecken genau benachbarten Sechsecken entsprechen. Offene Ecken sind gelb, geschlossene blau. Die Sechsecke am Rand sind in der linken Hälfte blau, in der rechten gelb. Alle anderen sind per Zufall (jeweils mit Wahrscheinlichkeit  $1/2$ ) blau oder gelb gefärbt. Die dicke, rote Linie kennzeichnet den Rand des großen offenen (gelben) Bereichs. Im Skalierungsgrenzfalle ergibt dies eine SLE(6)-Kurve.

sondern auch eine Formel für die kritische Wahrscheinlichkeit im Grenzfalle, die John Cardy 1992 mit plausiblen Überlegungen vorhergesagt, aber nicht streng bewiesen hatte. Cardys Formel ist kompliziert:

$$\frac{3\Gamma(\frac{2}{3})}{\Gamma(\frac{1}{3})} \eta^{1/3} {}_2F_1(\frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{4}{3}; \eta);$$

sie enthält so spezielle Funktionen wie die Gamma-Funktion und die hypergeometrische Funktion  ${}_2F_1$  sowie eine Zahl namens  $\eta$  (eta), welche die geometrische Größe der Randgebiete  $R$  und  $S$  charakterisiert.

Auch hier gibt es eine konforme Invarianz. Die Physiker waren schon immer davon überzeugt, aber erst Smirnov hat sie bewiesen. Es gebe zwei Gebiete  $U$  und  $U'$  der oben beschriebenen Art mit speziellen Randteilen  $R$  und  $S$  beziehungsweise  $R'$  und  $S'$  und eine konforme, umkehrbar eindeutige Abbildung von  $U$  nach  $U'$ , die  $R$  auf  $R'$  und  $S$  auf  $S'$  abbildet. Konforme Invarianz besagt, dass diese beiden Gebiete im Skalierungsgrenzfalle die gleiche Verbindungswahrscheinlichkeit haben, und das, obwohl wie vorhin die konforme Abbildung im Allgemeinen die Gitter selbst nicht aufeinander abbildet.

Wieder vereinfacht die konforme Invarianz das Leben der Mathematiker erheblich. Man hat nämlich große Freiheiten, zu einem gegebenen Gebiet  $U$  mit Randteilen  $R$  und  $S$  ein Gebiet  $U'$  mit passenden Randteilen  $R'$  und  $S'$  zu wählen, und es gibt immer noch eine konforme Abbildung mit den beschriebenen Eigenschaften zwischen  $U$  und  $U'$ . Insbesondere darf  $U'$  ein Rechteck sein und  $R'$  und  $S'$  zwei gegenüberliegende Seiten desselben. Nur das Verhältnis der Seitenlängen ist festgelegt: Es ist der geometrische Parameter  $\eta$ .

### Konforme Abbildung: Dreieck auf Rechteck

Der schwedische Mathematiker Lennart Carleson (Abelpreis 2006) hat eine einfache Interpretation von Cardys Formel in einem einfachen Spezialfall gefunden: Sei  $U$  ein gleichseitiges Dreieck mit den Ecken  $A$ ,  $B$  und  $C$ , und  $D$  sei ein weiterer Punkt auf der Seite  $CA$ . Sei  $R$  die Seite  $AB$  und  $S$  das Intervall  $CD \subset CA$ . Dann ist die Übergangswahrscheinlichkeit einfach  $|CD|/|AB|$  (die senkrechten Striche bedeuten »Länge von«:  $|CD|$  ist die Länge des Intervalls  $CD$ ). Die oben genannte komplizierte Formel von Cardy nimmt hier also eine ganz einfache Form an. Natürlich muss Cardys Formel in diesem Spezialfall auch bewiesen werden; aber wenn außerdem konforme Invarianz gilt, dann ist damit der allgemeine Fall erledigt. Smirnov hat beide Teilergebnisse bewiesen. Cardys Formel ist also nur deshalb so kompliziert, weil die konforme Abbildung des Dreiecks auf ein Rechteck kompliziert ist.

Dieser Erfolg kam völlig unerwartet. Im Jahr 2001, in dem Smirnov dieses Ergebnis fand, äußerten Greg Lawler, Oded Schramm und Wendelin Werner (Bild S. 60) in einer wegweisenden wissenschaftlichen Arbeit die Einschätzung: »Gegenwärtig scheint ein Beweis dieser Vermutung [dass der Skalierungsgrenzwert existiert und konform invariant ist] völlig außer Reichweite.« (Wendelin Werner erhielt 2006 selbst eine



Fields-Medaille.) Allerdings ist bis heute die Universalität für Perkolation nicht bekannt: Smirnovs Argumente nutzen die Struktur des Dreiecksgitters in sehr geschickter Weise.

Die zusammenhängenden Gebiete offener Ecken haben komplizierte Ränder, die insbesondere im Skalierungsgrenzwert von besonderem Interesse sind. Smirnov hat bewiesen, dass man diese Ränder durch die »Schramm-Loewner-Evolution zum Geschwindigkeitsparameter  $\kappa$ « beschreiben kann (kurz SLE( $\kappa$ ) genannt;  $\kappa$  ist das kleine griechische kappa). Diese Methode zur Beschreibung von Zufallskurven mit bestimmten Invarianzeigenschaften hat Oded Schramm Ende der 1990er Jahre entwickelt; dabei griff er eine Theorie auf, die Karl Löwner (der sich später Charles Loewner nannte) vor fast 100 Jahren im Zusammenhang mit einer Vermutung aus der Funktionentheorie aufgestellt hatte. Diese Zufallskurven kennzeichnen viele Prozesse der statistischen Physik. Smirnov hat gezeigt, dass kritische Perkolation (genauer: der Skalierungsgrenzwert der Randkurven zusammenhängender »offener« Gebiete im Dreiecksgitter) sich durch eine SLE mit Parameter  $\kappa=6$  beschreiben lässt.

Auch seine Arbeit zum Ising-Modell hängt eng damit zusammen. Hier benutzt er die Konzepte der SLE-Theorie, um konforme Invarianz zu beweisen: Er zeigt nämlich, dass die Randkurven im Ising-Modell bei kritischer Temperatur gerade durch SLE(3) gegeben sind, und folgert daraus die konforme Invarianz.

### Fields-Medaille: Ansporn zu weiteren Großtaten

Stas Smirnov ist ein Mathematiker mit sehr breit gestreuten Forschungsinteressen. Er ist ein Meister darin, das Umfeld, die Fragestellungen und die Bedeutung seiner Forschung spannend und verständlich klarzumachen. Er hat enorme Kreativität, innerhalb und außerhalb der Mathematik, und meint von sich selbst, er habe einen »unglaublich schrägen« Humor; das können wir fröhlich bestätigen, bis auf das Attribut »schräg«. Ein eingängiges Beispiel für seine Kommunikationsfähigkeit findet sich in seinem Text »How do Research

Problems Compare with IMO Problems? – A Walk Around Games«, der für interessierte Laien geschrieben ist.

Die Fields-Medaille ist ausdrücklich nicht nur als Anerkennung vergangener Leistungen gedacht, sondern auch als Ermunterung zu weiteren Großtaten – daher auch die Altersbeschränkung (Kasten S. 59). Stas Smirnov hat diese Erwartung eingelöst, und zwar noch in der Zeit zwischen der Entscheidung über die Vergabe und der Verleihungszeremonie selbst: Er bestimmte den Wert der Verbindungskonstanten für das ebene Sechseckgitter mit dem Wert  $\sqrt{2+\sqrt{2}}$ . Wir werden dies hier nicht beschreiben – Smirnov selbst hat es in der genannten Arbeit schön erklärt.

Eines der Jury-Mitglieder für die Fields-Medaille, Timothy Gowers, schrieb in seinem Blog zur Internationalen Mathematiker-Konferenz: »Man fragt sich ja immer, ob man wirklich die richtigen Preisträger ausgezeichnet hat; und umso mehr ist man erfreut und erleichtert, wenn ein Preisträger noch vor der Verleihung der Medaille ein weiteres wichtiges Ergebnis beweist.« Mit Stas Smirnov hat die Fields-Medaille also einen würdigen Preisträger gefunden. ~

### DIE AUTOREN



**Daniel Meyer** (links) promovierte 2004 an der University of Washington in Seattle. Nach Zwischenstationen in Ann Arbor (Michigan), Genf und Helsinki ist er seit Anfang 2011 Professor für Mathematik an der Jacobs University Bremen.

**Diirk Schleicher** promovierte 1994 an der Cornell University in Ithaca (New York). Nach Gastprofessuren an der Stony Brook University und der Universität München wurde er 2001 – als Gründungsmitglied – Professor für Mathematik an der Jacobs University Bremen. Er war einer der verantwortlichen Organisatoren der 50. Internationalen Mathematik-Olympiade 2009 in Bremen.

### QUELLEN

**Gowers, T.:** ICM2010 – Smirnov Laudatio. <http://gowers.wordpress.com/2010/08/22/icm2010-smirnov-laudatio>

**Grimmett, G.:** Percolation. Springer, Heidelberg, 2. Auflage 1999

**Kesten, H.:** What is ... Percolation? In: Notices of the American Mathematical Society 53, S. 572 – 573, 2006

**Kesten, H.:** The Work of Stanislav Smirnov. Laudatio auf dem ICM 2010 in Hyderabad. [www.icm2010.org.in/wp-content/icmfiles/laudaions/fields3.pdf](http://www.icm2010.org.in/wp-content/icmfiles/laudaions/fields3.pdf)

**Smirnov, S.:** How do Research Problems Compare with IMO Problems? A Walk Around Games. In: Schleicher, D., Lackmann, M. (Hg.): An Invitation to Mathematics – from Competitions to Research. Springer, Heidelberg 2011

**Tao, T.:** Lindenstrauss, Ngo, Smirnov, Villani. <http://terrytao.wordpress.com/2010/08/19/lindenstrauss-ngo-smirnov-villani>

### WEBLINKS

[www.unige.ch/~smirnov](http://www.unige.ch/~smirnov)  
Homepage von Stas Smirnov an der Universität Genf

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116470](http://www.spektrum.de/artikel/1116470)





ENDOKRINOLOGIE

# Störenfriede im Hormonhaushalt

Eine große Anzahl Umweltchemikalien beeinträchtigt das Gleichgewicht der Hormone in Organismen – nicht zuletzt auch bei Menschen. Forscher versuchen, die molekularen Wirkmechanismen solcher Fremd- oder Xenohormone zu verstehen, um medizinische und ökologische Schäden einzudämmen.

Von Marie Tohmé, Jean Pierre Cravedi und Vincent Laudet

**S**eit rund fünf Jahrzehnten bemerken Forscher in der Natur gravierende Anomalien der Geschlechtsorgane bei verschiedensten Tierarten. Zu den spektakulärsten Fällen gehörten in den 1990er Jahren Untersuchungen von Louis Guillette und seinen Kollegen von der University of Florida in Gainesville an Krokodilen. Ihnen war aufgefallen, dass die Anzahl der Alligatoren im Apopka-See,

dem größten des Bundesstaats, drastisch abnahm. Auffallend viele Männchen besaßen einen verkümmerten Penis. Auch an deren Hoden entdeckten sie oft Fehlbildungen.

Daraufhin prüfte das Team den Untergrund des Sees – und fand die Ursache: chlorhaltige Insektizide, die nach einem Chemieunfall ins Wasser gelangt waren. Die Sedimente enthielten DDE (Dichlordiphenyldichlorethylen), ein Abbau-





produkt von DDT (Dichlordiphenyltrichlorethan). Laboranalysen zeigten, dass das Blut der Krokodile tatsächlich 10- bis 20-mal so viel DDE aufwies wie das von Alligatoren in Nachbarseen. Die Eier enthielten, verglichen mit anderen im Umkreis, sogar ein Hundertfaches an chlorhaltigen Pestiziden.

Biologen wussten damals schon, dass bei Alligatoren derart hohe Giftstoffkonzentrationen in frühen Entwicklungsphasen unter anderem die Penisausbildung beeinträchtigen. Als ursächlichen Mechanismus für die Fehlbildungen vermuteten sie Wechselwirkungen der Umweltchemikalien mit dem Hormonhaushalt der heranreifenden Tiere. Auch dass DDE ähnlich wie manche Hormone wirkt, war bereits bekannt. So kann es wegen seiner Ähnlichkeit mit Östrogenen die Geschlechtsorgane verweiblichen. Zugleich hemmt der Stoff die Androgene, die für die Ausprägung der männlichen Merkmale sorgen, indem es sich an deren Erkennungsmoleküle anlagert und sie blockiert. Tatsächlich bildeten die Alligatormännchen vom Apopca-See auffallend wenig Testosteron.

Unter Fachleuten gilt DDE als ein »endokriner Disruptor«, als Störenfried im Hormonsystem. So bezeichnen Wissenschaftler heute eine Vielzahl ganz unterschiedlicher Moleküle in der Umwelt, die vom Körper aufgenommen werden und sich dort ähnlich wie Hormone verhalten. Teils imitieren sie natürliche Hormone, teils konkurrieren sie mit ihnen, etwa indem sie deren Zielmoleküle (Rezeptoren) blockieren. Die

**Viele Pestizide haben hormonähnliche Eigenschaften. Selbst in geringen Mengen können sie Hormonfunktionen beeinträchtigen.**

#### AUF EINEN BLICK

#### EIN PROBLEM VON NOCH UNBEKANNTER DIMENSION

**1** Als »**endokrine Disruptoren**«, hormonelle Störer, werden diverse hormonähnliche – hauptsächlich synthetische – Chemikalien bezeichnet, von denen heute immer mehr in die Umwelt gelangen und über Wasser, Luft und Nahrungsmittel den **Hormonhaushalt von Tier und Mensch** beeinträchtigen können. Es handelt sich etwa um **Pestizide** oder **Zusätze in Plastik**, wie Weichmacher.

**2** Die Störstoffe oder Xenohormone konkurrieren im Körper mit solchen Molekülen, die mit Hormonen wechselwirken, etwa den Transportproteinen von **Geschlechtshormonen**, oder mit deren Rezeptoren im Zellkern.

**3** Im Blickpunkt von Forschern standen bisher vor allem die **Fortpflanzungsfunktionen**. Manche Wissenschaftler sehen aber auch Zusammenhänge mit einigen neueren Zivilisationserscheinungen wie **Fettleibigkeit** und **Altersdiabetes**.

Forscher versuchen aufzuklären, wie sich diese Substanzen im Körper verhalten und wie sie ihm schaden. Weil solche »Xenohormone« heute quasi allgegenwärtig sind und selbst der Mensch ihnen nicht entkommt, interessieren sich für sie inzwischen nicht nur Biologen und Mediziner, Umweltexperten und Gesundheitswissenschaftler, sondern zunehmend auch die Gesundheitsbehörden der industrialisierten Länder.

Zu Miss- und Fehlbildungen bei Tieren, die Umwelthormonen ausgesetzt waren, lassen sich sehr viele gut dokumentierte Beispiele anführen. Da wären etwa die im Meer lebenden Wellhornschnecken. Normalerweise bilden bei ihnen Männchen und Weibchen getrennte Geschlechter, doch nun treten Zwitterwesen auf: Manche Weibchen entwickeln männliche Attribute. Solche Fehlsteuerungen verzeichnen Forscher auch bei anderen Weichtieren, die im Wasser leben. Schuld sind Schiffsanstriche mit dem Antifoulingmittel TBT (Tributylzinnhydrid). Die mittlerweile (international seit 2003) für solche Zwecke verbotene Zinnverbindung verhindert, dass sich Tiere oder Algen am Schiffsrumpf festsetzen.

Erschreckende Schlagzeilen machten seit den 1960er Jahren die Raubvögel und auch räuberische Säuger, etwa Eisbären oder Robben. Sie vermehrten sich plötzlich nur noch wenig, und es traten allzu oft Fehlbildungen auf. Auch besaßen die Eier der Vögel zu dünne Schalen. Diese Tiere stehen an der Spitze der Nahrungskette und hatten dadurch offenbar zu viele Chemikalien im Körper angereichert, die ihren Hormonhaushalt aus dem Gleichgewicht brachten.

### Vergiftete Umwelt durch Medikamente

Ein anderes bekanntes Beispiel kam in den 1990er Jahren aus Indien und Pakistan. In einigen Gegenden waren die Geierbestände innerhalb eines Jahrzehnts um 97 Prozent geschrumpft – und zwar dort, wo man den Vögeln Rinderkadaver überließ. Die Geier starben an Nierenversagen. Sie vertrugen das auch hier zu Lande bei Mensch und Tier eingesetzte Entzündungs- und Schmerzmittel Diclofenac nicht, das die Rinder erhalten hatten. Für Haustiere ist die Substanz in Indien heute verboten.

Diese Fälle zeigen die Vielfalt der Substanzen auf, die selbst in geringen Mengen Stoffwechsel- und Entwicklungsprozesse empfindlich stören können. Als endokrine Disruptoren gelten nicht nur verschiedene Pestizide aus der Landwirtschaft und deren Abbauprodukte, die in nennenswerten Mengen im Boden oder Wasser verbleiben. Auch mit dem Urin ausgeschiedene Medikamente gelangen in die Umwelt und können dort Schaden anrichten. Aufmerksamkeit erregten in letzter Zeit zudem Weichmacher in Kunststoffen, wie Bisphenol A und die Phtalate; ebenso Konservierungsmittel wie die Parabene in vielen Kosmetika; oder die früher in zahlreichen Industrieprodukten enthaltenen polychlorierten Biphenyle (PCBs), die seit zehn Jahren weltweit verboten sind, aber noch in den Gewässern und im Boden vorkommen; weiterhin die als Flammschutzmittel etwa in diversen Kunststoffen verwendeten polybromierten Diphenylether (PBDE)

## Regelwerk im Zellkern

**Natürliche Steroidhormone binden sich** an Rezeptormoleküle (orange) im Zellkern. Synthetische hormonähnliche Stoffe tun das ebenfalls. Diese Kernrezeptoren gehören zu den Transkriptionsfaktoren. Sie lagern sich jeweils paarweise an einer bestimmten Stelle der DNA an (der Östrogenrezeptor an die Regulatorsequenz ERE) und kontrollieren die Aktivität ihrer Zielgene. Dockt ein Hormon (hellblau) an die Hormonbindungsdomäne des Rezeptors an, so verändert die Bindungstasche ihre Form. Vorher (a) konnten sich Korepressoren an den Rezeptor binden, die dafür sorgten, dass das Zielgen stumm blieb. Doch jetzt (b) können sich Koaktivatoren anlagern und die Genaktivierung ermöglichen.

sowie die hochgiftigen Dioxine und die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe aus Verbrennungsprozessen.

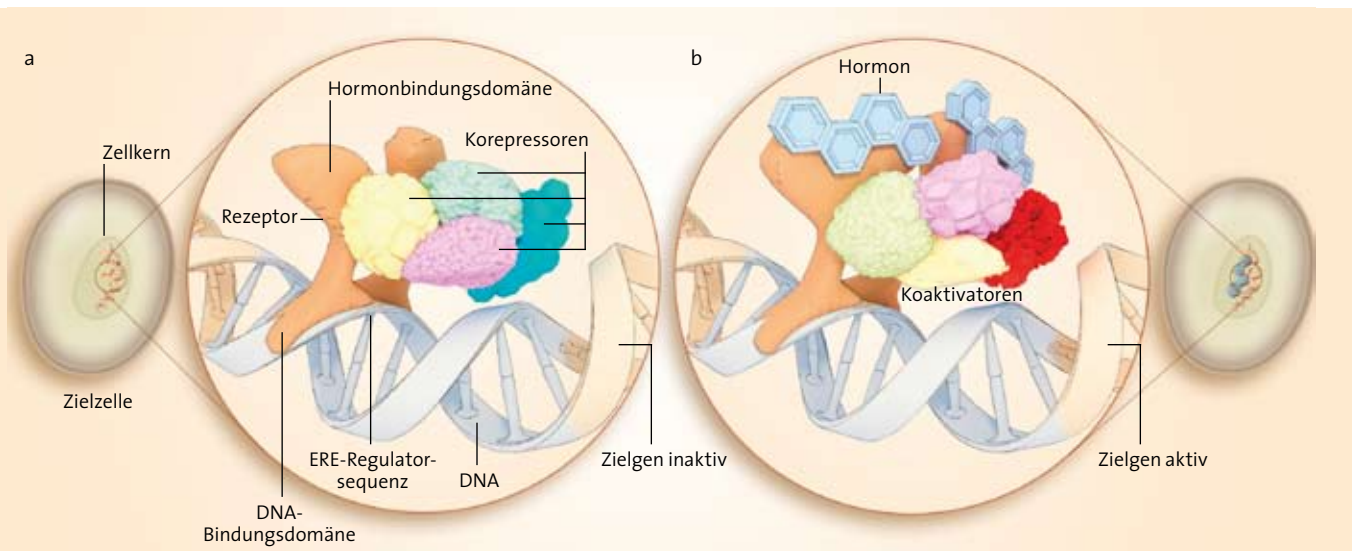
All diese Stoffe verbleiben nach ihrer Freisetzung in der Umwelt, oft jahrzehntelang. Werden sie von Tieren oder Menschen aufgenommen, verändern oder modulieren sie auf komplexe Weise die Bildung, Wirkung, den Transport und Abbau von Hormonen.

Der Begriff »endokrine Disruptoren« wurde 1991 bei einer Konferenz in Wingspread (Wisconsin, USA) eingeführt, auf der von Chemikalien verursachte Entwicklungsstörungen bei diversen Wildtieren zur Sprache kamen. Viele Forschergruppen suchen seither die genauen Zusammenhänge und Abläufe im Körper zu ergründen. Und auch die Gesetzgeber und internationalen Behörden beschäftigen sich zunehmend mit der Thematik.

Eine zentrale Erkenntnis war, dass bereits winzige Störungen im hormonellen Gleichgewicht auf den Organismus erhebliche Auswirkungen haben können, wobei sich solche Effekte manchmal erst lange nach dem Kontakt mit der Substanz zeigen. Diese Einsicht gewannen die Forscher zuerst durch zwei sehr unterschiedliche Beobachtungen.

Bei der ersten handelt es sich um eine enorme medizinische Tragödie. Seit etwa 1940 bis Mitte der 1970er Jahre erhielten einige Millionen Frauen zur Verhinderung von Fehl- und Frühgeburten den Wirkstoff Diethylstilbestrol. Dieses Molekül bindet sich an Rezeptoren des weiblichen Sexualhormons Östrogen. Erst nach Jahrzehnten wurden die verheerenden Nebenwirkungen des Kunsthormons für die Kinder bekannt.

So entwickeln sich oft die Geschlechtsorgane nicht normal. Als Erwachsene bekommen die Frauen auffallend häufig Vaginalkrebs, und viele der Männer sind steril. Dies trat allerdings nur dann auf, wenn die Mütter das Medikament zwischen der 6. und der 17. Schwangerschaftswoche bekommen



hatten – in der Zeit, in der sich die Geschlechtsorgane bilden. Wegen der schweren Schäden, die es verursacht, wurde das Präparat in den 1970er Jahren vom Markt genommen.

Auf leidvolle Weise hatte sich gezeigt: Substanzen, die natürliche Hormone imitieren, können irreversible Fehlbildungen der Fortpflanzungsorgane verursachen, wenn Kinder ihnen im Uterus ausgesetzt sind. Und es gibt bestimmte Entwicklungszeitfenster, in denen die Gefahr dafür sehr hoch ist. Das hormonelle System reagiert dann äußerst empfindlich auf jede noch so geringe hormonelle Anomalie, deren Auswirkungen sich klinisch oft erst Jahre später bemerkbar machen.

### Hormonbad im Uterus

Die zweite aufschlussreiche Beobachtung hat auf den ersten Blick nichts mit Umwelthormonen zu tun. Forscher hatten bei Ratten und später auch bei Mäusen bemerkt, dass sich manche Weibchen eines Wurfs aggressiver und weniger mütterlich geben als andere. Sie ermittelten einen Zusammenhang mit der Lage der oft zehn oder zwölf Geschwister im Uterus: Weibchen, die zwischen zwei Brüdern heranwuchsen, verhielten sich am »männlichsten«, solche zwischen zwei Schwestern am »weiblichsten«. Durch die Nähe der Geschwister waren sie jeweils in unterschiedlichem Grad fremden männlichen Hormonen ausgesetzt gewesen. Das zeigte sich sogar schon bei den Neugeborenen an kleinen Unterschieden der äußeren Geschlechtsorgane (siehe SdW 5/2004, S. 38).

Im Verhältnis zu den vom Fötus selbst gebildeten Hormonkonzentrationen sind die von Geschwistern stammenden Mengen, mit denen er in Berührung kommt, geradezu winzig. Dennoch haben diese einen deutlichen und nachhaltigen Effekt auf Fortpflanzungsorgane und Psyche. Deswegen können Umweltchemikalien, die in einer kritischen Entwicklungsphase mit Hormonrezeptoren interagieren, sicher-

lich ebenfalls merklich in die Entwicklung eingreifen – und das sogar in geringer Dosis.

Um die Wirkweise von Stoffen aus der Umwelt, die Hormonfunktionen stören, zu verstehen, muss man zunächst das Verhalten der Hormone selbst betrachten – und hier besonders das der Geschlechtshormone. Die Östrogene (etwa Östradiol), Androgene (wie Testosteron) und Progesteron zählen zu den Steroidhormonen. Sie leiten sich vom Cholesterin ab, einem Bestandteil von Zellmembranen. Wir nehmen es zum Teil mit der Nahrung auf. Die Umwandlung von Cholesterin in aktive Hormone erfolgt durch eine Reihe komplexer enzymatischer Reaktionen.

Das geschieht bei den Sexualhormonen auch – aber nicht nur – in den Gonaden, also den Hoden und Eierstöcken. Besonders empfindlich gegenüber Störfaktoren sind dabei die letzten Schritte, die von einem inerten zu einem biologisch aktiven Hormon führen: einem Molekül, das sich an seinen spezifischen Rezeptor zu binden vermag. Auch kann ein aktives Hormon in ein anderes aktives umgewandelt werden – das dann einen anderen Rezeptor erkennt. Das Enzym Aromatase etwa baut Androgene in Östrogene um.

Die Enzyme der Steroidsynthese können für endokrine Disruptoren mögliche Angriffspunkte sein (siehe Kasten S. 71). Manche der Stoffe erkennen das so genannte aktive Zentrum des Enzymproteins: die Stelle, wo ein Hormon oder sein Vorläufer andockt und umgebaut wird. Wer diesen Platz fälschlicherweise einnimmt, stört die normale Hormonproduktion. Das hier zu Lande längst verbotene Unkrautvernichtungsmittel Atrazin beispielsweise wirkt verheerend, weil es die Produktion der Aromatase hochschraubt. Die Folge: zu viel Östrogen und verweiblichte Männchen.

Des Weiteren greifen manche Xenohormone in den Transport von Sexualhormonen vom Bildungsort in ihre teils entfernten Zielgewebe ein. Testosteron etwa entsteht im männ-

lichen Geschlecht hauptsächlich in den Hoden, wird aber unter anderem auch für das Muskelwachstum und im Gehirn benötigt. Weil die Steroidhormone nicht wasserlöslich sind, gelangen sie im Verbund mit Proteinen über das Blut an Ort und Stelle.

In den Zielgeweben müssen sie in die Zellkerne kommen, wo sie ihre Aufgaben erfüllen. Zunächst gilt es, die äußere Zellmembran zu passieren, dann den Weg durch das Zellplasma zurückzulegen. Bei all diesen Schritten helfen bestimmte Proteine. Die Transportmoleküle im Zellinnern bringen das Hormon allerdings nicht immer sofort zu seinem Rezeptor im Zellkern, sondern speichern es unter Umständen erst einmal, bis es gebraucht wird.

Die Hormonbindungsstellen all dieser Transportproteine sind oft wenig spezifisch und passen deshalb zu verschiedenen Steroidhormonen: Östrogenen, Androgenen oder auch anderen, etwa Steroiden der Nebennieren. Diese Ungenauigkeit ermöglicht es Umwelthormonen, ihre Wirkung zu entfalten.

### **Schaden durch Abbauprodukte manchmal noch größer**

Vor einigen Jahren stellte sich heraus, dass PCBs (polychlorierte Biphenyle) der Schilddrüse schaden und damit der Hirnentwicklung. Sie sind ein gutes Beispiel für die vielfältigen Wirkweisen endokriner Disruptoren. Bei manchen Tieren konkurrieren PCBs mit den Schilddrüsenhormonen direkt um bestimmte Transportproteine im Blut. Der Mensch benutzt dafür allerdings andere Transporter, zu denen die PCBs weit weniger Affinität haben. Viel stärker machen ihm dafür Stoffwechselprodukte solcher Biphenyle zu schaffen. Überdies beeinträchtigen diese Metabolite nicht nur die Schilddrüsenfunktion, sondern stören auch die Östrogenfunktion, indem sie deren Rezeptoren aktivieren – was PCBs selbst nicht tun. Andere PCB-Metaboliten lagern sich an Bindungsstellen für Hormone der Nebennierenrinde.

Damit ist das Verhaltensrepertoire der Hormonstörenfriede allerdings längst nicht erschöpft. Der Organismus stellt auch verschiedene Enzyme bereit, um Hormone wieder abzubauen. Xenohormone können diese Systeme manipulieren. Ein verlangsamter Abbau führt aber zu einer höheren Hormonkonzentration oder zu verlängerter Hormonaktivität. Zum Beispiel hemmen manche PCB-Abkömmlinge Enzyme, die Östradiol entfernen. Der Östrogenspiegel steigt, und davon betroffene Tiere werden femininer.

Im Zellkern, ihrem Zielort, steuern die Steroidhormone die Aktivität bestimmter Gene – in der Regel indem sie die so genannte Transkription ankurbeln und so die Produktion der jeweiligen Proteine veranlassen (siehe Kasten S. 68/69). Und zwar docken sie an speziellen Transkriptionsfaktoren an, die an den Genen sitzen und deren Transkription überwachen und beeinflussen. Diese Proteinmoleküle zählen zu den so genannten Kernrezeptoren. Findet ein Hormon seinen Rezeptor, also das betreffende Protein an der DNA, so aktiviert dieses seine Zielgene. Ohne das Hormon bleiben diese

Transkriptionsfaktoren inaktiv oder hemmen ihre Zielgene manchmal sogar.

In dieser Weise kurbeln zum Beispiel Östrogene etwa bei Fischen, Amphibien und Vögeln während der Eiproduktion das Gen für Vitellogenin an, ein Dottervorläuferprotein. Bei Frauen regulieren Östrogene zahlreiche Gene in den Ovarien, im Gehirn und in der Brustdrüse.

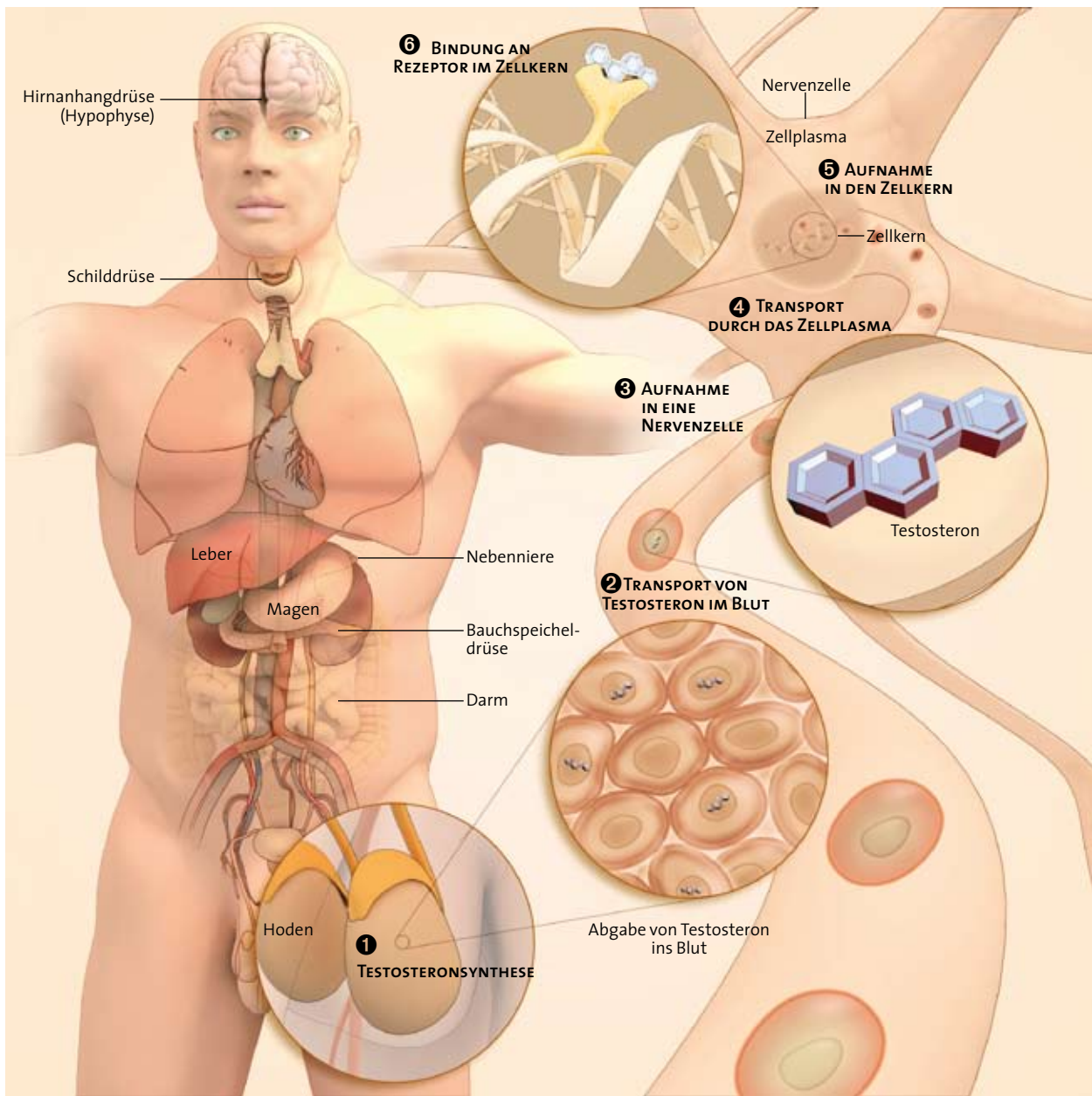
Die einzelnen Hormonrezeptoren im Zellkern besitzen jeweils einen besonderen Bereich, mit dem sie ihre spezifische DNA-Sequenz und somit ihre Zielgene erkennen (siehe Kasten S. 68/69). An einer anderen Stelle befindet sich die Bindungsstelle für das Hormon, also den Liganden. Auch diese Erkennung erfolgt zumindest für die körpereigenen Hormone streng spezifisch. Das Rezeptormolekül formt eine Tasche für das Hormon, deren wasserabweisendes Zentrum das Hormon festhalten kann. Durch die Bindung verändert der Rezeptor seine Gestalt (siehe Bilder S. 68/69 und S. 72). Die Taschen sehen bei jeder Rezeptorsorte etwas anders aus, passend zum jeweiligen Hormon.

Auch Xenohormone aus der Umwelt können mit den Hormonrezeptoren im Zellkern interagieren und wandeln die Rezeptorgestalt, wenn auch anders (siehe Bilder S. 72). Trotz der hohen Spezifität des Rezeptors gelangen diese Moleküle in die Bindungstasche und nehmen dort den Hormonplatz ein, denn Erstere sind nur darauf ausgelegt, die körpereigenen Botenstoffe zu unterscheiden. Die Fremdlinge binden sich zwar oft viel schwächer an den Rezeptor. So ist die Affinität von Bisphenol A zu einem Östrogenrezeptor 10 000-mal kleiner als die des natürlichen Hormons. Dennoch kann diese Substanz sich anlagern – nämlich dann, wenn das Hormon nicht oder nur in ganz geringer Menge vorkommt.

Für Östrogenrezeptoren sind solche Zusammenhänge genauer erforscht. Verglichen wurde die Struktur der Bindungstasche in Gegenwart des natürlichen Partners Östradiol sowie mehrerer Fremdstoffe: wie Diethylstilbestrol, dem Phytoöstrogen Genistein aus Soja oder dem bei Brustkrebs eingesetzten Östrogenhemmer Tamoxifen. Je nach Substanz nahm der Rezeptor nach der Bindung eine etwas andere Konfiguration ein. Teils erlaubte jene Form die Genaktivierung – Tamoxifen aber, ein recht großes Molekül, ließ keine normale Umgestaltung des Rezeptors zu und unterband damit erwartungsgemäß die Proteinproduktion.

Das Gesamtbild ist allerdings noch viel komplexer, denn zahlreiche weitere Proteine (Koaktivatoren) beeinflussen die Genaktivierung. Jedes Organ hat dabei sein eigenes Sortiment an Regulationsfaktoren, und entsprechend wirken die Hormone je nach Ort verschieden stark. Solche teils feinen Unterschiede versuchen Pharmakologen für die Entwicklung zielgenauer Medikamente zu nutzen. Mit derart komplizierten Steuerungen im Hintergrund erklärt sich auch das oft verblüffend differenzierte Verhalten der verschiedenen Umwelthormone, selbst wenn sie – wie im Fall von Bisphenol A und Genistein – an die gleichen Rezeptoren binden. Die einzelnen Xenohormone verteilen sich im Körper unterschiedlich, lagern sich an einen Rezeptor verschieden stark an und

## Hier greifen Xenohormone an



ILLUSTRATION

**Viele Hormone entstehen in endokrinen Drüsen:** zum Beispiel in der Hypophyse, der Schilddrüse, den Eierstöcken und den Hoden. Doch auch verschiedene andere Gewebe produzieren Hormone: etwa Zellen von Bauchspeicheldrüse, Magen, Leber, Nebennieren, Darm. Über das Blut gelangen sie an ihre teils entfernten Zielorte, wo sie die Aktivität bestimmter Gene beeinflussen.

Das männliche Sexualhormon Testosteron beispielsweise wird hauptsächlich in den Hoden hergestellt (1) und unter anderem im Gehirn, in der Muskulatur und der Prostata

benötigt. Um etwa in Hirnneuronen wirken zu können, muss es zunächst von Proteinen im Blut dorthin mitgenommen werden (2). Ein anderes Transportprotein schleust es durch die Zellmembran der Nervenzelle (3), wieder andere Proteine schleppen es bis zum Zellkern (4) und bringen es hinein (5).

Dort, an der DNA, kann es sich an seine Rezeptoren binden (6) und so seine Wirkung auf Gene ausüben. All diese Stationen sind zugleich Schwachstellen, an denen Xenohormone angreifen können.

manipulieren ihn jedes auf seine Weise – kurz, sie erzeugen oft ganz spezielle Effekte.

Damit nicht genug: Solche Fremdhormone passen oft nicht nur zu einem, sondern zu mehreren verschiedenen Rezeptoren. Im europäischen Forschungsnetz Cascade ergründen wir und andere inzwischen auch dieses Phänomen.

Das menschliche Genom hält für die unterschiedlichen Rezeptoren im Zellkern 48 Gene bereit, darunter die für Steroid- und Schilddrüsenhormone, aber ebenfalls für Abkömmlinge von Fettsäuren. Einige Kernrezeptoren in Leberzellen erkennen körperfremde Gifte und veranlassen deren Abbau. Das können auch Xenobiotika sein, also Stoffe wie etwa Medikamente, die an sich nicht in der Natur vorkommen. Anscheinend interagieren diese Leberrezeptoren manchmal mit anderen Kernrezeptoren, wenn sie Umwelthormone erwischen – mit gefährlichen Folgen.

### Feind im Plastik

Ein Stoff mit vielseitiger Affinität ist Bisphenol A (siehe Grafik rechts). Es bindet nicht nur schwach an die Östrogenrezeptoren ER-alpha und ER-beta, sondern erkennt auch – mit weniger als einem Tausendstel der Bindungsstärke der natürlichen Hormone – den Androgenrezeptor (AR), den es blockiert. Erst kürzlich stellte sich heraus, dass Bisphenol A sich außerdem an den Rezeptor ERR-gamma anlagert, und zwar mit einer Affinität, die fast so hoch ist wie üblicherweise für Hormone.

Die normale Funktion dieses Rezeptors, der den Östrogenrezeptoren ähnelt, kennen wir noch nicht, denn im Körper scheint es kein Hormon für ihn zu geben. ERR-gamma hat allerdings viele gemeinsame Zielgene mit den Östrogenrezeptoren.

toren ER-alpha und ER-beta. Das könnte manche der starken Auswirkungen von Bisphenol A erklären helfen, die Forscher wegen dessen schwacher Affinität zu den Östrogenrezeptoren bisher nicht verstanden.

Ferner besteht der Verdacht, dass sich Bisphenol A oder seine Abkömmlinge (etwa Tetrabrombisphenol A) bei den Schilddrüsenhormonen einmischen – wie genau, ist noch unklar, denn diese Hormonrezeptoren erkennt Bisphenol A nicht. Einige weitere bisher entdeckte Wirkorte zeigt der Kasten auf S. 73. Solche Listen ließen sich für viele Hormonstoffe aufstellen. Nach heutiger Kenntnis beheligt so mancher endokrine Disruptor den Stoffwechsel gleich an mehreren Stellen.

Bestätigt werden muss noch der kürzlich von Medizinern und Entwicklungsbiologen anhand einer Reihe von Indizien und Studien dargelegte Verdacht, dass die zunehmenden Allergien und die sich ausbreitende Fettsucht in den Industrieländern teils mit solchen Umwelthormonen zusammenhängen könnten. Sicherlich trägt zu Übergewicht auch die moderne Lebensweise bei, und genetische Faktoren dürften mitspielen. Aber beispielsweise vermutet der Entwicklungsforscher Bruce Blumberg von der University of California in Irvine aus guten Gründen, dass Xenohormone den Fettstoffwechsel verändern und so das Risiko für eine Gewichtszunahme steigern, wenn sie Rezeptoren im Zellkern manipulieren.

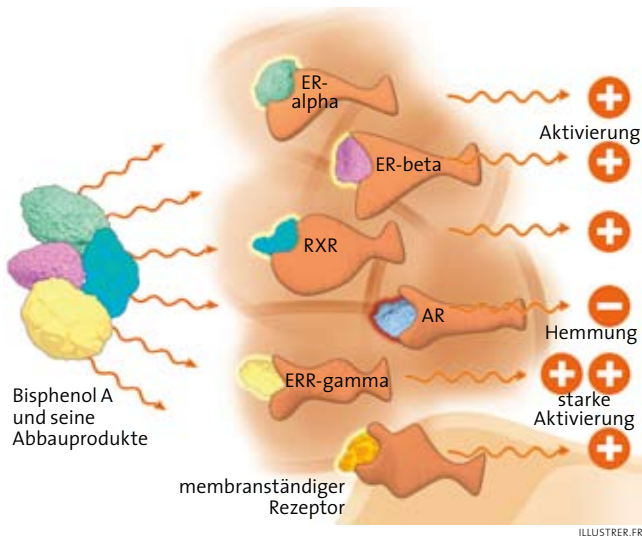
Die zahlreichen bisher entdeckten Wirkmechanismen von Umwelthormonen zeigen deutlich: Solche Substanzen vermögen im Hormonhaushalt und überhaupt im physiologischen Geschehen selbst in geringer Konzentration Schaden anzurichten. Ihnen wirklich auf die Schliche zu kom-

### HELIX 12



Die Hormonbindungsdomäne des Östrogenrezeptors ist hier in verschiedenfarbigen spiralig gerollten Bändern wiedergegeben. Die Bänder stellen Aminosäureketten der Bindungstasche im Rezeptorprotein dar, darunter die Helix 12 (rotes Band). Die Domäne kann mehrere verschiedene Konformationen annehmen. In

Abwesenheit des Hormons ragt Helix 12 hervor (a). Wenn sich ein Hormonmolekül (weiß) einfindet und andockt, legt Helix 12 sich in die Vertiefung der Tasche (b). Auch manche Xenohormone (lilarot) können den Platz einnehmen (c), verhindern unter Umständen aber, wenn das Molekül zu groß ist, dass sich die Tasche schließt.



men, ist allerdings nicht leicht, zumal Tier und Mensch gewöhnlich vielen Schadstoffen gleichzeitig ausgesetzt sind.

Ein Beispiel sind Abwässer aus Kläranlagen. Sie können bei Fischen eine Geschlechtsumwandlung bewirken oder Männchen fälschlicherweise dazu anregen, das Eidottervorläuferprotein Vitellogenin zu bilden. Je näher an der Einleitungsstelle die Fische leben, desto stärker zeigt sich dies. Zur Feminisierung dürfte eine Palette von Stoffen beitragen: darunter natürliche menschliche Hormone; synthetisch hergestellte Hormone zur Empfängnisverhütung, für Hormonersatz- oder Krebstherapien; vielerlei Abfallprodukte der Industrie; diverse Haushaltschemikalien, etwa die Alkylphenole unter anderem aus Reinigungsmitteln oder Klebstoffen; auch landwirtschaftliche Pestizide; oder Phytoöstrogene wie das cholesterinähnliche Sitosterin aus Pflanzenölen. Was und wie viel bei den Fischen die einzelne Substanz verschuldet, lässt sich nur mit aufwändigen Analysen ergründen.

Am Menschen eine Kausalbeziehung zwischen einer einzelnen Umweltchemikalie und einer Schädigung zu erkennen, ist fast noch schwerer, denn man muss dazu die individuelle Lebensführung genauso mit einbeziehen wie etwa genetische Hintergründe oder allgemein Kontakte zu bestimmten Stoffen. Laborergebnisse an Tieren sind nicht einfach übertragbar. So leben die meisten für Tests verwendeten Tiere — ob Nager, Fische oder Amphibien — nur ein paar Jahre, und ihre Hormonsysteme funktionieren teils im Einzelnen etwas anders als das menschliche. Was besagen die Befunde an einer Maus, die zwei Jahre lang Bisphenol A verabreicht bekommt, wenn man das Ergebnis auf eine Frau überträgt, die dem mehr als 30 Jahre lang ausgesetzt war, vielleicht auch noch die Pille oder andere Medikamente nimmt, und Kinder geboren hat?

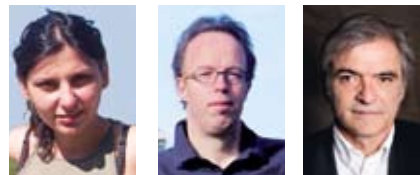
Heute gilt als gesichert, dass die endokrinen Disruptoren vielen Tierarten schaden. Die Gefahr für den Menschen wird bisher kontrovers diskutiert. Vielfach fehlt es hier noch an zwingenden wissenschaftlichen Belegen. Allerdings gibt es außer dem oben beschriebenen Fall Diethylstilbestrol noch weitere überzeugende Beispiele für gravierende Hormonfunktionsstörungen durch Umweltchemikalien – und zwar

Bisphenol A oder seine Abbauprodukte binden sich im Körper an verschiedene Rezeptoren: mit leichter Affinität an die Östrogenrezeptoren ER-alpha und ER-beta; stark an ERR-gamma, dessen Funktion noch unbekannt ist; zudem an den Androgenrezeptor (AR); den Kernrezeptor für Vitamin A RXR; und an verschiedene membranständige Rezeptoren. Es dürfte darüber hinaus noch weitere Zielstrukturen geben.

bei beruflicher Exposition. So wurden in den Jahren von 1970 bis 1990 auf den Bananenplantagen von Costa Rica und Nicaragua über 11 000 Arbeiter durch das Antiwurmgift Dibromchlorphenol unfruchtbar, weil es die Qualität und Anzahl der Spermien verringerte. Mittelamerikanische Bananenproduzenten setzten auch das heute verbotene Insektizid Chlordacon ein, das östrogenartig wirkt. Damit vergiftete Arbeiter bildeten weniger und schlechter bewegliche Spermien.

Diese Fälle sollten uns zusammen mit unserem Wissen über die biochemischen Mechanismen der Xenohormone zu großer Vorsicht mahnen – so lange, bis wir die Effekte und möglichen Schädigungen der einzelnen Stoffe genauer kennen. ~

#### DIE AUTOREN



Die Autoren arbeiten an den französischen nationalen Instituten für agronomische Forschung – INRA: **Marie**

**Tohmé** (links) und **Vincent Laudet** (Mitte) sind an der Université Claude Bernard Lyon 1 am Institut de Genomique Fonctionnelle (CNRS UMR 5242, INRA). **Jean-Pierre Cravedi** leitet in Toulouse die Forschungseinheit für Xenobiotika (UMR 1098 INRA, ENV).

#### QUELLEN

- Cravedi J.-P. et al.:** Le Concept de Perturbation Endocrinienne et la Santé Humaine. In: Médecine/Sciences 23, S. 198 – 204, 2007
- Swedenborg, E. et al.:** Endocrine Disruptive Chemicals: Mechanisms of Action and Involvement in Metabolic Disorders. Review in: Journal of Molecular Endocrinology 43, S. 1–10, 2009
- Tabb, M. M., Blumberg, B.:** New Modes of Action for Endocrine-Disrupting Chemicals. In: Molecular Endocrinology 20, S. 475–482, 2006

#### LITERATURTIPP

**Colborn, T. et al.:** Die bedrohte Zukunft. Gefährden wir unsere Fruchtbarkeit und Überlebensfähigkeit? Droemer Knauer, München 1996  
Das Buch (englischer Originaltitel »Our stolen Future«) brachte das Thema in den 1990er Jahren besonders in Amerika in die Schlagzeilen.

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116471](http://www.spektrum.de/artikel/1116471)



## SCHWERPUNKT

# Die Zukunft der Mobilität

Den Eisenbahnfahrplan eines ganzen Landes zu erstellen, ist ein kombinatorisches Optimierungsproblem von bislang unerreichter Größe. Aber das ehrgeizige Projekt war erfolgreich – in den Niederlanden S. 76

Durch Simulation des Verhaltens vieler individueller Autofahrer decken Verkehrsforscher auf, wie Staus entstehen, sich fortpflanzen – und (manchmal) zu vermeiden sind S. 82

Viele Autos können dicht an dicht mit hoher Geschwindigkeit im Pulk fahren, wenn sie sich mit dem geeigneten Datenübermittlungsprotokoll untereinander verständigen S. 86

## KOMBINATORISCHE OPTIMIERUNG

# Ein nationaler Fahrplan aus dem Computer

Erstmals wurde der Eisenbahnbetrieb eines ganzen Landes durch mathematische Software komplett neu entworfen. Eine Erfolgsbericht aus den Niederlanden

VON CHRISTOPH PÖPPE

**M**annheim Hauptbahnhof, Sonntag, 10. Juli 2011. Just als wir am Abend in die abfahrtsbereite S-Bahn in Richtung Heidelberg und Karlsruhe eingestiegen sind, springt die Anzeige auf dem Bahnsteig um: Alles aussteigen, der Zug fällt aus. Der Uniformierte auf dem Bahnsteig ist davon offensichtlich ebenso überrascht wie die Fahrgäste und kann auch keine brauchbare Auskunft darüber geben, wann die nächste Bahn in dieselbe Richtung fährt. Wir lassen uns in die wenige Minuten später abfahrende, völlig überfüllte S-Bahn stopfen, die zwar nach Heidelberg, aber dann weiter nach Mosbach fährt – besser ungefähr zum Ziel kommen als gar nicht –, und nehmen uns für die letzte Teilstrecke ein Taxi.

Was war der Grund für den Zugausfall? Planmäßige Bauarbeiten auf der Strecke zwischen Mannheim und Heidelberg in der Nacht von Sonntag auf Montag. Das war zwar nicht auf der Website der Deutschen Bahn, aber immerhin in der Tageszeitung zu finden. Nur – die Bauarbeiten hatten of-

fensichtlich noch nicht angefangen, sonst wäre ja die S-Bahn nach Mosbach nicht durchgekommen.

Nach längerem Nachdenken finde ich einen denkbaren Grund: Unsere Bahn wäre zwar noch störungsfrei bis nach Karlsruhe gekommen, aber nicht wieder zurück. Dann hätte sie für den Dienstbeginn am Montagmorgen am falschen Platz gestanden. Also lässt man sie lieber gleich stehen, und mit ihr eine beträchtliche Anzahl potenzieller Fahrgäste zwischen Heidelberg und Karlsruhe.

Und warum kam den Verantwortlichen der Bahn diese Erkenntnis so spät, dass alle Beteiligten von ihr überrascht wurden? Bei einer lange vorher bekannten Störung wie dieser bleibt das ein Rätsel. Immerhin muss man der Bahn zugutehalten, dass eine Umplanung wegen einer Störung das ganze Gefüge der Personal- und Wagenlaufpläne ins Wanken bringt und entsprechend viel Zeit erfordert, vor allem wenn dafür keine geeignete Software zur Verfügung steht.



Hier können wir offensichtlich von unseren nordwestlichen Nachbarn lernen. Die niederländische Eisenbahngesellschaft Nederlandse Spoorwegen (NS) arbeitet seit Beginn der 1990er Jahre an der Optimierung ihres ganzen Betriebs: Linienauslegung, Fahrzeiten, Personal- und Materialeinsatz. Das Projekt überdauerte auch die Aufspaltung der NS in einen staatseigenen Netzbetreiber und mehrere Gesellschaften, welche die Züge fahren lassen; unter ihnen dominiert allerdings mit 95 Prozent Marktanteil die Nachfolgesellschaft NS Reizigers der alten NS und berechnet die Fahrpläne für ihre privaten Konkurrenten gleich mit.

### Schnelleres Umsteigen, höhere Verkehrsdichte

Sichtbarstes Ergebnis dieser Bemühungen war der neue Fahrplan vom Dezember 2006. Erstmals hatten die Planer nicht, wie sonst üblich, die Abfahrtszeiten vom Vorjahr hier und da ein bisschen nachgebessert, sondern vollkommen neu berechnet. In der Folge stiegen die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit – nicht durch schnelleres Fahren, sondern durch kürzere Umsteigeaufenthalte –, die Verkehrsdichte, die Pünktlichkeit, die Anzahl der Passagiere und darüber hinaus auch noch der operative Gewinn.

Die Niederländer standen allerdings auch unter größerem Leidensdruck. Ihre Eisenbahnen transportieren über je-

den Punkt ihres Streckennetzes im Durchschnitt reichlich fünf Millionen Passagiere pro Jahr, zweieinhalb mal so viele wie in Deutschland. Das Land ist sehr dicht besiedelt – mehr als 400 Einwohner pro Quadratkilometer –, und die größten Städte Amsterdam, Den Haag, Rotterdam und Utrecht konzentrieren sich auf engem Raum im Westen des Landes. Zu Stoßzeiten bewältigt die Eisenbahn in dieser Region mehr als die Hälfte des gesamten Personenverkehrs; wenn sie ausfiele und alle Fahrgäste auf das Auto umstiegen, würde sich der schleichende Berufsverkehr auf den Straßen in totalen Stillstand verwandeln. Und Pünktlichkeit ist den Niederländern lieb und teuer: Bei einer Verspätung von mehr als einer Stunde gibt es den vollen Fahrpreis zurück.

In den 30 Jahren seit der letzten großen Fahrplanumstellung 1970 hatte sich die Transportleistung im Personenver-

**Niederländische Züge sind zahlreich und gesellig: Sie verkuppeln sich gern, auch unterwegs, zu größeren Einheiten, wie die beiden älteren Nahverkehrszüge rechts. Im Vordergrund ein *koploper*: Die große Fronttür kann sich automatisch öffnen, sobald ein gleichartiger Zug angekoppelt wird – was einen Durchgang zwischen beiden Zugteilen herstellt. Wegen großer Störanfälligkeit wird dieser Mechanismus jedoch zunehmend außer Betrieb gesetzt.**



MITFOLGEN VON HANS VAN DER SLUIS

kehr der Eisenbahn verdoppelt (und im Güterverkehr fast vervierfacht). Aber für größere Streckenneubauten oder -ausbauten fehlte nicht nur das Geld, sondern auch der Platz. Also musste die Software aus den begrenzten Ressourcen das Optimum herausholen.

Wie berechnet man einen Fahrplan mit dem Computer? Erstens drücke man die Bedingungen, die der Fahrplan erfüllen muss, durch mathematische Formeln aus. Zweitens weise man den Unbekannten des Problems Werte zu, so dass alle Bedingungen erfüllt werden.

### Die Bedingungen: Lauter lineare Ungleichungen

Der erste Teil der Aufgabe ist im Prinzip ziemlich einfach, auch wenn die konkrete Durchführung mühsame Kleinarbeit erfordert. Der Verlauf der Linien ist vorgegeben; es ist also zum Beispiel festgelegt, dass ein Intercity von Den Helder über Amsterdam, Utrecht und Arnhem nach Nimwegen fährt und wie viele Minuten er für jede Teilstrecke braucht. Die Unbekannten sind die Ankunfts- und Abfahrtszeiten jedes Zugs an jedem Bahnhof (»Ereignisse«), und die Bedingungen sind sämtlich von der Form  $e_i - e_j \geq d_{ij}$ : Zwischen den zwei Ereignissen  $e_j$  und  $e_i$  muss eine bestimmte Mindestzeit  $d_{ij}$  liegen. Wenn  $e_1$  die Ankunft des Zugs in Utrecht ist und  $e_2$  dessen Abfahrt im selben Bahnhof, dann besagt die Bedingung  $e_2 - e_1 \geq 2$ , dass der Zug mindestens zwei Minuten zum Aus- und Einsteigen halten soll. Ist  $e_3$  die Ankunft in Ede-Wageningen, dann drückt die Bedingung  $e_3 - e_2 \geq 25$  aus, dass die Fahrzeit von Utrecht bis dorthin nicht weniger als 25 Mi-

nuten betragen kann. Vielleicht soll es in Utrecht Anschluss an einen Zug nach Zwolle und Groningen geben. Sei dessen Abfahrtszeit  $e_4$ , dann sichert die Bedingung  $e_4 - e_1 \geq 6$ , dass die Fahrgäste sechs Minuten Zeit zum Umsteigen haben. Und wenn schließlich zwei Züge auf demselben Gleis hintereinander herfahren, darf die Differenz ihrer Abfahrtszeiten den Sicherheitsabstand nicht unterschreiten.

Welche Ziele soll der Fahrplan über die Einhaltung der Bedingungen hinaus verfolgen? Für die Fahrgäste kommt es auf möglichst kurze Gesamtreisezeiten an; also legen sie Wert darauf, dass der Zug wirklich nur 25 Minuten von Utrecht bis Ede-Wageningen unterwegs ist und dass der Anschlusszug nicht länger als die geforderten sechs Minuten auf sich warten lässt. Das trifft sich mit dem Interesse des Bahnbetreibers; denn der will die Zeiten, für die er sein Personal bezahlen muss, nicht unnötig durch Warten am Bahnsteig, Langsamfahren unterwegs und durch lange Pausen zwischen zwei Einsätzen verlängern. In das Optimierungsproblem bringt man derartige Wünsche entweder durch Ungleichungen mit »kleiner gleich« statt »größer gleich« ein ( $e_4 - e_1 \leq 10$  erzwingt die Abfahrt des Anschlusszugs nach spätestens zehn Minuten) oder durch eine »Kostenfunktion«: Jede verrodelt Minute wird mit einem fiktiven Preis verrechnet. Dieser darf von der Zugart abhängen; einen voll besetzten Fernzug eine Minute stehen zu lassen kostet mehr, als die kleine Anschlussbahn ins nächste Dorf für dieselbe Zeit aufzuhalten. Die Aufgabe lautet dann: Finde unter allen zulässigen Fahrplänen – das heißt solchen, deren Ereignisse alle Ungleichungen erfüllen – den preisgünstigsten.

Das ist ein Standardproblem der numerischen Mathematik, ein so genanntes lineares Optimierungsproblem. Dafür gibt es ein Standardlösungsverfahren, die Simplexmethode, die sich ihrerseits geometrisch erklären lässt. Nehmen wir an, wir hätten nur drei Unbekannte. Dann ist die gesuchte Lösung unseres Problems ein Punkt in einem abstrakten dreidimensionalen Raum. Jede Ungleichung definiert eine Ebene in diesem Raum und fordert, dass die Lösung nur auf einer Seite dieser Ebene liegen darf. Alle Forderungen zusammen lassen von dem ganzen Raum nur einen von ebenen Flächen begrenzten Körper, ein Polyeder, übrig. Die optimale Lösung muss in einer der – endlich vielen – Ecken des Polyeders liegen (da die Kostenfunktion linear ist, kann sie kein Minimum mitten auf einer Seitenfläche haben); also genügt es, von Ecke zu Ecke zu hüpfen, bis die Lösung nicht mehr besser wird. Die Koordinaten der Ecken sind im Allgemeinen nicht ganzzahlig, aber wenn man die fertige Lösung auf ganze Minuten rundet, ist sie in aller Regel noch gut genug.

Diese geometrische Idee, algebraisch formuliert, funktioniert auch dann noch, wenn es wie beim niederländischen Fahrplanproblem ungefähr 8400 Unbekannte und 70000 Bedingungen sind und der abstrakte Raum damit eben 8400 Dimensionen hat. Nur die Zahl der Ecken wird etwas unübersichtlich, und die algebraische Darstellung droht den Ar-



Das Eisenbahnnetz der Niederlande



ISTOCKPHOTO / CORSTIAAN VAN ELZINGEN

Die Kupplung zwischen zwei Zügen rastet beim Kontakt automatisch ein und ist vom Führerstand aus zu lösen.

beitsspeicher selbst moderner Computer zu überfordern; aber das ist mit speziellen Programmierungstechniken zu bewältigen.

Leider war das noch nicht alles. Jeder Arbeitsschritt des Optimierungsprogramms – ein Sprung von einer Ecke des gedachten Polyeders zur nächsten – entspricht einer kleinen Änderung des Fahrplans; zum Beispiel überholt der Intercity A den Regionalzug B an einer anderen Stelle als zuvor. Ab da hat nicht mehr A den Sicherheitsabstand zu B zu wahren, sondern umgekehrt, mit der Folge, dass eine Ungleichung durch eine andere ersetzt wird. Mitten in der Suche nach der optimalen Lösung ändert sich also auf einmal das Problem.

### Nach dem Fahrplan: Der Personalplan

Schlimmer noch: Am Ende soll ein Taktfahrplan herauskommen, denn die Fahrgäste schätzen es sehr, wenn sie sich nur merken müssen, wie viele Minuten nach der vollen Stunde ihr Zug abzufahren pflegt, und sich auch das Umsteigen jede Stunde in gleicher Weise abspielt. Die Unbekannten unserer Optimierungsaufgabe sind nicht Zeiten wie 11.42 Uhr, sondern nur noch Minutenzahlen wie 42.

Wenn mein Zug um 57 ankommt und mein Anschlusszug um 03 abfährt, habe ich offensichtlich die geforderten sechs Minuten Zeit zum Umsteigen. Aber die Ungleichung  $e_4 - e_1 \geq 6$  ist nicht erfüllt, denn  $e_4 - e_1 = 03 - 57 = -54$ . Da muss man auf der linken Seite 60 addieren, damit es wieder stimmt – aber eben nur in diesen Fällen. Und wieder ändert sich mitten in der Optimierung das Problem.

Damit wird das *periodic event scheduling problem* (PESP) eines der schwierigen kombinatorischen Optimierungsprobleme, für die es viele theoretische Ansätze, aber keinen Königsweg zur Lösung gibt (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 76). Die Planer der NS taten sich mit Wissenschaftlern von der Erasmus-Universität in Rotterdam und vom Zentrum für Mathematik und Informatik (*Centrum voor Wiskunde en Informatica*, CWI) in Amsterdam sowie der Softwarefirma Sa-

firo in Almere zusammen und entwickelten eigens für ihre Zwecke ein Programm namens CADANS.

Steht endlich der Fahrplan, ist die Arbeit für die Disponenten noch lange nicht zu Ende. Man will Fahrzeuge und Personal möglichst optimal nutzen, vor allem weil beides nicht so schnell neu angeschafft werden kann, wie das Leistungsangebot und damit der Bedarf steigt. Also geht es darum, unproduktive Zeiten möglichst zu vermeiden.

Für das rollende Material gibt es eine spezielle Dispositionsfreiheit: Viele niederländische Züge sind aus *koplopers* zusammengesetzt, Einheiten mit drei oder vier Wagen und Führerständen an beiden Enden (Bild S. 77). Ohne größeren Aufwand kann man einen Teil eines Zugs auf einem Bahnhof unterwegs abkuppeln und auf eine andere Strecke oder aufs Abstellgleis schicken, weil auf der Reststrecke der Bedarf geringer ist oder die Bahnsteige zu kurz sind. In der Gegenrichtung lässt sich entsprechend ein Zug aus zweien zusammenkuppeln oder durch abgestelltes Material verlängern. Dank dieser Freiheiten kann man die Züge sehr flexibel dem variierenden Bedarf anpassen, vor allem der großen Nachfragespitze am Morgen und der etwas flacheren am Nachmittag.

Wieder gibt es Bedingungen einzuhalten und zu programmieren. So kann man nicht aus der Mitte eines Zugs einen Teil herauszunehmen – das wäre zu viel Rangieraufwand –, aus einem Abstellgleis kann nur der vorderste *koploper* wieder herausfahren, und Züge dürfen sich beim Rangieren und bei der Ein- und Ausfahrt im Bahnhof nicht in die Quere kommen.

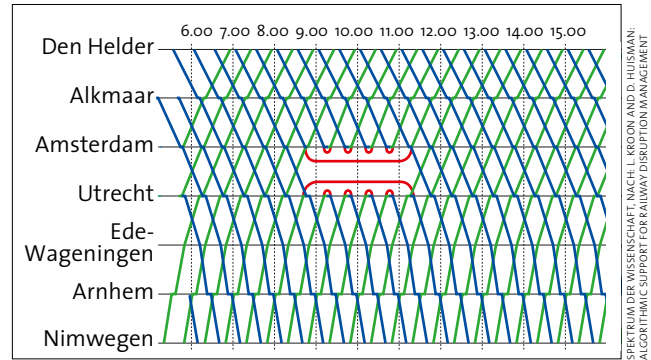
Für den Personaleinsatz gelten noch restriktivere Bedingungen. Ein Dienst soll am selben Ort beginnen und enden, im Durchschnitt nicht über die reguläre Arbeitszeit hinausgehen und in der Mitte eine hinreichend lange Essenspause vorsehen. Darüber hinaus – wieder eine niederländische Besonderheit – ist auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen »süßen« und »sauren« Diensten zu achten. Fernzüge sind süß, Nahverkehrszüge sauer, und dreimal zwischen denselben Endpunkten hin- und zurückzufahren gilt als bitter.

Das zugehörige mathematische Problem heißt »Mengenüberdeckung« (*set covering problem*). Man zeichnet zuerst in Gedanken für jede durchzuführende Fahrt einen Punkt auf ein Blatt Papier. Wenn ein Fahrer oder Zugbegleiter zwei Fahrten hintereinander ausführen kann, weil die erste Fahrt ihn zur rechten Zeit an den rechten Ort für die zweite gebracht hat, zeichne man einen Pfeil vom ersten zum zweiten Punkt. Jeder Dienst, zu dem man einen Fahrer oder Zugbegleiter einteilen könnte, entspricht in diesem Schema einer Folge von Punkten, die durch einen in Pfeilrichtung zu durchlaufenden Weg verbunden sind, wobei zusätzlich die Arbeitszeitvorschriften eingehalten werden.

Man überdecke nun die Menge aller Fahrten mit Diensten, das heißt, man finde aus der Menge aller denkbaren Dienste eine Teilmenge, die jeden Punkt abdeckt. Unter all diesen – ungeheuer vielen – Möglichkeiten suche man wieder die preisgünstigste. Dabei kann es vorkommen, dass ein Punkt doppelt abgedeckt wird, also zum Beispiel ein Lokführ-

## Störfallmanagement

**Auf der Kursbuchstrecke 3000** fährt alle halbe Stunde ein Intercity von Den Helder nach Nimwegen (blaue Linien) und zurück (grüne Linien). Angenommen, eine Störung macht um 8.40 Uhr den Abschnitt Amsterdam–Utrecht in beiden Richtungen unbefahrbar. Dann bleibt der erste betroffene Zug am letzten erreichbaren Bahnhof (»Frontbahnhof«) stehen, also in Amsterdam beziehungsweise Utrecht. Jeder folgende Zug macht im Frontbahnhof kehrt und übernimmt den Fahrplan des Zugs in Gegenrichtung, der wegen der Störung nicht durchgekommen ist (kleine rote Bögen). Nach dem Ende der Störung um 11.20 Uhr macht auf jeder Seite der Störung der zuerst stehen gebliebene Zug kehrt und übernimmt den Fahrplan des letzten ausgefallenen Zugs (große rote Bögen). So bleibt außerhalb der Störungsstelle der Betrieb in vollem Umfang erhalten und kann nach dem



Störfall nahtlos weiterlaufen. Dass die Züge hinterher zu anderen Zeiten eingesetzt werden als geplant, stört nicht besonders. Nur das Personal gerät in andere Dienstpläne und kommt möglicherweise nicht zur vorgesehenen Zeit nach Hause.

PROF. DR. HANS-JOHN VAN DER WERF, INSTITUT FÜR OPERATIONSRESEARCH, TECHNISCHE UNIVERSITEIT Eindhoven, ALGORITHMIC SUPPORT FOR RAILWAY DISRUPTION MANAGEMENT

rer als Passagier im Zug des Kollegen mitfährt; das wird wegen der Kosten aber nur selten der Fall sein.

Neuere Entwicklungen gehen in zwei Richtungen. Erstens versucht man die verschiedenen Ebenen der Planung besser miteinander zu verzahnen. Vor dem Fahrplan kommt die Linienplanung, also zum Beispiel, ob der Zug von Maastricht und Roermond in Utrecht nach Nordwesten (Amsterdam, Den Helder) oder Nordosten (Zwolle, Groningen) weiterfährt. Für den Fahrplan von 2006 wurde für zehn verschiedene handgemachte Linienpläne Fahrpläne ausgerechnet; aus den beiden bestplatzierten Linienplänen wurde dann ein elfter zusammengesetzt, der zur Basis des dann gültigen Fahrplans wurde. Es wäre hilfreich, wenn ein Programm diesen Schritt übernehmen, das heißt einen optimalen Linienplan bestimmen könnte. Das Vorhaben scheitert jedoch noch an der Komplexität des Problems.

Entsprechend gibt es Optimierungsspielraum, wenn das Programm für den Personal- und Fahrzeugeinsatz ein bisschen in den Fahrplan eingreifen darf. Auf diese Weise ist es schon vor Jahren Christian Liebchen, damals an der Technischen Universität Berlin, gelungen, bei der Berliner U-Bahn einen kompletten Wagenlauf einzusparen. Für alle solchen Bemühungen gilt: Gibt man den Optimierungsprogrammen mehr Freiheiten, kann davon das Optimum nur besser werden; aber mit der Anzahl der denkbaren Möglichkeiten steigt die Komplexität rasch ins Unbeherrschbare.

Die zweite Entwicklung zielt ganz im Gegenteil nicht darauf, unter großem Aufwand eine noch bessere Lösung zu finden, sondern sehr rasch eine akzeptable: nämlich bei einer Betriebsstörung, was in den Niederlanden im Durchschnitt ungefähr dreimal pro Tag vorkommt. Dann sollte möglichst binnen Minuten ein neuer Wagenlauf- und Dienstplan errechnet und kommuniziert werden (Kasten oben).

Die zu diesem Zweck entwickelte Software hatte ihre Feuerprobe am 23. März 2009, als in der Nähe von Vleuten bei Utrecht ein Güterzug entgleiste. Fünf Kilometer Strecke wa-

ren beschädigt und eine Woche lang unpassierbar. Innerhalb einer Stunde gelang es, einen Notfahrplan mit Umleitungsstrecke und neuen Personal- und Fahrzeugumläufen zu berechnen. Dass dann die Datenübertragung in die Planungszentrale der NS nicht funktionierte und die neuen Dienstpläne in Nachtschichten von Hand ins System eingetippt werden mussten, ist wohl unter Kinderkrankheiten zu verbuchen.

Für die geplanten Bauarbeiten zwischen Mannheim und Heidelberg hätten die niederländischen Softwarespezialisten also im Prinzip eine Lösung anbieten können. Und in naher Zukunft finden sie vielleicht sogar bei einem plötzlichen Triebwerksschaden einen Plan, der den Betrieb in einer Stunde zur Normalität zurückkehren lässt. ~

### DER AUTOR



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

### QUELLEN

**Caprara, A. et al.:** Passenger Railway Optimization. In: Barnart, C., Laporte, G. (Hg.): Transportation. Elsevier, Amsterdam 2007, S. 129–187. Online unter <http://arrival.cti.gr/index.php/Documents/0035>

**Huisman, D. et al.:** Operations Research in Passenger Railway Transportation. In: Statistica Neerlandica 59, S. 467–497, 2005

**Kroon, L. et al.:** The New Dutch Timetable: the OR Revolution. In: Interfaces 39, S. 6–17, 2009. Online unter <http://homepages.cwi.nl/~lex/files/Interfaces.pdf>

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116474](http://www.spektrum.de/artikel/1116474)

## VERANTWORTUNG ÜBERNEHMEN ...



## ... VIelfALT ERHALTEN.

Die KfW engagiert sich weit über ihren Förderauftrag hinaus. Im Rahmen unseres gesellschaftlichen Engagements unterstützen wir unter CSR-Gesichtspunkten nachhaltige Konzepte, die sich mit dem Erhalt der Vielfalt in Flora und Fauna, aber auch in der Kultur beschäftigen – und das lokal, regional und international. So sind wir unter anderem Partner des Zoos Frankfurt, des Naturmuseums Senckenberg und des Southern African Wildlife College. Weitere Informationen erhalten Sie unter [www.kfw.de/nachhaltigkeit](http://www.kfw.de/nachhaltigkeit)

# Der simulierte Stau

Ein Stau aus dem Nichts verblüfft uns immer wieder, ebenso wie die Hartnäckigkeit von Staus, deren Ursache längst beseitigt ist. Simulationen, die das individuelle Verhalten der Autofahrer modellieren, zeigen, warum wir immer wieder auf der Straße feststecken.

Von Martin Treiber

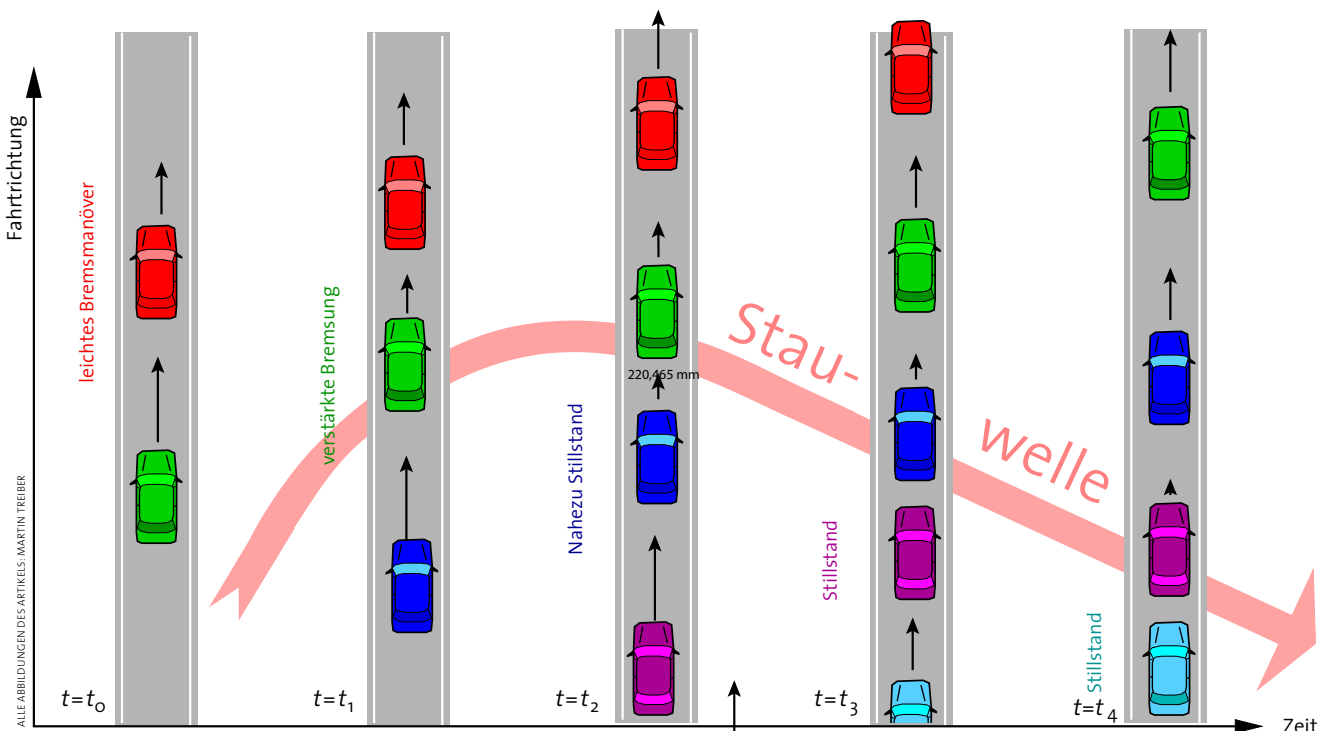
Auch Stauforscher stecken gelegentlich im Stau und wundern sich, wie dessen Entwicklung der Logik vernünftigen Autofahrens zu widersprechen scheint. Auf hindernisfreier Strecke stockt es plötzlich, bevor sich die Fahrzeugkolonne ebenso scheinbar grundlos erneut in Bewegung setzt. Wenige Minuten später ist die Autobahn wieder so frei, als ob nichts gewesen wäre – bis die nächste Stauwelle kommt.

Dem Fahrer schießen da einige Fragen durch den Kopf: Warum fahren die Leute ganz vorn im Stau nicht einfach weiter? Könnten intelligente Maßnahmen zur Verkehrsbeeinflussung – oder sogar Änderungen des eigenen Fahrverhaltens – Staus verhindern oder wenigstens hinauszögern? Verkehrsdaten, mathematische Verkehrsflussmodelle und Simulationen geben Antworten auf diese Fragen. So gibt es zum Beispiel den »Stau aus dem Nichts« in Wirklichkeit gar nicht. Der Eindruck entsteht lediglich dadurch, dass Stauwellen stromauf-

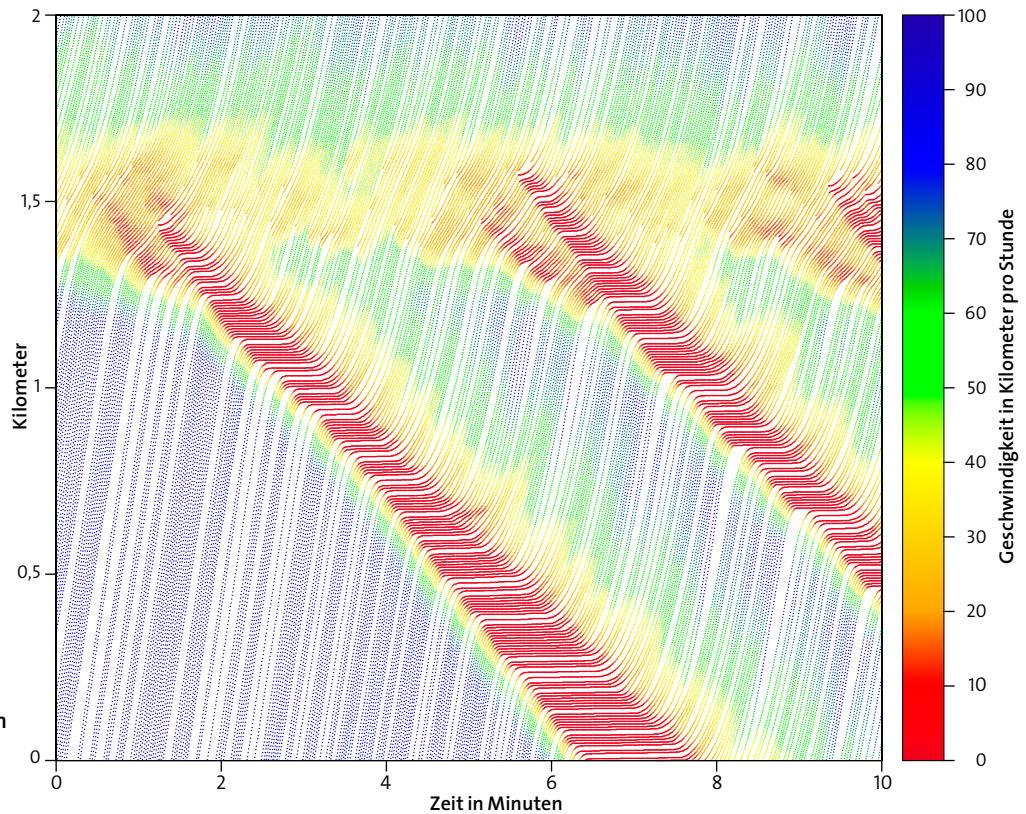
wärts, also entgegen der Fahrtrichtung, wandern, so dass der Fahrer sie stets vor der Engstelle passiert, die den Stau ausgelöst hat. Nicht einmal die Pendelbewegungen des Stop-and-go-Verkehrs sind irrationalem Fahrverhalten anzulasten, sondern allenfalls einer gewissen Trägheit vieler Autofahrer. Das heißt aber auch, dass jeder durch eine agilere Fahrweise selbst zur Steigerung des Verkehrsflusses beitragen kann.

Inspiziert von Flüssigkeiten und Gasen versuchen manche Forscher, den Verkehr mit Hilfe von Gleichungen für Fluss, Dichte und mittlere Fließgeschwindigkeit nachzubilden – man spricht ja nicht umsonst von Verkehrsstrom. Stauwellen entsprechen hier den simulierten Dichtewellen. Anschaulicher ist es allerdings, die Aktionen eines jeden Fahrers durch mikroskopische Modelle zu beschreiben. Bei Flüssigkeiten entspräche dies der Bewegung einzelner Moleküle und ihrer Wechselwirkung mit den Nachbarn. Sowohl Wasser- als auch Stauwellen sind damit kollektive Phänomene, die als Folge der fortgesetzten Einflüsse benachbarter »Teilchen« entstehen. In diesem Sinn spielt das Auto samt Fahrer, in der Welt der Verkehrsmodellierer oft emotionslos als Fahrer-Fahrzeug-Einheit bezeichnet, die Rolle eines Moleküls.

**Der Stau aus dem Nichts: Das rote Fahrzeug bremst leicht (Zeit  $t_0$ ), was nachfolgende Fahrzeuge der Reihe nach stillstehen lässt).**



Simulierter Verkehrszusammenbruch an einer Einfahrt bei Kilometer 1,5: Jede Kurve stellt die Bewegung eines Autos dar. Im Bereich der horizontalen, roten Kurven stehen die Autos, während sie bei den blauen, steilen Kurven normal fahren. Die Zone stehender Fahrzeuge wandert als Stauwelle rückwärts, also in der Grafik nach unten.



Der Fahrer agiert dabei auf verschiedenen Ebenen: Auf der obersten, strategischen Ebene entscheidet er sich, welche Fahrten er wohin, wann und mit welchem Verkehrsmittel durchführen will. Auf der taktischen Ebene bestimmt er die Route. Auch während der Fahrt kann sich diese noch ändern, beispielsweise als Folge von Stauwarnungen. Auf der untersten Ebene beschleunigt, bremst und lenkt der Fahrer, um auf seiner Route sicher, schnell und unter Einhaltung der Verkehrsregeln voranzukommen. Auf allen drei Ebenen lässt sich Verkehr beziehungsweise das Verhalten des Fahrers mikroskopisch modellieren. Die beiden oberen werden durch Entscheidungsmodelle für die Auswahl von Aktivitäten, Zielen, Verkehrsmitteln und Routen abgebildet. Dagegen beschreiben Verkehrsflussmodelle auf der untersten operativen Ebene den individuellen Fahrstil mathematisch.

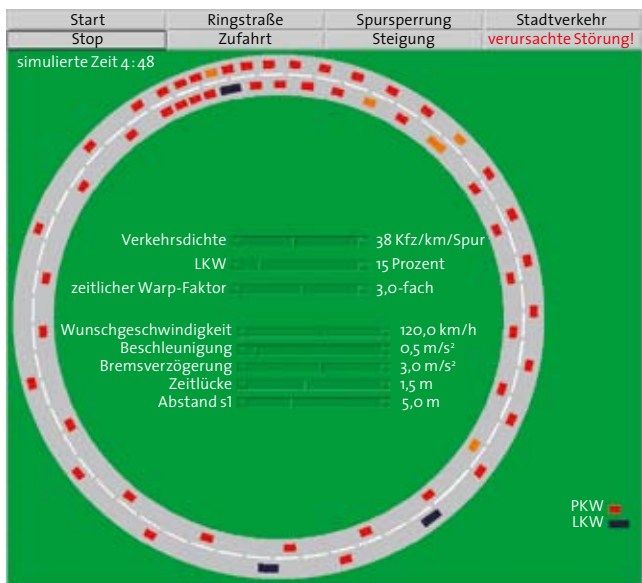
Solche Verkehrsflussmodelle beschreiben die Entstehung von Staus sowie Maßnahmen zu seiner Vermeidung am unmittelbarsten. Doch ist etwas so Subjektives wie der Fahrstil überhaupt einer mathematischen Beschreibung zugänglich? Zumindest beim Beschleunigen und Bremsen sollte das sehr wohl möglich sein. Schließlich gibt es für diese Aufgaben den »automatischen Fahrer« bereits in Form von Tempomaten zu kaufen, die den Abstand zum Vordermann regeln. Beim Assistenzsystem, auch Adaptive Cruise Control (ACC) genannt, liefern Radar- und Infrarotsensoren die Informationen über den freien Raum nach vorn. Ferner ist die eigene Geschwindigkeit sowie durch mathematisches Ableiten des Abstands auch die Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug bekannt. Aus diesen Größen berechnet das ACC eine – positive oder negative – Beschleunigung, mit welcher

sich der festgelegte Wunschabstand oder bei freiem Verkehr die eingestellte Wunschgeschwindigkeit erreichen beziehungsweise halten lässt.

In der Tat funktionieren viele mikroskopische Modelle genau wie ein ACC: Aus Abstand, Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsdifferenz wird die Beschleunigung berechnet. Einen einfachen derartigen Ansatz bietet unser Intelligent Driver Model, das im Internet getestet werden kann. Bei der Modellierung mit Hilfe so genannter zellulärer Automaten hingegen hüpfen die Autos in jedem Zeitschritt eine gewisse Anzahl an Zellen fester Länge weiter. Beispielsweise ist im Nagel-Schreckenberg-Modell eine Zelle 7,5 Meter lang, und ein Zeitschritt dauert eine Sekunde. Damit kann die Geschwindigkeit nur ein Vielfaches von 7,5 Metern pro Sekunde beziehungsweise 27 Kilometern pro Stunde annehmen.

### Alte Fahrschulregel: Abstand gleich halber Tacho

Jeder Fahrer fährt anders, auch setzt jedes Fahrzeug Grenzen, vor allem wenn es sich um einen LKW handelt. Um dies zu berücksichtigen, hat ein Verkehrsmodell Stellschrauben in Form so genannter Parameter. Bereits beim ACC kann der Fahrer die Wunschgeschwindigkeit und meist auch den Sicherheitsabstand wählen. Da dieser mit der Geschwindigkeit zunimmt, wird allerdings nicht der räumliche, sondern der zeitliche Abstand eingestellt, die so genannte Folgezeit. Die aus der Fahrschule bekannte Regel »Abstand gleich halber Tacho« liefert beispielsweise eine Folgezeit von 1,8 Sekunden. Als Modellierer muss man aber berücksichtigen, dass die tatsächlichen Abstände oft deutlich geringer sind, und die Folgezeit im Modell entsprechend reduzieren. Durch Wunsch-



Dieser Screenshot zeigt eine Ringstraße der interaktiven Verkehrssimulation [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de). Ganz oben: eine Stauwelle

abstand und -geschwindigkeit ist der Fahrstil aber noch nicht vollständig charakterisiert. Hinzu kommen Einstellmöglichkeiten für Sportlichkeit, Aggressivität und Fahrerfahrung (siehe Kasten unten).

Den bis jetzt beschriebenen Modellen fehlen zudem typisch menschliche Eigenschaften wie Reaktionszeiten. Um eine Reaktionszeit (von beispielsweise einer Sekunde) abzubilden, liegt es nahe, die Beschleunigungsfunktion des Modells mit Abständen und Geschwindigkeitsdifferenzen zu berechnen, welche eine Sekunde zurückliegen – schließlich reagiert der Fahrer im Modell ja genau auf diese Größen.

Schätzfehler und irrationale Elemente des menschlichen Fahrstils lassen sich durch zufällige Variationen (»Verrauschen«) der Eingangsgrößen beziehungsweise der Beschleunigung selbst modellieren. Menschliche Fahrer haben jedoch auch ihre Vorzüge. Im Gegensatz zum ACC berücksichtigt der Mensch weitere Signale wie Blinker und Bremslichter ande-

rer Verkehrsteilnehmer. Zudem kann er mehrere Fahrzeuge über den Vordermann hinaus voraussehen. Und schließlich haben erfahrene Fahrer gegenüber den obigen Modellen viel raffiniertere Vorgehensweisen, um etwa aufkommende Gefahrensituationen vorwegzunehmen.

Nachdem mein Team all diese Besonderheiten menschlicher Fahrer in einem komplexen Modell berücksichtigt hat, sahen wir zu unserer Überraschung, dass sich die simulierten Verkehrsflüsse dadurch nur wenig veränderten. Menschliche Stärken und Schwächen heben sich also offenbar größtenteils auf. Das hilft bei der Simulation, da sich hierfür die einfachen Modelle nutzen lassen.

Warum bricht nun der Verkehr zusammen? Japanische Experimente zeigten, dass sich zumindest auf Ringstraßen eine laufende Stauwelle bereits aus kleinsten Störungen entwickeln kann. Einmal entstanden, wandert die Welle pro Stunde um etwa 15 Kilometer entgegen der Fahrtrichtung (siehe Kasten rechts). Die Welle entsteht in mehreren Schritten: Zunächst bremst ein Fahrer ein wenig. Bis der nachfolgende Fahrer reagiert und seine Geschwindigkeit ebenfalls reduziert hat, vergeht einige Zeit, so dass sein Sicherheitsabstand unterschritten ist. Um den Abstand wieder zu vergrößern, muss er also stärker als der Vordermann abbremsen. Während dieser Zeit nähert sich von hinten bereits der nächste Fahrer, welcher deshalb noch stärker abbremsen muss. Schließlich schaukelt sich die Kette von Bremsmanövern so lange auf, bis der Verkehr stillsteht. Damit ist quasi aus dem Nichts eine Stauwelle entstanden.

### Engstellen lösen Stauwellen aus

Dieser Mechanismus zeigt zugleich, dass Stauwellen nicht zwangsläufig entstehen, sondern nur dann, wenn bei hohem Verkehrsaufkommen zu viele Fahrer zu langsam reagieren. Aktiverer Fahrer beschleunigen bereits wieder, wenn die nachfolgenden Fahrer näher kommen – womit der Teufelskreis durchbrochen wird. Das können Sie auf der Website [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de) selbst nachprüfen: Wenn Sie bei der modellierten Ringstraße die Verkehrsdichte verringern oder die Agilität der Fahrer erhöhen (den Beschleunigungsregler

## Modellierung verschiedener Fahrweisen

Durch Variation seiner Parameter kann dasselbe Modell verschiedenste Fahrstile und Verkehrssituationen abbilden. Die Tabelle zeigt dies für das so genannte Intelligent Driver Model, das auch im interaktiven Simulator [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de) zum Einsatz kommt. Ein aggressiver Fahrstil entspricht einem geringeren zeitlichen Abstand (»Folgezeit«) und erhöhten Beschleunigungen  $a$  und  $b$ , während eine aktivere Fahrweise allein durch eine hohe Beschleunigung  $a$  charakterisiert ist. Schließlich steht ein niedriger Wert der Verzögerung  $b$  für eine vorausschauende Fahrweise. Bei defensiven beziehungsweise trägen oder unerfahrenen Fahrern verhält es sich genau umgekehrt.

PARAMETER	STADTVERKEHR	AUTOBAHN
Wunschgeschwindigkeit	50 Kilometer/ Stunde	130 Kilometer/ Stunde
Folgezeit	1,5 Sekunden	1,5 Sekunden
Mindestabstand	2 Meter	3 Meter
Wunschbeschleunigung $a$	1,5 Meter/Sekunde <sup>2</sup>	1 Meter/Sekunde <sup>2</sup>
Wunschverzögerung $b$	2 Meter/Sekunde <sup>2</sup>	2 Meter/Sekunde <sup>2</sup>



## Warum bewegen sich die Stauwellen mit 15 Kilometer pro Stunde nach hinten?

**Stauwellen pflanzen sich** mit erstaunlich konstanter Geschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung fort. Dies kann man anhand des Anfahrvorgangs aus dem Stillstand verstehen: Fährt ein Fahrzeug an, kann das nächste erst losfahren, wenn der zeitliche Sicherheitsabstand von etwa 1,8 Sekunden gegeben ist. Steht im Stau alle 7,5 Meter ein Auto bei einer mittleren Fahrzeuglänge von rund 4,5 Metern und einem Abstand von Stoßstange zu Stoßstange von drei Metern, so wandert die Position der anfahrenen Fahrzeuge und damit die Stauwelle alle 1,8 Se-


kunden um 7,5 Meter nach hinten. Die Geschwindigkeit beträgt also 4,2 Meter pro Sekunde beziehungsweise 15 Kilometer pro Stunde. Damit ist auch klar, warum sich in Amerika die Stauwellen etwas schneller fortpflanzen: Dort sind die Autos im Schnitt etwas länger. Entgegen einem weit verbreiteten Missverständnis hat die Stauwellengeschwindigkeit nichts mit der Reaktionszeit zu tun: Das auf [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de) verwendete Modell berücksichtigt beispielsweise gar keine Reaktionszeit.

nach rechts schieben), entstehen keine Stauwellen mehr, und bereits entstandene lösen sich wieder auf.

Reale Straßennetze unterscheiden sich allerdings deutlich von Ringstraßen. Sie sind offen, und sie haben Engstellen. Damit werden Staus weniger durch die Verkehrsdichte als von Angebot und Nachfrage bestimmt. Der Zufluss in das offene System von außen repräsentiert die Nachfrage. Dagegen stellt die maximale Durchsatzfähigkeit der Engstellen das Angebot dar. Staus können gemäß dem obigen Mechanismus auch hier allein durch dichten Verkehr (hohe Nachfrage) und eine kleine Störung im Verkehrsfluss entstehen, allerdings nur theoretisch. In der Praxis wirken die immer vorhandenen Stör- und Engstellen – seien es nun Autobahnkreuze, Steigungen, Bau- oder Unfallstellen – als Kondensationskeime. Damit gibt es bei der Entstehung von Staus drei Faktoren: hohes Verkehrsaufkommen, Engstellen und kleine Störungen innerhalb des Verkehrsflusses.

Sobald der Verkehr zusammengebrochen ist, löst die Engstelle fortlaufend Stauwellen flussaufwärts aus, während der Staukopf ortsfest an der Engstelle verbleibt. Dies können Sie selbst unter [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de) mit der Situation »Zufahrt« nachstellen. Die Faktoren der Stauentstehung dienen zugleich als Schlüssel zu ihrer Vermeidung: Man muss nur mindestens einen davon schwächen oder völlig ausschalten. Gegen hohes Verkehrsaufkommen hilft nur antizyklisches Fahren. Engstellen lassen sich natürlich nicht einfach beseitigen. Es hilft aber, dort besonders aufmerksam und aktiv zu fahren. Unsere Simulationen haben gezeigt, dass dadurch die für Engstellen charakteristischen Kapazitätslöcher »dynamisch aufgefüllt« werden.

Ist der Verkehr erst einmal zusammengebrochen, kann auch ein aktiver Fahrer, der im Stau feststeckt, nichts mehr ändern, wohl aber, sobald er das Kopfende des Staus erreicht, der sich ja an der Engstelle befindet. Hier erhöht zügiges Herausfahren aus dem Stau deutlich den Fluss, und der Stau löst sich schneller wieder auf. Schließlich lassen sich Störungen innerhalb des Verkehrsflusses, die oft von Spurwechseln herrühren, durch Tempolimits reduzieren. Auf [www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de) kann man dies mit der Situation »Spurspernung« selbst nachvollziehen: Anfänglich ist das Tempolimit

auf 80 eingestellt, und jeder findet rechtzeitig eine Lücke, um auf die nicht gesperrte Spur zu wechseln. Erhöht man das Tempolimit, wird dies auf Grund der Geschwindigkeitsdifferenzen schwieriger, so dass früher oder später jemand den Wechsel nicht mehr schafft und der Verkehr zusammenbricht. Aus verkehrstechnischen Gründen ist ein Tempolimit aber nur bei hohem Aufkommen und vor Engstellen nötig. Dies spricht dafür, den Verkehr variabel zu regeln. 

### DER AUTOR



**Martin Treiber** studierte in Nürnberg an der Georg-Simon-Ohm-Hochschule Feinwerktechnik, anschließend in Bayreuth Physik, wo er auch 1996 mit einer Arbeit über Instabilitäten in nematischen Flüssigkristallen promovierte. Nach Stationen in Santa Barbara, Tucson und Stuttgart ist er seit 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wirtschaft und Verkehr an der

Technischen Universität Dresden.

### QUELLEN

**Kesting, A., Treiber, M.:** Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen. In: Straßenverkehrstechnik 1, S. 5–11, 2010

**Kranke, F. et al.:** Der Baustellenlotse – ein stauvermeidendes Fahrerassistenzsystem auf Grundlage von Fahrzeugsensordaten und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation. In: Straßenverkehrstechnik 1, S. 12–19, 2010

**Treiber, M., Kesting, A.:** Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer, Heidelberg 2010

### WEBLINKS

[www.verkehrsdynamik.de](http://www.verkehrsdynamik.de)

Website des Autors zu seinem Buch über Verkehrsdynamik

[www.traffic-simulation.de](http://www.traffic-simulation.de)

Interaktive Simulation von Staus

[www.traffic-states.com](http://www.traffic-states.com)

Bilderdatenbank von realen Staus auf der Autobahn A5

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116473](http://www.spektrum.de/artikel/1116473)

# Die Autobahn als Fließband

Maschinell gesteuertes Kolonnenfahren kann Staus vermeiden und den Verkehr gleichmäßig fließen lassen. Das demonstrierte das deutsche Projekt AnnieWAY, das bei einem Wettbewerb in den Niederlanden den ersten Preis ergatterte.

Von Martin Lauer

**D**ichter Kolonnenverkehr auf allen Spuren. Ein Fahrzeug bremst und zwingt so das nachfolgende, es ihm gleichzutun. Die Verzögerung setzt sich in einer Kette fort, bis sich schließlich ein Stau aufbaut. So sieht der Alltag auf Europas Straßen aus, ein ständiges Ärgernis und noch viel mehr: Staus kosten Zeit und belasten die Umwelt, sie verursachen wirtschaftliche Schäden in Millionenhöhe.

Das Phänomen verstehen Forscher inzwischen recht gut, dennoch ist ihm kaum beizukommen. Das naheliegende Gegenmittel, die Anlage weiterer Fahrspuren und neuer Straßen, greift nicht, denn die Nachfrage, das heißt die jährliche Gesamtfahrleistung aller Pkws und Lkws, wächst seit vielen Jahren so stark an, dass das Angebot an Straßenfläche unter keinen Umständen mithalten könnte. Ein entsprechender Ausbau wäre nicht nur unbezahlbar, sondern auch umweltschädlich und häufig mangels Platz gar nicht möglich. Die einzige Lösung ist die Nutzung des vorhandenen Netzes mit erhöhter Verkehrsdichte. Zu diesem Ziel soll unser Projekt beitragen.

Dem dichten Kolonnenfahren steht jedoch die menschliche Natur entgegen. Da jeder Fahrer verzögert auf ein Bremsmanöver des Vordermanns reagiert, muss er nicht nur einen großen Sicherheitsabstand einhalten, sondern es entstehen auch Staus ohne konkrete Ursache (siehe den vorstehenden Beitrag). Dieser menschlichen Schwäche können Maschinen mit ihren Stärken aufhelfen: Sie verarbeiten Informationen schneller als Menschen und ermüden nicht. Der Idealfall einer Kolonnenfahrt gleicht dem gleichmäßig dahineilenden Fließband in einer automatisierten Fabrik, auf dem im dichten Takt Objekte befördert werden. Deshalb sehen Verkehrsexperten in der Entwicklung eines technischen Assistenten, der die Ansteuerung von Gas und Bremse übernimmt, eine wichtige Etappe auf dem Weg zu einem homogen fließenden, dabei dicht gepackten Verkehr, der das Straßennetz optimal nutzt.

Diese Grundidee veranlasste die niederländische Forschungsgesellschaft TNO vor zwei Jahren, einen entsprechenden Wettbewerb auszuschreiben. Verschiedene Forscherteams sollten mit autonomen, also fahrerlosen Autos gegeneinander antreten und zweierlei demonstrieren: dass maschinengesteuertes Kolonnenfahren überhaupt machbar ist und dass es darüber hinaus einen homogenen Verkehrsfluss ergibt. Im Mai dieses Jahres traten dann neun Teams aus verschiedenen europäischen Ländern zum

»Grand Cooperative Driving Challenge« (GCDC) im niederländischen Helmond an.

Zum Einsatz kamen Pkws und Lkws, allesamt Serienfahrzeuge, die mit zusätzlicher Ansteuerungselektronik, Sensorik und Computern ausgestattet waren. Den Sieg, dies sei vorweggenommen, trug unser Team AnnieWAY (benannt nach der ersten Teamleiterin) vom Karlsruher Institut für Technologie davon. Wir verwendeten einen VW Passat, den der Hersteller lediglich so umgerüstet hatte, dass unser Computer auf die Fahrzeugelektronik zugreifen sowie Gas und Bremse steuern konnte. Hinzu kamen Kameras und Laserscanner, um die Umgebung zu beobachten. Zur Originalausstattung von VW gehörte bereits ein Radarsystem, das den Abstand zum Vordermann und dessen Geschwindigkeit ermittelte.

## Mit Sensoren und GPS die Bewegungsdaten bestimmen

Um die Genauigkeit des bordeigenen GPS-Systems von mehreren Metern auf unter einen Meter zu erhöhen, ergänzten wir es um einen Empfänger für Korrektursignale, die nicht von Satelliten, sondern von Bodenstationen aus gesendet werden (differenzielles GPS). Des Weiteren statteten wir das Auto mit Trägheits- und Beschleunigungssensoren aus, um beispielsweise aus der gemessenen Drehung des Fahrzeugs und seiner Beschleunigung die zurückgelegte Strecke und die Richtungsänderung berechnen zu können. Solche Informationen erlauben es, die Position des Fahrzeugs sowie seine Geschwindigkeit und Beschleunigung auch dann zu ermitteln, wenn die Satelliten durch Gebäude verdeckt sind: Anhand der Sensordaten errechnet der Computer die Bewegung von der letzten bekannten GPS-Position aus, bis wieder Signale empfangen werden.

Dank dieser Fülle an Informationen wäre es sicher bereits möglich gewesen, mit kurzen Latenzzeiten auf die Manöver eines vorausfahrenden Fahrzeugs zu reagieren, doch das genügte der TNO noch nicht. Sie forderte ein vorausschauendes Fahren! Die Automatik sollte nicht nur reagieren, sondern die Manöver der Vorausfahrenden mitvollziehen. Deshalb wurden alle Autos auch mit einem Funksystem ausgestattet, das den Austausch relevanter Informationen mit bis zu 700 Meter entfernten Fahrzeugen erlaubt. Über das gleiche Modul empfangen sie auch Daten von fest installierten Funkstationen, beispielsweise zu Geschwindigkeitsbeschränkungen und Ampelphasen.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (KIT)

Alle Berechnungen führt bei AnnieWAY ein PC mit mehreren Prozessoren durch, von der Sensordatenverarbeitung über die Analyse der gegenwärtigen Verkehrssituation bis hin zur Regelung von Gas und Bremse. Da es sich um einen Prototyp handelt, sind die Geräte sehr groß und müssen auf dem Dach und im Kofferraum untergebracht werden (Bild S. 88); für die Serienfertigung würde man sie miniaturisieren.

Es gibt zwar bereits so genannte Adaptive Cruise Controller (ACC), also Regelalgorithmen, die ein Auto einem vorausfahrenden hinterhersteuern könnten, sie leisten aber kein vorausschauendes Bremsen oder Beschleunigen. Hier kommen nun die Informationen ins Spiel, die alle Fahrzeuge per Funk über ihre eigenen Aktionen verbreiten. Mit ihrer Hilfe kann jedes Fahrzeug die Bremsverzögerung Vorausfahrender mit minimaler Reaktionszeit nachvollziehen. Werden Sicherheitsabstände unterschritten, soll der automatische Assistent den Abstand vergrößern, um einer Stau auslösenden Kettenreaktion vorzubeugen.

Unser Team AnnieWAY hat dazu einen Algorithmus namens MPC (*model predictive controller*, Regler mit modellgestützter Vorhersage) entworfen. Dieses Programm versucht, eine zukünftige Situation anhand aktueller Gegebenheiten vorherzusagen und das zu steuernde Fahrzeug optimal darauf vorzubereiten. Sein Ziel ist, zu allen vorausfahrenden

**Für den Wettstreit absolvierten alle Teilnehmer 15 Fahrten in jeweils zwei aus Pkws und Lkws gemischten Kolonnen.**

Fahrzeugen den idealen Abstand einzuhalten: zum unmittelbaren Vordermann den einfachen Sicherheitsabstand, zum übernächsten den doppelten Sicherheitsabstand plus Fahrzeuglänge und so fort. Anzahl und Art der vorausfahrenden Autos erfährt das System aus deren per Funk verbreiteten »Selbstauskünften«.

Um dieses Ziel zu erreichen, berechnet MPC eine Prognose, wo und wie schnell die Vorausfahrenden in den nächsten zehn Sekunden sein werden, und stellt daraufhin das Fahrverhalten des eigenen Fahrzeugs – das heißt dessen positive oder negative Beschleunigung – so ein, dass sein zukünftiger Ort zu den für die Zukunft vermuteten Orten der anderen die Idealabstände möglichst genau einhält. Zusätzlich wählt der Algorithmus unter verschiedenen denkbaren Möglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen, die komfortabelste und umweltfreundlichste, das heißt diejenige mit dem geringsten Brems- beziehungsweise Beschleunigungsaufwand.

Dabei folgt er einem üblichen Minimierungsprinzip: Er berechnet die Differenz zwischen den prognostizierten und den erwünschten Werten, quadriert sie, multipliziert jeden



Das Versuchsfahrzeug AnnieWAY trägt auf dem Dach von vorn nach hinten ein Paar Stereokameras, einen 3-D-Laserscanner (der hohe Aufbau mit den zwei »Augen«), eine Stabantenne für die Kommunikation mit den anderen Fahrzeugen, große, rote Not-Aus-Taster, Anzeigelampen für autonome und menschengesteuerte Fahrweise und zwei GPS-Empfänger. Im Kofferraum (kleines Bild) befinden sich links die Stromversorgung und rechts die Steuerelektronik.

dieser Fehlerterme mit einem gewissen Faktor – Fahrkomfort hat einen geringeren Gewichtungsfaktor als Unterschreitung des Sicherheitsabstands –, addiert sie auf, summiert (genauer: integriert) sie über den Prognosezeitraum und erhält dadurch eine Zahl, welche die Abweichung zwischen Ideal und Prognose kennzeichnet, das so genannte Fehlerfunktional. Der Algorithmus wählt dann die Werte der zu steuernden Variablen so, dass das Fehlerfunktional minimal wird. Diese Berechnung führt er jede Zehntelsekunde aufs Neue aus.

Während der GCDC absolvierten alle teilnehmenden Fahrzeuge an zwei Tagen 15 Kolonnenfahrten auf einer gesperrten Autobahn, wobei hinter einem vom Veranstalter gefahrenen Führungsfahrzeug jeweils eine Kolonne auf dem linken und eine auf dem rechten Fahrstreifen folgte. Die Autos waren zur Sicherheit auch mit einem menschlichen Fahrer besetzt, der vor allem die – nicht automatisierte – Lenkung übernahm. Brems- und Beschleunigungsmanöver des Führungsfahrzeugs simulierten Stau auslösende Störungen. Nach einem Punktesystem wurden jene Fahrzeuge ermittelt, die damit am besten zurechtkamen und die dichteste Kolonne bildeten. Bei jedem Lauf änderte sich die Zusammenstellung der beiden Gruppen, so dass jedes Team die Chance erhielt, in einer optimalen Kolonne mitzufahren.

Während am ersten Tag des Wettbewerbs einige Teams noch mit Problemen wie Sensorausfällen zu kämpfen hatten – schließlich handelte es sich ausschließlich um Prototypen –, verlief der zweite Wettbewerbstag ohne Zwischenfälle. Damit demonstrierte die TNO-Veranstaltung, dass in einigen Jahren kooperatives, automatisiertes Fahren im Kolonnenverkehr eine realistische Möglichkeit sein wird. Dass wir den ersten Platz errungen haben, machte uns natürlich stolz. Offenbar arbeiteten die Module unseres Systems sehr

gut zusammen, so dass unser Fahrzeug deutlich schneller auf Veränderungen im Vorausverkehr reagierte als andere. Es verfügte auch nicht jedes System über eine Trägheitssensorik, was sich bei Fahrten unter Brücken und anderen schlechten Empfangsbedingungen für GPS-Signale bemerkbar machte.

Natürlich arbeiten wir nun daran, unser System noch weiter zu verbessern (es zur Serienreife zu bringen, wäre Aufgabe der Industrie), untersuchen aber auch bereits das autonome Fahren im städtischen Verkehr, wobei die Automatik neben Gas und Bremse auch die Lenkung übernehmen soll. Das ist freilich noch Zukunftsmusik, denn die Vielfalt der möglichen Verkehrssituationen erfordert eine wesentlich aufwändigere Erfassung der Umgebung und weit komplexere Algorithmen zur Berechnung eines situationsangepassten Verhaltens. Der vollständige Ersatz des Fahrers durch die Technik – in Science-fiction-Filmen längst vorweggenommen – wird wohl noch eine Weile auf sich warten lassen. ☺

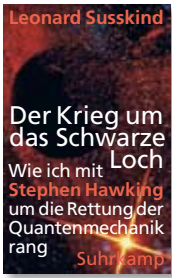
#### DER AUTOR



Der promovierte Informatiker **Martin Lauer** leitet das Projekt AnnieWAY des Instituts für Mess- und Regelungstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). An den geschilderten Arbeiten haben auch die Teammitglieder Andreas Geiger, Frank Moosmann, Benjamin Ranft, Holger Rapp und Julius Ziegler mitgewirkt.

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116472](http://www.spektrum.de/artikel/1116472)



Leonard Susskind

### Der Krieg um das Schwarze Loch.

Wie ich mit Stephen Hawking um die Rettung der Quantenmechanik rang

Aus dem Amerikanischen von Friedrich Griese.

Suhrkamp, Berlin 2010. 541 S., € 29,90

GRUNDLAGENPHYSIK

## Duell der Physikgiganten

Schwarze Löcher verschlingen Information – aber welche?

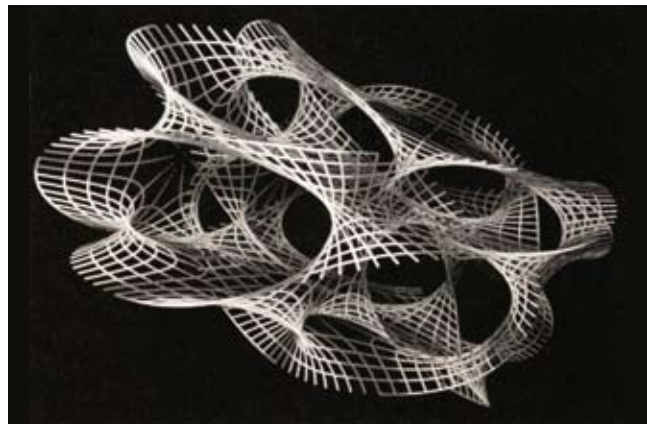
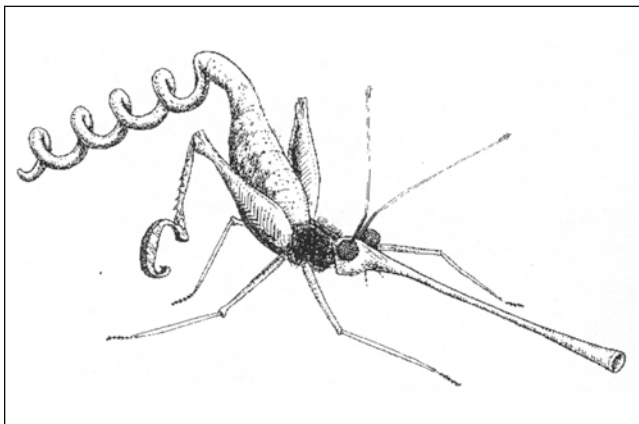
Der amerikanische Physiker Leonard Susskind (Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 58) betreibt Quantenmechanik, ist also Mikrophysiker. Sein britischer Fachkollege Stephen Hawking (Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 46), der Star der Theorie Schwarzer Löcher, arbeitet über relativistische Gravitationstheorie, ist also Makrophysiker. Damit verkörpern die beiden Wissenschaftsstars jene zwei Theoriekomplexe, deren Vereinigung zu einer Quantentheorie der Gravitation bislang trotz aller Bemühungen nicht gelingen will.

Aber es gibt ein viel älteres Problem zwischen Mikro- und Makrophysik, noch aus der klassischen Ära, vor dem Aufkommen der Quantentheorie: Was ist Entropie? Sie wird gern veranschaulicht als Maß für Unordnung, ist aber präziser definiert als der Logarithmus der Anzahl der Mikrozustände – zum Beispiel der unterschiedlichen Atomkonfigurationen in einem Gas –, die densel-

ben Makrozustand ergeben, im Beispiel ein Gasvolumen mit einer bestimmten Temperatur. Doch Susskind verquickt makroskopische Entropie mit mikroskopischer Information: Er nennt Entropie »versteckte Information« und meint damit die kompletten Daten über sämtliche Mikrozustände.

Das ist ein terminologischer Trick. Traditionell ist Information das Gleiche wie Entropie, nur mit einem Minuszeichen. Während Entropie tendenziell zunimmt – Unordnung wächst spontan, sie zu senken erfordert Arbeit –, nimmt Information tendenziell ab; sie hat die Neigung, im allgemeinen Zufallsrauschen unterzugehen. Vor allem sind nach herkömmlichem Verständnis En-

Susskinds Mitstreiter Gerard 't Hooft von der Universität Utrecht erfindet gerne Fantasiewesen wie den »Kleinen Weindieb« *Bacchus deliriosus* (links), komplett ausgerüstet, um Flaschen und Dosen aller Art zu öffnen. Rechts eine zweidimensionale Scheibe eines Calabi-Yau-Raums. Diese Mannigfaltigkeiten »sind extrem komplex, mit Hunderten von sechsdimensionalen Donutlöchern und unvorstellbaren Brezelwindungen« (Susskind).



tropie und Information statistische Begriffe. Sie stehen für makroskopische Mittelwerte von mikroskopischen Zuständen.

Susskind aber setzt Information mit den mikroskopischen Quantenzuständen eines Systems gleich – und die verschwinden nicht einfach. Quantenzustände können sich nur ineinander umwandeln; Teilchen können aus Teilchen entstehen oder in pure Energiepakete zerstrahlen, aber der Gesamtzustand des Systems ist durch die so genannte Unitarität der Quantengleichungen gekennzeichnet. Sie garantiert, dass kein Mikrozustand auf Nimmerwiedersehen verschwindet.

Der »Krieg um das Schwarze Loch«, wie Susskind sich ausdrückt, oder – weniger martialisch – das Informationsparadoxon Schwarzer Löcher dreht sich also um unterschiedliche Definitionen von Information. Hawking versteht sie klassisch-thermodynamisch, Susskind deutet sie quantenmechanisch. Warum? Weil Hawking Schwarze Löcher als »große« – der einsteinschen Gravitationstheorie gehorchende – kosmologische Objekte betrachtet, während Susskind betont, auch für sie sei in letzter Instanz die Quantenphysik zuständig. Darum findet Hawking nichts dabei, wenn Information in Schwarzen Löchern verschwindet; für Susskind ist

das ein Skandal, der die Grundlagen der Physik gefährdet.

Das Buch beschreibt sehr unterhaltsam, wie zunächst nur ein paar Quantentheoretiker, insbesondere der Holländer Gerard 't Hooft und Susskind selbst, gegen Hawking Sturm liefen. Schließlich aber überzeugten sie die Mehrheit der Schwarzslochspezialisten – sogar Hawking selbst – davon, dass Information, mikrophysikalisch verstanden, nicht für ewig im Schwarzen Loch gefangen bleibt. Irgendwann und irgendwie entkommt sie ihm, und zwar mit speziellen Eigenschaften der von Hawking theoretisch entdeckten und nach ihm benannten Strahlung.

Solange die große Vereinigung von Gravitation und Quantenmechanik nicht vollzogen ist, bleibt das freilich ein Streit um des Kaisers Bart. Susskind schildert die Hintergründe des »Kriegs« sehr geschickt, muss sich aber am Ende hastig in extrem spekulative Bereiche der Mikrophysik vorwagen,

wo sogar ein Kernteilchen wie das Proton als kompliziert aus Quantenfäden – »Strings« – zusammengesetztes Riesensobjekt erscheint. In die von Susskind beschworenen Regionen gigantischer Energien und winzigster Distanzen wird nicht einmal der derzeit größte Teilchenbeschleuniger, der Large Hadron Collider, jemals eindringen.

Eine Moral von Susskinds Geschichte scheint mir zu sein, dass der zwischen Mikro- und Makrophysik schillernde Informationsbegriff kaum als fundamentale Größe für die gesamte Physik geeignet ist – auch wenn prominente Theoretiker von Carl Friedrich von Weizsäcker über John Wheeler (»The It from Bit«) bis Anton Zeilinger das behauptet haben.

Mikrophysikalisch gedeutet ist »Information« ein Synonym für die Gesamtheit der Mikrozustände eines Makroobjekts, das im Schwarzen Loch verschwindet und – bis zur Unkenntlichkeit in Hawkingstrahlung verwandelt –

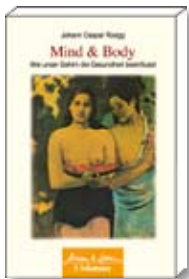
komplett wieder auftaucht. Auch beim Brand der antiken Bibliothek von Alexandria blieben theoretisch alle Bücher und Texte erhalten – als Asche, Wärmestrahlung und warme Luft. Hingegen sind gemäß der statistischen Informationstheorie die verbrannten Bücher in jedem praktischen Sinn unwiederbringlich verloren.

Dabei wäre das Kunststück, die größte Bibliothek des Altertums aus ihrer Asche zu rekonstruieren, noch unermesslich viel einfacher als der Rückgewinn sämtlicher in einem Schwarzen Loch verschwundenen Quantenzustände aus der gesamten Strahlung des irgendwann vollständig verdampften Lochs. Susskinds Buch führt vor, wie weit die Grundlagenphysik noch gehen muss, bis sich die Umrisse einer Theorie von Allem abzeichnen.

---

**Michael Springer**

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.



Johann Caspar Rüegg

**Mind & Body**

*Wie unser Gehirn die Gesundheit beeinflusst*

Schattauer, Stuttgart 2010. 158 Seiten, € 14,95

MEDIZIN

## So baut sich der Geist den Körper

Johann Caspar Rüegg präsentiert eine neue Psychosomatik auf Basis der modernen Hirnforschung.

Der Versuch eines ganzheitlichen Ansatzes in der Medizin ist so alt wie das menschliche Denken. Bereits in Platons Dialog »Charmides« heißt es, man müsse ein Augenleiden vom Kopf her behandeln, den Kopf aber vom ganzen Körper aus. Der ganze Körper wiederum könne nur von der Seele aus geheilt werden. Für die moderne Auffassung der Psychosomatik ist es allerdings nicht nötig, die wissenschaftlich nur

schlecht fassbare Instanz »Seele« als Verursacher körperlicher Krankheiten zu bemühen. Es genügt, auf ihren materiellen Träger zurückzugreifen: das Gehirn. Johann Caspar Rüegg, emeritierter Physiologieprofessor und selbst Fachmann auf dem Gebiet der neurobiologisch fundierten Psychosomatik, will mit dem vorliegenden Buch das neue Verständnis dieser medizinischen Teildisziplin darstellen, mit dem Ziel, »die

Kluft zwischen einer rein somatisch orientierten Medizin und einem ganzheitlichen, psychosomatischen Krankheitsverständnis« zu überbrücken.

Diesem Anspruch versucht er in zehn Essays gerecht zu werden; jeder ist eigenständig und mit einer umfangreichen Literaturliste versehen. Der erste beschreibt knapp den Aufbau des Gehirns; die folgenden zeigen, wie mentale Prozesse und frühkindliche Erfahrungen auf die Gesundheit sowie auf die neuronale Struktur des Gehirns wirken, wie Schmerz sich mental beeinflussen lässt und wie emotionaler Stress auf den Körper wirkt, insbesondere auf das Herz.

Das Thema, das sich wie ein roter Faden durch fast alle Kapitel zieht, ist die Veränderung des Gehirns durch den Geist. An unterschiedlichen Beispielen zeigt Rüegg, dass »die Aktivität eines bestimmten Hirnteils das bewusste Erleben und die Befindlichkeit beeinflussen, ... aber auch ... das Bewusstsein wiederum auf die Aktivität einer Hirnregion zurückwirken« kann. Damit erweist er sich eindeutig als Gegner einer epi-

phänomenalistischen Sichtweise, die den Geist lediglich als Nebenprodukt neurophysiologischer Prozesse deutet, ihm umgekehrt aber jede kausale Wirkung abspricht.

Eng verbunden mit dem Problem der Einwirkung des Geistes auf den Körper – dem »Leib-Seele-Problem« – ist die Frage der menschlichen Freiheit. Im Essay »Emotion und Bewegung« greift der Autor ein berühmtes Experiment auf, das häufig als Widerlegung der menschlichen Willensfreiheit gedeutet wird. Der amerikanische Physiologe Benjamin Libet hatte Anfang der 1980er Jahre gezeigt, dass ein Willensakt erst mehrere Zehntelsekunden nach der Entstehung eines spezifischen Bereitschaftspotenzials überhaupt bewusst wird. Rüegg macht allerdings darauf aufmerksam – und bezieht sich dabei auf die Erkenntnisse der Münchener Psychologen Patrick Haggard und Martin Eimer –, dass das Bereitschaftspotenzial »gar nicht die Ursache für das Bewusstwerden ei-

ner Entscheidung sein kann«. Das sei vielmehr wahrscheinlich ein anderes Hirnpotenzial, »das mit der bewussten Wahrnehmung der Absicht beinahe ko-inzidiert« und als lateralisiertes Bereitschaftspotenzial bezeichnet wird.

Darüber hinaus zitiert der Autor Untersuchungen des britischen Hirnforschers Hawkan Lau: Wenn die Versuchsteilnehmer ihre Aufmerksamkeit auf den Moment der Intention richten – also den Zeitpunkt, in dem sie den Impuls verspüren, einen Finger zu krümmen – und nicht auf die Auslösung der Bewegung, dann verstärkt sich die Gehirnaktivität im »präsupplementär-motorischen Kortex (Pre-SMA)«. Es gebe also eine zerebrale Repräsentation einer Intention, mit der Folge, »dass die Aufmerksamkeitsfokussierung auf die Intention einer Handlung auch deren bewusste (willentliche) Kontrolle ermöglichen« könne.

Somit hätte der Mensch seine verloren geglaubte Freiheit wieder zurück-

erlangt: »Trotz oder vielleicht auch gerade wegen der aktuellen Erkenntnisse neurowissenschaftlicher Forschung ist kaum anzunehmen, dass das für die ethischen Belange der Menschheit so wichtige Konzept des ›freien Willens‹ bald aufgegeben wird.«

Besonders interessant sind die Erklärungen, wie psychotherapeutische – im Speziellen verhaltenstherapeutische – Verfahren bei psychosomatischen Erkrankungen wirken. Es hat sich gezeigt, so der Autor, dass es im Verlauf einer Therapie zur Lockerung (»Labilisierung«) synaptischer Verknüpfungen kommt und deren erneute Verfestigung durch die betreffende Therapie gehemmt wird. So können negative, oder auch traumatische Erinnerungen teilweise »gelöscht« werden: »Eine Psychotherapie wirkt auch auf biologische Weise, und zwar im Prinzip fast genauso wie antidepressive Medikamente, nämlich durch eine nachhaltige Veränderung des Gehirns.« Dabei geht

ANZEIGE

# 11. MÜNCHNER WISSENSCHAFTSTAGE 2011

22.–25. Oktober

Wissen für alle

alle Veranstaltungen kostenfrei

## Herausforderung Gesundheit!

an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an über 30 weiteren Orten im Großraum München

Marktstände und Vorträge, Führungen und Workshops  
spezielles Programm für Schüler und Kinder

Die Gesundheit ist ein merkwürdiges Phänomen. Erst wenn sie uns fehlt, beginnen wir sie richtig zu schätzen. Verschiedenste Berufsgruppen und Institutionen befassen sich damit: Ärzte, Wissenschaftler, Krankenhäuser, Pharmaunternehmen und viele andere. Gerade im Großraum München wird verstärkt auf medizinische Forschung gesetzt.

Rund 20 Vorträge im Audimax, über 35 Marktstände der Wissenschaft, ein spannendes Kinderprogramm und 4 Themenabende, dazu etwa 50 dezentrale Veranstaltungen im Großraum München und verschiedene Schüler- und Lehrerworkshops präsentieren in diesem Jahr die faszinierende Welt der Forschung für unsere Gesundheit. Mehr als 300 Spitzenwissenschaftler und Experten stellen sich Fragen wie: »Ist sich die Menschheit krank?«, »Welche Bedeutung hat die Genforschung für die Medizin?«, »Wann ist Arbeit Auslöser für Burnout?«, »Was leistet die moderne Transplantationsmedizin?« oder »Ist unsere gesundheitliche Versorgung zu teuer?« und »Müssen arme Menschen früher sterben?«.

Offiziell durch



Landeshauptstadt München

Allianz



BayWa Stiftung

bene

Medizinspektrum

Spektrum  
muenchende

[www.muenchner-wissenschaftstage.de](http://www.muenchner-wissenschaftstage.de)



Eveline Crone

**Das pubertierende Gehirn. Wie Kinder erwachsen werden**

Aus dem Niederländischen von Bärbel Jänicke. Droemer, München 2011. 206 S., € 14,99

Eveline Crone, Entwicklungspsychologin an den Universitäten Leiden und Amsterdam, nimmt den Leser mit auf eine erlebnisreiche Reise durch die Gehirnwelt Jugendlicher. Sie selbst stellte ihnen hinterlistige Aufgaben, störte sie beim Lösen und zeichnete das Ganze mit bildgebenden Verfahren auf. Dabei kommt sie zu höchst spannenden Befunden. Zum Beispiel sind die Gehirnzentren für Vernunft und Gefühl weniger koordiniert als bei Erwachsenen, und das Belohnungszentrum ist häufig hoch erregt – eine plausible Erklärung für unstetes Verhalten und Risikobereitschaft. Ausdrücklich wendet sich Crone gegen die verbreitete Ansicht, jungen Menschen fehle es an Verständnis und ihr Gehirn – das sich in diesem Alter neu strukturiert – sei noch wenig leistungsfähig. Vielmehr sei es dem Erwachsenenhirn an Kreativität und Auffassungsgabe weit überlegen. Lesenswert für jeden, der junge Menschen kennt – oder selbst einmal jung war.

ADELHEID STAHNKE



Paul McEuen

**Spiral**

Aus dem Amerikanischen von Rainer Schmidt. Scherz, Frankfurt am Main 2011. 388 S., € 18,95

Dass finstere Forscher in einem japanischen Geheimplabor während des Zweiten Weltkriegs einen Killerpilz entwickeln, ist im Kontext eines amerikanischen Thrillers ohne Weiteres plausibel. Und dass ein böser alter japanischer und ein guter alter amerikanischer Wissenschaftler 60 Jahre später deswegen noch eine Rechnung offen haben, erst recht. Die autonomen, sich selbst ernährenden Miniroboter, die in dem Pilzlabor des Letzteren umherwuseln, hat Paul McEuen in der Realität schon fast konstruiert; schließlich betreibt er hauptberuflich Nanotechnologie an der Cornell University. Aber dem ereignisreichen, zuweilen brutalen Kampf zwischen den Guten und den Bösen, den der Autor aus diesen Zutaten sich entwickeln lässt, fehlt es häufig an Plausibilität. Der Spannung zuliebe macht McEuen seinen Pilz so bedrohlich und unüberwindlich, dass er hinterher das Happy End sogar etwas gewaltsam herbeiführen muss – mit einem anderen Pilz, der sich selbst und damit ein Gegengift auf demselben Weg verbreitet wie der Killer. Kaum zu glauben, dass diese Medizin wirklich jeden Infizierten erreicht.

CHRISTOPH PÖPPE



Peter Laufmann

**Scott und Amundsen. Der tödliche Wettlauf zum Pol**

Frederking & Thaler, München 2011. 144 S., € 24,95

Wer hat nicht als Jugendlicher mit heißen Ohren die großen Eroberungen der Welt gelesen? Der Wettlauf zum Südpol zwischen dem Norweger Roald Amundsen und dem Briten Robert Falcon Scott im Jahr 1910 zeichnete sich dabei durch besonderen, aber auch fatalen Ehrgeiz aus: Hunde oder Ponys? Seehundfleisch oder Sauerkraut? Schlitten mit Motor oder ohne? Immerhin ging es um Weltruhm für die eigene Person und die eigene Nation. Der studierte Forstwissenschaftler und Journalist Peter Laufmann schildert dieses Abenteuer, bei dem Scott ums Leben kam, spannend und mit historischen Rückblenden in einem eindrucksvoll bebilderten Buch.

REINHARD BREUER



Josef Nussbaumer, Andreas Exenberger, Stefan Neuner

**Unser kleines Dorf. Eine Welt mit 100 Menschen**

IMT, Kufstein 2010 ([www.unserkleinesdorf.com](http://www.unserkleinesdorf.com)). 192 S., € 27,90

Man stelle sich die Welt als ein Dorf mit 100 Einwohnern vor, eingeteilt in sechs Weiler. Alle globalen Zahlen werden entsprechend heruntergerechnet. Die Idee ist innovativ, und die Zahlen machen Spaß: Nur vier Einwohner können das Buch überhaupt lesen, weil sie Deutsch verstehen. Von den elf Handfeuerwaffen im Dorf sind fünf in Nordamerika – mehr als die ganze Polizei besitzt. Auf diese Weise listen die Innsbrucker Volkswirtschaftler Josef Nussbaumer und Andreas Exenberger sowie der Grafiker Stefan Neuner die Zahlen zu wichtigen globalen Themen auf und kommen letztlich zu den drei größten Problemen der Menschheit: Umwelt, Ressourcenverteilung und Gewalt. Insgesamt transportiert die – reizvolle – Darstellungsform aber nur bekannte Fakten; und leider bleiben auch die eingangs versprochenen konkreten Lösungsansätze aus.

JANINA FISCHER



Rüegg davon aus, dass sich Ängste und Traumata als physiologische Spur (Engramm) ins emotionale Gedächtnis eingraviert haben und somit auch auf dieser Ebene beeinflussbar sind.

Alles in allem versucht der Autor in diesem Buch die kartesische Trennung von Körper und Geist zu überwinden. Der Mensch stelle eine psychophysische Einheit dar, da jede geistige Aktivität mit neurophysiologischen Prozessen korreliert und der Geist in der Lage ist, Einfluss auf das körperliche Empfinden zu nehmen: »Ich postuliere deshalb, dass unsere synaptischen Strukturen nicht nur durch das gesprochene Wort, sondern auch durch verbales Denken verändert werden.«

Am Schluss des Buchs zitiert der Autor zustimmend den Schweizer Allgemeinarzt Rudolf Schuppli mit den Worten: »Das Geheimnis echter ärztli-

cher Leistung sei die Fähigkeit, Hoffnung zu machen, auch wenn das Vermögen der Medizin als Wissenschaft beschränkt sei.« Und wenn der Autor weiter schreibt »Der Arzt als Arznei ist Realität, Worte können nachweislich wie Medikamente wirken«, dann ist das natürlich eine Aufforderung, dem gesprochenen Wort sowie dem Arzt als Person wieder mehr Platz einzuräumen. Angesichts immer knapperer Kassen und einer zum Teil hoffnungslosen personellen Unterbesetzung in vielen Kliniken wird dieser Ruf wohl ungehört in den Weiten des alltäglichen ärztlichen Betriebs verhallen.

#### Eckart Löhr

Der Rezensent hat Philosophie und Germanistik studiert; er arbeitet in der Erwachsenenbildung und ist darüber hinaus Musiker und Musiklehrer in Essen.



Paul Murdin

#### Die Kartenmacher

Der Wettstreit um die Vermessung der Welt

Aus dem Englischen von Susanne Kuhlmann-Krieg. Artemis & Winkler, Mannheim 2010.

300 Seiten, € 19,95

#### WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

## Schiffbruch und Messerstecherei

Die Vermessung des Pariser Meridians geriet zu einem gigantischen Unterfangen, das nebenher das damalige Weltbild umkremelte.

Was mir heute mein GPS-Empfänger in Sekundenschnelle erzählt – wo auf der Erde ich gerade bin –, das herauszufinden war vor 350 Jahren noch äußerst mühsam. Paul Murdin, Astronom und langjähriger Mitarbeiter der Sternwarte Greenwich, erzählt von der schweißtreibenden Vermessung Europas im 17. und 18. Jahrhundert, die dafür die Grundlage schuf.

Der Anlass für das große Unternehmen war ziemlich banal. Angeblich zürnte der Finanzminister des Sonnenkönigs,

Jean Baptiste Colbert (1619–1683), darüber, dass jegliches Kartenwerk ungenau und keineswegs geeignet war, die Regionen des Landes ihrer realen Größe nach zu besteuern. Die frisch gegründete französische Akademie der Wissenschaften beauftragte daher den Astronomen und Jesuiten Jean Picard (1620–1682), mit Hilfe der Triangulation das Land zu vermessen. Der Niederländer Willebrord Snellius (1580–1626) hatte zuvor diese neue Technik eingesetzt, bei der man ausgehend von einer



# talking-tree.de

AUS DEM LEBEN EINER EICHE

20°



Hallo! Ich bin ein Baum und ich tweete.

Mit Hilfe moderner Messtechniken gibt uns die mehr als 150 Jahre alte Stieleiche im Botanischen Garten von Erlangen direkte Einblicke in ihr aktuelles Befinden und in alles, was sich in ihrer Umgebung abspielt.

[www.talking-tree.de](http://www.talking-tree.de)

Präsentiert von

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Powered by

**SIEMENS**



**Universell verwendete Maßeinheiten hätten die Katastrophe verhindert: Die Raumsonde Mars Climate Orbiter (hier beim Zusammenbau in einem staubfreien Raum) verglühte in der Marsatmosphäre, weil bei ihrer Herstellung andere Einheiten verwendet worden waren als im Betrieb.**

einzigen Messstrecke nur durch Winkelmessungen ein Netz aus beliebig vielen Dreiecken über das Land legt.

Von Paris aus arbeitete sich Picard gleichermaßen nach Nord und Süd vor und schuf damit eine Referenzlinie für alle folgenden Vermesser. Dieser nicht erst seit dem Film »Sakrileg« weltberühmte Meridian zerteilt das Land ungefähr in der Mitte und verläuft exakt durch die Pariser Sternwarte.

Unabhängig von der Triangulation bestimmten Picard und seine Kollegen, namentlich Giovanni Domenico Cassini (1625–1712), Längen- und Breitengrade markanter Orte durch astronomische Messungen. Um beispielsweise den Längengrad von Brest zu bestimmen, muss man wissen, wann dort die Sonne ihren Höchststand erreicht. Da man aber die Uhrzeiten von Paris und Brest mangels genauer und transportabler Uhren nicht vergleichen konnte, mussten die Vermesser unabhängige astronomische Zeitgeber zu Hilfe nehmen, etwa die Bedeckung eines Jupiter-

monds durch den Planeten selbst. Zum Abgleich mit der lokalen Sonnenzeit mussten sie mit einer meterhohen Pendeluhr die Kirchtürme und Berggipfel besteigen, die ihnen als Triangulationspunkte dienten.

Cassini glaubte anhand seiner Triangulationen südlich von Paris belegen zu können, dass der Erdradius an den Polen größer sei als der am Äquator. Die Welt kreise somit wie ein aufrecht stehendes Ei um die Sonne. Der Physiker Jean-Jacques d'Ortous de Mairan (1687–1771) untermauerte dieses Bild sogar mit einer gewagten Theorie, welche die Erdanziehung mit dem Krümmungsradius der Oberfläche verknüpfte. Das stand in krassem Gegensatz zu Isaac Newton (1643–1727), der in seinen »Principia« aus dem von ihm entdeckten Gravitationsgesetz auch den (korrekten) Schluss gezogen hatte, dass die Erde an den Polen abgeplattet ist.

Da Mairan seine Theorie auf Ideen von René Descartes (1596–1650) gegründet hatte, geriet die philosophische Frage, ob die Gravitation eine Nahwirkung (Descartes) oder eine Fernwirkung (Newton) sei, zu einer Angelegenheit von nationaler Bedeutung. Zur abschließenden Klärung der Frage beschloss die Pariser Akademie daher, zwei Expeditionen zu entsenden, um die begrenzten Messergebnisse aus Frankreich mit aussagekräftigeren aus der Nähe von Nordpol und Äquator zu ergänzen.

Die Reisen von Picard und Cassini innerhalb Frankreichs waren bereits innerföhrlich aufreibend. Noch weit mehr plagte sich die Lappland-Expedition mit sommerlichen Mückenschwärmen und unglaublichen Schneemassen im Winter. Eine zweite Forschergruppe arbeitete in Südamerika unter großer Hitze und kämpfte in den Anden gegen die Höhenkrankheit. Zuletzt wurde die Expedition beinahe zum Fiasko, als sich eine Menge von bewaffneten Ein-

heimischen auf die Wissenschaftler stürzte.

Alle Strapazen sollten sich jedoch in mehrfacher Hinsicht auszahlen: Die Ergebnisse beider Expeditionen bewiesen, dass die Erde an den Polen abgeflacht ist. Der Schwede Anders Celsius (1701–1744) entwickelte nach der Lapplandreise die heute gebräuchliche Temperaturskala. Pierre Bouguer (1698–1758) entdeckte in Peru Regionen mit abnorm starkem Schwerefeld – die nach ihm benannte Bouguer-Anomalie. Und Newton gelangte zu der uneingeschränkten Autorität, die er bis heute innehat.

Es macht Spaß, dem Autor in die Welt der Vermesser zu folgen, denn »Die Kartenmacher« erzählt von richtigen Menschen, die lieben und leiden: mit Frauengeschichten im fernen Lappland oder lebenslangen Depressionen, ausgelöst durch ein ungenaues Messergebnis. Das Buch ist so verworren wie die reale Geschichte, springt zwischen Personen, Orten und den Wissenschaften Mathematik, Physik, Astronomie und Philosophie hin und her, welche die frühen Landvermesser allesamt beherrschen mussten. Murdin wagt manchmal etwas trockene Exkurse: in das Reich der Geometrie und die Funktionsweise von Theodoliten, Oktanten und Repetitionskreisen. Am Ende führt er jedoch alle Stränge wieder sauber zusammen.

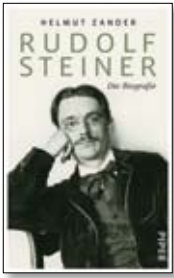
Die aus heutiger Sicht primitive Messtechnik war im 17. Jahrhundert auf dem neuesten Stand – ganz so wie heute die Satellitennavigation, die im Buch nur ein bescheidenes Kapitel einnimmt. Sie folgt noch immer dem Prinzip Picards: der exakten Bestimmung von Strecken und Zeiten. Die Wissenschaftler legten damals den Grundstein für die Ausweitung des Welthandels, die Standardisierung der physikalischen Einheiten und die Einführung internationaler Zeitzonen und leisteten dadurch unerlässliche Vorarbeit für den rasanten technischen Fortschritt des 20. Jahrhunderts.

**Karl Urban**

Der Rezensent hat Geowissenschaften studiert und ist freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869



Helmut Zander

**Rudolf Steiner**

*Die Biografie*

Piper, München 2011. 536 S., € 24,95

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

## Eine Anti-Hagiografie

Heiliger oder Spielball von Geschichte und Gesellschaft?  
Helmut Zander fordert die Anthroposophen heraus.

Rudolf Steiner (1861–1925) ist der Vater der Anthroposophie. Er schuf die Basis für Waldorfpädagogik, ökologischen Landbau, anthroposophische Medizin und Architektur. Zu seinem 150. Geburtstag legt nun der Historiker und katholische Theologe Helmut Zander, ein bekannter Kritiker der Anthro-

posophie, eine Biografie vor. Zander, der 2007 das 1800 Seiten starke Mammutwerk »Anthroposophie in Deutschland« veröffentlichte, ist Privatdozent an der Humboldt-Universität Berlin und arbeitete zuletzt als Fellow an einem internationalen Kolleg der Ruhr-Universität Bochum.

Der Einstieg in das Buch ist programmatisch. Die zweiseitige Diskussion um Steiners exaktes Geburtsdatum ist etwas verwirrend, transportiert aber eine wichtige Botschaft: Man nehme Rudolf Steiners Autobiografie »Mein Lebensweg« nicht beim Wort. Nach Zanders Überzeugung handelt es sich primär um eine rückblickende, große Spiritualitätserzählung, um eine kunstvoll arrangierte Partitur; in der vorliegenden Biografie hingegen könne man lesen, wie es wirklich war.

Zu Steiners Kindheit gibt es nur wenige Quellen. Als Sohn eines Bahnangestellten wächst er an der Grenze des deutschsprachigen Habsburgerreiches auf. Dort sieht Zander die Wurzeln für Steiners nationalistische Prägung. In Wien beginnt Steiner ein Studium der Naturwissenschaften und der Germanistik, entwickelt aber bald ein lebhaftes Interesse für die Philosophie. Er bricht sein Studium ab und wird Hauslehrer. Später erhält er über die Anfertigung

# 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](http://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, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis

▶ Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

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



Frauen in Steiners Leben: oben von links nach rechts seine philosophische Gesprächspartnerin Rosa Mayreder in Wien, seine erste Ehefrau Anna Eunike in Weimar und Marie von Sivers, mit der er 1901 zur Theosophie fand und die er 1914 heiratete. Unten Steiner 1907 in der Theosophischen Gesellschaft mit Annie Besant, die er anfangs zutiefst verehrte; später trennten sich ihre Wege.

einer Dissertation doch noch einen Abschluss und versucht, eine akademische Laufbahn einzuschlagen, scheitert jedoch. Nach verschiedenen Tätigkeiten als Editor, Leiter eines literarischen Magazins und Dozent an der Arbeiterbildungsschule tritt er in die Theosophische Gesellschaft ein und steigt bald zu deren Generalsekretär auf.

Bis dahin zeichnet Zander das Bild eines Mannes, der den Mund gerne zu voll nimmt und sich selbst überschätzt. Anscheinend ist Steiner unglücklich, raucht viel, trinkt und bekommt seinen Alltag nicht in den Griff. Zeitgenossen beschreiben ihn als unnahbar, sogar etwas unheimlich. Immer wieder weist Zander darauf hin, dass Steiner ein fachlicher Stümper sei, der polemische Halbwahrheiten verbreite. Bei seinen ständigen Geldsorgen kommt ihm das Angebot,

Vorträge für die Theosophische Gesellschaft zu halten, gerade recht. Nach einer eher atheistischen und materialistischen Phase findet er nun zu einer spirituellen Weltanschauung. Steiner selbst bezeichnet rückblickend seine vorthosophische Zeit als »Prüfungszeit« des Schülers auf dem Weg der Einweihung.

Zander spart nicht mit Hinweisen darauf, dass es sich bei den Mitgliedern der Theosophischen Gesellschaft durchgehend um Adel und gut situiertes Bürgertum handelte: »Der typische Theosoph war eine Frau: gebildet, nicht arm und Protestantin, eine Bürgersfrau eben, die aus Mangel an Alternativen Theosophin wurde.« Man erhält den Eindruck, dass Steiner seinen plötzlichen Aufstieg einer Schar gelangweilter Millionärgattinnen verdanke, die das Geld ihrer Männer für Spinnereien verprassten.

An diesem Punkt wird das Buch fast ein bisschen spannend. Steiner scheint in den Sog der Macht zu geraten und wird zum charismatischen Anführer. »Menschen, die bereit waren, sich verzaubern zu lassen, trafen auf einen Mann, der bereit war, die große Sinnstiftung vorzunehmen.« Die deutsche Theosophische Gesellschaft spaltet sich bald von ihrer indischen Mutter ab. Einige Zeit später geht aus ihr die Anthroposophische Gesellschaft hervor. Steiner ist ihr Vorsitzender, hält unzählige Vorträge, ist ständig auf Reisen und erbaut nebenbei ein spirituelles Zentrum in Dornach. Am Ende stellt Zander die Frage, ob Steiner nicht eher ein von den Erwartungen seiner Anhänger Getriebener denn Herr über sein eigenes Leben gewesen sei.

Auch über den Tod Steiners stellt Zander einige Vermutungen an: Die Obduktion durch Ita Wegman sei nur vorgetauscht, um die Todesursache, möglicherweise Prostatakrebs, zu vertuschen und das Bild vom erleuchteten Eingeweihten aufrechtzuerhalten. Aus diesem Grund sei auch der Leichnam nicht, wie von Steiner gewünscht, in Dornach bestattet, sondern verbrannt worden.

Für die Anthroposophen, von denen nicht wenige Steiner fast wie einen Heiligen verehren, ist Zanders Befund starker Tobak: Steiner habe von nichts eine

Ahnung, stelle ohne fundiertes Wissen Behauptungen auf, die er als höhere Einsichten deklariere, und wische jegliche Diskussion mit der Autorität des Sehers als unerleuchtete Kleingeisterei vom Tisch. Seine Erkenntnisse habe er weder durch intensives Studium noch durch intuitive Versenkung gefunden, sondern häufig unvorbereitet aus dem Stegreif erfunden oder von anderen abgekupfert. Einige seiner Thesen habe er nachträglich ins Gegenteil verkehrt, womit er sich flexibler gezeigt habe als einige seiner heutigen Anhänger. Zanders hier und da eingestreute Anerkennung von Steiners Werk wirkt eher ironisch, seine mehrfach vorgetragene Erklärung, er wolle lediglich Steiners Leben aus wissenschaftlicher Sicht im Umfeld der damaligen Zeit analysieren, wie ein Beschwichtigungsversuch.

Kritiker der Anthroposophie mag dieses Buch erfreuen, überzeugte Steiner-Anhänger werden sich entweder darüber ärgern oder den Eindruck gewinnen, sie seien einem Betrüger aufgesessen. Als Nichtanthroposoph erhält man sehr interessante Einblicke in das Umfeld Steiners und die vielen Einflüsse, die von außen auf ihn einwirkten. Man erfährt allerdings relativ wenig über die Inhalte seiner Weltanschauung und seine inneren Beweggründe. So beschränkt sich der Autor vorwiegend darauf nachzuweisen, dass Steiner kein Heiliger ist, womit der Historiker Zander sich in den Dienst des Theologen stellt.

Das Verdienst des Werks besteht vor allem darin, dass es Steiner mit seinen Ideen in einen gesellschaftlichen und geschichtlichen Kontext einordnet. Damit legt es einen Grundstein für die Auseinandersetzung mit dieser Person und schafft einen Gegenpol zur ideologisch verklärten Sicht der Anthroposophen. Es will allerdings nicht zum historisch-wissenschaftlichen Anspruch des Autors passen, dass er ausgesprochen tendenziös schreibt und ein wenig objektives Bild liefert.

#### Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.

# AcademiaNet

Das Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen bietet:

- :: Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter deutscher Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände,
- :: individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien,
- :: flankierende redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«,

kurz: einen einzigartigen Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen.

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

*»In Deutschland gibt es viele herausragende Wissenschaftlerinnen in allen Fachrichtungen. Sie bei ihrer weiteren Karriere zu unterstützen, ist ein wichtiges Anliegen. AcademiaNet bietet den Wissenschaftlerinnen die große Chance, ihre Kompetenzen noch besser und sichtbarer als bisher in den Wissenschaftsbetrieb einzubringen.«*

**Dr. Angela Merkel**



## Supraleitende Computer

»IBM wird noch in diesem Jahr einige Rechenmaschinen-Schaltungen mit Cryotrons – supraleitende Stromkreise, die als Speicherelemente benutzt werden – vorführen. Die Schaltzeiten liegen in der Größenordnung von  $10^{-9}$  s. Cryotrons sind billig herzustellen, zuverlässig und benötigen wenig Leistung. Sie arbeiten bei Temperaturen des flüssigen Heliums.« Naturwissenschaftliche Rundschau 9, September 1961, S. 354

## Zellen mit Gedächtnis

»Neues Licht in das Geheimnis der Organbildung werfen die amerikanischen Wissenschaftler Weiß, Taylor sowie Andres. Sie entnahmen 1–2 Wochen bebrüteten Hühnerembryonen Zellen von Nieren, Leber und Haut, und praktizierten diese in ein Hühnerei, das einen 1 Woche alten Keim enthielt. Bei der Bebrütung entwickelten sich die Zellen in der Weise, die der Struktur der Organe entsprach, aus denen die Zellen gewonnen worden waren. Jede Zelle hat also ein ›Gedächtnis‹, was aus ihr werden soll.« Kosmos, September 1961, S. 354

## Metallene Putzhilfe

»Eine Antwort auf die verzweifelten Stoßseufzer von Hausfrauen und Feuerwehrkommandanten ist dieser ferngesteuerte Roboter. Der MM.47 schafft fast alles, von Haushaltsarbeiten bis zum



Umgang mit radioaktivem Material. Er kann sogar in brennende Räume gehen und Feuer bekämpfen, während sich sein Bedienungsmann in sicherer Entfernung hält. Der fast 50 kg wiegende Roboter besteht aus Kunststoff und hat etwa 3000 Mark gekostet.« Populäre Mechanik 72, September 1961, S. 56



MM.47 weiß, was Frauen wünschen.



## Gleislose Straßenbahn

»Um für die vom Bahnhof Blankenese entfernt liegenden Teile die Möglichkeit einer ausgiebigen Bebauung zu schaffen, hat man den

Bau einer gleislosen Straßenbahn beschlossen. Die Räder laufen auf Vollgummireifen, wodurch Lärm vermieden wird. Der Betrieb erfolgt elektrisch mittels einer doppelten Oberleitung. Die Wagen fassen je 22 Personen. Der Einheitstarif von 10 Pf gilt für die einfache Fahrt.« Elektrotechnische Zeitschrift 36, September 1911, S. 912



Wunderwerk der Technik: das erste Wellenkraftwerk

## Fisch für Dinosaurier

»Auf Grund neuerer Funde zweifelt man, ob die Dinosaurier überhaupt als Pflanzenfresser in Betracht kommen. Bei einem Pflanzenfresser würde der lange Hals vorteilhaft sein, da das Tier, ohne den schweren Körper von der Stelle zu bewegen, große Flächen abweiden könnte, aber es brauchte dann der Kopf nicht so klein im Verhältnis zum Halse zu sein. Dagegen erklären sich diese Besonderheiten durch die Annahme, daß die Sauropoden unter Wasser schnelle Bewegungen ausgeführt haben; denn mit der Verkleinerung des Kopfes mußte der Widerstand herabgesetzt werden, den das Wasser entgegengesetzte. Dies weist darauf hin, daß die Nahrung aus Wassertieren bestand.« Umschau 39, September 1911, S. 813

## Energie aus dem Meer

»Schon öfters hat man Versuche unternommen, die Kraft der Meereswellen nutzbar zu machen. Nun hat sich in Amerika eine Gesellschaft gebildet, die den Wellenmotor auszuheben gedenkt. Zwei Bojen, die mit Wasser gefüllt und an senkrechten Radwellen befestigt waren, folgten den Wellen. Durch Gelenke wurde diese auf- und abwärtsgehende Bewegung auf eine Radwelle übertragen.« Prometheus 1141, September 1911, S. 780

## Eine strahlende Schönheit – die Höhensonne »Original Hanau Soliput«

Attraktive Bräune und eine positive Wirkung auf die Gesundheit – das versprachen die Heimsonnen der 1950er Jahre und trafen damit den Nerv der Zeit. In der Euphorie des Wirtschaftswunders nutzten immer mehr Menschen ihre bessere finanzielle Lage, um in den Urlaub zu fahren und sich ein paar schöne Tage in den Bergen, am See oder am Meer zu gönnen. Gebräunte Haut zeugte nicht länger von harter Arbeit im Freien, sondern wurde mit Urlaub und Wohlstand assoziiert. Wer es sich nicht leisten konnte wegzufahren, wollte dennoch nicht abseitsstehen und holte sich die Sonne in die Wohnung.

Heimsonnen galten außerdem als probates Mittel zur Vorbeugung von Mangelkrankheiten, wie sie in den ersten Nachkriegsjahren häufiger auftraten. So sollte etwa eine Bestrahlung mit ultraviolettem Licht, zusammen mit dem obligatorischen Löffel Lebertran, Rachitis vorbeugen.

Das Funktionsprinzip wurde bereits ein halbes Jahrhundert zuvor entwickelt. Dem Chemiker und Physiker Richard Küch, der damals bei der Firma Heraeus arbeitete, war es 1899 gelungen, Bergkristalle bei sehr hohen Temperaturen

zu schmelzen und daraus ein klares und blasenfreies Quarzglas herzustellen. Nach fünf Jahren Entwicklungsarbeit stellte er eine Quecksilberlampe aus Quarzglas vor, das – anders als herkömmliches Glas – ultraviolette Strahlung passieren lässt. Anfangs diente diese Lampe zur Beleuchtung in Fabrikhallen und auf Industriegeländen. Andererseits hatten Wissenschaftler entdeckt, dass »Höhenstrahlung«, also das UV-Licht in den Bergen, heilsam sein konnte. Angeregt durch diese Forschung modifizierte Küch seine Erfindung und entwickelte eine künstliche »Höhensonne«, also eine leichter zu handhabende UV-Lampe für Arztpraxen und Krankenhäuser. Dort diente sie beispielsweise zur Sterilisation von Wunden oder zur Behandlung von Hautkrankheiten. Schon bald wurden die Geräte kleiner, so dass sie auch im Haushalt Platz fanden; außerdem statteten die Hersteller sie zusätzlich mit Infrarotleuchten aus.

Die Höhensonne »Original Hanau Soliput« ist von Design und Aufbau her typisch für eine Heimsonne der 1950er Jahre. Im Deckelteil befinden sich die Quarzleuchte und die Infrarotstrahler. Auf dem Sockel aus Phenoplast, einem der ersten Kunststoffe, sind eine Signaluhr und die Schalter zur Auswahl zwischen Ultraviolett- und Infrarotstrahlung angebracht. Der kräftige Farbton des Geräts sollte wohl vor allem Frauen ansprechen. Zur platzsparenden Aufbewahrung klappte man die Höhensonne einfach zusammen und verstaute sie in einer farblich passenden PVC-Tasche.

Die Risiken der UV-Strahlung waren damals der breiten Öffentlichkeit noch nicht bekannt. Immerhin wusste man bereits, dass sie den Augen schaden kann. Daher wurden mit der Höhensonne auch Schutzbrillen geliefert. Inzwischen hat die Sonnenbank die klassische Heimsonne nahezu verdrängt. Sie bietet Ganzkörperbräunung, ist komfortabler zu nutzen, man liegt auf einem Schutzglas, und die Röhren strahlen weniger energiereiches UV-Licht ab. Das alles ändert aber nichts daran, dass das Hautkrebsrisiko bei häufiger Benutzung erhöht ist.

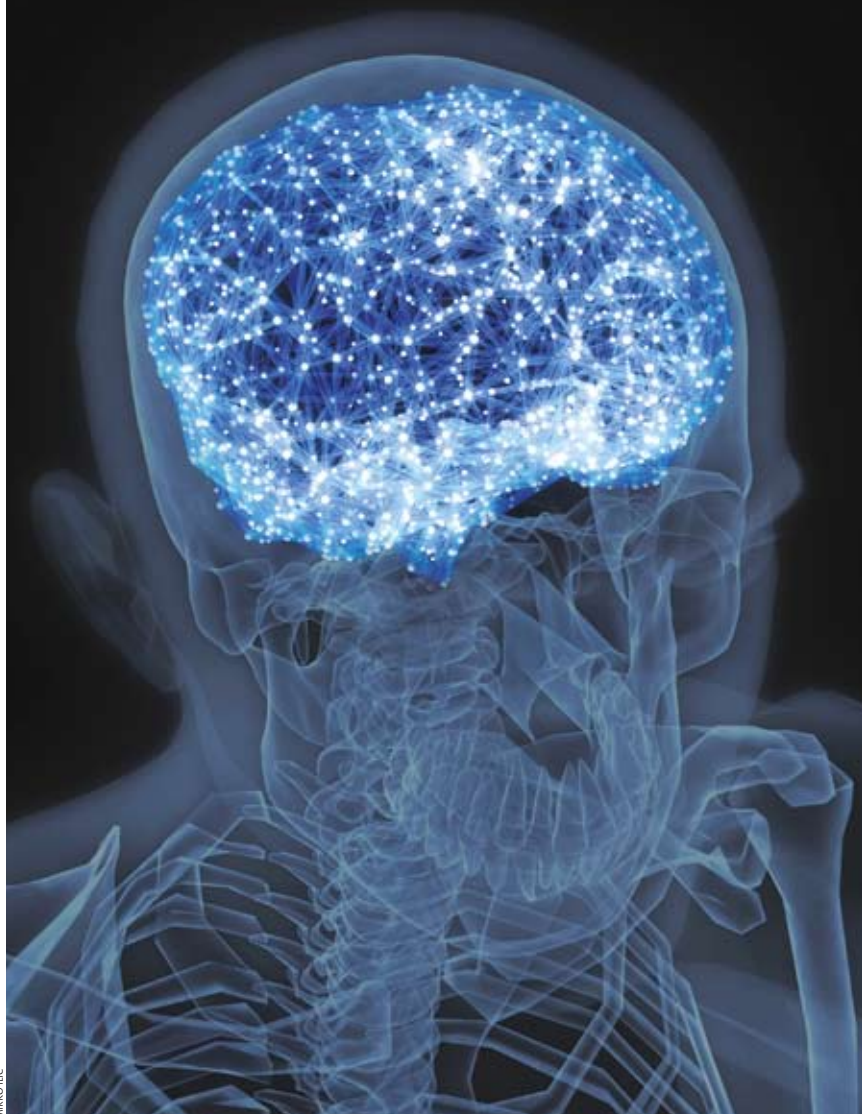
**Margherita Lasi** ist Kuratorin für Life Sciences am Deutschen Museum in München. Sie studierte Biologie an der LMU München, wo sie auch promoviert hat.

Die Höhensonne »Original Hanau Soliput« brachte die Sonne ins eigene Heim. Ultraviolettes und infrarotes Licht, per Zeitschaltuhr aktiviert, sollten zur »gesunden Bräune« verhelfen und Mangelkrankungen vorbeugen.



## Netzwerk Gehirn

Die Verknüpfungen der 100 Milliarden Nervenzellen unseres Gehirns bilden die Grundlage des menschlichen Geistes. Um sie zu entschlüsseln, betrachten Neuroforscher Gemeinsamkeiten mit anderen komplexen Systemen – wie etwa Aktienmärkten



MARKO ILIC

### Erster Geschlechtsakt

Vor 375 Millionen Jahren erfanden die heute ausgestorbenen Panzerfische (Plakodermen) die innere Befruchtung mit »Penis« und Lebendgeburt. Von diesen Fischen stammen wir ab. Aus den gleichen anatomischen Strukturen entwickelten sich Hinterbeine und äußere Geschlechtsorgane der landlebenden Wirbeltiere

### Atommüll unter Beschuss

Unser nuklearer Abfall wird die Umwelt noch in Hunderttausenden von Jahren gefährden. Dieser Zeitraum lässt sich aber durch neue Verfahren drastisch abkürzen, hoffen Forscher. In Transmutationsverfahren beschießen sie langlebige radioaktive Stoffe mit Neutronen und wandeln sie so in kurzlebige Nuklide um



REDOX PICTURES / THE NEW YORK TIMES / VINCENT LAURET

### Brennpunkt: Cyberangriff auf das Stromnetz

Mit der Automatisierung der Stromversorgung wächst die Gefahr, dass Hacker in die Kommunikationsnetze eindringen und Schadsoftware platzieren. Diese könnte Netzbereiche lahmlegen – mit gravierenden Folgen

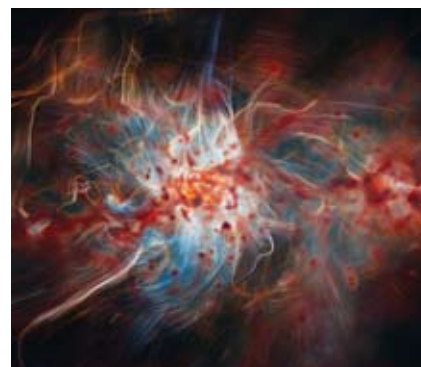


ILLUSTRATION: JAMES E. GEACH UND ROB ERWIN

### Die verlorenen Galaxien

Nach neuesten Schätzungen enthält das Universum 200 Milliarden Galaxien – doch die im Kosmos vorhandene Materie würde für zehnmal mehr reichen. Warum sind sie so selten?

#### 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](http://www.spektrum.com/newsletter)



# Spektrum **EXTRA**

DER WISSENSCHAFT

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

## Die Zukunft des Gehirns

Können Forscher  
bald Gedanken lesen?

Neurotechnologie  
auf dem Vormarsch

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

Forum MENSCH NATUR TECHNIK  
Eine Kooperation von Spektrum DER WISSENSCHAFT und  VolkswagenStiftung



**4 Der Traum vom Gedankenlesen**

*John-Dylan Haynes*

Mit Hilfe ausgeklügelter Computerprogramme können Wissenschaftler MRT-Scans erstaunlich viel darüber entlocken, was die jeweilige Person zum Zeitpunkt der Aufnahme dachte. Die Anwendungsfelder reichen vom Lügendetektor bis zur Werbeforschung



**INTERVIEW**

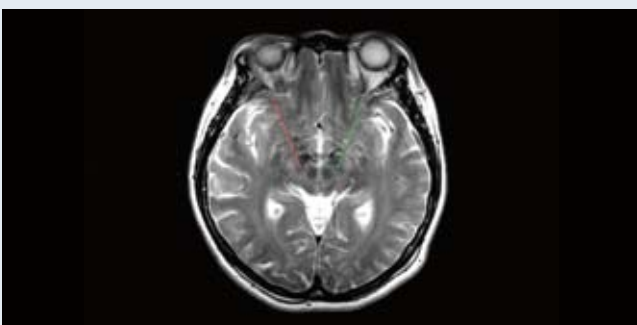
**12 Blick ins Gehirn von seelisch Kranken**

Der Psychologe und Mediziner Frank Schneider erklärt, was bildgebende Verfahren für sein Fachgebiet bereits leisten – und welche Hoffnungen er noch in sie setzt



**16 Direkter Zugang zum Gehirn**

*Henning Scheich und Frank W. Ohl*  
Cochlea-Implantate haben gezeigt: Neuroprothesen können Informationen in das Gehirn einspeisen. Nun hoffen Mediziner, neue Wege zu finden, um Funktionsstörungen zu korrigieren und Gedächtnisleistungen zu verbessern



**24 Neuronaler Schrittmacher**

*Volker Sturm*

Überaktive Neurone verursachen Morbus Parkinson und andere motorische, aber auch psychiatrische Störungen. Die tiefe Hirnstimulation kann diese Nervenzellen blockieren und so die Symptome lindern



Carsten Könneker  
Chefredakteur  
koenneker@spektrum.com

## Die Zukunft des Gehirns

**K**aum eine Disziplin hat in den letzten Jahren so viel von sich reden gemacht wie die Neurowissenschaft. Nachdem verschiedene Initiativen wie die amerikanische »Decade of the Brain« der Ergründung unserer Hirnprozesse erhebliche Finanzmittel und Aufmerksamkeit bescherten, hagelte es Fachpublikationen sowie Versuche, die komplexe Materie einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Keine neurologische oder psychiatrische Erkrankung, die man nicht in absehbarer Zeit heilen oder zumindest deutlich besser behandeln könne, so war darin oft zu vernehmen. Kein philosophisches Rätsel, das nicht seiner baldigen Lösung durch die Neurowissenschaftler harre. Da erstaunt es kaum, dass auch etliche Forscher aus anderen Bereichen auf den Zug aufsprangen. So entstanden Wissensgebiete wie Neuroästhetik, Neuroökonomie, Neuromarketing.

Woraufhin das Absehbare geschah: Kritische Stimmen erhoben sich und brandmarkten die Auswüchse des »Neuro-Hypes« – verkennend, dass sich sehr wohl wichtige Erkenntnisse einstellten. Vor allem wurden neue Technologien entwickelt, die uns das Gehirn und seine Funktionsweise näherbringen. Einige dieser Technologien, wie die funktionelle Magnetresonanztomografie oder die Optogenetik, zielen darauf ab, die komplizierten neuronalen Prozesse immer besser zu verstehen. Zwar sind wir noch weit davon entfernt, Gedanken zu lesen. Doch bestimmte Hirnaktivitäten lassen sich mit kognitiven Inhalten in Beziehung setzen; die Methode erwächst gerade den Kinderschuhen. Manche Psychiater versuchen heute gar, seelische Störungen über aus den Fugen geratene physiologische Vorgänge zu diagnostizieren – auch auf der Suche nach besseren Therapiekontrollen. Andere

Technologien zielen darauf ab, Gehirnprozesse direkt zu manipulieren, um neurologische Symptome zu lindern oder Defizite zu kompensieren. So helfen Innenohrprothesen manchen Gehörlosen, wieder Geräusche, ja sogar Sprache wahrnehmen zu können. Und die tiefe Hirnstimulation schaltet bei Parkinsonpatienten die Symptome ihrer Schüttellähmung weit gehend aus; schon erprobten Forscher diese Technik für weitere Erkrankungen, etwa Depression und Zwangsstörungen.

**Wir haben führende Protagonisten der Neuroforschung** gebeten, für dieses **Spektrum Extra** den aktuellen Stand der Entwicklung festzuhalten. Unsere Autoren sind dabei gleichzeitig Diskutanten. Im Rahmen des Forums »Mensch Natur Technik« der VolkswagenStiftung werden sie am 31. August und am 25. Oktober 2011 gemeinsam mit weiteren Experten über die Erkundung des Menschen durch sich selbst sowie die Leistungsversprechen der Neurotechnologien debattieren – inklusive der ethischen Fragen, die sich aufdrängen. Sowohl die beiden hochkarätig besetzten Veranstaltungen als auch das vorliegende **Spektrum Extra** haben wir in enger Kooperation mit der Stiftung entwickelt. Mehr Informationen über diese Zusammenarbeit sowie das detaillierte Programm der in Hannover stattfindenden Foren finden Sie auf der Webseite [www.spektrum.de/mnt](http://www.spektrum.de/mnt).

Herzlich Ihr

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Forum MENSCH NATUR TECHNIK 2011



**Die Vermessung der Gedanken? Wie der Mensch sich selbst erkundet**

31.08.2011, 18.00 Uhr, Schlossküche Herrenhausen, Hannover  
Mit Prof. Dr. John-Dylan Haynes, Prof. Dr. med. Dr. rer. soc. Frank Schneider,  
Dr. Felix Schürmann und Prof. Dr. Gottfried Vosgerau

**Der optimierte Mensch? Von den Leistungsversprechen der Neurotechnologien**

25.10.2011, 18.00 Uhr, Schlossküche Herrenhausen, Hannover  
Mit Prof. Dr. Niels Birbaumer, Prof. Dr. Michael Pauen, Prof. Dr. Henning Scheich  
und Prof. Dr. Volker Sturm

# Der Traum vom Gedankenlesen

Maschinen, die Gedanken lesen können, galten bislang als reine Sciencefiction. Sie sind es auch – noch. Mit Hilfe ausgeklügelter Computerprogramme lassen sich MRT-Scans allerdings bereits erstaunlich viele Informationen darüber entlocken, was die jeweilige Person zum Zeitpunkt der Aufnahme dachte. Die Anwendungsfelder reichen vom Lügendetektor bis zur Werbeforschung.

Von John-Dylan Haynes

Im Alltag können wir aus der Mimik, Gestik oder Körperhaltung viel über die Gedanken eines Menschen erfahren. Am Gesichtsausdruck lässt sich beispielsweise ablesen, ob er fröhlich, traurig oder wütend ist. Trotzdem ist unsere Fähigkeit, die Innenwelt anderer zu erkennen, sehr begrenzt. Oft täuschen wir uns in ihren Gedanken und Gefühlen und können auch deren Gründe anhand der Mimik nur schwer erkennen. Für Neurowissenschaftler liegt da der Gedanke nahe, dass sich diese Informationen vielleicht direkt der Hirnaktivität entnehmen lassen.

## AUF EINEN BLICK

### OFFENGELEGTE INNENWELT

**1** Mittels moderner **bildgebender Verfahren** und spezieller **Algorithmen** lassen sich heute bereits aus der Aktivität eines Gehirns Gedanken auslesen – etwa ob jemand an ein bestimmtes von verschiedenen zur Auswahl stehenden Tieren denkt.

**2** Allerdings ist dafür noch ein aufwändiges **Training des Computerprogramms** mit beispielhaften Aktivitätsbildern notwendig; außerdem lassen sich danach nicht automatisch auch die Gedanken anderer Menschen interpretieren.

**3** Die bisherigen **Erfolge im Gedankenlesen** führten aber immerhin bereits zu ersten Anwendungsversuchen, etwa als Lügendetektor oder zur Untersuchung des Kaufverhaltens.

Ein Beispiel dafür liefert etwa der amerikanische Sciencefictionfilm »Future World« aus dem Jahr 1976, in dem eine Maschine vorgestellt wird, die Gedanken aus der Hirnaktivität herauslesen kann. Eine Journalistin setzt sich unter einen Helm, der aussieht wie eine Kombination aus Trockenhaube und modernem Magnetenzephalograf – einem Gerät zur Messung der magnetischen Felder, die auf Grund der Signale im Gehirn entstehen. Im Film zeigt sich die so aufgenommene Hirnaktivität in Form von komplexen überlagerten Wellenmustern, die mit Hilfe von Computern interpretiert werden. Ein Bildschirm stellt dann in Echtzeit die Gedanken der Journalistin als Video dar: Man sieht eine bunte Traumreise zurück in ihre Kindheit, mit Bildern von Geburtstagen, Haustieren und Freunden.

Solch eine Maschine ist natürlich auch heute noch Sciencefiction. Doch haben Forscher in den letzten Jahren erstaunliche Fortschritte darin gemacht, aus der Aktivität eines Gehirns Erlebnisse, Gedanken, Pläne, Erinnerungen und Gefühle herauszulesen.

Heute gehen die meisten Neurowissenschaftler davon aus, dass das Gehirn die alleinige Grundlage des Denkens ist. Demnach sollte mit jedem Gedanken ein einzigartiges, unverwechselbares Muster der Hirnaktivität einhergehen. Zwei verschiedene mentale Vorstellungen, etwa von einem Hund und einer Katze, haben also unterschiedliche Muster – und



GEMALT: FOTOLIA / VASILY YAKOVCHUK; TYPOGRAFISCHE BEARBEITUNG: GEHIRN&amp;GEIST

wenn ich zweimal an denselben Hund denke, ergibt sich jeweils dasselbe Muster. Sollte dies zutreffen, müsste es zumindest theoretisch möglich sein, allein aus der Hirnaktivität einer Person herauszulesen, was sie gerade denkt.

Zu diesem Zweck benutzen Forscher spezielle mathematische Verfahren zur Mustererkennung. Die Vorgehensweise ist in etwa vergleichbar mit der Identifikation von Personen anhand von Fingerabdrücken: Ist in einer Kartei für jeden Menschen der zugehörige Fingerabdruck gespeichert, kann man einen gefundenen Abdruck mit der Kartei abgleichen und so den Besitzer ermitteln. In diesem Sinn lässt sich das Muster der Hirnaktivität, das sich bei einem bestimmten Gedanken einstellt, als Fingerabdruck des Gedankens im Gehirn auffassen.

Zunächst muss man die Hirnaktivität eines Probanden bei verschiedenen Gedanken registrieren. Bei gesunden Untersuchungspersonen kommen dafür nur so genannte nichtinvasive Messverfahren in Betracht – also solche, bei denen man von außen die Hirnaktivität der Versuchsperson misst, ohne diese zu verletzen. Gängige Methoden sind die Elektroenzephalografie (EEG), welche die elektrische Hirnaktivität mit Hilfe von Elektrodenhauben aufzeichnet, und die funktionelle Magnetresonanztomografie (fMRT), die den Hirnstoffwechsel registriert (siehe Kasten S. 6). Während der Messung würde man beispielsweise dem Probanden entwe-

**Vorstellungen, Wünsche, Gefühle – all das sind Produkte unseres Gehirns. Jetzt versuchen Forscher, sie aus den zu Grunde liegenden neuronalen Aktivitätsmustern herauszulesen.**

der abwechselnd Bilder von Hunden und Katzen zeigen oder ihn bitten, sich diese Tiere nacheinander vorzustellen. Anhand der sich dabei ergebenden Hirnaktivitätsmuster lässt sich dann ein Computer trainieren. Er lernt mit Hilfe spezieller, von Experten für maschinelles Lernen entwickelter Algorithmen, die Aktivitätsmuster optimal zu erkennen und den entsprechenden Gedanken zuzuordnen (siehe Kasten S. 7).

Jetzt kommt die entscheidende Phase: Der Computer erhält Aufnahmen der Hirnaktivität des entweder an einen Hund oder eine Katze denkenden Probanden und soll daraus bestimmen, um welches Tier es sich handelte. Dieses Verfahren liest nicht Gedanken im wörtlichen Sinne, sondern ordnet sie schlicht Hirnaktivitätsmustern zu, ohne sich darum zu kümmern, warum gerade ein bestimmtes Muster mit einem Gedanken einhergeht.

## Blick ins Gehirn

Heute stehen verschiedene Verfahren zur Messung der Hirnaktivität beim Menschen zur Verfügung. Generell unterscheidet man hier zwischen *invasiven* und *nichtinvasiven* Verfahren. Erstere kommen nur im Rahmen der Diagnostik und der Behandlung neurologischer Erkrankungen in Frage. Für sie müssen Messelektroden direkt auf der Oberfläche des Gehirns aufgebracht oder sogar in das Gewebe eingebracht werden. Der Vorteil besteht darin, dass sich so die Hirnaktivität räumlich sehr präzise und mit hoher zeitlicher Auflösung messen lässt. Allerdings können solche Verfahren aus ethischen Gründen nicht bei gesunden Probanden eingesetzt werden. Bei diesen kommen nur nichtinvasive Methoden in Betracht, bei denen die Hirnaktivität von außerhalb des Schädels gemessen wird.

Die drei wichtigsten nichtinvasiven Verfahren sind die Elektroenzephalografie (EEG), die Magnetenzephalografie (MEG) und die funktionelle Kernspintomografie (fMRT). EEG und MEG messen die elektromagnetische Aktivität von Nervenzellverbänden mit hoher zeitlicher Auflösung (im Bereich von Millisekunden). In räumlicher Hinsicht arbeiten sie allerdings eher ungenau (Auflösung im Zentimeterbereich). Im Gegensatz dazu erlaubt die fMRT eine hohe räumliche Auflösung (Millimeter), dafür aber nur eine geringe zeitliche (Sekunden). Die fMRT misst die Hirnaktivität indirekt über den Sauerstoffgehalt des Bluts im Gehirn. Wenn Nervenzellen aktiv werden, dann verbrauchen sie Sauerstoff. Dies führt zunächst zu einem lokalen Abfall der Sauerstoffsättigung des Bluts, danach steigt diese jedoch durch eine Reaktion des Gefäßsystems des Gehirns wieder an. Die gleichzeitige Messung von EEG und fMRT kombiniert die Vorteile beider Verfahren.

Nun zeichnen Forscher schon länger Bilder der Hirnaktivität bei allerlei komplexen mentalen Vorgängen auf, etwa romantischer Liebe oder religiösen Empfindungen. Allerdings stellen diese in der Regel Mittelwerte der Hirnaktivität von sehr vielen Probanden dar. In den Bildern einer einzel-

nen Person sind die Effekte zu schwach und verrauscht, um zu Tage zu treten. Bei den neuen Mustererkennungsverfahren stellt sich nun zum ersten Mal die Frage, wie genau man die Gedankenwelt eines bestimmten Menschen aus seiner Hirnaktivität ablesen kann und welche Verfahren dafür optimal geeignet sind.

Mit Hilfe solcher Mustererkennungsansätze haben Forscher in den letzten Jahren bereits verschiedene Arten von Gedanken aus der Hirnaktivität herausgelesen. Als Erstes testeten sie Bilder von Tieren, Haushaltsgegenständen, Gesichtern oder auch Kunstwerken. Sofern der Computer zuvor die Hirnaktivität des Probanden beim Betrachten oder beim Visualisieren der einzelnen Bilder gelernt hatte, konnte er allein aus den Messdaten sehr gut erkennen, an welches Bild die Person gerade dachte.

### Die Bilderwelt von Träumen rekonstruieren

Ein besonders schönes Beispiel präsentierte ein Forscherteam um Yukiyasu Kamitani aus Japan 2009. Sie dekodierten mit einem maßgeschneiderten mathematischen Modell beliebige visuelle Bilder, die eine Person sah, aus ihrer Hirnaktivität (siehe Kasten S. 8). Sogar Buchstaben konnten sie erkennen. Auf diese Weise ließe sich eines Tages vielleicht auch die Bilderwelt von Träumen rekonstruieren.

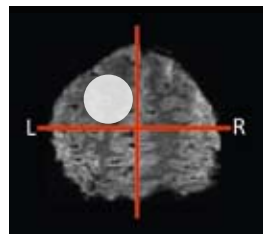
Zusammen mit Kollegen wies ich 2005 nach, dass es sogar möglich ist, unterschwellige Wahrnehmungen auszulesen. Hierfür präsentierten wir Bilder extrem kurz in einer Reihe von Ablenkzirkeln, so dass die Probanden sie nicht bewusst erkennen konnten. Dennoch war es möglich, mit den Mustererkennungsalgorithmen Spuren der Verarbeitung dieser unsichtbaren Bilder im Gehirn zu finden.

Auch abstraktere und komplexere Gedanken lassen sich inzwischen erkennen. Im Jahr 2007 registrierten wir in unserer Arbeitsgruppe am Bernstein Center der Charité Berlin in der Hirnaktivität verdeckte Absichten – sogar mehrere Sekunden bevor sie in die Tat umgesetzt wurden. Dazu ließen wir die Probanden zwischen verschiedenen möglichen Intentionen wählen. Sie mussten zwei Zahlen, die sie erst später sehen würden, entweder addieren oder subtrahieren. Die Frage lautete: Ist es nach der Entscheidung – aber noch vor der Handlung – möglich, aus ihrer Hirnaktivität zu bestimm-

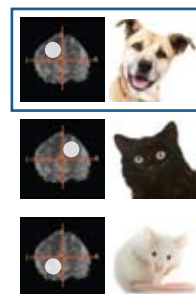
MRT, UNIKLINIKUM HEIDELBERG; HIRNSCHNITT: JOHN-DYLAN HAVNES; HUND, KATZE: ISTOCKPHOTO / MARINA WASLENNIKOVA; MAUS: FOTOLIA / ERIC ISSELE



Messung



Hirnaktivität



Klassifikation

Das Prinzip des »Gedankenlesens« ist einfach: Mit Hilfe bildgebender Verfahren registrieren Forscher die Hirnaktivität einer Person beispielsweise beim Betrachten von Tierbildern und trainieren dann einen Computer, die Tiere und die dazupassenden Hirnbilder einander zuzuordnen (schematische Darstellung).

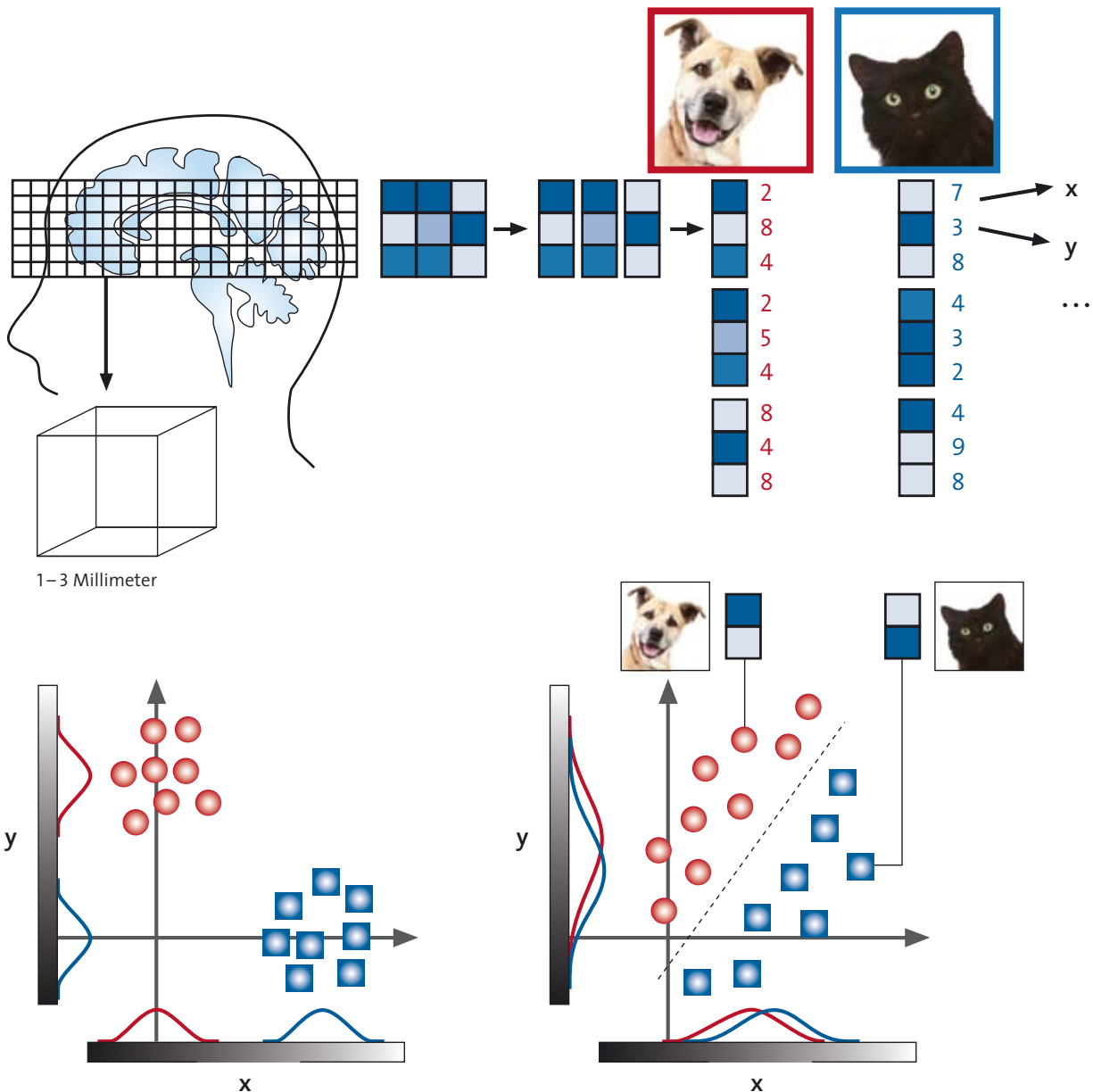
# Mustererkennung im Computer

Die **Magnetresonanztomografie misst die Hirnaktivität** in kleinen Würfeln mit einer Kantenlänge von etwa 1 bis 3 Millimetern. Diese Würfel heißen »Voxel« (kurz für Volumenpixel), das ist die Bezeichnung für dreidimensionale Bildelemente. Aus räumlichen Mustern der Aktivität in vielen solchen Voxeln lässt sich zu einem gewissen Grad schließen, was eine Person gerade denkt. Nehmen wir an, jemand stellt sich einen Hund oder eine Katze vor. Das räumliche Aktivitätsmuster in den neun farblich markierten Voxeln kann man sich wie eine Liste aus neun Zahlen vorstellen. Es unterscheidet sich, je nachdem ob man an den Hund oder die Katze denkt.

Wie kann man aus solchen Aktivitätsmustern die Gedanken herauslesen? Angenommen, man betrachtet zunächst einmal nur die beiden ersten Zahlen und nennt sie jeweils  $x$  und  $y$ .

Beim Hund wäre  $x = 2$  und  $y = 8$ , bei der Katze  $x = 7$  und  $y = 3$ . Diese Zahlen kann man nun als Punkte in ein Koordinatensystem eintragen (links unten). In unserem Fall sind die Punkte für wiederholte Messungen der Aktivitätsmuster für Hund (rot) und Katze (blau) dargestellt. Man sieht, dass die Aktivitätsmuster räumlich klar auseinander liegen. Allein durch einen Blick auf die  $x$ - oder  $y$ -Achse (beziehungsweise den ersten und den zweiten Voxel) lässt sich feststellen, ob es sich um Hund oder Katze handelt.

Rechts unten ist ein komplizierterer Fall dargestellt. Hier kann man nicht mehr einfach mit einem Blick auf eine der zwei Achsen die beiden Gedanken trennen, sondern muss die Aktivität sowohl in  $x$ - als auch in  $y$ -Richtung betrachten und dann mit einer geeigneten Linie die Aktivitätsmuster trennen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: JOHN-DYLAN HAWNES; HUND, KATZE: ISTOCKPHOTO / MARINA MASLENNIKOVA

men, was sie gleich machen würden? Um dies zu beantworten, trainierten wir den Computer mit Beispielen der Hirnaktivität, die auftrat, wenn Probanden sich für Addition oder Subtraktion entschieden hatten. Es zeigte sich, dass die Aktivitätsmuster im so genannten präfrontalen Kortex erlauben, die Absichten mit 70-prozentiger Zuverlässigkeit zu rekonstruieren. Diese Hirnregion liegt hinter der Stirn und ist unter anderem zuständig für das Speichern und Abrufen von komplexen Handlungsplänen.

In einer späteren Studie sollten Probanden spontan entweder mit der linken oder der rechten Hand einen Knopf drücken. Parallel dazu berichteten sie, wann genau sie den Eindruck hatten, sich entschieden zu haben. Somit war es möglich zu testen, ob sich bereits vor dem subjektiv wahrgenommenen Zeitpunkt vorhersagen lässt, wie sich der Proband gleich entscheiden wird. Wieder konnten wir die Wahl überzufällig häufig richtig vorhersagen, und zwar bis zu sieben Sekunden davor (siehe Grafik rechts), wenn auch insgesamt nur mit einer niedrigen Trefferquote. Dies zeigt, dass das Gehirn in gewissen Situationen Entscheidungen vorbereitet, bevor man sich dessen klar wird. Inzwischen haben Forscher noch viele andere komplexe mentale Vorgänge aus der Hirnaktivität rekonstruiert – etwa Erinnerungen und Gefühle, aber auch Kaufabsichten und Lügen (weiter unten dazu mehr).

Bei allen Erfolgen auf diesem Gebiet in den letzten Jahren ist man natürlich trotzdem noch sehr weit von einer univer-

sellen Gedankenlesemaschine entfernt. Eine Maschine, die beliebige Gedanken von beliebigen Personen präzise auslesen kann, wird voraussichtlich noch auf lange Zeit Zukunftsmusik bleiben. Doch vor welchen Schwierigkeiten stehen die Entwickler im Detail?

### Biologische Grenzen des Verfahrens

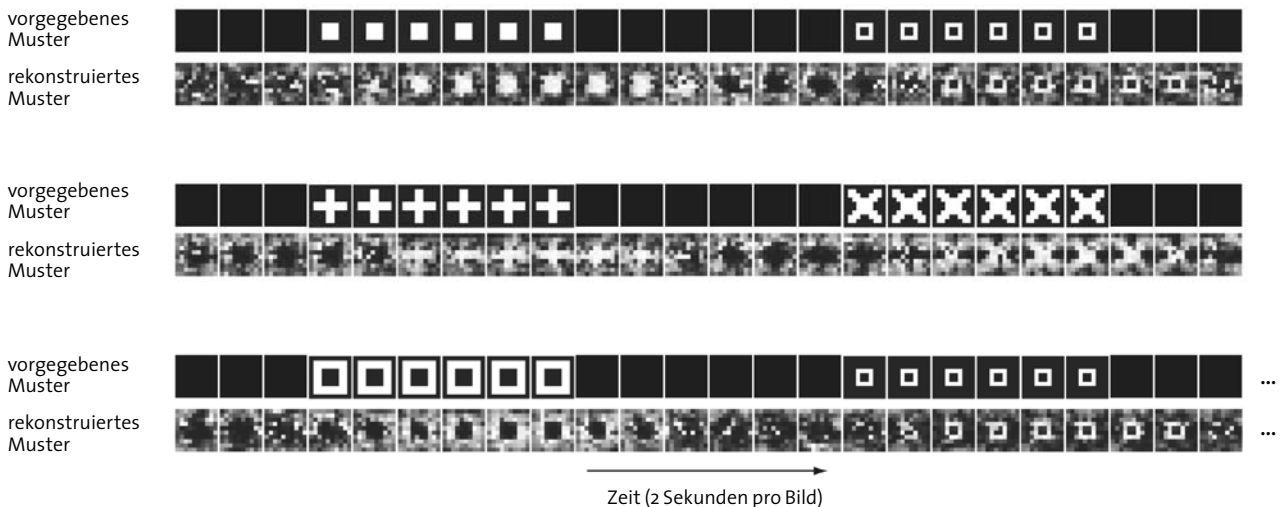
Eines der Kernprobleme ist die begrenzte Genauigkeit der Methoden, mit denen man heute die Hirnaktivität misst. Die funktionelle Magnetresonanztomografie hat zwar derzeit von allen nichtinvasiven Verfahren die höchste räumliche Auflösung, aber diese ist trotzdem begrenzt. Denn sie erfasst die Aktivität von Nervenzellen nur indirekt, indem sie den Sauerstoffgehalt des Blutes in den feinen Verästelungen des Gefäßsystems im Gehirn misst. Da man die Auflösung der Gefäße nicht erhöhen kann, stößt das Verfahren nicht nur an technische Grenzen, sondern auch an biologische.

Zudem unterscheiden sich die Hirnaktivitätsmuster von Person zu Person erheblich. Grob betrachtet sind zwar die Regionen, in denen etwa Hörerlebnisse oder Erinnerungen gespeichert sind, bei allen Menschen gleich. Aber in den Details unterscheiden sich die Gehirne von Probanden doch erheblich. Nur leicht variierende Absichten können bei verschiedenen Probanden mit ganz anderen Mustern verbunden sein. Daher ist es heute noch nicht möglich, einen Computer mit den Daten einer Person zu trainieren und den so gewonnenen Algorithmus bei einer anderen Person an-

## Geometrische Muster aus der Hirnaktivität rekonstruieren

Die drei Reihen zeigen oben jeweils den zeitlichen Ablauf von Bildern, die Probanden sahen, und unten deren Rekonstruktion aus der Hirnaktivität im Sehkortex. Mit demselben Verfahren kann man auch erkennen, welchen Buchstaben jemand gerade

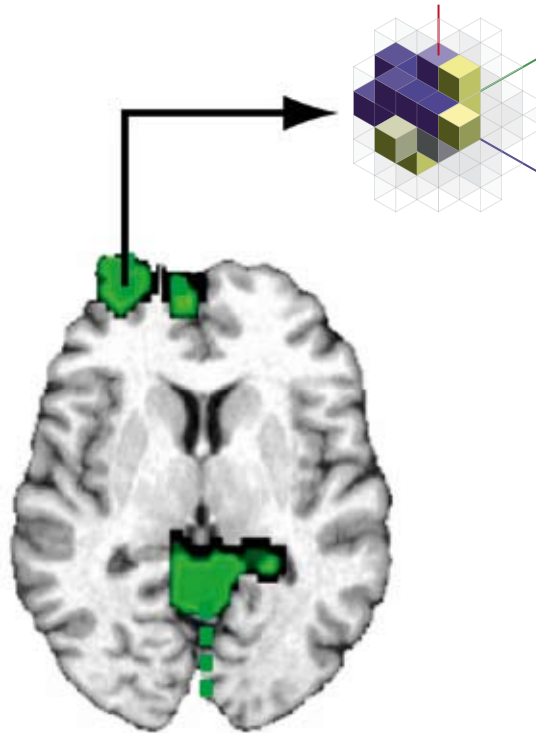
betrachtet. Dies könnte womöglich die Grundlage für eine neue Art von Tastatur liefern, mit der Buchstaben durch bloßes Betrachten ausgewählt werden. Eines Tages wäre vielleicht sogar denkbar, Traumbilder aus der Hirnaktivität herauszulesen.



Y. MIYAWAKI ET AL.: VISUAL IMAGE RECONSTRUCTION FROM HUMAN BRAIN ACTIVITY USING A COMBINATION OF MULTISCALE LOCAL IMAGE DECODERS. IN: NEURON 60, S. 915–929, 2008, FIG. 2 B. ABRUCK GENEHMIGT VON ELSEVIER / CCC

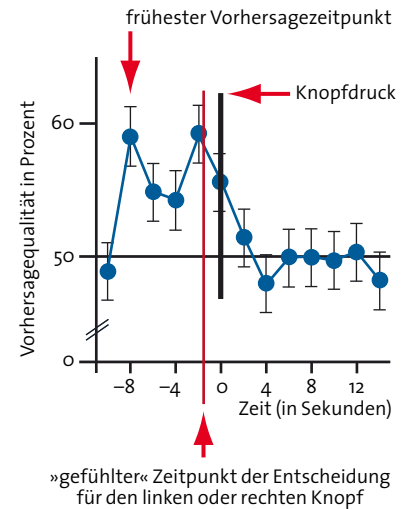


Aus den grün markierten Regionen lässt sich die freie Entscheidung eines Probanden vorhersagen, auf den linken oder den rechten Knopf zu drücken. Dazu wird eine Mustererkennungssoftware darauf trainiert, aus den Mikromustern im präfrontalen Kortex zu erkennen, wie sich der Proband entscheiden wird. Der früheste Vorhersagezeitpunkt liegt sieben Sekunden vor dem »gefühlten« Zeitpunkt, an dem der Proband glaubt, sich zu entscheiden.



HIRNSCAN: JOHN-DYLAN HAYNES; WÜRFEL UND DIAGRAMM: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: JOHN-DYLAN HAYNES

Vorhersage der Entscheidung aus Mikromustern der Aktivität im Stirnhirn



zuwenden – zumindest nicht, wenn es um Einzelheiten ihrer Gedankenwelt geht.

Zudem ist es überhaupt schwierig zu erfassen, was ein Mensch zu einem bestimmten Zeitpunkt denkt. Angenommen, wir würden eine Stunde lang kontinuierlich die Hirnaktivität eines Probanden messen, während er tagträumend im Scanner liegt. Welche Gedanken sollen wir nun dem Computer zusammen mit Beispielen der Hirnaktivität eingeben, um ihn zu trainieren? Wir könnten den Probanden zwar bitten, laut zu denken, allerdings wären dann die Messdaten, mit denen wir unseren Computer füttern, mit Sprache kontaminiert. Zurzeit untersucht man deshalb einfachere Situationen, bei denen der Proband vorgegeben bekommt, woran er in einem bestimmten Zeitintervall denken soll. Allerdings ist die Komplexität der Gedanken, die man so erfassen kann, erheblich eingeschränkt.

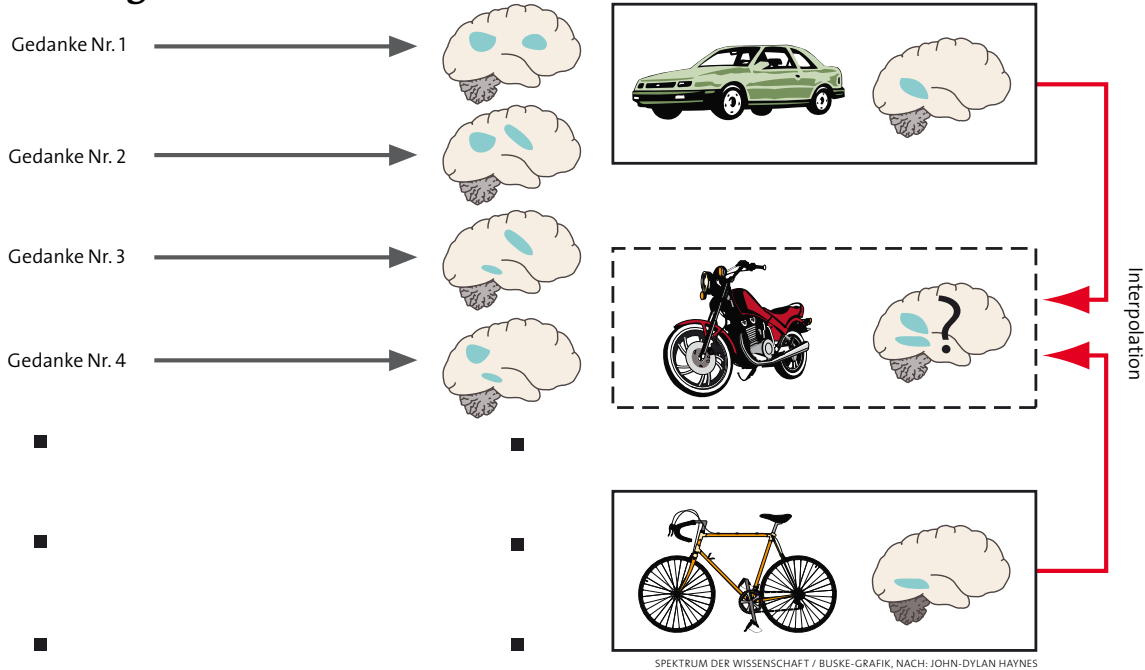
Das größte Hindernis liegt jedoch in der menschlichen Kreativität – wir können unglaublich viele verschiedene Dinge denken. Selbst die ausgefallensten Konstrukte müsste man einplanen, wie etwa den Satz »Mein Luftkissenboot ist voller Aale« aus einem Sketch von Monty Python. Soll man etwa einen Menschen in einen Magnetresonanztomografen legen und systematisch alle unendlich vielen möglichen Gedanken durchgehen und die zugehörige Hirnaktivität messen? Obwohl das Problem zunächst unlösbar scheint, gibt es doch zumindest einen ersten Ansatz: Man kann sich die Ähnlichkeit zwischen der Hirnaktivität verschiedener Gedanken

zu Nutze machen (siehe Kasten S. 10). Erst jüngst zeigten Forscher um Tom Mitchell von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh, dass sich so sehr viele verschiedene mentale Bilder unterscheiden lassen, selbst wenn nur eine Hand voll Trainingsbeispiele zur Verfügung steht.

### Flipperspielen mit EEG-Kappen

Obwohl wir vermutlich noch lange nicht dazu in der Lage sein werden, eine universelle Gedankenlesemaschine zu bauen, entstehen bereits mit den heutigen einfachen Techniken erste Anwendungen – so etwa für den medizinischen Bereich, wo Mustererkennung genutzt wird, um Prothesen zu steuern. Können Patienten sich nicht mehr bewegen, wäre es sehr hilfreich, wenn sie dazu in der Lage wären, allein mit Gedankenkraft künstliche Gliedmaßen oder einen Computer zu bedienen. In diesem Feld ist die Entwicklung schon sehr weit fortgeschritten. Deutsche Arbeitsgruppen aus Berlin, Tübingen und Freiburg mischen hier an der Weltspitze mit. So zeigen Klaus-Robert Müller, Gabriel Curio und Benjamin Blankertz aus Berlin, dass man mit einer so genannten Gehirn-Computer-Schnittstelle (auf Englisch: *brain computer interface*, BCI) eine Tastatur bedienen oder mit einem Flipperautomaten spielen kann. Üblicherweise verwendet man dabei EEG-Kappen zur Messung der Hirnaktivität. In den USA wurden aber auch schon erste klinische Versuche mit implantierten Elektroden bei schwerst bewegungsbehinderten Patienten gemacht.

## Aus wenigen mach viele



Eine Gedankenlesemaschine, die auf computergestützter Mustererkennung beruht, müsste eigentlich für jeden einzelnen möglichen Gedanken wissen, welche Hirnaktivität dazugehört – ein hoffnungsloses Unterfangen. Doch laut ersten Forschungsergebnissen kann man sich den Effekt zu Nutze machen, dass ähnliche Gedanken zu ebenfalls ähnlichen Hirnaktivitäten führen. So lassen sich durch Interpolation aus eini-

gen Kalibrierungsmessungen möglicherweise eine ganze Vielzahl von Gedanken auslesen.

Ein Beispiel: Wenn man die Hirnaktivitätsmuster von Gedanken an Autos und an Fahrräder kennt, kann man womöglich darauf schließen, dass eine Person gerade an ein Motorrad denkt, falls die Hirnaktivität eine Mischung der Aktivitätsmuster von Auto und Fahrrad ist.

Daneben gibt es vielfältige andere Einsatzgebiete dieser Techniken. So kann die Mustererkennung helfen, anhand von Hirnbildern Krankheiten zu diagnostizieren. Das Verfahren ist dasselbe wie beim Herauslesen von Gedanken: Man trainiert einen Computer mit Beispielen von Hirnaktivitätsmustern von Gesunden und von Patienten. Dann soll er Aufnahmen von neuen Personen richtig zuordnen. In unserer Arbeitsgruppe konnten wir damit Fälle von multipler Sklerose identifizieren und zu einem gewissen Grad auch den Krankheitsverlauf vorhersagen.

Ein anderes Gebiet betrifft Wachkomapatienten. Diese zeigen einen normalen Schlaf-wach-Rhythmus und reagieren scheinbar auf manche Ereignisse in der Außenwelt, wenn etwa ein Verwandter in den Raum kommt. In den meisten Fällen handelt es sich hierbei um automatische Reflexe, die unbewusst ausgelöst werden. Trotzdem stellt sich die Frage, ob solche Patienten bisweilen doch etwas von ihrer Umwelt mitbekommen. Steven Laureys aus Liège und Adrian Owen aus Cambridge haben untersucht, ob sich bei Betroffenen komplexe, willentlich gesteuerte Vorstellungen auslösen lassen. Sie legten ihre Komapatienten in einen Magnetresonanztomografen und instruierten sie, sich vorzustellen, dass sie entweder Tennis spielen oder durch ihr Haus laufen. Zu-

vor hatten sie bereits an gesunden Probanden gemessen, welche Hirnaktivität für diese beiden Imaginationen typisch ist. Von 54 Patienten zeigten immerhin fünf Aktivitätsmuster, wie sie auch bei den Gesunden vorkamen. Möglicherweise haben demnach diese Menschen auf die Instruktionen bewusst und willentlich reagiert.

Neben dem medizinischen Bereich könnte man sich zukünftig kommerzielle Anwendungen in der Freizeittechnologie vorstellen. So wird man vielleicht in ein paar Jahren mit Hilfe einer EEG-Kappe seinen Computer oder seinen Fernseher per Gedankenkraft bedienen können. Dazu ist die Entwicklung von EEG-Geräten erforderlich, die einfach aufgesetzt und bedient werden können. Herkömmliche EEG-Elektroden verwenden ein Gel, um optimalen elektrischen Kontakt mit der Kopfhaut herzustellen – ein beträchtlicher praktischer Nachteil. Die Entwicklung von neuen, gelfreien Kappen ist jedoch bereits in vollem Gang.

Daneben gibt es auch umstrittenere Anwendungen, etwa die Lügendetektion. Bisher maßen hierzu so genannte Polygraphen die Erregung eines Probanden anhand verschiedener Eigenschaften des peripheren Nervensystems. Die wichtigste davon ist der Hautwiderstand, der abnimmt, wenn ein Proband schwitzt. Aber auch andere Kennzeichen von Erre-

gung sind von Bedeutung, etwa Atmungsfrequenz, Puls und Blutdruck. Dahinter steht die Hoffnung, eine Lüge daran erkennen zu können, dass der Proband besonders gestresst und erregt auf eine Frage reagiert. Allerdings kann das auch ganz allgemein durch die Situation ausgelöst werden oder dadurch, dass der Proband erkennt, welche Fragen relevant sind, und nervös wird. Mit etwas Training können Versuchspersonen auch ihr Erregungsniveau künstlich manipulieren, etwa indem sie an etwas Aufregendes denken. Aus solchen Gründen ist die Zuverlässigkeit von Polygrafen sehr umstritten. Magnetresonanztomografen könnten sich als bessere Lügendetektoren erweisen. Da unwahre Aussagen mentale Aktivitäten sind und mithin auf Vorgängen im Gehirn beruhen, dürften Verfahren, die direkt bei der Hirnaktivität ansetzen, genauer und weniger leicht verfälschbar sein.

### Schwindeln im Hirnscanner

Forscher um Daniel Langleben von der University of Pennsylvania haben deshalb 2005 getestet, inwiefern man mit Hilfe der MRT bestimmen kann, ob jemand lügt. Sie gaben dazu Versuchspersonen in einem Umschlag zwei Spielkarten. Die Probanden sollten bei einer dieser Karten später leugnen, sie gesehen zu haben, und für die andere die Wahrheit sagen – bei welcher jeweils, konnten sie sich selbst aussuchen. Um die 21 Versuchsteilnehmer zu möglichst überzeugendem Schwindeln zu motivieren, sollten sie 20 Dollar bekommen, wenn sich nicht an ihrer Hirnaktivität ablesen ließe, bei welcher Karte sie gelogen hatten. Im MRT liegend sahen sie nun Bilder von Spielkarten und sollten sagen, ob sie diese in ihrem Umschlag hatten. Nach einer Trainingsphase mit Bildern der Hirnaktivität bei Lügen und korrekten Antworten konnte der Computer an neuen Aufnahmen eines anderen Probanden mit 88 Prozent Genauigkeit Flunkereien von der Wahrheit unterscheiden – ein sehr hoher Wert.

Bedeutet dies also, dass ein MRT-basierter Lügendetektor bald Realität werden kann? In den USA bieten bereits zwei Firmen derartige Tests an. Für eine wissenschaftlich fundierte Anwendung sind allerdings noch zahlreiche offene Fragen zu klären. Die meisten solcher neuen Lügendetektoren entstanden im Labor. Wie werden sich die Verfahren in der Realität behaupten, wo es nicht um den Gewinn von 20 Dollar geht, sondern um möglicherweise langjährige Haftstrafen? Auch beziehen sich die Lügen dann nicht auf Spielkarten, sondern auf komplexe, emotional besetzte Episoden aus dem eigenen Leben. Niemand weiß, ob die damit verbundenen Hirnprozesse denen der Spielkartenexperimente überhaupt ähneln. Die Tatsache, dass die Verfahren bereits kommerziell angeboten werden, macht es allerdings umso dringlicher, klare wissenschaftliche Kriterien bezüglich ihrer Zuverlässigkeit zu entwickeln.

Ein weiteres Anwendungsgebiet, das für viel Furore sorgt, ist das so genannte Neuromarketing. Dabei geht es darum, aus der Hirnaktivität Informationen über Produktpräferenzen

und Kaufentscheidungen abzuleiten, was eine völlig neue Dimension der Werbung eröffnen soll, die auf die Stimulation von Belohnungszentren des Gehirns abzielt. Die Idee dahinter: Wenn man die Wirkung von Produktwerbung im Gehirn messen kann, ist es auch möglich zu testen, ob die Produkte ein Verlangen auslösen können.

In einer Studie hat unsere Arbeitsgruppe untersucht, inwiefern es möglich ist, Kaufentscheidungen aus der Hirnaktivität vorherzusagen. Die Versuchsteilnehmer bekamen im Scanner Bilder von verschiedenen Autos gezeigt, während wir ihre Hirnaktivität registrierten. Hinterher fragten wir sie zu jedem Auto, ob sie sich vorstellen könnten, es zu kaufen. Wir trainierten einen Computer darauf, aus den Hirnbildern zu erkennen, ob jemand ein bestimmtes Auto erwerben würde oder nicht. Die Vorhersage funktionierte dann bei neuen Aktivitätsaufzeichnungen sehr gut – mit einer Trefferquote von über 70 Prozent. Die aussagekräftigsten Hirnregionen waren solche, die bei Gefühlen und Belohnungen eine wichtige Rolle spielen.

Um herauszufinden, welche Rolle die Aufmerksamkeit bei dieser Vorhersage spielt, untersuchten wir noch eine zweite Gruppe von Versuchspersonen. Wieder präsentierten wir Autobilder auf dem Bildschirm, aber diesmal lenkten wir die Aufmerksamkeit der Probanden von den Bildern ab, während wir ihre Hirnaktivität maßen. Interessanterweise ließ sich in dieser Situation die spätere Kaufentscheidung genauso zuverlässig vorhersagen, obwohl die Produkte gar nicht aufmerksam studiert wurden.

Folgt aus diesem Blick ins Gehirn bald der sprichwörtliche gläserne Kunde? Die Zukunft wird es weisen. Zwar ist es heute immer noch leichter, eine Kaufentscheidung vorherzusagen, indem man eine Person fragt, anstatt in ihr Gehirn zu blicken. Wie lange noch, ist allerdings offen. ~

#### DER AUTOR



**John-Dylan Haynes** ist Professor für Theorie und Analyse weiträumiger Hirnsignale am Bernstein Center for Computational Neuroscience in Berlin und Leiter des Berlin Center for Advanced Neuroimaging an der Charité.

#### QUELLEN

- Haynes, J. D.:** Decoding and Predicting Intentions. In: Annals of the New York Academy of Sciences 1224, S. 9–21, 2011
- Mitchell, T. M. et al.:** Predicting Human Brain Activity Associated with the Meanings of Nouns. In: Science 320, S. 191–195, 2008
- Miyawaki, Y. et al.:** Visual Image Reconstruction From Human Brain Activity Using a Combination of Multiscale Local Image Decoders. In: Neuron 60, S. 915–929, 2008

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116495](http://www.spektrum.de/artikel/1116495)

# Blick ins Gehirn von seelisch Kranken

**Frank Schneider** hat eine Vision. Er sieht im Blick ins Gehirn eine Möglichkeit, Diagnose und Behandlung eines psychiatrischen Patienten erheblich zu verbessern. Im Interview erklärt der Psychologe und Mediziner, was bildgebende Verfahren für sein Fachgebiet schon heute leisten und welche weiter gehenden Hoffnungen er in sie setzt.

**Frank Schneider** ist Direktor der Klinik für Psychiatrie, Psychotherapie und Psychosomatik am Universitätsklinikum Aachen sowie Gründungsdirektor von JARA-BRAIN, einer Initiative zur Erforschung psychischer und neurologischer Erkrankungen. Er hat an der Universität Gießen Psychologie und Medizin studiert und dort 1987 promoviert. Nach einem zweijährigen Forschungsauf-

enthalt an der University of Pennsylvania habilitierte er sich 1993 an der Universität Tübingen in Psychiatrie. 1996 erhielt er einen Ruf an die Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universität Düsseldorf, bevor er nach Aachen wechselte. Von 2009 bis 2010 war Frank Schneider Präsident der Deutschen Gesellschaft für Psychiatrie, Psychotherapie und Nervenheilkunde.

*Der Nobelpreisträger Eric Kandel argumentierte schon in den 1990er Jahren, dass Gehirn und Geist, also Physiologie und Psyche, einander bedingen und quasi die Kehrseiten ein und derselben Medaille sind. Entspricht dies in Fachkreisen mittlerweile der allgemeinen Überzeugung?*

**FRANK SCHNEIDER:** Diese Sichtweise, wonach Geist und Materie in engster Wechselwirkung miteinander stehen, gab es schon länger. Aber sie setzte sich erst in den letzten 20 Jahren allmählich durch – unter anderem dank großer Fortschritte bei den Untersuchungsmethoden. Das sehe ich auch an meiner eigenen Biografie: Ich habe angefangen, Psychologie zu studieren, weil ich mich für den Einfluss des Gehirns auf das Verhalten des Menschen interessierte. Später habe ich Medizin als zweites Studienfach dazugenommen, weil mir klar wurde, dass Leib und Seele, Biologie und Umwelt ganz eng zusammengehören. In meinem Kollegenkreis ist dies fast durchweg anerkannt. Auch wenn es natürlich noch ein paar Freudianer gibt, die das anders sehen ...

*Welche Rolle spielen bildgebende Verfahren beim Brückenschlag zwischen Physiologie und Psychologie?*

**SCHNEIDER:** Die Bildgebung ist ein wichtiges Werkzeug, um zu verstehen, was im Gehirn passiert. Sie hilft, Veränderungen in diesem Organ aufzuspüren und zu sehen, worin sich Menschen mit einem bestimmten Krankheitsbild von Gesunden unterscheiden. Dazu untersuchen wir die Struktur und die Funktion des Gehirns. Die Struktur ließ sich früher nur nach dem Tod an Gehirnschnitten ermitteln. Heute ist

das mit der Magnetresonanztomografie, kurz MRT, auch an Lebenden möglich. In abgewandelter Form, als funktionelle Magnetresonanztomografie oder fMRT, liefert das Verfahren außerdem Informationen über die Funktion des Gehirns. Dasselbe gilt für die Positronenemissionstomografie oder kurz PET. Mit beiden Untersuchungsmethoden kann man beispielsweise die Durchblutung und den Stoffwechsel beobachten oder feststellen, ob bestimmte Botenstoffe an den Nervenzellen ausgeschüttet werden. So erhält man Aufschluss über die Aktivität einer Gehirnregion. Eine andere Methode ist die Magnetenzephalografie, MEG. Auch damit lässt sich darstellen, welche Region aktiv ist. Zwar gelingt das räumlich nicht so genau wie mit der fMRT und der PET. Der Vorteil der MEG ist jedoch ihre hohe zeitliche Auflösung. Sie erlaubt also, die unmittelbare Reaktion auf ein bestimmtes Ereignis zu beobachten.

*Was bedeutet das konkret für den Patienten? Legt ihn der Psychiater der Zukunft in die Röhre statt auf die Couch?*

**SCHNEIDER:** So illusorisch ist das nicht (*lacht*). Wir legen unsere Patienten hier in der Klinik jedenfalls nicht auf die Couch. Für Gespräche haben wir Stühle, aber wir arbeiten auch mit MRT, PET und so weiter.

*Das heißt, Sie richten Ihr Augenmerk primär auf Veränderungen im Gehirn des Patienten?*

**SCHNEIDER:** Nein, wenn ein Patient in die Klinik kommt, rede ich natürlich zuerst mit ihm. Wer ist das überhaupt, warum kommt er? Aber affektive oder psychotische Zustände kön-



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: ANDREAS HERMANN

nen beispielsweise auch durch Tumoren, Schlaganfälle oder Entzündungen des Gehirns ausgelöst werden. Wenn ich einen Patienten vor mir habe, der halbseitig gelähmt und zudem wahnhaft ist und Stimmen hört, liegt er nach der klinischen Untersuchung innerhalb von Minuten im Kernspintomografen. Da muss abgeklärt werden, welche körperliche Ursache es dafür gibt. Wir werden nicht riskieren, Wahnvorstellungen psychotherapeutisch und pharmakologisch zu behandeln, und dann stirbt der Patient an einem Gehirntumor, von dem wir nichts wussten.

*Verwenden Sie die Bildgebung derzeit also nur dazu, bestimmte somatische Krankheiten wie Tumoren auszuschließen, oder dient sie auch zur Diagnose von speziellen psychischen Erkrankungen?*

**SCHNEIDER:** Es gehört zu den Leitlinien in unserem Fach, bei der erstmaligen Erkrankung eines Patienten verschiedene Untersuchungen vorzunehmen, um möglichst viel über ihn zu erfahren. Wir sprechen lange mit ihm sowie mit seinen engsten Angehörigen wie Ehepartnern und Kindern. Außerdem nehmen wir Blut ab und machen auch eine MRT-Aufnahme. Diese ist bei einer leichten Angststörung oder Depression zwar nicht unbedingt angezeigt, bei einer erstmals auftretenden schizophrenen Psychose, die mit massiven Beeinträchtigungen im Erleben und Verhalten einhergeht, dagegen immer. Auf der Basis eines MRTs eine psychische Krankheit zu diagnostizieren und davon ausgehend die Behandlung festzulegen, geht allerdings nicht. Oder zumindest

nur in Ausnahmefällen: Bei der Alzheimerdemenz ist das MRT oder manchmal eine Computertomografie ein wichtiges zusätzliches Diagnosehilfsmittel und deshalb obligatorisch. Doch auch in diesem Fall reichen die Bilder allein nicht aus. Sie zeigen zwar, dass sich das Gehirn insgesamt – und besonders stark an bestimmten Stellen – verkleinert hat. Genauso eingeschrumpelt kann es gelegentlich aber auch bei jemandem aussehen, der gesund und putzmunter ist.

*Gibt es weitere Anwendungen von bildgebenden Verfahren, und wie profitiert der einzelne Patient davon?*

**SCHNEIDER:** Derzeit ist vieles noch im experimentellen Stadium. Dabei gilt es zu unterscheiden zwischen einer Patientengruppe, die an einem Forschungsprojekt teilnimmt und so zu neuen Erkenntnissen beiträgt, und dem einzelnen Patienten. Der zieht zunächst meist für sich selbst keinen großen Nutzen aus unseren Experimenten. Aber aus der Studie lernen wir mehr über seine Krankheit und können die Wirkung von Medikamenten und anderen Therapien überprüfen. Das kommt dann wiederum allen Erkrankten zugute.

*Hilft Ihnen die Bildgebung also auch, den Erfolg einer Therapie zu beurteilen?*

**SCHNEIDER:** In bestimmten Fällen ja. Wir haben hier in der Klinik mit schizophrenen Patienten eine Studie zu Gefühlen durchgeführt. Diesen Menschen fällt es schwer, Emotionen bei anderen zu erkennen. Sie können aber auch ihren eigenen Gefühlen schlecht Ausdruck verleihen. Wir haben mit unseren Probanden deshalb geübt, Emotionen bei ihrem Ge-

genüber wahrzunehmen. Davor und danach machten wir ein fMRT. In den Aufnahmen war deutlich zu erkennen, dass sich durch das Training die Aktivität in den relevanten Gehirnregionen derjenigen bei Gesunden annäherte. Das könnte man als Spielerei bezeichnen. Aber es ist sehr wohl ein Gewinn, die Verbesserung im Therapieverlauf auch auf biologischer Ebene zu sehen und so mehr über die physiologische Basis zu erfahren.

*Doch was haben die Betroffenen selbst davon?*

**SCHNEIDER:** Wenn wir wissen, was im Gehirn passiert, können wir gezielter vorgehen. Außerdem erleichtert es uns, den Patienten ihre Krankheit zu erklären. Vor etwa zehn Jahren haben wir eine Studie zur therapeutischen Beeinflussbarkeit der Alkoholkrankheit mit einer Kombination aus Psycho- und Pharmakotherapie durchgeführt. Zu Beginn der Behandlung machten wir ein fMRT mit den Patienten, während sie Schnapsgeruch einatmeten, was das *craving*, den Suchtdruck, auslöst. Sechs Wochen später, lange nach dem akuten Entzug, wiederholten wir dieselbe Untersuchung. Dabei konnten wir feststellen, dass sich die Gehirnfunktionen der Betroffenen in relevanten Regionen verändert hatten und wieder dem Bild bei gesunden Kontrollpersonen entsprachen. Das belegte den Erfolg der Behandlung auf physiologischer Ebene, aber es nutzte auch den Patienten. Wir zeigen solche Aufnahmen Alkoholkranken auf der Station, um ihnen zu erklären, dass sie an einer Gehirnkrankheit leiden, die im Prinzip jeden von uns treffen kann. Das hilft ihnen, ihr Leiden besser zu verstehen. Es ist eine große Erleichterung für sie, zu erkennen, dass nicht einfach nur mangelnder Wille hinter dem Griff zur Flasche steckt.

*Sie zeigen den Suchtpatienten ihre Krankheit und den Therapieerfolg also schwarz auf weiß. Hat das auch bei anderen psychischen Erkrankungen einen positiven Effekt?*

**SCHNEIDER:** Wir zeigen unseren Patienten immer ihre Bilder, allerdings in Farbe (*schmunzelt*), und geben Erläuterungen dazu. Ob ihnen das im Einzelfall hilft, hängt sehr stark von ihrer Krankheit und vom Genesungsstadium ab. Depressive bemerken zum Beispiel meist als Allerletzte, wenn es ihnen im Therapieverlauf besser geht, während Familie, Pflegepersonal und Ärzte schon längst einen Fortschritt erkennen. Sie haben eine schwarze, depressive Brille auf und können sich deshalb lange gar nicht vorstellen, dass eine Besserung überhaupt möglich ist. Ein Patient mit Zwangsstörung weiß

dagegen genau, was in ihm vorgeht. Er ist sich bewusst, dass er schwer krank ist, hat aber sein Verhalten nur ungenügend unter Kontrolle. Ihm helfen solche Bilder sehr viel, weil sie ihm zeigen, dass er an einer biologischen Erkrankung leidet, an der er nicht selbst schuld ist.

*Eine moderne Therapiemethode ist ja das Neurofeedback. Welche Rolle spielt hier die Bildgebung?*

**SCHNEIDER:** In diesem Fall wird die Bildgebung sogar zum entscheidenden therapeutischen Mittel. Beim Neurofeedback liegt der Patient in einem MR-Scanner und soll die Aktivität in einer bestimmten Hirnregion beeinflussen. Steigt sie, so wird das betreffende Areal stärker durchblutet. Das stellen wir beispielsweise als ansteigenden Balken auf dem Monitor für den Patienten dar. Dieser hat also die Aufgabe, den Balken gezielt nach oben oder unten zu bewegen. Die meisten Menschen lernen das nach einigen Versuchen, obwohl unklar bleibt, wie sie es bewerkstelligen. Die Mechanismen dahinter laufen ja unbewusst ab.

*Und das lindert dann die Krankheitssymptome?*

**SCHNEIDER:** Ja. Bei uns läuft derzeit eine Studie mit schizophrenen Patienten, bei denen wir ein Areal im Stirnhirn trainieren, dessen Aktivität deutlich von der Norm abweicht. Tatsächlich bessert sich ihre Symptomatik. Klaus Mathiak, Professor an unserer Klinik, hat diese Methode hier eingeführt. Für die teilnehmenden Patienten ist die Selbststeuerung ihres Erlebens oft ein ganz großer Erfolg. Einer berichtete mir zum Beispiel begeistert, dass er nach vielen Jahren erstmals seine für ihn sehr quälenden Stimmen im Kopf gezielt abschalten könne. Kollegen in Maastricht und London verwenden diese Methode auch bei depressiven Patienten.

*Wenn Sie einen Blick in die Zukunft wagen: Was wäre Ihr Wunsch? Was erhoffen Sie sich?*

**SCHNEIDER:** Im Moment halte ich die Psychiatrie für das spannendste Fach in der Medizin, weil die anderen Disziplinen schon viel mehr über ihr Gebiet wissen. Wir Psychologen und Psychiater diagnostizieren eigentlich noch genauso wie vor 50 oder 100 Jahren. Wir sprechen mit jemandem und ermitteln dann anhand eines Kriterienkatalogs, ob eine Depression, eine schizophrene Psychose, eine Zwangserkrankung und so weiter vorliegt. Doch dabei fehlt uns – von einigen Ausnahmen abgesehen – oft ein objektives Maß für die Klassifizierung. Schizophrenien repräsentieren zum Beispiel eine ganze Gruppe von Erkrankungen mit ähnlichen Symptomen. Aber die Ursachen des Erlebens und Verhaltens, der Angst, des Hörens von Stimmen und der Zurückgezogenheit können ganz unterschiedlich sein. Entsprechend müsste man sie differenzierter behandeln, als das bisher geschieht. Um die Diagnostik in ein objektiveres Fahrwasser zu bekommen, brauchen wir mehr Informationen über die Erkrankungen. Das Ziel wären Krankheitsbilder, in die neben psychologischen auch soziale und biologische Faktoren einfließen. Und da gehört die Bildgebung unbedingt dazu.

*Lange Zeit versprachen sich Mediziner von der Genetik den Schlüssel zu allen Krankheiten, bis die großen Hoffnun-*

»Leib und Seele,  
Biologie und  
Umwelt gehören  
ganz eng  
zusammen«





## »Die Bildgebung ist ein wichtiges Werkzeug, um zu verstehen, was im Gehirn passiert«

gen wie eine Seifenblase zerplatzen. Besteht bei der Bildgebung nicht die gleiche Gefahr?

**SCHNEIDER:** Vor ein paar Jahren waren viele tatsächlich der Überzeugung, dass die Molekularbiologie den großen Durchbruch bringen würde: Man nimmt Blut ab, bestimmt ein paar Faktoren und weiß dann, was zu tun ist. Diese Hoffnung hat sich nicht erfüllt. Da ist viel Geld geflossen, und jetzt sind Politiker und Drittmittelgeber skeptisch. Ich sehe eine solche Entwicklung bei der Bildgebung nicht. MRT, PET und MEG haben viel mit Verhalten und Erleben zu tun. Wir messen eine konkrete Reaktion, etwa auf eine Schrecksituation – und zwar bei einem individuellen Patienten. Das ist anders als in der Molekulargenetik. Hinzu kommt, dass wir letztlich alle Faktoren biologischer, sozialer und psychologischer Art berücksichtigen, um ein möglichst umfassendes Verständnis der jeweiligen Krankheit zu erlangen. Heute wissen wir: Die Kombination dieser beiden Königswege wird den Durchbruch bringen.

*Der individuelle Patient ist ein gutes Stichwort. Welchen Beitrag leistet die Bildgebung auf dem Weg zur personalisierten Medizin?*

**SCHNEIDER:** Wir haben mit mehr als 90 erstmals erkrankten Schizophreniepatienten aus verschiedenen Zentren in Deutschland eine Studie durchgeführt. Bei allen untersuchten wir mit einem Test zum Arbeitsgedächtnis im MRT die Hirnfunktion, bevor wir sie mit zwei verschiedenen Antipsychotika behandelten. Nach einem Jahr war ein Teil gesund, den anderen ging es noch nicht so gut. Wenn wir nun die Hirnscans bei der Erstuntersuchung retrospektiv anschauten, sahen wir dort auffällige Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Dieses Ergebnis müssen andere Wissenschaftler noch bestätigen, aber es hat den Anschein, dass wir auf dem besten Weg sind, für den einzelnen Patienten den Verlauf einer bestimmten Therapie vorhersagen zu können. Das

sollte dabei helfen, die beste Behandlungsstrategie auszuwählen.

*Das klingt verheißungsvoll.*

**SCHNEIDER:** Noch ist das Verfahren experimentell, aber wir wenden es bei unseren Patienten schon häufig an. Da bringt die Bildgebung also einen konkreten Nutzen. Und sie wird in Zukunft – neben dem Aufnahmegespräch, der laborchemischen und der klinischen Untersuchung – ein wichtiges Standbein sein, um den einzelnen Patienten besser einschätzen und so die Therapie für ihn maßschneidern zu können.

*Könnten demnach in einigen Jahren bildgebende Verfahren in psychotherapeutischen Praxen so selbstverständlich sein wie das EKG beim Allgemeinmediziner?*

**SCHNEIDER:** Gute Frage. Angesichts der enormen Kosten, die unserem Sozialsystem durch Behandlungen, Rehabilitationen, Arbeitsunfähigkeiten und Frührenten bei psychischen Erkrankungen entstehen, scheint mir, dass sich ein Hirnscan auch finanziell rechnet. Selbstverständlich wird nicht in jeder Einzelpraxis ein MRT stehen, dazu sind die Geräte zu aufwändig und teuer. Doch ich glaube schon, dass die Bildgebung in den nächsten Jahren an Bedeutung in der Psychiatrie gewinnen wird. Das gilt für die Diagnostik, aber auch für die Therapie, wie zum Beispiel beim Neurofeedback.

*Wenn jeder Patient zunächst in die Röhre geschoben wird, birgt das nicht das Risiko, den Kranken auf sein Gehirn zu reduzieren und seine Persönlichkeit nicht angemessen zu würdigen?*

**SCHNEIDER:** Heute kommt oft ein Patient mit einem großen persönlichen Leid zu uns, dem wir nicht so helfen können, wie wir gerne würden, weil wir die biologische Ursache, die Veränderung in seinem Gehirn, nicht ganz genau kennen. Hier kann der Scanner wertvolle zusätzliche Informationen liefern. Aber er darf den Therapeuten natürlich nicht ersetzen. Ein Patient kann nie auf die Biologie reduziert werden, auf die Flecken, die wir in seinem Gehirnscan sehen. Das würde dem Menschsein nicht gerecht. Die Individualität eines Patienten ist aus dem Hirnscan nicht ablesbar. Die Bildgebung unterstützt uns jedoch dabei, seine Krankheit besser zu verstehen und ihn wirksamer zu behandeln. ~

Die Fragen stellte **Stefanie Reinberger**. Sie ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1116496](http://www.spektrum.de/artikel/1116496)

# Direkter Zugang zum Gehirn

Lernende Neuroprothesen könnten künftig Funktionsstörungen des Gehirns korrigieren und Gedächtnisleistungen verbessern.

Von Henning Scheich und Frank W. Ohl

## AUF EINEN BLICK

### EINE NEUE ÄRA DER MEDIZINTECHNIK

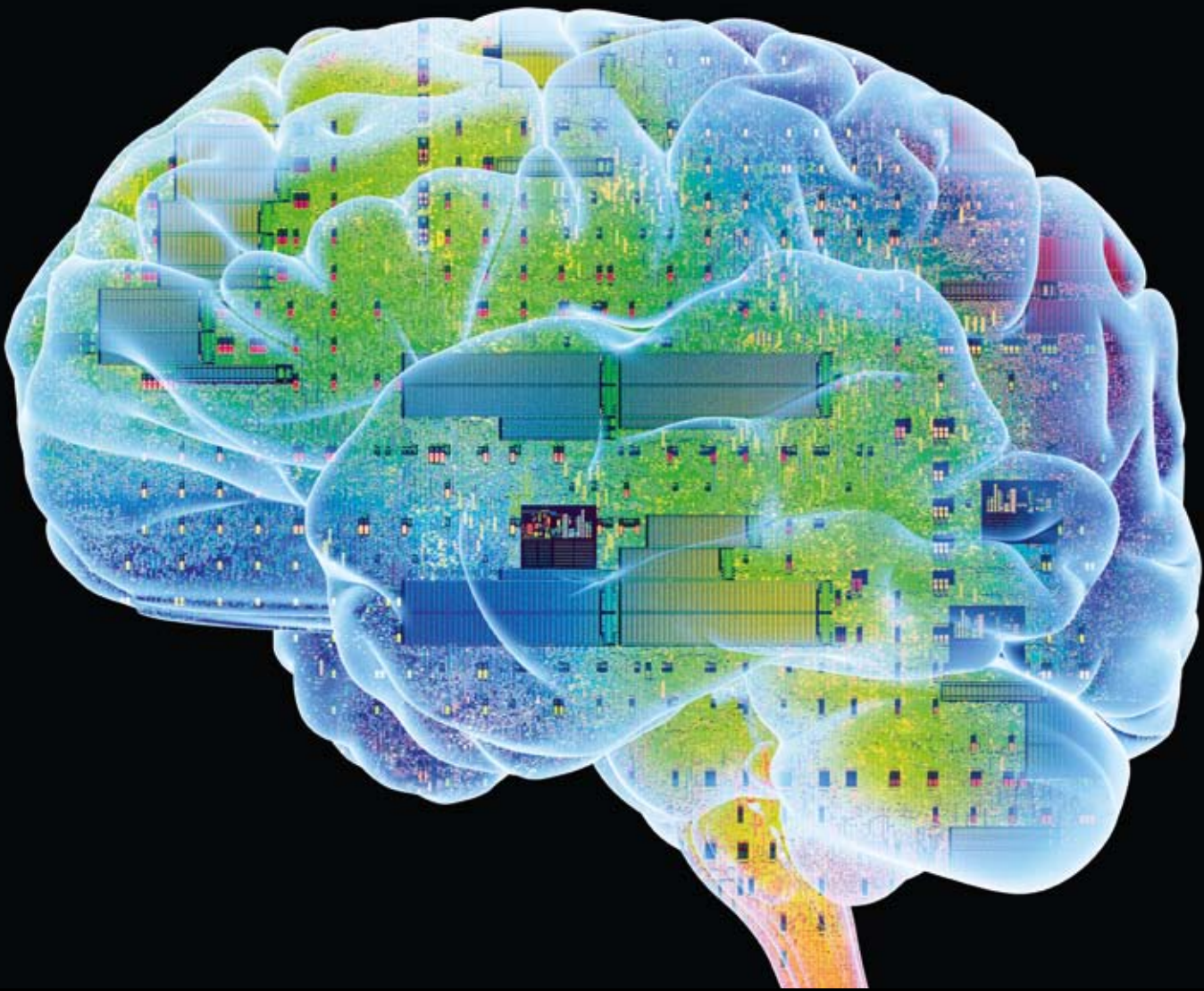
**1 Cochlea-Implantate** ermöglichen Ertaubten, wieder Sprache zu hören. Sie zeigen darüber hinaus, dass es möglich ist, Informationen mit technischen Mitteln in das Gehirn einzuspeisen.

**2 Neuroprothesen** könnten nicht nur defekte Wahrnehmungswege ersetzen, sondern auch gegen **Störungen der Bewegungssteuerung und der Informationsverarbeitung** helfen. Bei ihrer Entwicklung haben Neurowissenschaftler viel Neues über die grundlegenden Prozesse im Gehirn gelernt.

**3** Die beiden Autoren erforschen unter anderem die **technische Beeinflussung von Lernvorgängen**, beispielsweise zur Therapie der Drogensucht oder zur Gedächtnisstabilisierung von Alzheimerpatienten.

**N**ervenzellen werden durch Stromimpulse elektrisch erregt. Heute mutet diese fundamentale Erkenntnis der Physiologie des 19. Jahrhunderts fast banal an, doch erst sie ermöglichte, die Funktionsweise unseres Gehirns wie auch seiner Peripherie aus Reizleitungen, Sensoren und Effektoren zu verstehen. Diese Erkenntnisse nutzen Wissenschaftler neuerdings, um mit Nervenzellen zu kommunizieren, zum Beispiel in der Therapie: Über technische Schnittstellen, so genannten Neural-Electrical Interfaces (NEIs), wollen Ärzte defekte Sinnesorgane ersetzen, Alzheimer- und Parkinsonkrankheit heilen, vielleicht sogar die Gedächtnis- und Lernfähigkeit älterer Menschen optimieren. Diese neuartigen Implantate zur Hirnstimulation sind nicht nur ein Triumph der Neurobiologie und der Medizintechnik. Sie haben auch traditionelle





Vorstellungen zur Funktionsweise des Gehirns in Frage gestellt, werfen allerdings ebenso ethische Fragen auf.

Elektrische Impulse von etwa einer Millisekunde Dauer, so genannte Aktionspotenziale, übertragen Informationen innerhalb des Nervensystems. Was beispielsweise Sensoren den zuständigen Verarbeitungsinstanzen mitteilen wollen, läuft als Abfolge solcher Pulse an Axonen entlang, den langen Ausläufern der Nervenzellen. Über Synapsen genannte Kontaktstellen vermitteln Botenstoffe die Signale von Zelle zu Zelle. Auf jedes Aktionspotenzial folgt eine »Refraktärzeit« von mehreren Millisekunden, während der ein Neuron kein neues Aktionspotenzial bilden kann. Diese Totzeit begrenzt seine maximale Feuerrate. Wirken Reize in dieser Phase von außen ein, behindern sie sogar das Entstehen neuer Aktionspotenziale (siehe Kasten S. 18).

**Elektronische Systeme könnten helfen, wo Medikamente oder andere Therapieformen bislang versagen: Sie sollen Störungen der normalen Gehirnfunktion reduzieren oder gar heilen.**

Ein weiteres Grundprinzip der Hirnfunktionen ist die Parallelverarbeitung: Informationen werden von separaten Nervenleitungen gleichzeitig übertragen, so dass verschiedene Zellen bei bestimmten Aufgaben zusammenarbeiten können. Erst eine solche neuronale Kooperation ermöglicht es Forschern, Karten von Arealen und Strukturen anzulegen, in denen die unterschiedlichen Arten von Informationen im Gehirn verarbeitet werden. Eine Neuroprothese muss das berücksichtigen und Daten auf mehreren Kanälen schicken.

Was solche neuronal-elektronischen Schmittstellen vermögen, demonstrieren Cochlea-Implantate, die vor mehr als 30 Jahren das Feld erschlossen und mit weltweit etwa 200 000 Patienten die erfolgreichste Anwendung darstellen: Sie geben Ertaubten das Gehör zurück. Zur Taubheit kann es kommen, wenn die schalldruckempfindlichen Inneren Haarzellen (siehe Glossar rechts) im Innenohr geschädigt werden und zu Grunde gehen – etwa infolge von Entzündungen. Diese winzigen Messfühler, gut 4000 an der Zahl, wandeln die mechanischen Schwingungen einer Membran in elektrische Signale um. Dabei registrieren Haarzellen am Eingang der Schnecke (Cochlea) hohe Schallfrequenzen, während die Haarzellen am Ende der Cochlea die tiefen Frequenzen wahrnehmen. Über eine Synapse übermitteln die Zellen ihre Information dann an je eine Nervenfasern des Hörnervs.

Diese Fasern bilden die Aktionspotenziale aus. Je nach Stärke der Erregung durch die Haarzellen – und damit je nach Intensität der jeweiligen Frequenz – variieren sie das Tempo ihrer Abfolge, nicht aber ihre Amplitude. Die erste Hörbahnstation im Gehirn, der Nucleus cochlearis, vermag diesen Kode zu deuten. Welche Frequenz jeweils gemeint ist, versteht er allein auf Grund des »Ortskodes« – das heißt anhand der Zuständigkeit einer jeden Faser des Hörnervs. Das Gehirn bildet also eine Tonhöhenempfindung schon vorab, je nachdem auf welcher Leitung es Signale empfängt. Dass dem so ist und die Frequenzinformation nicht etwa über die Rate der

Aktionspotenziale kodiert wird, konnte mit Hilfe der Cochlea-Implantate erstmals bewiesen werden.

Wenn eine Haarzelle abstirbt, bleibt die mit ihr über eine Synapse verbundene Nervenfasern oft noch intakt, denn sie liegt gut geschützt in separaten Kanälchen des knöchernen Felsenbeins. Das ist die Chance für die Medizintechnik: Über eine flexible Elektrode kann man die Enden erreichen und elektrisch reizen (siehe Kasten rechts unten). Aus dem Schall, den ein Mikrofon aufgenommen hat, errechnet ein Prozessor das jeweilige Stromsignal. Der taube Patient nimmt daraufhin einen Ton wahr, und zwar in einer Höhe, die ungefähr dem Ort auf der Membran entspricht, den die Haarzelle eingenommen hatte. Das funktioniert auch ohne Training und selbst bei Kindern, die bereits taub geboren wurden – sofern ihr Hörnerv gesund ist. Höhere Pulsraten bei gleicher Amplitude erhöhen lediglich die Intensität der Schallempfindung.

Moderne Implantate arbeiten mit bis zu zwölf Elektroden entlang der Cochlea, die jeweils einen Frequenzbereich zur Verfügung stellen. Bei einer größeren Zahl würden die Abstände zu sehr schrumpfen, die elektrischen Signale auf den verschiedenen Leitungen könnten dann einander beeinflussen und so die Frequenzauflösung verschlechtern. Immerhin verstehen die meisten Patienten mit diesen Systemen Sprache, sofern das Umgebungsgeräusch nicht zu laut ist. Das ist erstaunlich, wenn man bedenkt, dass gesunde Hör-

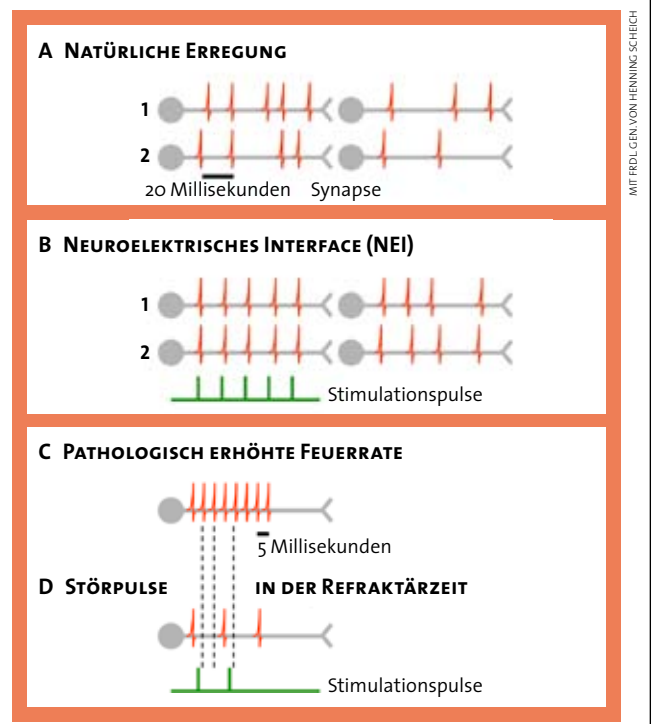
## 12 Elektroden statt 4000 Sinneszellen – und doch wird Sprache verstanden

### DER SIGNALKODE DES GEHIRNS

**Elektrische Impulse, so genannte Aktionspotenziale,** bilden das Grundelement der Informationsweitergabe entlang der Nervenbahnen. Neurone bilden diese Strompulse auf einen Reiz hin. Das ist im Normalfall ein ankommendes Signal, sei es seitens eines Sensors oder eben eines anderen Neurons. Es wird über Botenstoffe in den als Synapsen bezeichneten Kontaktstellen auf die Nervenzelle übertragen.

Die zu vermittelnde Information steckt zum einen in der Rate der Aktionspotenziale, zum anderen in der Zuständigkeit der sendenden Zelle beziehungsweise Nervenfasern selbst. Selbst zwei dicht beieinanderliegende Neurone feuern mit einer gewissen Unabhängigkeit voneinander (A). Werden benachbarte Neurone aber durch eine Elektrode von außen erregt, sind ihre Aktionspotenziale zeitlich synchronisiert.

Ein Neuron kann nicht beliebig oft feuern, es benötigt zwischen den Aktionspotenzialen eine kurze Pause (Refraktärzeit). Das ermöglicht es, pathologisch aktive Nervenzellen zu bremsen. Im Beispiel feuert ein Neuron auf Grund einer Störung alle fünf Millisekunden (C). Wird es während der Erholungszeit gereizt, verlängert sich diese (D).



nerven mindestens 4000 Frequenzkanäle statt der maximal zwölf der Prothese besitzen. Der Genuss einer auf westlichen Harmonieskalen beruhenden Musik mit ihren präzisen Frequenzabständen ist Implantatträgern aber leider noch nicht möglich.

Die Erfahrungen, die man bislang mit Innenohrimplantaten gewinnen konnte, lassen sich wahrscheinlich auch auf andere NEI-Systeme übertragen. So erfordert die Übermittlung von Informationen an das zentrale Nervensystem offenbar, die Impulsrate der Reizelektroden jenen Feuerraten anzupassen, die das gesunde Wahrnehmungsorgan verwendet. Sicherlich wird man bei anderen Sinneskanälen auch das raumzeitliche Muster der elektrischen Aktivierung jenem des natürlichen Wahrnehmungsorgans anpassen müssen. Zum Beispiel analysiert die Cochlea ein Schallsignal lediglich auf einer eindimensionalen Frequenzskala, während die Netzhaut ein zweidimensional arbeitender Sensor ist, der neben Farbe und Helligkeit zudem Informationen zur Position eines Reizes im Raum weitergibt.

### Das Gehirn lernt selbst, das Implantat optimal zu nutzen

Nervenzellen des Hörnervs arbeiten voneinander unabhängig, selbst wenn sie der gleichen Art von Wahrnehmung dienen. Treffen die Aktionspotenziale leicht versetzt ein, können die Neurone das nutzen, um beispielsweise den Kontrast zwischen den Reizen zu verschärfen. Werden hingegen benachbarte Nervenzellen und Axone gleichzeitig von einer Elektrode stimuliert, bilden sie ihre Aktionspotenziale syn-

## Glossar

**AKTIONSPOTENZIAL:** Die vorübergehende charakteristische Abweichung des Membranpotenzials einer Nervenzelle von ihrem Ruhepotenzial; dient der Informationsübermittlung

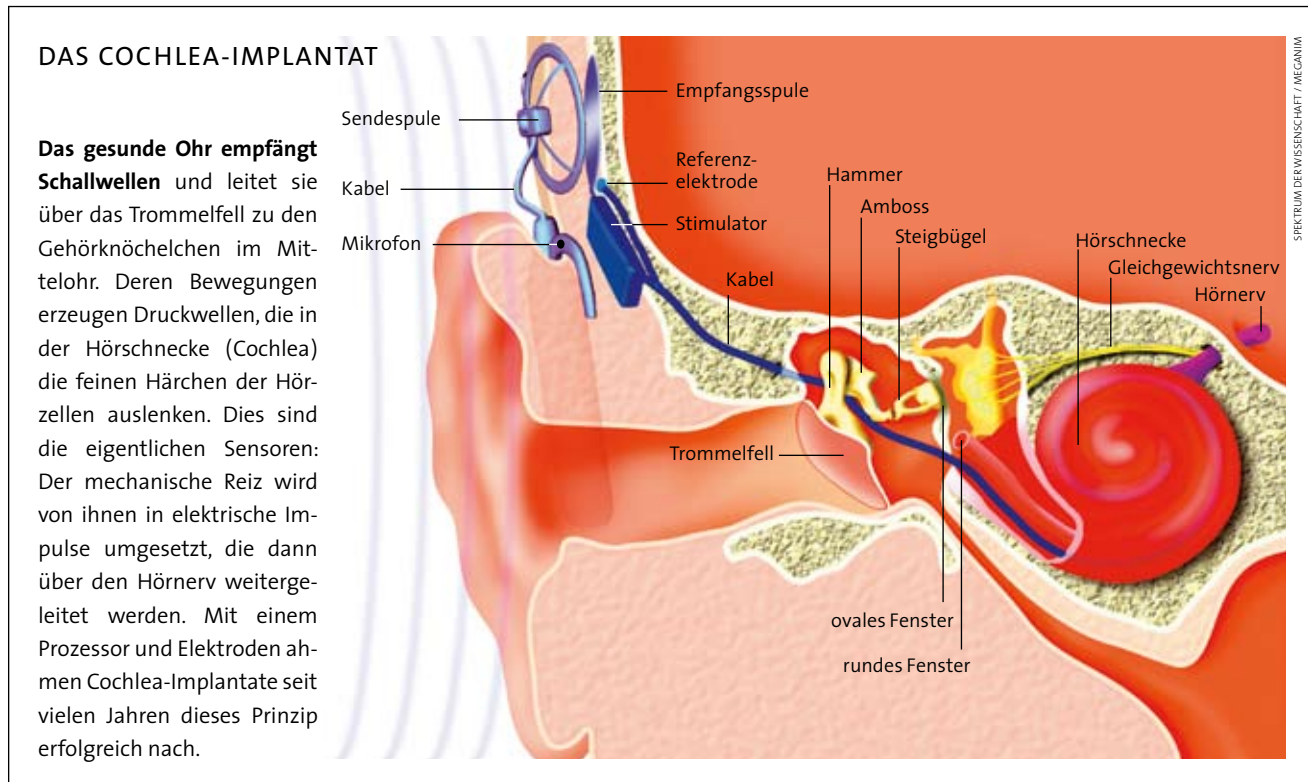
**AXON:** Langer Fortsatz von Nervenzellen, der die Aktionspotenziale weiterleitet. In der Regel besitzen Nervenzellen nur ein Axon, die Reizweiterleitung erfolgt in einer Richtung.

**COCHLEA:** Ein schlauchförmiges Organ mit einer schwingenden Membran, auf der die Haarzellen sitzen

**HAARZELLE:** Ein Typ von Sinneszellen, der mechanische Reize in Nervenaktivität umwandelt. Dem Zellkörper sitzen haarähnlichen Strukturen auf, die zur mechanischen Aufnahme des Reizes (etwa des Schalls) dienen.

**SYNAPSE:** An dieser Kontaktstelle zwischen zwei Nervenzellen werden Signale auf chemischem Weg, nämlich durch Botenstoffe, übermittelt.

chron (siehe Kasten links). Ob das die Informationsverarbeitung verbessert oder verschlechtert, wird sich noch herausstellen. Bislang wissen wir nur, dass sich über Synapsen verbundene Nervenzellen bei synchroner Erregung gegenseitig beeinflussen. Dies ist eine Grundlage von Assoziationsbildung verschiedener Informationen beim Lernen. Die Wirkung eines NEI lässt sich deshalb durch Übung verbessern. So hören Patienten nach dem Einsetzen eines Cochlea-Implan-



tats zunächst nur einen Geräuschmix. Sofern sie nicht taub geboren wurden, sondern das Sprechen erlernt haben, erkennen sie nach einiger Zeit Worte, bis ihnen das wahrgenommene Geräusch wie natürliche Sprache vorkommt.

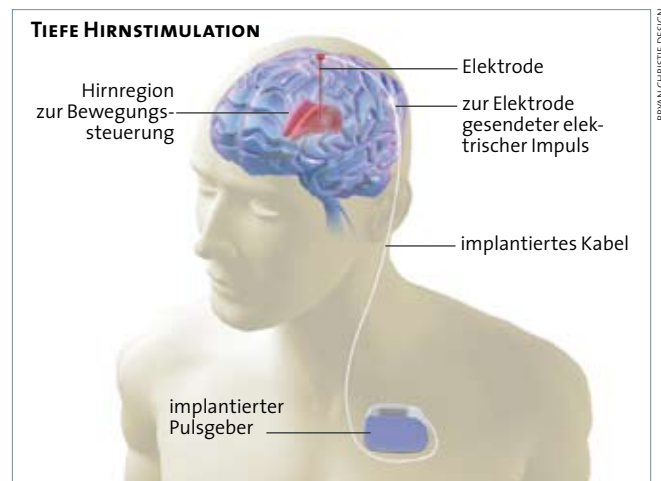
Der aus Experimenten bekannte und an Cochlea-Implantaten bestätigte Effekt, dass zu hohe Stimulationsraten auf Grund der Totzeit die Impulsrate begrenzen oder gar sinken lassen, lässt sich zu therapeutischen Zwecken nutzen. So sind bei Patienten, die unter fokaler Epilepsie leiden, bestimmte Hirnregionen nicht nur während eines Anfalls übererregt und können deshalb gehemmt werden. Bei Gesunden sorgen dafür spezialisierte, diffus im Gewebe verteilte Nervenzellen. Diesen Regelmechanismus könnten inhibitorisch eingesetzte Elektroden ersetzen.

Nervengewebe toleriert künstliche elektrische Reizungen hervorragend, vorausgesetzt Elektroden und Isolationen bestehen aus gewebeverträglichen Materialien wie inerten Metallen und neuerdings auch Karbon-Nanotubes. Zudem stellte sich bei langjährigen Cochlea-Implantatpatienten weder eine Gewöhnung noch eine Überempfindlichkeit ein, wie man sie etwa von Medikamenten kennt. Das liegt vermutlich daran, dass diese auf die Synapsen wirken und deren molekulare Struktur verändern, während Elektroden lediglich elektrische Reize aussenden – die für Nervenzellen sozusagen zum Tagesgeschäft gehören.

### Die tiefe Hirnstimulation – ein alternativer Weg der Signalübertragung

Welche Möglichkeiten bleiben aber, wenn Axone auf ihrem Weg zum zentralen Nervensystem, also zum Gehirn und Rückenmark, unterbrochen sind? Ein Tumor kann den Hörnerv zerstören; eine Degeneration der Makula, eines Bereichs der Retina, der sehr viele lichtempfindliche Sinneszellen enthält, kann dazu führen, dass der Sehnerv zu Grunde geht. In diesen Fällen lässt sich kein Signal zur verarbeitenden Instanz leiten. Dann bleibt nur eine Alternative: die tiefe Hirnstimulation (siehe den Beitrag ab S. 24). Sie gilt auch als eine Option, um Erkrankungen des zentralen Nervensystems wie Epilepsie, Parkinson, Depression zu bekämpfen, wenn eine medikamentöse Behandlung nicht anschlägt. Die Voraussetzung dafür sind bildgestützte räumliche Planungen, die es ermöglichen, Gebiete im Gehirn von der Oberfläche des Schädels aus präzise anzusteuern.

Bislang wird die tiefe Hirnstimulation mit einzelnen Elektroden ausgeführt. Womöglich ließen sich mit mehreren Elektroden weit bessere Ergebnisse erzielen. Von Untersuchungen mit Patienten, die an einer Degeneration des Hörnervs leiden, ist bekannt, dass ein räumlich geordnetes Ansprechen mit mehreren Elektroden notwendig ist, um den Nucleus cochlearis im Hirnstamm oder die nächsten Hörbahnstationen im Colliculus inferior des Mittelhirns elektrisch zu reizen. Leider sind diese tief liegenden und verdeckten Hirnstrukturen von außen nur sehr schwer zu erreichen.



Eine elektrische Tiefenstimulation des Gehirns kann Bewegungsstörungen wie permanentes Zittern bei Parkinson mildern.

Eher bietet sich das oberflächlicher gelegene Hörareal der Hirnrinde für eine Stimulation an.

Zu den vielen Anwendungen, die für NEIs denkbar sind, zählt auch die Behandlung von Hirnfehlsteuerungen, die nach heutigem Verständnis auf krankhafte neuronale Lernprozesse zurückzuführen sind. Ein Beispiel sind Süchte, die sich als therapieresistent erweisen, ebenso Tinnitus oder die Alzheimerkrankheit, bei der bestimmte Lern- und Gedächtnisfunktionen stark nachlassen.

Bei manchen Abhängigkeiten, etwa der Alkoholsucht, erhält vermutlich ein Belohnungssystem im Mittelhirn den Drang nach der Droge aufrecht. Natürlicherweise schützt es kurzzeitig den Nervenbotenstoff Dopamin aus und vermittelt über Strukturen im limbischen System das Empfinden von Erfolgserlebnissen – etwa als Reaktion auf eine Problemlösung. Eine weit heftigere Ausschüttung rufen die meisten Suchtmittel hervor. In der Folge lässt die Empfindlichkeit der Empfangsstationen nach, so dass eine höhere Dopaminkonzentration erforderlich wird, um den gleichen Empfindungsgrad zu erreichen.

### Erlernte Assoziationen löschen, um Drogensucht zu bekämpfen

Forscher der Medizinischen Fakultät Magdeburg und des Leibniz-Instituts für Neurobiologie gelang es 2009 durch Implantation eines Elektroden systems zur chronischen Stimulation des Nucleus accumbens – eines Zentralkerns des limbischen Systems –, das Verlangen nach der Droge bei therapieresistenten Alkoholikern zu stoppen. Die Patienten sind nach wie vor »trocken«.

Der Trick besteht hier darin, die Assoziationen, die beispielsweise der Anblick einer Flasche auslöst, massiv zu stören. Enthielte sie keinen Alkohol, sondern immer nur Wasser, würde zwar die Erwartung des erwünschten Alkoholkonsums enttäuscht. In einem herkömmlichen Verhaltenstraining eingesetzt, zeigte dergleichen jedoch keinen Erfolg. Indem man aber Teile des Nucleus accumbens elektrisch stimuliert, lässt sich die früher erlernte Verknüpfung lösen und

damit vergessen – so jedenfalls lautet eine unserer Theorien, welche die therapeutische Wirkung der tiefen Hirnstimulation erklären kann.

Ein grundsätzliches Problem beim Stimulieren von Lern- und Gedächtnisprozessen wie bei der Sucht ist, dass sich ein Effekt nicht unmittelbar nach der elektrischen Reizung einstellt, wie es etwa bei Parkinsonpatienten der Fall ist. Deren krankheitsbedingtes Zittern verschwindet durch die tiefe Hirnstimulation noch auf dem Operationstisch. Modifikationen, die das Gedächtnis beeinflussen, können jedoch nicht unmittelbar gemessen werden.

Eine Art Konditionierung dürfte auch dem Tinnitus zu Grunde liegen, sofern ihm ein Hörsturz, also ein teilweiser oder vollständiger Gehörverlust, vorausgegangen ist. Dabei werden Regionen der Cochlea, die an den Ort des eigentlichen Schadens angrenzen, massiv übererregt, was sich über die Hörbahn bis in die Großhirnrinde (Kortex) fortsetzt. Die-

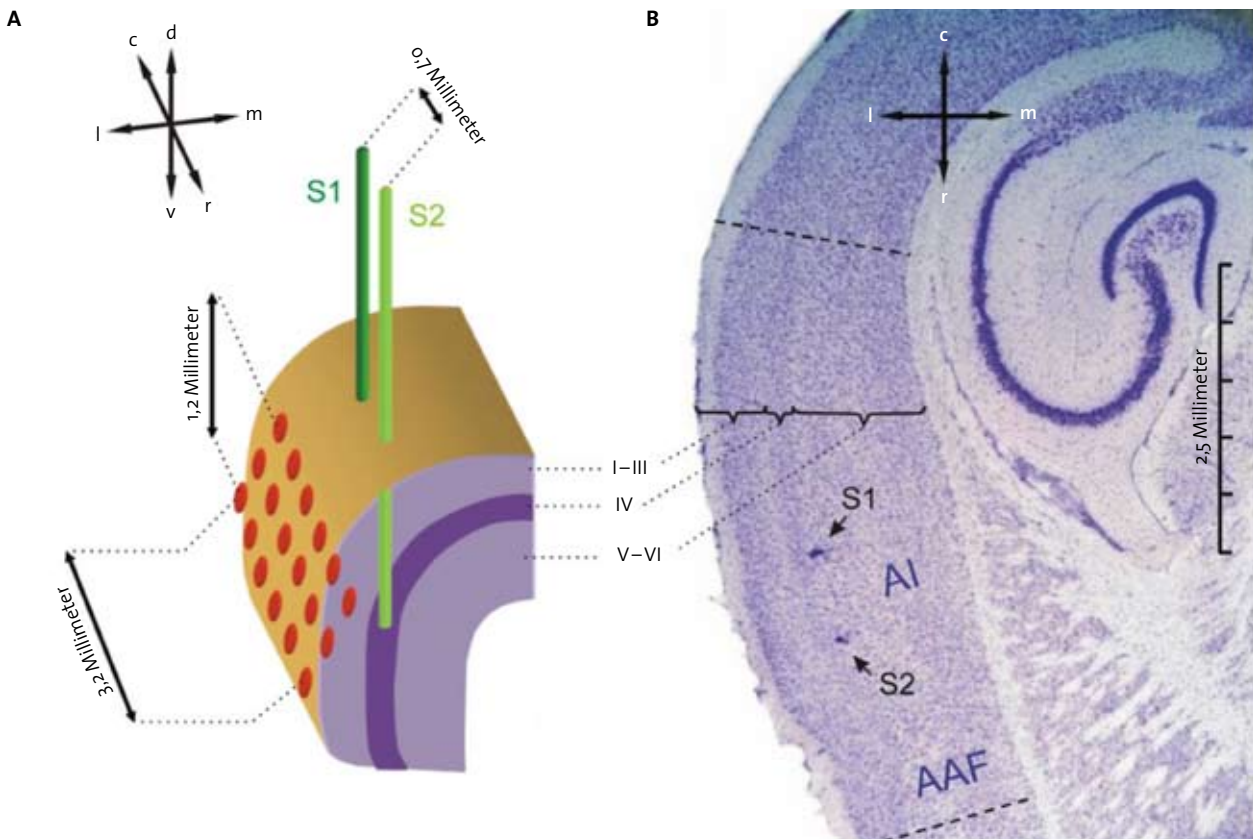
se speichert die zugehörige Tonhöhe als Gedächtnisinhalt – das unangenehme »Ohrklingeln« bleibt bestehen. Zur Therapie nutzen Ärzte verschiedene Techniken, beispielsweise indem sie gezielt die Frequenz des Tinnitus durch ein akustisches Rauschen übertönen. Bislang war dem jedoch nur wenig Erfolg beschieden. Möglicherweise könnte es aber gelingen, den Hörkortex elektrisch zu stimulieren und dank der Refraktärzeit zu hemmen, um die Übererregung dauerhaft zu reduzieren.

Statt Gemerktetes zu löschen, ist mitunter das Gegenteil erwünscht: wenn die Lern- und Gedächtnisfähigkeit rapide nachlassen, etwa bei der Alzheimerkrankheit. Vom Schwund betroffen ist das semantische Langzeitgedächtnis im Kortex, also das Gedächtnis für Bedeutungen von Dingen und Ereignissen, sowie der Zwischenspeicher im Hippocampus. Beide Hirnregionen werden vom erwähnten internen Belohnungssystem beeinflusst.

## NEUORIMPLANTAT FÜR EINE MAUS

**Eine einfache Neuroprothese mit zwei Kanälen**, das heißt zwei Elektroden, wurde in jenen Bereich der Großhirnrinde der Mongolischen Wüstenrennmaus implantiert, der Gehörtes verarbeitet und ihm Bedeutung beimisst. Grafik und Hirnschnitt verdeutlichen die Position der Stimulationselektroden (S1 und S2) in der Granulärschicht (dunkel) des auditorischen Kortex. Auf

dessen Oberfläche wurden zudem Ableitelektroden (rot) angebracht, die gleichzeitig mit der Stimulation die sich ausbildenden Aktivitätsmuster aufzeichnen. Dabei bestätigte sich, dass am Reizort selbst frühe Muster entstanden. Spätere, die offenbar der dem Signal zugewiesenen Bedeutung entsprachen, bildeten sich im Abstand von einem bis zwei Millimetern.



Nach heutigem Kenntnisstand kommen im frühen Stadium von Alzheimer die später so typischen krankhaften Ablagerungen (Plaques) und Zellverluste kaum vor. Auffällig ist aber ein Abbau von Synapsen. Damit geht nachlassende Gedächtniskapazität einher, denn diese Kontaktstellen werden bei Lernvorgängen umgestaltet und tragen so zur Fixierung der Information bei. Wie wir zeigen konnten, spielt Dopamin auch hierbei eine entscheidende Rolle.

Das veranlasste uns zu zwei Hypothesen. Zum einen müssten sich Lern- und Gedächtnisprozesse beschleunigen lassen, wenn man nach jedem erfolgreichen Trainingsdurch-

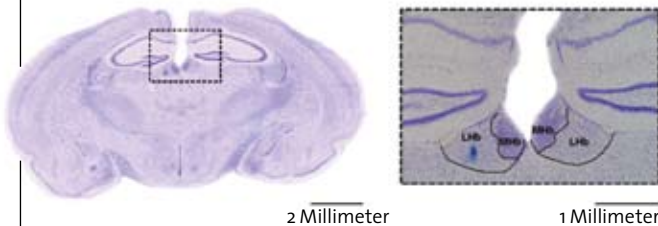
gang eine bestimmte Hirnstruktur, den Mittelhirnkern VTA (ventrales tegmentales Areal, siehe Kasten unten), elektrisch stimuliert und so die Ausschüttung von Dopamin steigert. Zum anderen könnten sich Synapsen des Dopaminsystems, das bei Alzheimerpatienten oft noch gut funktioniert, auf diese Weise stabilisieren, oder ihr Abbau lässt sich zumindest verzögern. In Tierexperimenten haben wir die erste Hypothese bereits bestätigt – Labormäuse lernten bei VTA-Stimulation nicht nur wesentlich schneller, sie vergaßen zudem langsamer. Während dieser Untersuchungen haben wir erkannt, dass ein anderes Kerngebiet des limbischen Systems,

## NEUROPROTHESEN WIDER DAS VERGESSEN

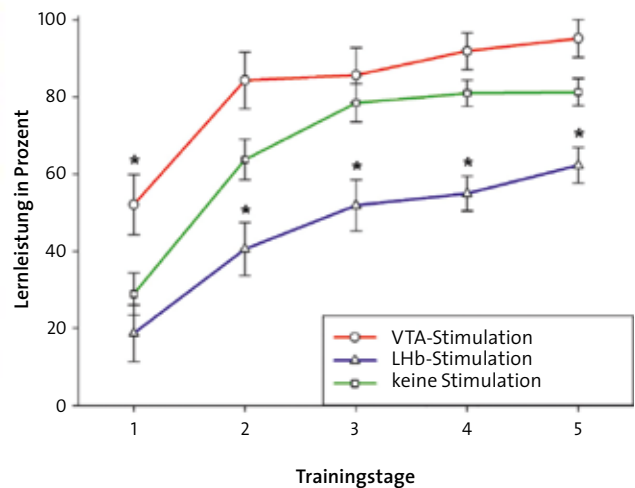
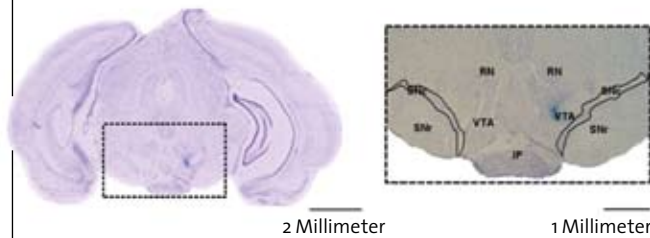
**Synaptische Verbindungen zwischen Neuronen** verankern Gelerntes dauerhaft im Gedächtnis. Gerade in frühen Stadien der Alzheimerkrankheit gehen diese Verknüpfungen verloren. Das Team der Autoren hofft nun, sie durch elektrische Stimulation stabilisieren zu können. Im Tierexperiment testeten sie Elektro-

den in zwei verschiedenen Regionen: dem Mittelhirnkern (VTA) und der lateralen Habenula (LHb), Kerngebieten des Komplexes rezevaluierender Hirnstrukturen. Wurde Ersterer während des Lernvorgangs stimuliert, zeigten die Mäuse bessere Gedächtnisleistungen, bei gleichzeitiger Stimulation der LHb schlechtere.

### LHB-POSITIONIERUNG



### VTA-POSITIONIERUNG



Spektrum der Wissenschaft Extra »Mensch, Natur, Technik« ist eine regelmäßige Sonderpublikation in Kooperation mit der Volkswagenstiftung

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

**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. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Editor-at-Large:** Dr. Reinhard Breuer  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Redaktionsassistenten:** Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 9/2011

**VolkswagenStiftung**

**Leitung Kommunikation:** Jens Rehländer  
**Projektmanagement Veranstaltungen:** Anna Böhnig

[www.volkswagenstiftung.de](http://www.volkswagenstiftung.de)

**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.

**Spektrum** CUSTOM  
DER WISSENSCHAFT PUBLISHING

**Leitung:** Dr. Joachim Schüring  
**Anschrift:** Spektrum der Wissenschaft – Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-612, Fax 06221 9126-5612;

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

die so genannte laterale Habenula, einen umgekehrten, das heißt lernunterdrückenden Effekt ausübt. Diese Erkenntnis könnte sich ebenfalls als nützlich erweisen, um die zweite Hypothese zu überprüfen, die sich noch in einem experimentellen Stadium mit Alzheimer-Tiermodellen befindet.

Auch ein ganz anderer, ein wenig nach Sciencefiction klingender Typus von Neuroimplantaten ist Gegenstand unserer aktuellen Forschungsarbeiten: Prothesen, die durch elektrische Stimulation nicht der peripheren Nerven, sondern der Hirnrinde selbst Wahrnehmungen erzeugen, wenn Sinnesbahnen unterbrochen sind. Bislang steckt die Entwicklung noch in den Kinderschuhen – unseren Untersuchungen zufolge aber nicht auf Grund technischer Unzulänglichkeiten der Interfaces, sondern weil Mediziner die Funktionen der so genannten sensorischen Hirnrindengebiete noch nicht richtig verstehen.

Unsere Experimente deuten darauf hin, dass solche Hirnareale nicht nur akustische beziehungsweise visuelle Reize analysieren, sondern zudem bereits daran beteiligt sind, ihnen subjektive Bedeutung zuzuordnen, beispielsweise einen Pfiff als Warnsignal zu interpretieren. Denn während die Analyse physikalischer Reizeigenschaften in der Hörrinde während einer ersten Erregungswelle geschieht, manifestiert sich die Repräsentation der Bedeutung erst nach einigen zehn bis wenigen hundert Millisekunden in Form komplexer raumzeitlicher Aktivitätsmuster. Während die frühen Muster stereotyp aufgebaut sind, entwickeln sich diese späteren erst im Lauf individueller Lernprozesse.

### Muster der Hirnaktivität

Bereits vor einiger Zeit konnten wir bei Wüstenrennmäusen demonstrieren: Implantiert man zwei Stimulationselektroden in jene Bereiche der Hörrinde, die für tiefe beziehungsweise hohe Frequenzen zuständig sind (siehe Kasten S. 21), lernen die Tiere, verschiedene Reizparameter zu unterscheiden und sie korrekt den Verhaltensalternativen Flucht oder Fluchtvermeidung zuzuordnen. Dazu zählen der Ort der Stimulation – und somit die Tonhöhe – sowie Kombinationen von Ort- und Zeitfolgen. Zusammen mit Matthias Deliano vom Leibniz-Institut für Neurobiologie haben wir kürzlich zusätzlich weitere Elektroden implantiert, um gleichzeitig raumzeitliche Aktivitätsmuster zu messen, die infolge der Stimulation im Gehirn selbst ausgelöst werden. Auch diese Untersuchungen ergaben: Im Zuge des Trainings, die elektrischen Signale richtig zu deuten, entwickelten sich in den Hirnrinden der Tiere individuelle Aktivitätsmuster.

Mathematische Analysen zeigen, dass bei den frühen Mustern die für den Reiz spezifische Information am Reizort selbst am stärksten vertreten ist und mit dem Abstand zur Elektrode abfällt. Das war auf Grund des Aufbaus primärer sensorischer Hirnareale durchaus zu erwarten. Deren Topografie impliziert, dass ähnliche Reize zu räumlich benachbarten Erregungen führen und dass die im Kortex repräsentier-

ten Reize einander mit zunehmendem Abstand immer weniger ähneln. Genau dieses topografische Prinzip war der Ausgangspunkt für alle frühen Versuche, Neuroprothesen für sensorische Hirnrindengebiete zu entwickeln. Bereits in den 1960er und 1970er Jahren sollte die elektrische Reizung der für das Sehen und Hören zuständigen Areale entsprechende Eindrücke auslösen.

Die späten Aktivitätsmuster unterscheiden sich jedoch drastisch von den frühen: Die Information über die Reizbedeutung scheint am Reizort selbst am schwächsten zu sein und erst im Abstand von einigen hundert Mikrometern anzusteigen. Offenbar entsteht sie im Zuge neuronaler Kommunikation rund um den Ort der Stimulation. Erst wenn das geschehen ist, können die elektrischen Reize richtig gedeutet werden. Das wollen wir nun nutzen, um NEIs lernfähig zu machen. Sie sollen sich auf die für ihren Träger spezifischen Repräsentationen für Sinnesreize einstellen können, um mit dem Gehirn optimal zu kommunizieren. ~

## Späte Aktivitätsmuster repräsentieren die Bedeutung eines Reizes

### DIE AUTOREN



**Henning Scheich** (links) studierte Medizin und Philosophie in Köln, Montpellier sowie München und hatte nach Ausbildungsjahren in den USA einen Lehrstuhl für Neurobiologie an der Technischen Universität Darmstadt inne.

Heute leitet er die Abteilung »Akustik, Lernen, Sprache« des Leibniz-Instituts für Neurobiologie in Magdeburg, dessen Gründungsdirektor er 1992 war. Er ist auch Leiter der tierexperimentellen Forschung am Deutschen Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (DZNE), Standort Magdeburg. **Frank W. Ohl** promovierte nach einem Studium der Biologie und Physik an der Technischen Hochschule Darmstadt. Nach seinem Postdoc an der University of California in Berkeley wurde er Professor für Neurobiologie an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Seit 2011 leitet er zudem die Abteilung »Systemphysiologie des Lernens« des Leibniz-Instituts für Neurobiologie in Magdeburg.

### QUELLEN

**Deliano, M. et al.:** Auditory Cortical Activity after Intracortical Microstimulation and its Role for Sensory Processing and Learning. In: Journal of Neuroscience 29, S. 15898–15909, 2009

**Müller, U.J. et al.:** Successful Treatment of Chronic Resistant Alcoholism by Deep Brain Stimulation of Nucleus Accumbens: First Experience with Three Cases. In: Pharmacopsychiatry 42, S. 288–291, 2009

**Scheich, H., Breindl, A.:** An Animal Model of Auditory Cortex Protheses. In: Audiology and Neurotology 7, S. 191–194, 2002

**Shumake, J. et al.:** Differential Neuromodulation of Acquisition and Retrieval of Avoidance Learning by the Lateral Habenula and Ventral Tegmental Area. In: Journal of Neuroscience 30, S. 5876–5883, 2010

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1117193](http://www.spektrum.de/artikel/1117193)

TIEFE HIRNSTIMULATION

# Neuronaler Schrittmacher

Überaktive Neurone, die im Gleichtakt feuern, verursachen Morbus Parkinson und andere motorische sowie psychiatrische Störungen. Wo Medikamente nicht greifen, können tief in das Gehirn eingeführte Elektroden den Patienten helfen.

Von Volker Sturm

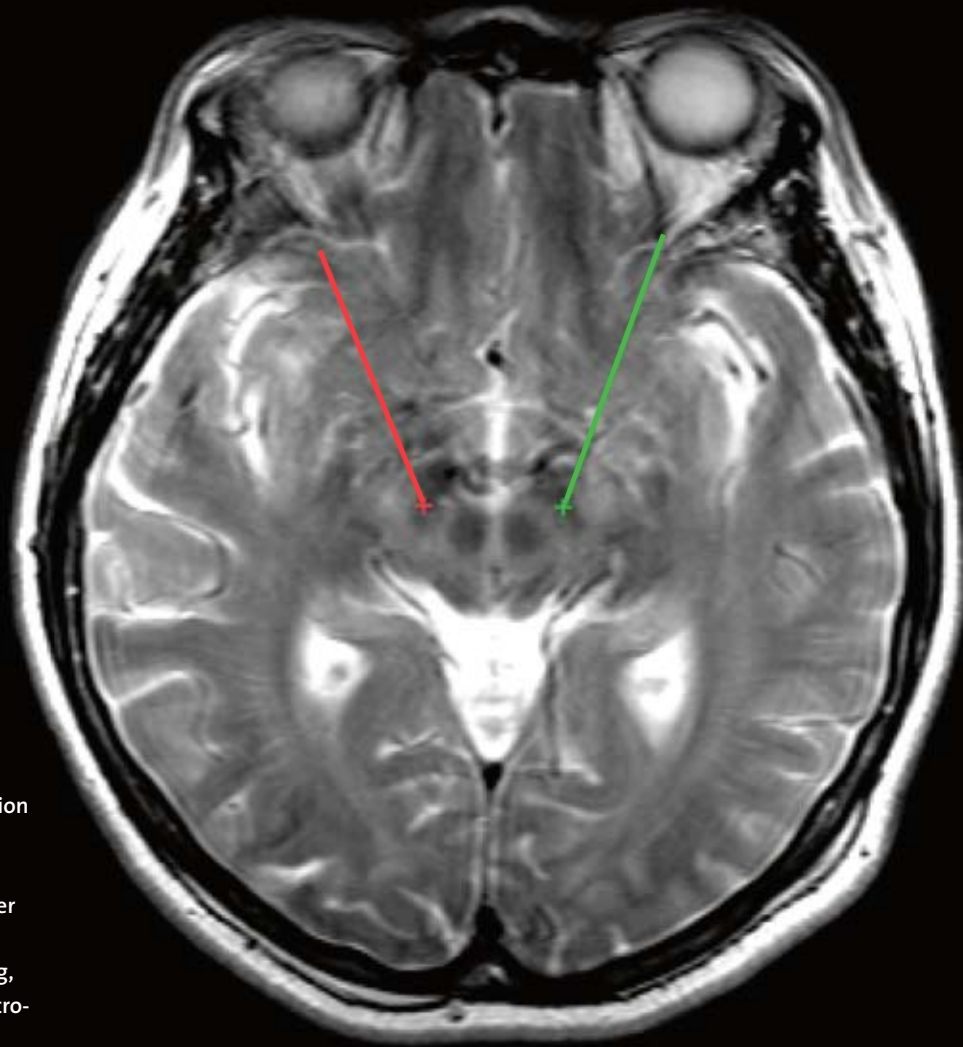
»S haking Palsy«, zu Deutsch Schüttellähmung – so nannte der englische Apotheker James Parkinson (1755–1824) eine Krankheit, die er 1817 erstmals beschrieb. Grund dafür war das auffällige Zittern seiner Patienten. Seine Bezeichnung war jedoch irreführend: Bei dem nach dem Entdecker benannten Morbus Parkinson verarmt vielmehr die gesamte Motorik bis hin zur Bewegungslosigkeit; hinzu gesellen sich Muskelstarre und eine instabile Körperhaltung – neben dem unwillkürlichen Zittern vor allem der Hände. Schuld daran trägt eine aus dem Takt geratene Schaltzentrale im Gehirn. Diese können Neurochirurgen inzwischen mit so genannten Hirnschrittmachern beeinflussen – zumindest bei Patienten mit »idiopathischem Parkinsonsyndrom«, der häufigsten Variante der Erkrankung.

Im Gehirn von Parkinsonpatienten gibt es generell zu wenig Dopamin. Dabei handelt es sich um einen Neurotransmitter, also einen Botenstoff, der Informationen an Synap-

sen von einer Nervenzelle auf eine andere überträgt. Der Grund für diesen chronischen Mangel: In der Substantia nigra, einem etwa erbsengroßen Areal im Mittelhirn, sterben jene Zellen ab, die den Botenstoff produzieren. Eine medikamentöse Behandlung mit L-Dopa, einer Vorstufe des Dopamins, oder mit Dopamin ähnelnden Substanzen kann den Neurotransmitter bis zu einem gewissen Punkt kompensieren und die Beschwerden deshalb über viele Jahre erfolgreich lindern.

Lange Zeit dachte man, der Dopaminmangel verursache seinerseits ein weiteres Zellsterben und damit irreparable Schäden. Ärzte und Wissenschaftler hielten daher bis vor rund 15 Jahren das Schicksal der Patienten für besiegelt, sobald die medikamentöse Behandlung ihre Wirkung verlor und alltägliche Handlungen wie Waschen, Zähneputzen und Ankleiden zur unüberwindlichen Hürde wurden. Heute kennen wir die wahren Mechanismen. Zwar gehen in der Sub-





Eine Ursache des Morbus Parkinson ist die Fehlfunktion des Nervenkerne Nucleus subthalamicus. Die tiefe Hirnstimulation wirkt dieser entgegen. Im Bild eine am Computer erstellte Planung, auf welchem Weg die Elektroden einzuführen sind

stantia nigra von Parkinsonpatienten tatsächlich Dopamin produzierende Zellen zu Grunde, doch das Fortschreiten der Krankheit hat zumindest beim idiopathischen Parkinsonsyndrom seinen Ursprung an einem anderen Ort im Gehirn: dem Nucleus subthalamicus, einem so genannten Nervenkerne, der als Schaltzentrale der Motorik dient.

Bei Gesunden herrscht dort scheinbares Chaos. Die Neurone feuern durcheinander und versenden aktivierende Signale an die nachgeordneten Regionen der Bewegungssteuerung. Fehlt nun aber der Botenstoff Dopamin, wächst die bioelektrische Aktivität in diesem Kern nicht nur, die Zellen beginnen obendrein im Gleichtakt zu arbeiten – sie synchronisieren sich. Schließlich wird das Kerngebiet zum »Störsender«. Es blockiert nachgeschaltete Instanzen und in der Folge auch die für Bewegungen zuständige motorische und prämotorische Hirnrinde. Folge: Die Patienten erstarrten regelrecht.

## AUF EINEN BLICK

### DEFEKTE REGELKREISE DIMMEN

**1** Lange glaubten Forscher, die fortschreitende Bewegungsstörung bei idiopathischer **Parkinsonkrankheit** sei eine Folge zunehmenden **Dopaminmangels**. Inzwischen erwies sich aber der Nervenkerne **Nucleus subthalamicus** als Ursache der Verschlechterung: Seine Zellen feuern synchrone Signale und stören damit nachgeschaltete Gehirnbereiche.

**2** Stereotaktisch – minimalinvasiv und hochpräzise – an den defekten Kern geführte Elektroden können dessen Aktivität mit geeigneten elektrischen Impulsen »dimmen« oder ganz ausschalten. Die **tiefe Hirnstimulation** vermag damit schwere Parkinsonsymptome zu lindern oder gar zu beseitigen.

**3** Dies zeigt: Gehirnaeale sind oft über **Regelkreise** miteinander verbunden, um bestimmte Funktionen zu erfüllen. Auch bei **Sucht**, **schwerer Depression** oder **Schizophrenie** könnte die tiefe Hirnstimulation deshalb helfen.

Der französische Neurochirurg Alim-Louis Benabid in Grenoble zog 2004 die logische Konsequenz: Er pflanzte feine Elektroden in den gestörten Nucleus subthalamicus eines Parkinsonpatienten. Über dünne, unter der Haut verlaufende Kabel verband Benabid sie mit einem Impulsgeber, den er – ähnlich einem Herzschrittmacher – zwischen Brustmuskel und Haut positionierte. Auf diese Weise stimulierten schwache elektrische Impulse die Zellen des Nervenkerne und veränderten so deren krank machende elektrische Aktivität. Fachleute bezeichnen das als tiefe Hirnstimulation. Spannung, Dauer und Frequenz der Impulse lassen sich je nach Patient variieren, um die überschießende, gleichgeschaltete Aktivität der Neurone zu blockieren und so den Störsender abzuschalten oder zumindest herunterzufahren. Bei erfolgreichem Einsatz funktionieren die übergeordneten Instanzen wieder, die Regelkreise arbeiten normal, und die Beweglichkeit der Patienten verbessert sich deutlich. Im optimalen Fall verschwinden die Symptome während der Stimulation nahezu vollständig. Sorgfältige Planung der Eingriffe ist geboten, denn der Nervenkerne besteht aus drei Regionen mit unterschiedlicher Funktion. Die Elektroden sollten nur den motorischen Teil erreichen, nicht aber den assoziativen oder den limbischen, die in kognitive beziehungsweise emotionale Regelkreise eingebunden sind. Sonst sind Nebenwirkungen wie Sprachstörungen möglich.

### Minimalinvasiv ins Gehirn

Je eine Elektrode mit vier Stimulationskontakten wird in den Nucleus subthalamicus beider Hirnhälften implantiert. Die Operation ist komplex und verläuft dennoch minimalinvasiv. Durch ein nur acht Millimeter großes Loch führt der Neurochirurg die Elektroden über Katheter ein. Bildgesteuerte, computerunterstützte Berechnungen helfen, sie punktgenau zu platzieren und dabei andere Hirnareale und kritische Stellen wie Blutgefäße nicht zu verletzen. Der Eingriff läuft unter lokaler Betäubung ab, also bei vollem Bewusstsein des Patienten. Der Grund dafür: Bereits während der Operation muss der Chirurg Tests durchführen, um die Impulse für die Stimulation richtig einzustellen, so dass die Parkinsonsymptome verschwinden, aber keine unerwünschten Nebenwirkungen entstehen. Dafür braucht er die Rückmeldung des Patienten. Die Stimulation erfolgt mit sehr schwachen elektrischen Impulsen, die dieser nicht wahrnimmt.

Die implantierte Elektronik lässt sich auch nach dem Einsetzen noch programmieren und so individuell anpassen. Und während es bei den ersten Hirnschrittmachern noch notwendig war, alle vier Jahre Batterien operativ auszutauschen, werden sie heute durch Induktion aufgeladen. Dazu muss der Patient ein Ladegerät über den im Brustbereich eingesetzten Impulsgeber halten; man spricht

hier von Hirnschrittmachern der zweiten Generation. Eine Operation erfolgt erst wieder nach neun Jahren – der meist verwendete Impulsgeber des Unternehmens Medtronic schaltet sich nach dieser Zeit automatisch ab, weil die Firma nur für diesen Zeitraum die korrekte Funktion garantiert.

Bisher fanden sich auch nach langjähriger Behandlung bei der Untersuchung der stimulierten Hirnareale verstorbener Patienten keinerlei Zellschäden. Sollten stimulationsbedingte Funktionseinschränkungen auftreten, lassen sie sich durch Neuprogrammierung oder im Extremfall durch vollständiges Abschalten des Schrittmachers jederzeit rückgängig machen.

Das Verfahren hat sich dank seines großen Erfolgs recht schnell durchgesetzt. Weltweit behandelten Neurochirurgen bereits gut 90 000 Patienten mit tiefer Hirnstimulation. Allein in unserem Zentrum in der Kölner Universitätsklinik verpflanzten wir mehr als 1200 Hirnschrittmacher, zumeist bei Morbus Parkinson. Damit verfügen wir über die größte Erfahrung auf diesem Gebiet weltweit.

Schnell zeigte sich, dass diese Therapieform auch bei anderen Bewegungsstörungen von Erfolg gekrönt ist. Dazu zählen der schwere Tremor – ein massives Muskelzittern, das erblich oder durch Krankheiten wie multiple Sklerose bedingt sein kann – sowie verschiedene Formen der Dystonie, also neurologische Bewegungsstörungen. Doch die Neuromodulation tief im Gehirn hat nicht nur große praktische Bedeutung, weil sie Patienten, die noch vor wenigen Jahren als nicht mehr behandelbar galten, jahrelanges Leid ersparen kann. Sie brachte zudem einen erheblichen Erkenntnisgewinn über verschiedene Hirnfunktionen. Insbesondere setzen einige davon offenbar eine intakte Kommunikation zwischen funktionellen Arealen voraus, die über Schleifen der Erregung – fachlich: kortikobasale Loops – verbunden sind und sich wechselseitig beeinflussen.

Immer mehr Neurowissenschaftler sind deshalb davon überzeugt, dass eine Störung solcher Regulations Schleifen nicht nur bei motorischen, sondern auch bei psychiatrischen Erkrankungen eine zentrale Rolle spielt. Tatsächlich haben beide Krankheitstypen trotz ihrer unterschiedlichen Symptome einen gemeinsamen Nenner: Die bioelektrische Aktivität von Neuronen ist in betroffenen Gebieten des Gehirns in pathologischer Weise synchron geschaltet. Die Ursache hierfür kann in genetischen Fehlern liegen. Oftmals gesellen sich weitere schädigende Faktoren hinzu, etwa während der Embryonalentwicklung durch Sauerstoffmangel oder als Nebenwirkung von Medikamenten. Meist ist das Störzentrum, in dem Hirnzellen absterben, so winzig, dass es sich mit bildgebenden Verfahren nicht ausmachen lässt.

Im weiteren Krankheitsverlauf werden die betroffenen Zellverbände immer leichter erregbar. Mehr und mehr Neurone beginnen



Über zwei Elektroden wird der Nucleus accumbens stimuliert – eine mögliche Therapie für Patienten mit schwerer Depression.



MIT FRIEDRICH-VON-VOLKERS-STRAÙE, UNIKLINIK KÖLN

**Stereotaktische Operationen sind punktgenaue Eingriffe in das Gehirn. Sie setzen eine computergestützte Planung sowie ein mechanisches Zielgerät voraus.**

im Gleichtakt zu feuern. Sie stören damit neuronale Regelkreise und hemmen die darüber verknüpften Regionen in der Hirnrinde. Je nachdem, welche Regulationsschleifen und Bereiche betroffen sind, leiden die Patienten beispielsweise unter Depressionen, Zwangserkrankungen, dem Tourette-Syndrom, Schizophrenie oder Autismus.

Tatsächlich hat unsere Forschungsgruppe große Erfolge in der Therapie von Patienten mit Zwangsstörungen, bei denen wir den Nucleus accumbens, eine wichtige Schaltstelle des neuronalen Belohnungssystems, über Elektroden reizen. Unseren holländischen Kollegen um den Psychiater Damian Denys von der Universität Amsterdam gelang dies 2010 ebenfalls, wobei sie den Kern gleich von zwei Seiten behandelten. Das Ergebnis: Bei 9 der 14 Freiwilligen ging das krankhafte Wiederholen immer gleicher Handlungen und Gedanken kontinuierlich zurück, und zwar bereits innerhalb der ersten Woche nach Implantation.

### Erste Erfolge bei Depressionen

Den Nucleus accumbens steuern wir in Zusammenarbeit mit Thomas Schlaepfer von der Uniklinik Bonn auch zur Behandlung schwerer Depressionen an (siehe Bild links). Offenbar führen hier aber mehrere Wege zum Ziel. Helen Mayberg etwa, die heute an der Emory University in Atlanta (Georgia) forscht, und ihre Mitarbeiter reizten nicht diesen Nervenkern, sondern einen speziellen Teil des zingulären Kortex. Diese Hirnregion steht beispielsweise in Zusammenhang mit dem Körpergefühl. Letztlich drehen alle Teams wohl an ein und demselben Regelkreis – nur eben an unterschiedlichen Stellschrauben. Welcher Weg langfristig am wirkungsvollsten ist, wird sich in den nächsten Jahren zeigen. Möglicherweise bedürfen auch verschiedene Krankheitstypen jeweils unterschiedlicher Stimulation.

Derzeit erproben wir – gemeinsam mit unseren Kooperationspartnern Jens Kuhn, Oberarzt an der Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie der Universitätsklinik Köln, sowie

dem Neurologen Hans-Joachim Freund, Emeritus der Universität Düsseldorf –, ob sich die tiefe Hirnstimulation auch zur Behandlung leichter bis mittelschwerer Alzheimerdemenz eignet. Im Visier haben wir dabei den Nucleus basalis Meynert, einen Kern im Bereich des basalen Vorderhirns, der einer flachen Scheibe ähnelt. Im gesunden Denkgorgan versorgen Zellen dort viele Bereiche der Hirnrinde mit dem Botenstoff Acetylcholin. Und genau diese Regionen funktionieren bei Alzheimerpatienten nicht mehr richtig, so dass die Betroffenen selbst einfachste Tätigkeiten wie Essen und Zähneputzen kaum bewältigen können.

Hier arbeitet die tiefe Hirnstimulation ein wenig anders: Wir dimmen keinen Störsender, sondern aktivieren vielmehr den geschädigten Kern, um so die Reizweiterleitung durch Acetylcholin wieder anzukurbeln. Möglicherweise – so unsere Hoffnung – sorgt die Stimulation zudem dafür, dass Schutz- und Wachstumsfaktoren für die Nervenzellen ausgeschüttet werden, was den Fortbestand von neuronalen Verbindungen stabilisieren und den weiteren Verfall des Gehirns aufhalten könnte. Wir haben zwar erst kürzlich Patienten die Elektroden implantiert, das Konzept scheint aber aufzugehen.

Sicher ist: Die tiefe Hirnstimulation bietet die einzigartige Möglichkeit, gestörte Regelkreise im Denkgorgan höchst selektiv zu beeinflussen und so die immer stärker werdende pathologische Synchronisation zu unterbrechen. Damit erzielen wir zwar noch keine Heilung – schaltet man den Schrittmacher aus, geht das Problem von vorne los –, doch wir sorgen für eine deutliche Linderung der Symptome und können sie im Idealfall sogar ganz »abstellen«.

Die Herausforderung für die Zukunft lautet, die krankheitsspezifischen Regelkreise noch genauer zu identifizieren, um noch exakter stimulieren zu können. Und wir hoffen auf verbesserte Techniken. So hat unser Kooperationspartner im Forschungszentrum Jülich, der Mathematiker Peter Tass, Algorithmen für die Impulsfolge entwickelt, mit denen sich Störsender im Hirn gezielt desynchronisieren lassen. Der krank machende Gleichtakt der Neurone wird damit also nicht nur unterdrückt, sondern tatsächlich behoben. Noch gilt es, diese Hirnschrittmacher der dritten Generation eingehend zu prüfen, bevor sie tatsächlich am Menschen zum Einsatz kommen. Doch wir sind zuversichtlich, dass damit große therapeutische Erfolge zu erreichen sind. ~

#### DER AUTOR



**Volker Sturm** leitet die Klinik für Stereotaxie und Funktionelle Neurochirurgie der Universität Köln. Er operiert zudem am International Neuroscience Institute in Hannover.

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1117215](http://www.spektrum.de/artikel/1117215)