

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ERDE 3.0

Wasserstoff –  
der Energieträger  
für die Zukunft

MAI 2012

ASTRONOMIE

Dunkle Materie  
in der Milchstraße

ARCHÄOLOGIE

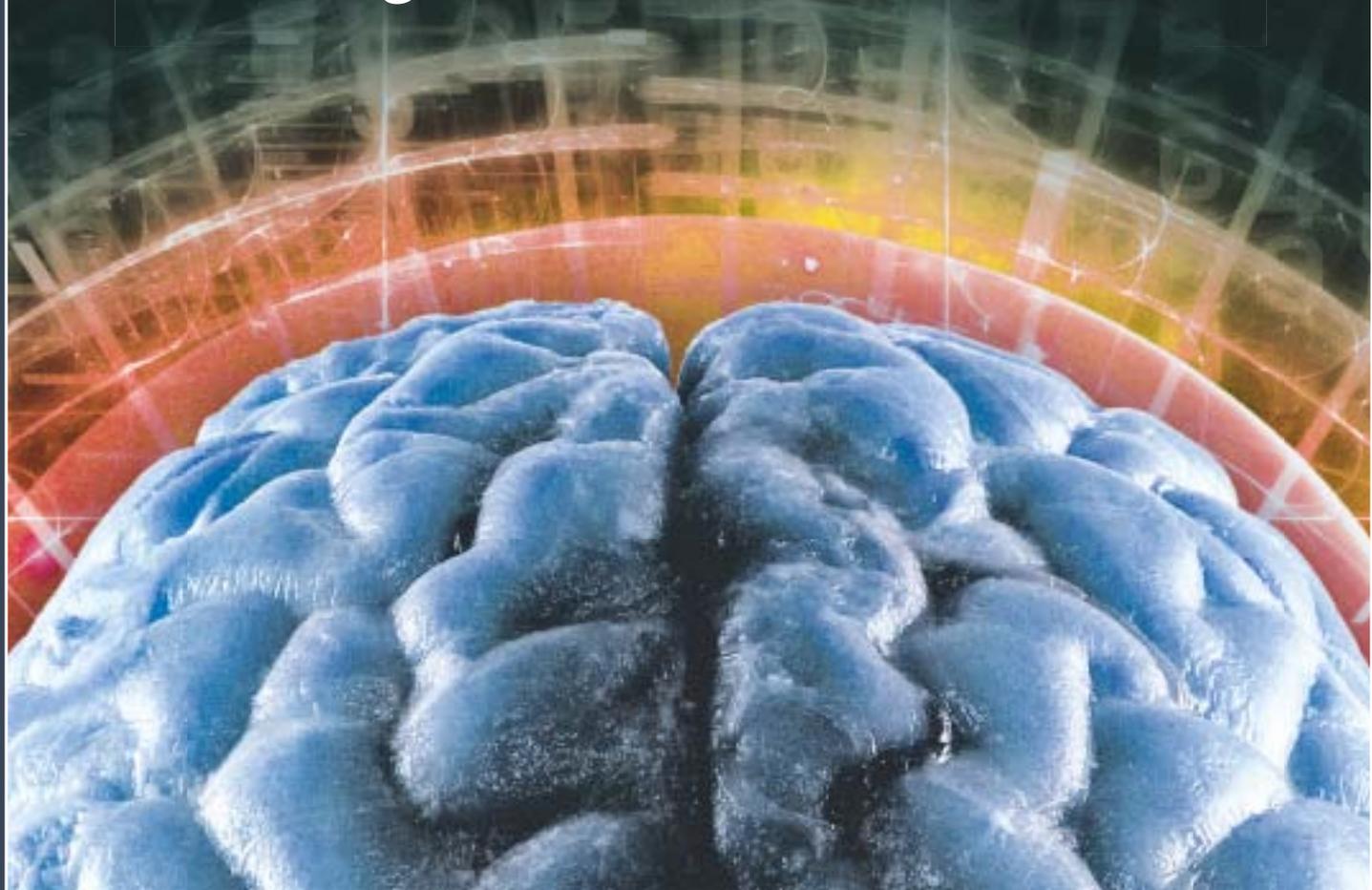
Die Megalithen  
Sumatras

MEDIZIN

Mit Gentherapie  
gegen Aids

## Die Grenzen der Intelligenz

Wie klug können wir noch werden?



7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.

D6179E

05



4 194058 407907

# Unsere Neuerscheinungen



Spektrum Spezial – Biologie, Mensch, Kultur 2/2012

## DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

Was ist der Mensch? Hat er einen freien Willen? Wie entsteht Bewusstsein? Was können wir überhaupt wissen? Was ist Gerechtigkeit? Viele der großen Fragen der Menschheit haben Philosophen schon in der Antike aufgeworfen und in jeder Epoche neu gestellt. Doch in einer Welt, die immer komplexer wird und sich rascher verändert als je zuvor, gehen den Philosophen die Fragen nicht aus. Und immer neue kommen hinzu, etwa die nach ethischen Grenzen des technischen Fortschritts. In diesem **Spektrum-Spezial** legen namhafte Philosophen dar, welche Rolle ihre Disziplin in unserer modernen Zeit spielt und was sie heute zu den größten Rätseln der Menschheit zu sagen hat. Dabei zeigt sich, wie spannend das Nachdenken über die Welt immer noch ist.

Das Spezial »Die größten Rätsel der Philosophie« kostet € 8,90 zzgl. Versand. Die Spezial-Reihen können auch unter [www.spektrum.de/spezialabo](http://www.spektrum.de/spezialabo) bezogen werden.



Gehirn&Geist-Basiswissen 5

## »DIE VERMESSUNG DER SEELE«

Psychologie und Hirnforschung sind Wissenschaften mit kurzer Geschichte, aber langer Vergangenheit. In diesem Sonderheft, dem fünften Teil unserer Serie **Basiswissen**, präsentieren wir die besten **G&G**-Beiträge über Pionierleistungen aus fünf Jahrhunderten: Begleiten Sie Künstler, Gelehrte und Forscher bei ihren Erkundungen des menschlichen Geistes. Themen der Ausgabe sind unter anderem:

- > Innenansichten des Seelenorgans
- > »Das Gehirn ist ein Irrweg«
- > Einblicke in die Dynamik des Denkens
- > Hirnforschung und Psychologie – eine schwierige Beziehung

Das neue **Basiswissen** kostet € 8,90 zzgl. Versand.

Alle Hefte der Reihe können auch unter [www.gehirn-und-geist.de/basiswissen](http://www.gehirn-und-geist.de/basiswissen) bezogen werden.



## STERNE UND WELTRAUM 5/2012

**Sterne und Weltraum** bietet monatlich eine umfassende Weltraumperspektive für alle, die von der kosmischen Umgebung unserer Erde fasziniert sind. Experten ihres Fachs beschreiben für Sie das spannende Geschehen im Weltall. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

- >> Kosmischer Staub: Seine Schlüsselrolle im Kreislauf der Materie
- >> Weltweites Netz: Auf der Suche nach Gravitationswellen
- >> Supernova in M101: Wie kam es zur großen Sternexplosion
- >> Kleinplaneten: Amateure und Profis forschen gemeinsam
- >> Weltall im Computer: Virtuelle Raumflüge mit Redshift 3D

**Sterne und Weltraum** kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (12 Ausgaben pro Jahr) für € 85,20 inkl. Inlandspporto (ermäßigt auf Nachweis € 64,-) zu beziehen.



## GEHIRN&GEIST 5/2012

Zehnmals pro Jahr erwarten Sie in **G&G** spannende Berichte aus folgenden Themengebieten: Psychologie, Hirnforschung, Medizin, Psychiatrie, Psychotherapie, Philosophie, Pädagogik, Religion, Neurotheorie und künstliche Intelligenz. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

- >> Ernährung und Psyche: Essen, das die Seele schützt
- >> Hirnforschung: Täterprofile im Hirnscan
- >> **Spezial Alzheimer**: Die Krankheit des Vergessens
- >> Die Qual der Wahl: Weniger ist mehr

**Gehirn&Geist** kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (10 Ausgaben pro Jahr) für € 68,- inkl. Inlandspporto (ermäßigt auf Nachweis € 55,-) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:



Hartwig Hanser  
Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.com

## Intelligenz – Spielball der Evolution?

In den 1980er Jahren machte der Politologe James R. Flynn eine interessante Beobachtung: Die Ergebnisse von Intelligenztests hatten sich in den Industrieländern während der vorherigen Jahrzehnte stetig verbessert. Je nach Testform und Land nahmen die IQ-Werte von Generation zu Generation um 5 bis 25 Punkte zu. Werden wir also immer schlauer?

Die Biologie macht uns da eher wenig Hoffnung: Die Evolution des menschlichen Denkorgans könnte bereits an ihrem Ende angelangt sein; einer weiteren Optimierung stehen laut Studien unüberwindbare physikalische Gesetze entgegen (siehe Artikel ab S. 26).

Kaum war der Flynn-Effekt richtig bekannt geworden, stießen Forscher auch schon auf einen gegenläufigen Trend in manchen Industrieländern. Der durchschnittliche IQ scheint dort einigen Untersuchungen zufolge in den 1990er Jahren einen Höchststand erreicht zu haben und fällt seitdem wieder ab! Auch hier streiten die Experten noch über die möglichen Gründe. So diskutieren sie sich verschlechternde Ernährungsgewohnheiten, übermäßigen Konsum elektronischer Medien, die demografische Entwicklung – sowie verstärkte Einwanderung.

**Das erinnert an Thilo Sarrazins umstrittene Thesen** zur Intelligenzentwicklung in Deutschland, mit denen er 2010 für Aufsehen sorgte. Eine häufig kritisierte Passage seines Buchs »Deutschland schafft sich ab« beschreibt die menschliche Intelligenz als zu 50 bis 80 Prozent erblich. Tatsächlich ist Sarrazins Wortwahl sehr ungenau und damit irreführend. Besser sollte man sagen, dass Variationen des IQ-Werts in der Bevölkerung zu – grob geschätzt – rund zwei Dritteln auf Erbgutabweichungen zwischen Individuen und zu etwa einem Drittel auf unterschiedlichen Entfaltungsbedingungen für die Erbanlagen in der jeweiligen Umwelt beruhen. Vor allem stehen die beiden Aspekte nicht in einem additiven, sondern einem multiplikativen Verhältnis zueinander, wie der Verhaltensbiologe Joachim Bense im »Lexikon der Biologie« betont: Intelligenz ist nicht die Summe von Genen und Umwelt, sondern ihr Produkt.

Letztlich wollen jedoch beide Formulierungen auf dasselbe hinaus: Wie leistungsfähig ein Gehirn ist, hängt mindestens so sehr von biologischen wie von Umweltfaktoren ab, vielleicht sogar wesentlich mehr. Da nun aber anscheinend von der Evolution kaum weitere Verbesserungen zu erwarten sind – und diese ohnehin nur über lange Zeiträume zum Tragen kämen –, bleiben lediglich die nichtbiologischen Grundlagen der Intelligenzausprägung als Ansatzpunkt, um unsere Denkfähigkeit zu erhöhen.

Glücklicherweise besteht hier noch einiges Entwicklungspotenzial. Denn laut verschiedenen Studien hängen IQ-Unterschiede in so genannten bildungsfernen Kreisen viel stärker von Umweltbedingungen ab als bei privilegierteren Mitgliedern der Gesellschaft wie typischen Akademikern. Damit schließt sich der Kreis zum Flynn-Effekt: Wir müssen schlicht die Umweltbedingungen so verbessern, dass jeder das ihm in Form von Erbfaktoren in die Wiege gelegte Intelligenzpotenzial möglichst weit gehend realisieren kann. Hier ist die Politik gefordert, diese Chance vor allem jenen zu geben, die davon am meisten profitieren könnten!

Herzlich Ihr

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



**Carl H. June** (links) und **Bruce L. Levine** von der University of Pennsylvania in Philadelphia wollen mit einem neuen gentechnischen Ansatz dem Aids-erregere HIV ein Schnippchen schlagen (ab S. 34).



Warum ist die Milchstraße verbogen? Der Astronom **Leo Blitz** von der University of California in Berkeley führt das auf Schwerkrafteffekte der Dunklen Materie zurück (ab S. 42).



Seit 2003 leitet **Dominik Bonatz** von der Freien Universität Berlin Ausgrabungen auf Sumatra. Der Professor für Vorderasiatische Archäologie beschreibt ab S. 58 die engen Verflechtungen zweier scheinbar getrennter Kulturen in unterschiedlichen geografischen Regionen der Tropeninsel.



52 Das Geheimnis der Glorien



74 Wasserstoffwirtschaft



58 Sumatra



42 Die Auswirkungen der Dunklen Materie

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

**TITELTHEMA**

► **26 Die Grenzen des Gehirns**

*Douglas Fox*

Können wir aus biologischer Sicht noch wesentlich schlauer werden? Experten meinen: Nein! Denn unser Gehirn hat schon alle Möglichkeiten der Optimierung ausgereizt.

► **34 Zutritt verboten für HIV**

*Carl H. June, Bruce L. Levine*

Forscher manipulieren Immunzellen von HIV-Infizierten, um sie genetisch dauerhaft gegen das Aidsvirus resistent zu machen.

► **42 Die dunkle Seite der Milchstraße**

*Leo Blitz*

Die Scheibe unserer Galaxis ist leicht verbogen. Ist daran die Dunkle Materie schuld?

**SCHLICHTING!**

**50 Schau nicht so genau hin!**

*H. Joachim Schlichting*

Grob verpixelte Gesichter sind kaum zu erkennen – es sei denn, man vernichtet noch mehr Information.

**52 Das Leuchten des Heiligenscheins**

*H. Moysés Nussenzveig*

Für das rätselhafte atmosphärische Phänomen der Glorien ist vor allem der so genannte optische Tunneleffekt verantwortlich.

► **58 Megalithen im Regenwald**

*Dominik Bonatz*

Archaische Steinkolosse im Dschungel des Hochlands, Paläste und Tempelanlagen im Tiefland: Auf Sumatra kooperierten einst zwei Kulturen, wie sie verschiedener nicht sein konnten.

**MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN**

**66 Wundergarten der Polyeder**

*Norbert Treitz*

Räumliche Körper fügen sich auf überraschende Weise zu großen Strukturen zusammen, etwa zu Zerlegungen des Raums in zwei getrennte Teile, die unendlich groß sind und sich unendlich oft umschlingen.

26  
TITELTHEMA

# Die Grenzen der Intelligenz

Wie viel klüger  
können wir  
noch werden?



## ERDE & UMWELT



SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE

ERDE3.0

► **74 Hoffnungs(energie)träger  
Wasserstoff**

*Vincent Artero, Nicolas Guillet,  
Daniel Fruchart, Marc Fontecave*  
Wasserstoff könnte viele Probleme der Energieversorgung lösen – sofern die Kosten für Produktion und Speicherung deutlich sinken.

INTERVIEW

**82 »Wir wollen  
die Welt retten«**

Der Chemiker Robert Schlögl verrät, warum bessere Katalysatoren der Schlüssel für effektivere Elektrolyseure und Brennstoffzellen sind.

## TECHNIK & COMPUTER

► **84 Vermehrungsfähige  
Maschinen**

*Jean-Paul Delahaye*

Zelluläre Automaten sind sehr einfach gebaut. Gleichwohl können sie wesentliche Mechanismen des Lebens nachbilden, darunter insbesondere die Vermehrung.

Titelmotiv:

*Gehirn: Adam Voorhes Photography;  
Hintergrund: iStockphoto /  
Andrew Ostrovsky [M]; Bearbeitung:  
Spektrum der Wissenschaft*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

## SPEKTROGRAMM

**8** Tauwetter auf Grönland • Genetisch veränderter Hartweizen • Orientierung bei Wüstenameisen • Frühe Magnetfelder im All • Mesopotamische Siedlungsgeschichte • Spektroskopie von Antiwasserstoff

## BILD DES MONATS

**11** Blick auf Merkur

## FORSCHUNG AKTUELL

**12** Kosmische Raubtierfütterung  
Schwarzes Loch verschlingt Gaswolke

**14** Revolution der Riesenviren  
Eine vierte Domäne des Lebens?

**16** Qubits auf der Datenautobahn?  
Beugungsgrenze in der Quantenoptik durchbrochen

**20** Feinfühliges Spinnen  
Beuteortung mittels Vibrationen

KOMMENTAR

**21** Neutrinos nicht überlichtschnell  
Ein Messfehler mit Folgen

**22** Abelpreis für Endre Szemerédi  
Kombinatorik und extremale Graphen

SPRINGERS EINWÜRFE

**24** Fliegen wie ein Vogel  
Roboter können es mittlerweile

## WEITERE RUBRIKEN

**3** Editorial

**6** Leserbrief/Impressum

**92** Rezensionen  
*M. Laita:* Wasserfarben  
*R. Penrose:* Zyklen der Zeit  
*Zahlreiche Werke von H. Lesch et al.*  
*B. Kanitscheider:*  
Das hedonistische Manifest  
*A. Fothergill, K. Scholey:* Im Reich der Raubkatzen (Film); u. a.

**104** Wissenschaft im Rückblick  
Vom Telegrafen zum Radioteleskop

**105** Exponat des Monats  
Der »Flammenwagen« – Raketenmotor mit Flüssigtreibstoff

**106** Vorschau

## Das letzte Rätsel

Der Physiker Claus Kiefer stellte Ansätze vor, wie Quantenphysik und allgemeine Relativitätstheorie vereint werden können. (»Auf dem Weg zur Quantengravitation«, April 2012, S. 34)

**Walter Weiss, Kassel:** Der Autor gibt einen Überblick über die immer komplizierter werdenden Theorien zur Lösung dieses »letzten Problems« mit gezwungenmaßen auch immer komplizierter werdenden mathematischen Formeln, die diese Theorien darstellen. Das erweckt jedoch den Eindruck, als habe die Suche nach einer Lösung manische oder zumindest krampfhaftige Züge angenommen. Es stellen sich einige Fragen: 1) Handelt es sich womöglich um ein Scheinproblem? Muss eventuell die Divergenz zwischen Quantenphysik und allgemeiner Relativitätstheorie von unserem irdischen Verstand schlicht hingenommen werden (wie etwa die viel weniger gewichtige Divergenz zwischen Korpuskel- und Wellennatur des Lichts)? 2) Ist die Mathematik als bisher stets ausschlaggebendes Instrument bei der Lösung naturwissenschaftlicher Probleme hier an ihre Grenze gestoßen? Die Mathematik kann nie etwas anderes



**Die Raumzeit könnte sich aus winzigen Raumzeitstücken zusammensetzen – so ein Vorschlag zur Zusammenführung von Quanten- und Relativitätstheorie.**

leisten, als die zu definierenden und zu untersuchenden Vorgänge auf unserer mit der Reichweite unserer körperlichen Sinne begrenzten Umwelt abzubilden. 3) Sind die vielen komplizierten Versuche, die der Autor darstellt, vielleicht weniger darauf gerichtet, das »letzte Rätsel« zu lösen – als vielmehr darauf, mit allen Mitteln die Anwendbarkeit der Mathematik auch hier zu verteidigen?

### Antwort des Autors Claus Kiefer:

Zu 1): Das Problem ist, dass allgemeine Relativitätstheorie und Quantenphysik nicht gleichzeitig exakt gelten können. Das liegt zum Beispiel an dem unter-

schiedlichen Zeitbegriff, wie im Artikel ausgeführt. Auch wenn diese Diskrepanz für die Alltagsphysik keine Rolle spielt, steht sie doch einem tieferen Verständnis von Kosmologie und Schwarzen Löchern entgegen.

Zu 2) und 3): Ob man mit der Mathematik an Grenzen stößt, ist ein interessante Frage. Das Problem der Quantengravitation ist trotz aller mathematischen Schwierigkeiten aber in erster Linie ein begriffliches. Ganz sicher geht es nicht um die Rettung der Mathematik auf Kosten der Physik.

## Düstere Erfolgsaussichten

*Tumoren mittels Impfung bekämpfen – das plant der Biotechnologe Eric von Hofe. (»Immuntherapie gegen Krebs«, März 2012, S. 24)*

**Rudolf Mierau, Eschweiler:** Ein Grund für das Scheitern vieler Versuche zur Krebstherapie mit Hilfe des Immunsystems ist sicherlich, dass der Tumor sich seit seiner Entstehung mit diesem Gegner auseinandergesetzt hat. Er kann trotz des Immunsystems wachsen und sich ausbreiten und sich den T-Lymphozyten entziehen. Der Krebs, dem

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. Carsten Könneker (vi.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. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke. E-Mail: redaktion@spektrum.com  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Editor-at-Large:** Dr. Reinhard Breuer  
**Art Direction:** Karsten Kramarczuk  
**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  
**Redaktionsassistent:** Anja Albat-Nollau  
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 0 62 21 91 26-711, Fax 0 62 21 91 26-729  
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 0 62 21 91 26-600, Fax 0 62 21 91 26-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814  
**Verlagsleiter:** Richard Zinken  
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 0 62 21 91 26-733  
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 0 62 21 91 26-741, E-Mail: service@spektrum.com  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 0 62 21 91 26-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Michael Springer, Emmanuelle Vaniet, Dr. Sebastian Vogel, Dr. Klaus Volkert

**Leser- und Bestellservice:**  
Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 0 62 21 91 26-743, 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. 0 71 1 72 52-192, Fax 0 71 1 72 52-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.  
**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dözl; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0 21 1 88 7-24 83, Fax 0 21 1 88 7-97-24 83; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. 0 21 1 88 7 24 81, Fax 0 21 1 88 7-26 86  
**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0 21 1 88 7-23 87, Fax 0 21 1 88 7-26 86  
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preislite Nr. 33 vom 01.01.2012.  
**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 Zugäng-

lichmachung, 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: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

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



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



der Arzt ja erst zu Leibe rücken kann, wenn er seiner gewahr wird, ist also bereits das erfolgreiche Produkt einer harten Selektion unter dem Druck des Immunsystems. Diese Waffe nun trotzdem erneut einzusetzen, ähnelt dem Versuch, eine bakterielle Infektion mit einem Antibiotikum zu bekämpfen, von dem man schon weiß, dass die Erreger dagegen resistent sind. Die Erfolgsaussichten für den Autor und sein Unternehmen erscheinen deshalb eher düster.

## Folgen für die Landwirtschaft

*Die Chemikerin Katharine Sanderson schlug vor, aus verholzten Pflanzenresten Biokraftstoff herzustellen. (»Kein Zuckerschlecken«, März 2012, S. 74)*

**Fabian Cundano Maltez, Erfurt:** Solche organischen Reste wie Stängel und Blätter spielen in der Landwirtschaft eine entscheidende Rolle: als direkter Dünger (untergepflügt) oder als indirekter (über den Umweg Tierfutter und Gülle). Daher müsste bei ausgebaute Biokraftstoffherzeugung der zweiten Generation (also auch Integrierung von anderweitigem Nutzpflanzenanbau) die Regeneration des Bodens auf sämtlichen landwirtschaftlichen Anbauflächen zu 100 Prozent durch Einsatz künstlicher Dünger erfolgen – und dies bei (durch optimierte Anbaupflanzen) noch deutlich intensiverer Bodenbeanspruchung.

## Wirklich zufällig

*Mit Zufallszahlen lassen sich Flächeninhalte komplizierter Figuren gut ermitteln, meinte Brian Hayes. (»Spiel mit dem Zufall«, Februar 2012, S. 88)*

**Andreas Berg, Berlin:** In dem Beitrag wird etwas missverständlich formuliert, dass Zufallszahlen nicht wirklich zufällig sind, wenn sie von Computern berechnet werden. Richtig müsste es dagegen heißen, dass durch arithmetische Methoden berechnete Zufalls-

zahlen nicht wirklich zufällig sind. Heutzutage haben Computer vielfältige Möglichkeiten, unvorhersagbare Größen für die Erzeugung von Zufallszahlen heranzuziehen, beispielsweise Wärmesonden, Zeitgeber, Mausebewegungen oder Aktivitäten an den Netzwerkschnittstellen. Diese Möglichkeiten werden in der Praxis (etwa in der Kryptografie) eingesetzt.

Auch das Thema Korrelationen ist etwas komplexer als beschrieben, denn korreliert können nicht nur einzelne, aufeinander folgende Zufallszahlen sein, sondern in beliebig komplexer Weise beliebige Teilmengen der generierten Zufallszahlen. Die Korrelationen können so verdeckt sein, dass in der Praxis eine Beweisführung kaum möglich ist, ob es Korrelation gibt oder nicht – unabhängig davon, ob die Zahlen analog oder digital erzeugt wurden.

## Virale DNA in menschlichem Erbgut?

*»RNA aus der Nahrung beeinflusst Cholesterinspiegel«, Spektrogramm November 2011, S. 10*

**Jan Brak, Villach (Österreich):** Wenn schon aus Nahrung RNA in unsere Zellen gelangt, sind dann auch Viren in der Lage, ihre Gene in Human-DNA einzuschleusen, und sind diese DNA-Abschnitte vererblich? Von vielen tausenden Menschen ist jetzt das Erbgut schon entschlüsselt. Ist jemals festgestellt worden, ob es darin »fremde« DNA-Abschnitte viraler Herkunft gibt? Könnten dann diese Abschnitte von Bedeutung sein bei der Entstehung von Autoimmunkrankheiten wie Diabetes oder auch von Krebs?

### Antwort der Redaktion:

Rund 45 Prozent des menschlichen Erbguts bestehen aus springenden Genen (Transposonen), von denen die meisten jedoch ihre Fähigkeit zum Springen verloren haben. Vermutlich handelt es sich ursprünglich um DNA aus Retroviren, die sich ins menschliche Genom integriert hat und nun vererbt wird. Wenn

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)

Transposonen springen, wird eine Kopie ihrer genetischen Information an anderer Stelle wieder in die DNA eingebaut. Je nachdem, wo das geschieht, können unterschiedliche Folgen auftreten: Veränderte oder ausgeschaltete Eiweißmoleküle, die Synthese von wesentlich größeren oder kleineren Mengen eines Proteins und so fort. Im Prinzip kann dadurch auch Krebs entstehen.

### Erratum

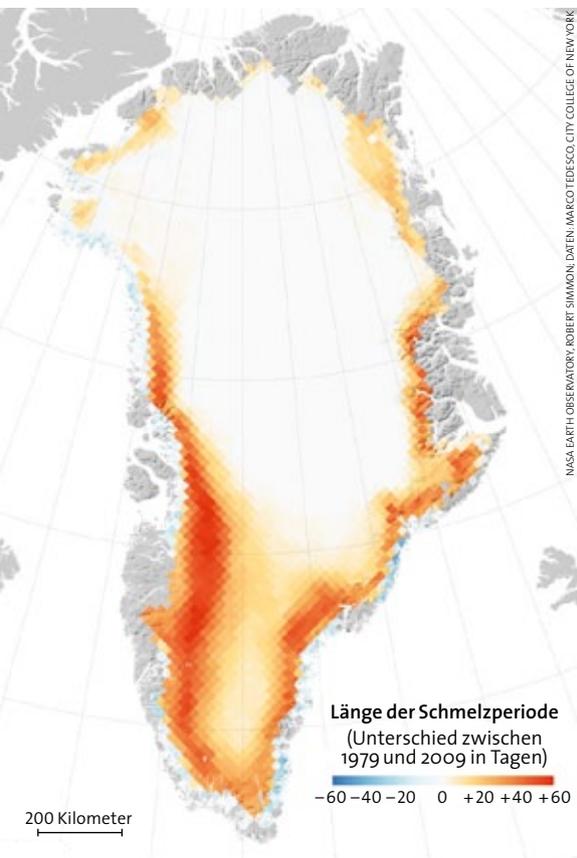
*»Auf der Suche nach »grünem« Benzin«, März 2012, S. 78*  
Auf S. 78, 2. Spalte, 1. Zeile werden Substanzen, die sich aus Zuckerrohr und Maiskörnern gewinnen lassen, Kohlenwasserstoffe genannt. Es muss richtig Kohlenhydrate heißen.

### 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)



In großen Teilen Grönlands hält das Tauwetter heute länger an als früher.

KLIMAWANDEL

## Mehr Tauwetter auf Grönland

Grönlands Eisschild reagiert womöglich deutlich empfindlicher auf den Klimawandel als bislang angenommen, befürchten Forscher um Alexander Robinson von der Universidad Complutense de Madrid (Spanien). Gemäß ihrer neuen Modellrechnung könnten die grönländischen Gletscher bereits komplett verschwinden, wenn die globale Durchschnittstemperatur um lediglich 1,6 Grad Celsius steigt, verglichen mit dem vorindustriellen Niveau. Nach den bisher zuverlässigsten Schätzungen wäre erst ab einer mittleren Erwärmung um 3,1 Grad Celsius mit einem Totalverlust des Eispanzers zu rechnen.

Falls die globale Durchschnittstemperatur den Schwellenwert nur wenig übersteige, würde sich das Schmelzen zwar über zehntausende Jahre hinziehen, schreiben die Forscher. Setze sich der gegenwärtige Trend beim Ausstoß klimarelevanter Treibhausgase aller-

dings fort, so beschleunige sich der Eisverlust stark. Würde die regionale Durchschnittstemperatur auf Grönland etwa um acht Grad Celsius zunehmen – was den Modellen zufolge im Bereich des Möglichen liegt –, verschwände innerhalb der nächsten 500 Jahre ein Fünftel des Eises. Weit gehend eisfrei wäre die Insel dann in 2000 Jahren, wie Robinson und sein Team ermittelt haben.

2011 war der Grönländische Eisschild, das zweitgrößte dauerhaft vereiste Areal der Welt, während des Sommers auf einem knappen Drittel seiner Fläche geschmolzen – zum dritten Mal seit Beginn der Aufzeichnungen in den 1970er Jahren. In vielen Regionen der Insel dauert die jährliche Schmelzperiode mittlerweile mehrere Wochen länger als noch vor einigen Jahrzehnten.

*Nature Climate Change*  
10.1038/nclimate1449, 2012

BIOTECHNOLOGIE

## Genetisch veränderter Hartweizen trotz Salzböden

Hartweizen (*Triticum durum*) ist ein wichtiges Grundnahrungsmittel: Er dient etwa als Basis für Pasta, Couscous und Bulgur. Auf salzigen Äckern gedeiht er allerdings schlecht – im Gegensatz zum Weichweizen (*Triticum aestivum*), aus dem Brotmehl hergestellt wird. Der Unterschied rührt daher, dass Hartweizen während mehrtausendjähriger Züchtung seine ursprünglich vorhandene Salztoleranz verloren hat. Allerdings kann ihm die Salzverträglichkeit wieder beigebracht werden, melden nun australische Wissenschaftler.

Ein Versuchsfeld im Norden des australischen Bundesstaats New South Wales: Hier wächst die neu gezüchtete Form des salztoleranten Hartweizens.

Die Forscher um Matthew Munns von der University of Western Australia kreuzten Erbmaterial des Einkorns (*Triticum monococcum*, eine der ältesten domestizierten Getreidearten) in Hartweizen ein, und zwar das Gen



*TmHKT1;5-A*. Es enthält die Bauanleitung für einen Ionentransporter, der in bestimmten Zellen des Wasserleitungssystems in den Wurzeln sitzt. Der Transporter pumpt Natriumionen aus dem Wasser, das nach oben in die Pflanze geleitet wird, und schützt die Blätter so vor toxischen Natriumkonzentrationen. Der damit ausgerüstete Hartweizen erbrachte in Feldversuchen auf salzigen Böden um fast ein Viertel höhere Erträge.

Mittlerweile arbeiten die Forscher daran, die Salztoleranz des Einkorns auch auf weitere Kultursorten zu übertragen. So zeigen erste Versuche, dass Weichweizen ebenfalls von dem Entsalzungsgen *TmHKT1;5-A* profitieren kann.

*Nature Biotechnology*  
10.1038/nbt.2120, 2012

## BIOLOGIE

## Wüstenameisen verwenden Rüttel- und Magnetwegweiser

**A**uch wenn sich die Wüstenameise *Cataglyphis noda* mehrere Meter von ihrem winzigen Nesteingang entfernt, findet sie ihn wieder – obwohl ihre monotone Umgebung kaum Landmarken bietet. Hierfür nutzen die Tiere zahlreiche Hinweise. Schon länger ist bekannt, dass sie sich an der Polarisierung des Sonnenlichts, am Sonnenstand und an der Windrichtung orientieren; außerdem haben sie einen inneren Schrittzähler, der die zurückgelegten Wegstrecken berücksichtigt. Weil diese Navigationshilfen bei langen Wanderungen aber ungenau werden, werten die Ameisen zusätzlich noch andere Reize aus, um wieder nach Hause zu finden, etwa gut erkennbare Geländeformationen oder den Geruch des Nests.

Forscher vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena haben nun gezeigt, dass die Tiere darüber hinaus zwei weitere Reize zur Orientierung verwenden können: örtliche Magnetfelder und Vibrationen. Letztere dienen den Tieren sonst eher zur sozialen Verständigung. Offenbar verfügt *Cataglyphis noda* also über einen hochflexiblen Orientierungssinn, der auf ganz verschiedene Reize zurückgreift und auch solche verarbeiten kann, die das Tier normalerweise in einem anderen Kontext verwendet.

*PLoS ONE 7, e33117, 2012*



Diese Laufarena bietet kaum Orientierungspunkte. Trotzdem finden die Ameisen zuverlässig zum künstlichen Nesteingang (vorn) zurück.

## ASTROPHYSIK

## So entstanden die ersten Magnetfelder

**A**n vielen Orten im Weltall lassen sich Magnetfelder beobachten, die ganze Galaxien durchziehen. Doch wie sind sie entstanden? Ursprünglich wohl über den Biermann-Batterie-Effekt, schreiben Gianluca Gregori von der University of Oxford und seine Kollegen: Wenn Druck- und Temperaturgradienten in einem Plasma nicht parallel zueinander verlaufen, entstehen elektrische Ströme, die

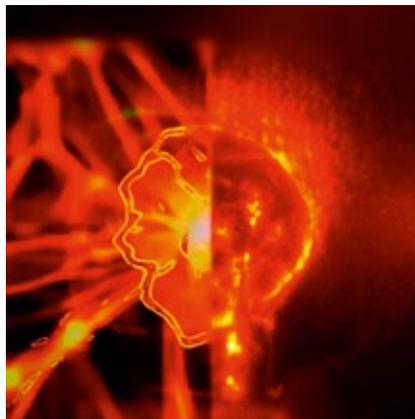
ihrerseits ein Magnetfeld hervorrufen. Die nötigen Bedingungen hierfür seien in den gewaltigen Stoßwellen erfüllt gewesen, die beim Schwerkraftkollaps von protogalaktischen Gaswolken auftraten, erläutern die Wissenschaftler.

Mit Laborexperimenten gelang es den Forschern, solche Vorgänge nachzustellen. In einer mit Helium gefüllten Kammer beschossen sie einen Kohlenstoffstab mit energiereichen Laserpulsen. Das erzeugte eine Stoßwelle in der Kammer, begleitet von kurzlebigen, starken Magnetfeldern. Laut Analyse der Daten müssen diese durch den Biermann-Batterie-Effekt entstanden sein.

Übertragen auf protogalaktische Strukturen könne der Effekt magnetische Flussdichten von etwa einem trilliardstel Gauß erzeugen, berichten die Wissenschaftler. Im Lauf der Zeit dürften Turbulenzeffekte diese schwachen Felder dann allmählich verstärkt haben, so dass sie irgendwann auch die Evolution der Galaxien beeinflussen.

*Nature 481, S. 480–483, 2012*

**Stoßwellen in Theorie und Praxis:** Die linke Bildhälfte entstammt einer Computersimulation von Stoßwellen im frühen Universum. Die rechte Bildhälfte zeigt eine Wellenfront, die im Labor per Laserbeschuss erzeugt wurde. Helle Farben stehen dabei für hohe Dichten und Temperaturen.



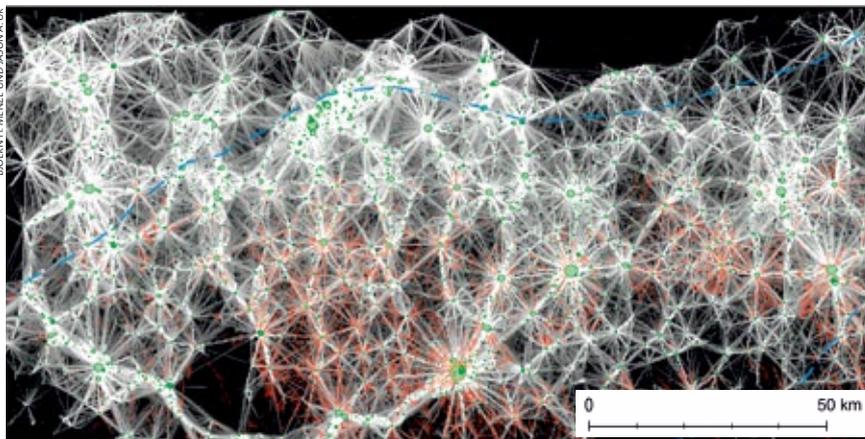
A. RAVASIO & A. PELKA, LULL, J. MEINECKE & C. MURPHY, OXFORD / SIMULATION: F. MINIATI, ETHZ

## ARCHÄOLOGIE

## Satellitenblick in die Siedlungsgeschichte

Die Gemeinwesen des alten Mesopotamien standen und fielen mit dem Zugang zum Wasser sowie der Einbindung ins regionale Wegenetz. Zu diesem Schluss kommen Björn Menze und Jason Ur von der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. Sie werteten zahlreiche Satellitenaufnah-

**Das alte Nordostsyrien. Grüne Punkte: Historische Siedlungen. Weiße und rote Linien: Alte Verbindungswege (je stärker, desto öfter frequentiert).**



men des nordöstlichen Syrien aus. Das erlaubte es ihnen, die Besiedlung der Region über acht Jahrtausende hinweg zu rekonstruieren.

Historische Niederlassungen verraten sich auf Satellitenbildern durch eine veränderte Farbe, die auf die lang anhaltende Ablagerung von organischem Müll und Bauschutt zurückgeht. Menze und Ur erstellten ein Computerprogramm, das entsprechend verfärbte Strukturen in den Aufnahmen identifizierte. Zudem ermittelten sie die Höhe der Siedlungs-



MEHR WISSEN BEI  
**Spektrum.de**



Aktuelle Spektrogramme  
finden Sie täglich unter

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

hügel, die recht verlässlich anzeigt, wie lange der jeweilige Ort bewohnt war. So erfassten die Forscher rund 14 000 teils unbekannte Stätten, die seit dem Ende der Jungsteinzeit mehr oder weniger dicht bevölkert gewesen waren.

Es zeigte sich, dass die Siedlungen vor allem dann über große Zeiträume hinweg prosperierten, wenn sie stets Zugang zu Wasser hatten. Einige Niederlassungen blieben auch dadurch bedeutsam, dass sie an Knotenpunkten von Transportwegen lagen, die schon Jahrtausende vorher bestanden und ein überraschend dichtes Netzwerk bildeten. Diese uralten Wege lassen sich vor allem anhand von Fotos rekonstruieren, die Spionagesatelliten in den 1960er und 1970er Jahren aufgenommen hatten – vor den umfangreichen Bodenveränderungen der zurückliegenden Jahrzehnte.

*PNAS USA 10.1073/  
pnas.1115472109, 2012*

## PHYSIK

## Antiwasserstoff lässt sich spektroskopisch untersuchen

Wasserstoffatome aus Antimaterie lassen sich schon seit Mitte der 1990er Jahre künstlich herstellen. Mittlerweile kann man sie auch für etliche Minuten einsperren. Doch bisher fehlte die Möglichkeit, sie spektroskopisch zu untersuchen, um ihre Eigenschaften mit denen gewöhnlicher Materie zu vergleichen. Im Experiment ALPHA am Forschungszentrum CERN zeigen Physiker um Jeffrey Hangst von der Universität Aarhus (Dänemark) nun, dass solche Messungen an Antiwasserstoff mit heutiger Technik machbar sind.

Die Forscher sperrten Antiwasserstoffatome aus Antiprotonen und Positronen in eine magnetische Falle.

Das Magnetfeld spaltet den Grundzustand des Antiatoms in zwei Energieniveaus auf – seine Hyperfeinstruktur. Nur in einem der beiden Zustände lässt sich das Teilchen in der Falle festhalten.

Das nutzten die Forscher aus: Sie bestrahlten die eingefangenen Antiatome mit Mikrowellen einer Frequenz, die sie in den anderen Zustand überführt. Die so behandelten Antiwasserstoffatome verschwanden deutlich öfter aus der Falle, als wenn sie anderen Frequenzen oder keiner Strahlung ausgesetzt waren. Das spricht stark für eine Wechselwirkung zwischen Mikrowellen und Antiatomen und eröffnet im Prinzip die Möglichkeit, das Hyper-

feinspektrum von Antiwasserstoff präzise zu vermessen.

Durch den Vergleich mit dem Spektrum normalen Wasserstoffs ließe sich ein fundamentales Gesetz der Physik überprüfen: das CPT-Theorem. Es besagt, dass jeder mögliche Vorgang in Raum und Zeit auch dann physikalisch möglich ist, wenn man seine Raumkoordinaten spiegelt, die Zeit rückwärtslässt und überdies Teilchen mit Antiteilchen vertauscht. Das Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie im Universum könnte genau darauf zurückzuführen sein, dass das Theorem manchmal eben nicht gilt.

*Nature 483, S. 439–444, 2012*

# BLICK AUF MERKUR

Seit einem Jahr umkreist die NASA-Sonde Messenger den sonnennächsten Planeten Merkur. Aus den bislang per Laserhöhenmessung gesammelten Daten entstand nun die erste topografische Karte der Nordhalbkugel: Zwischen den tief liegenden, im Falschfarbenbild violett gekennzeichneten Flächen und den in Hellgrau gehaltenen Höhen links unten liegen 2300 Meter Höhenunterschied. Die ausgedehnte Ebene links oben entstand vermutlich vor etwa vier Milliarden Jahren

durch Überflutung mit flüssiger Lava, während die sichtbaren Höhenzüge Folgen späterer tektonischer Prozesse sind. Die runden Strukturen stellen Einschlagkrater dar. Für die Karte hatten die Wissenschaftler um Maria Zuber vom Massachusetts Institute of Technology die Daten von 4,3 Millionen einzelnen Punkten ausgewertet. Die Unsicherheit bei den Höhenwerten beläuft sich dabei auf weniger als 20 Meter.

*Science* 10.1126/science.1218805, 2012

# Kosmische Raubtierfütterung

Erstmals werden Astronomen Gelegenheit haben, live zu beobachten, wie ein Schwarzes Loch eine Gaswolke zerreißt und sich einverleibt.

VON STEFAN GILLESSEN, REINHARD GENZEL UND ANDREAS BURKERT

Im Zentrum der Milchstraße schlummert ein Schwarzes Loch. Es ist rund vier Millionen Mal so schwer wie die Sonne, die in einer sicheren Entfernung von 25 000 Lichtjahren das Herz unserer Galaxie alle 200 Millionen Jahre umrundet. Solch ein Schwerkraftmonster konzentriert so viel Masse auf kleinem Raum, dass die starke Gravitation keine Strahlung mehr entkommen lässt. Beobachten kann man es also nur indirekt. Wenn etwa Gasteilchen in ein Schwarzes Loch stürzen, heizen sie sich stark auf und strahlen deswegen, bevor sie in die Unsichtbarkeit abstürzen. Und ein Schwarzes Loch kann sich durch die Wirkung seiner Schwerkraft bemerkbar machen.

Unsere Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik beobachtet seit 20 Jahren das Zentrum der Milchstraße, das von der Erde aus gesehen im Sternbild Schtze (Sagittarius) liegt. Wir haben dort Sterne entdeckt, die sich mit Geschwindigkeiten von vielen tausend Kilometern pro Sekunde auf elliptischen Bahnen bewegen – dieselbe Bahnform, die schon Johannes Kepler für die Bewegung der Planeten um die Sonne fand. Am spektakulärsten ist der Stern S2, der in nur 16 Jahren umläuft – um eine Stelle am Himmel, an der keine helle Strahlungsquelle auszumachen ist.

Aus den Bahndaten lässt sich schließen, dass die Masse, die S2 auf eine so enge Bahn zwingt, die genannten vier Millionen Mal so groß wie die Sonnenmasse sein muss und in einem Raumbereich konzentriert ist, der nicht größer ist als das Sonnensystem (*Spektrum der Wissenschaft* 4/2003, S. 26–33). Die vernünftigste Erklärung dafür ist ein massereiches Schwarzes Loch.

Erstaunlich ist, wie dunkel es um das Schwarze Loch ist. Ein Objekt mit dieser Masse übt auf seine Umgebung gewaltige Anziehungskräfte aus. Entsprechend viel Materie müsste hineinstrzen und sich durch Strahlung bemerkbar machen. Würde das Schwarze Loch mit nur einem Prozent der maximal möglichen Rate Gas aus der Umgebung aufsaugen, müsste der Schwerkraftstrudel eine Million Mal so hell wie beobachtet erscheinen. Das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße gehört damit zur Klasse der leuchtschwachen galaktischen Kerne und ist gleichzeitig der Prototyp dieser Gattung, denn wegen seiner vergleichsweise kleinen Entfernung können wir es viel genauer beobachten als das Zentrum jeder anderen Galaxie. Zwar haben wir 2003 entdeckt, dass es ein paar Mal pro Tag für jeweils etwa eine Stunde aufleuchtet; jedoch wird es dabei lediglich rund zehn bis hundert Mal so hell wie im Ruhezustand. Erklären kann man die Leuchtschwche nur damit, dass das Schwarze Loch auf Diät gesetzt ist: Es schluckt zurzeit nicht mehr als ein hundertstel Erdmasse pro Jahr.

## Flug ins Verderben

Das könnte sich bald ändern. Letztes Jahr haben wir eine überraschende Entdeckung gemacht: Eine Gaswolke mit ungefähr der dreifachen Erdmasse fliegt fast direkt auf das Schwarze Loch zu (*Nature* 481, S. 51–54, 5. Januar 2012). Aus unseren Daten können wir – wie auch für die Sterne – ihre Bahn in allen drei Dimensionen bestimmen. Die Wolke hat eine Geschwindigkeit von mehr als 2000 Kilometern pro Sekunde und würde Mitte 2013 das Perizentrum erreichen, den Punkt ihrer Bahn, an dem sie dem Schwarzen Loch am nächsten ist.

Sie wäre dann 36 Lichtstunden vom Ereignishorizont entfernt, nur rund doppelt so weit wie das Perizentrum von S2.

Im Gegensatz zu einem Stern, den seine eigene Schwerkraft zusammenhält, ist die Gaswolke den Kräften des Schwarzen Lochs hilflos ausgeliefert. Da die Gravitationskraft mit zunehmendem Abstand abnimmt, erfährt der vordere Teil der Wolke eine stärkere Anziehung als der hintere Teil. Dadurch wird die ursprünglich kugelformige Wolke zu einem langen Filament auseinandergezogen. Man spricht von Gezeitenwirkung, weil auch für Ebbe und Flut auf der Erde die Abnahme der Schwerkraft – in diesem Fall des Monds – mit zunehmender Entfernung verantwortlich ist.

Das können wir jetzt schon beobachten: Während die Wolke in den Daten des Jahres 2004 kugelsymmetrisch aussah, bewegte sich bereits 2008 der vordere Teil etwas schneller als der hintere, und 2011 war diese Geschwindigkeitsdifferenz noch stärker ausgeprägt. Wir können also zusehen, wie die Gaswolke auf ihrem Weg zerstört wird.

Nicht nur die Gezeiten zerren an der Gaswolke. Das Schwarze Loch ist umgeben von einem sehr dünnen, aber vielen Millionen Grad heißen Gasplasma. Dessen räumliche Verteilung und Temperatur könnten erklären, warum das Schwarze Loch zurzeit so wenig Mate-

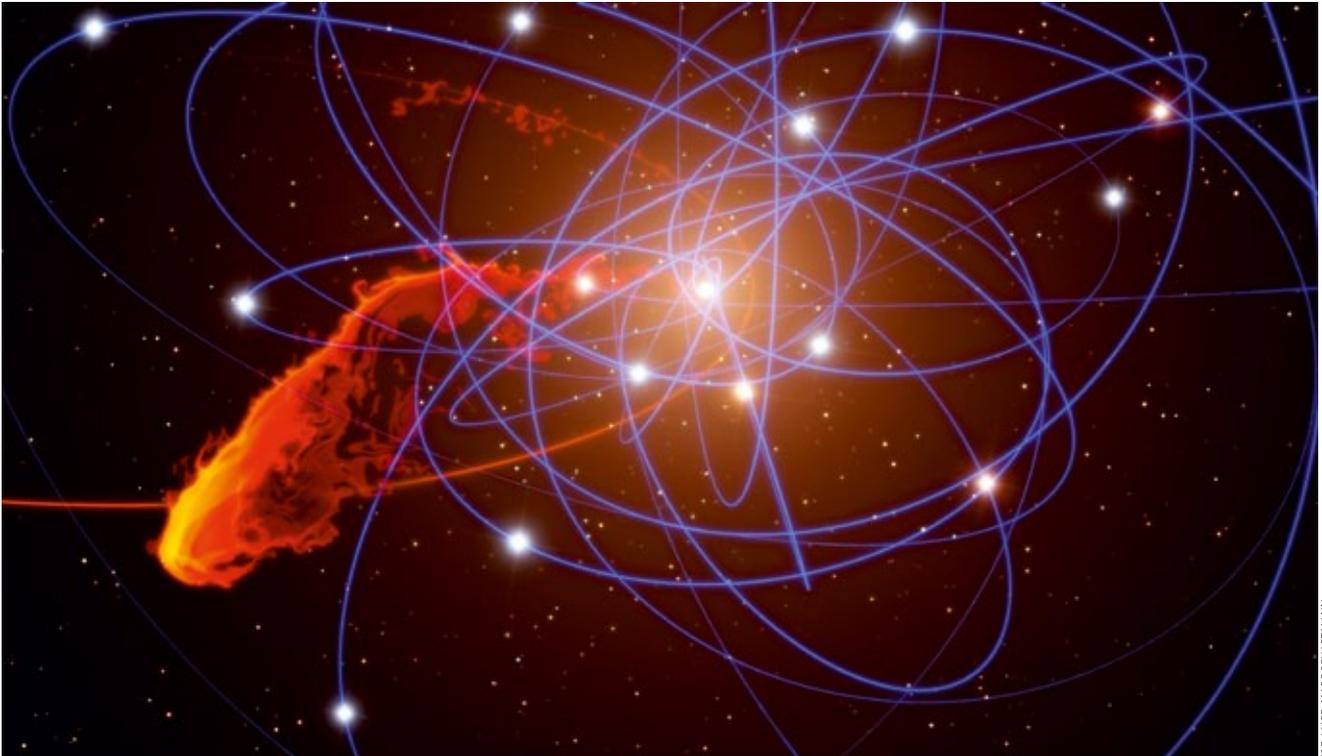


MEHR WISSEN  
BEI **Spektrum.de**



Video zum Thema mit  
Stefan Gillessen und Animationen

[www.spektrum.de/kosm-gaswolke](http://www.spektrum.de/kosm-gaswolke)



ESO / MPF, MARC SCHARTMANN

rial verschlingt. Wir müssten nur diese Eigenschaften besser kennen. Genau dafür bietet die Gaswolke nun eine einzigartige Möglichkeit.

Auf ihrem Weg ins Verderben durchquert sie das Plasma mit Überschallgeschwindigkeit, das heißt schneller, als sich Druckschwankungen in diesem Medium ausbreiten können. Dadurch wird derselbe Effekt eintreten wie beim Überschallknall: Eine Stoßfront wird sich ausbilden, das heißt eine scharf begrenzte Zone erhöhter Dichte und Temperatur. Wahrscheinlich wird sie heiß genug werden, um im Röntgenlicht aufzuleuchten. Doch spätestens wenn die Gezeiten die Wolke Mitte 2013 zerrissen haben werden, bestimmt die schwer vorherzusagende Hydrodynamik des umgebenden Plasmas die weitere Entwicklung – insbesondere wie schnell das Gas der Wolke in das Schwarze Loch fällt. Es ist gut möglich, dass diesem nun einige fette Jahre bevorstehen. Wir sind sehr gespannt auf das zu erwartende Feuerwerk.

Es wäre allerdings nicht das erste seiner Art. Röntgenbeobachtungen deuten darauf hin, dass vor rund 300 Jahren ein ähnlicher Strahlungsausbruch

**Blick in die Zukunft:** Die Gaswolke, die zurzeit auf einer elliptischen Bahn (rote Linie, von links kommend) auf das Schwarze Loch (Bildmitte) im Zentrum der Milchstraße zufliegt, wird von Gezeitenkräften zerfetzt und durch Wechselwirkung mit dem Gasplasma rund um das Schwarze Loch aus der Bahn geworfen werden. Neben der mutmaßlichen Gestalt der Wolke sind die Bahnen der benachbarten Sterne (blaue Linien) sowie ihre Positionen (leuchtende Scheiben) im Jahr 2021 dargestellt. Die kleinste Ellipse gehört zum Stern S2.

stattfind. So ließe sich zumindest das Röntgenlichtecho erklären, das sich wie eine Wellenfront in das interstellare Material in der weiteren Umgebung unseres galaktischen Zentrums ausbreitet. Durch Zurückrechnen ergibt sich, dass damals etwas mehr Energie frei geworden ist, als in der nun entdeckten Gaswolke steckt. Demnach wäre eine entsprechend größere Masse in das Schwarze Loch gestürzt.

Woher kommt die aktuelle Gaswolke? Ihre Bahn liegt in derselben Ebene, in der sich auch eine Gruppe von jungen, massereichen Sternen bewegt. Diese entstanden vor rund sechs Millionen Jahren gemeinsam und umrunden das Schwarze Loch in einer Scheibe. Ihr innerer Rand befindet sich in etwa dort, wo die Kepler-Ellipse der Gaswolke ihren fernsten Punkt hat. Die jungen Sterne verlieren vergleichsweise viel Mate-

rial. Diese Sternwinde haben vergleichbare Geschwindigkeiten wie die Sterne selbst. Es ist also plausibel, dass sich die Gaswolke als eine Verdichtung in einem solchen Sternwind gebildet hat und dann auf einer sehr exzentrischen Bahn in Richtung Schwarzes Loch fallen konnte. Bereits früher durchgeführte Simulationen der Sternwinde bestätigen diese Idee.

Vielleicht ist unsere Gaswolke aber auch eine Gas- und Staubscheibe um einen Protostern, wie man sie in vielen Sternentstehungsgebieten findet. Der Stern selbst ist nicht zu sehen, doch die Scheibe wird in der harschen Umgebung allmählich zerstört und durch die starke Ultraviolettstrahlung der jungen Sterne zum Leuchten angeregt.

Unter beiden Annahmen für die Vorgeschichte erstaunt es, dass die Gaswolke so nah an das Schwarze Loch heran-

gekommen ist. In jedem Fall erwarten wir, dass sie im Lauf der nächsten zwölf Monate zerstört wird. Entsprechend spannend werden die folgenden Jahre werden. Wie genau wird die Gaswolke auseinandergerissen, und was können wir daraus über das heiße Gas um das

Schwarze Loch lernen? Warum hat dieses bislang so wenig Materie geschluckt? Wie viel Gas wird hineinfallen? Wie hell wird es aufleuchten? Können wir den Ursprung der Gaswolke aufklären? Können wir etwas über leuchtschwache Galaxienkerne im Allgemeinen lernen?

Wir werden uns die Gelegenheit nicht entgehen lassen, dem Schwarzen Loch beim Speisen zuzusehen.

**Stefan Gillessen, Reinhard Genzel und Andreas Burkert** sind Astrophysiker am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.

BIOLOGIE

# Revolution der Riesenviren

Gigantische Viren rütteln am akzeptierten biologischen Weltbild: Möglicherweise bilden sie gar eine neue, vierte Domäne des Lebens. Zwar ist diese Frage noch lange nicht geklärt, doch immerhin vermittelt die genetische Ausstattung der Riesenviren zunehmend Einblicke in ihre evolutionären Wurzeln.

VON STEFANIE REINBERGER

Als Wissenschaftler 1992 das erste Riesenvirus entdeckten, erkannten sie zunächst gar nicht, was sie da in ihren Reagenzgläsern hatten. In Proben aus dem Wasserkreislauf eines Industriekühlturms in Bradford, Großbritannien, hatten sie Amöben gefunden, die mit einer unbekanntem »Mikrobe« infiziert waren. Die Forscher ordneten Letztere den grampositiven Bakterien zu und taufte sie *Bradfordcoccus*.

Erst Jahre später, 2003, wurde Didier Raoult von der Université de la Méditerranée in Marseille klar: Das ver-

meintliche Bakterium ist ein Virus – wenn auch eigentlich viel zu groß. Mit seinem Durchmesser von 750 Nanometern übertrifft es kleine intrazelluläre Bakterien und ist sogar im Lichtmikroskop zu sehen. Der Franzose nannte den Riesen *Mimivirus*, von »mimicking microbe«: ein Virus, das sich als Bakterie ausgibt.

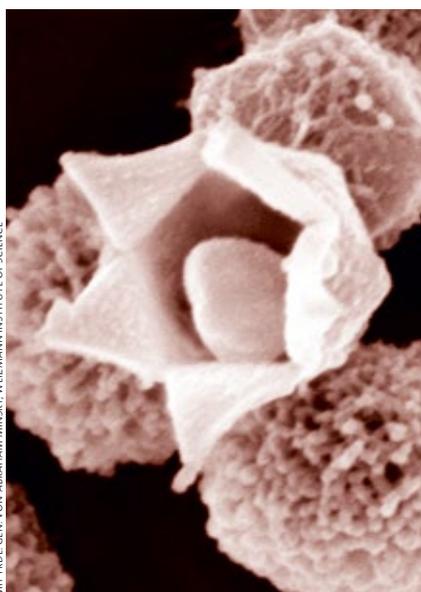
2004 warteten Raoult und sein Kollege, der Genetiker und Bioinformatiker Jean-Michel Claverie, mit der Sequenz des doppelsträngigen DNA-Genoms auf – sowie mit neuen Überraschungen. So übertrifft das Erbgut mit 1,2 Millionen Basenpaaren das bis dahin größte bekannte Virusgenom um das Doppelte. In ihm verschlüsselt sind rund 1000 Gene; manches Bakterium besitzt weniger.

Noch erstaunlicher war, dass die Giganten eine ganze Reihe von Genen enthalten, die in einem Virus eigentlich nichts zu suchen haben: beispielsweise einige Stoffwechsellzyme und essenzielle Proteine, die helfen, die Bauanlei-

tung für Eiweißmoleküle zu übersetzen. Solche Werkzeuge benötigt ein Virus normalerweise nicht, da es dafür jene seines Wirts nutzt.

Raoult stellte daraufhin eine gewagte These auf. Der virale Riese gehöre zu einer vierten, bislang unbekanntem Domäne des Lebens – neben den drei etablierten Domänen der Archeen (Archäobakterien), der Bakterien sowie der Eukaryoten, zu denen Pilze, Pflanzen und Tiere zählen, darunter auch viele einzellige Organismen. Das schloss er aus vergleichenden Analysen »ubiquitärer Proteine«, hochkonservierter Eiweißstoffe, die sich quer durch alle Lebensformen finden. Evolutionsbiologen nutzen solche Moleküle, um Stammbäume zu erstellen, nach der Regel: Je größer die Übereinstimmung, desto enger das Verwandtschaftsverhältnis. Mindestens sieben solche Proteine stecken auch im *Mimivirus*-Genom. Ein Vergleich mit Vertretern aller drei bereits bekannten Domänen ergab verblüffende Unterschiede. Es schien, als zweige vom Stammbaum des Lebens ein weiterer Ast ab, den Forscher bislang noch nicht zur Kenntnis genommen hatten (siehe Kasten rechts, oberes Bild).

Die Vermutung rief Kritiker auf den Plan, die methodische Fehler witterten. Schließlich fließen in Stammbaumanal-



MIT FRIEDL GEN, VON ABRAHAM MINSKY, WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE

Die elektronenmikroskopische Aufnahme von Mimiviren zeigt eines davon weit geöffnet. Auf diese Weise setzt das Virus sein Genom in befallenen Amöben frei, worauf dort neue Viren entstehen.

lysen mitunter vorgefertigte Vorstellungen der Wissenschaftler von der Evolution ein. Entsprechend legten Forscher um Eva Heinz von der University of Newcastle, Großbritannien, ihren Sequenzvergleichen alternative evolutionäre Modelle zu Grunde und kamen zu einem völlig anderen Ergebnis. Im Juni 2011 veröffentlichten sie ihre Stammbäume – und von einer vierten Domäne ist darin nichts zu sehen (*PLoS One* 6, e21080, 2011). Vielmehr verteilen sich hier die Gene der Virengiganten auf mehrere Äste in der Nähe der Eukaryoten. Heinz und ihre Kollegen vermuten: Die Riesen peppten ihr Erbgut im Lauf der Evolution per Gendiebstahl auf.

### Genetisches Diebesgut

Tatsächlich neigen Viren dazu, sich DNA-Abschnitte aus dem Genom ihres Wirts einzuverleiben und in das eigene einzubauen. Für einen Teil der virusuntypischen Gene mag das sogar zutreffen. »Allerdings gleichen nur rund zehn Prozent der Virusgene ihren Gegenstücken in der Wirtszelle ausreichend, um als Diebesgut durchzugehen«, sagt dazu Matthias Fischer vom Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg. Der Meeresvirologe untersuchte als Doktorand an der University of British Columbia in Vancouver einen weiteren Virengiganten: das *Cafeteria roenbergensis Virus* (CroV), benannt nach einem Meereseinzeller, den es infiziert. Es ist nur wenig kleiner als das *Mimivirus*, aber ähnlich komplex und rätselhaft. Fischer betont: »Mehr als die Hälfte der Gene von *Mimivirus* und CroV weist keinerlei Ähnlichkeit zu bekannten Genen auf.«

Auf Mutationen lassen sich die enormen Differenzen nicht schieben. Man darf sich die Riesenviren nicht etwa wie den Aidserreger HIV vorstellen, dessen Erbgut sich rasend schnell verändert. »Die Gene von *Mimivirus* und CroV scheinen kaum rascher zu mutieren als die von Bakterien«, erklärt Fischer.

Der Heidelberger Forscher bevorzugt eine andere Erklärung für die seltsamen Gene. Demnach besaß das Virus sie von Anfang an – als Erbe einer mit Eukaryoten verwandten Lebensform, die so heu-

te vermutlich nicht mehr existiert. Claverie hat dazu eine Theorie formuliert (*Trends Genet.* 26, S. 431–437, 2010). Ihr zufolge verlor ein einzelliger Vertreter einer inzwischen ausgestorbenen Zellli-

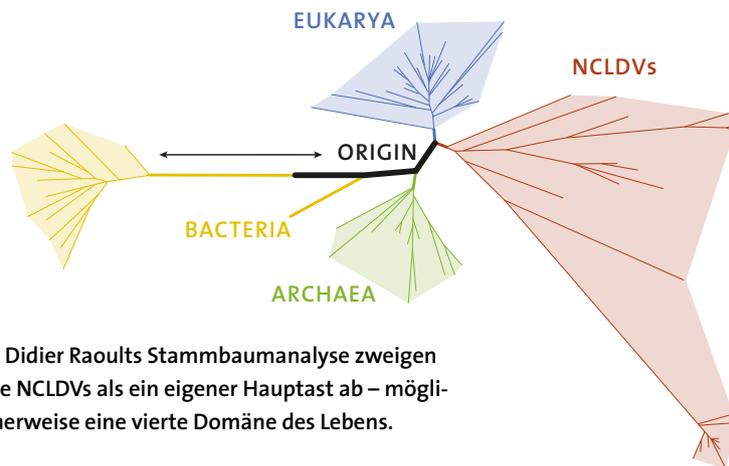
nie einen Teil seines genetischen Bauesatzes und war fortan gezwungen, ein parasitäres Dasein in anderen Zellen zu fristen. Nach und nach warf er molekularbiologischen Ballast ab – typisch für

## Weitläufige Virenverwandtschaft

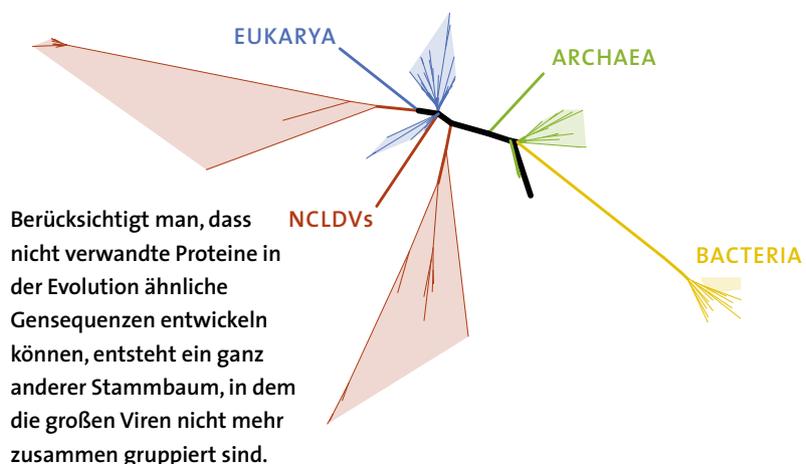
**Riesenviren zählen zu den »Nucleocytoplasmic large DNA Viruses«,** kurz NCLDV. Dabei handelt es sich um eine nicht offizielle große Gruppierung, die mehrere Virusfamilien zusammenfasst. Neben der Familie der Mimiviridae zählt dazu unter anderem die Familie der Poxviridae, der Pockenviren.

Allen NCLDV-Vertretern gemeinsam ist ein Repertoire von fünf Genen, rund drei Dutzend weitere kommen in den meisten Viren dieser Gruppe vor. Solche Überschneidungen im Erbgut könnten auf einen gemeinsamen evolutionären Ursprung hindeuten. Das ist jedoch

noch nicht endgültig geklärt. Die Familie der Mimiviridae, deren am besten charakterisierte Vertreter *Mimivirus*, CroV und *Megavirus* sind, stellt die einzigen echten Riesen in der Gruppe. Und auch nur sie beherbergen ein virusuntypisches Set an Genen für die Proteinsynthese. Eine Erklärung dafür könnte lauten, dass andere NCLDV-Vertreter diese Gene im Lauf der Evolution verloren haben. Das würde bedeuten, dass Riesenviren einen Blick weit zurück in die Geschichte der Viren erlauben, was sie zu einem besonders spannenden Forschungsobjekt macht.



In Didier Raoult's Stammbaumanalyse zweigen die NCLDVs als ein eigener Hauptast ab – möglicherweise eine vierte Domäne des Lebens.



Berücksichtigt man, dass nicht verwandte Proteine in der Evolution ähnliche Gensequenzen entwickeln können, entsteht ein ganz anderer Stammbaum, in dem die großen Viren nicht mehr zusammen gruppiert sind.

NATURE, NACH: BOYER, M. ET AL., PLOS ONE 5, E15330, 2010, FIG. 2 (OBEN); WILLIAMS, T. A. ET AL., PLOS ONE 6, E21080, 2011, FIG. 1 (UNTEN)

intrazelluläre Parasiten. Übrig blieb eine abgespeckte Version, die sich irgendwann die Geninformation für das Kapsid, das DNA-umschließende Hüllprotein eines Virus, einverleibte. Ein viraler Gigant war »geboren«.

Zu der Theorie passt, dass Riesenviren sich nicht wie andere Viren über den Zellkern ihres Wirts vermehren. Vielmehr bilden sie eine Art Virenfabrik, die sich gleich einem Organell – oder eben einem Parasiten – im Zytoplasma ausbreitet und Nachwuchs produziert. Dabei sind sowohl virale als auch zelluläre Genprodukte beteiligt. Mehr noch: *Mimivirus* und *CroV* können ihrerseits von kleineren Viren befallen werden, so genannten Virophagen. Diese sind in der Lage, die Riesenviren zu schwächen, wovon wiederum die Wirtszellen profitieren. Wie das genau funktioniert, ist noch unklar und steht im Zentrum von Fischers derzeitigen Forschungen. »Die Virophagen vermeh-

ren sich innerhalb der Riesenviren-Fabrik und scheinen dort hauptsächlich Proteine des Virus statt zellulärer Eiweißmoleküle zu nutzen«, sagt er. »Das unterstreicht wiederum, wie außergewöhnlich komplex Riesenviren sind.«

### Virale Giganten in den Weltmeeren

Doch letztlich wissen wir einfach noch zu wenig über die Riesen. Schließlich sind bislang erst drei davon wirklich charakterisiert: Zu *Mimivirus* und *CroV* gesellte sich kürzlich *Megavirus chilensis*, das ein noch etwas größeres Genom aufweist als *Mimivirus* (*PNAS* 108, S. 17486–17491, 2011) und wie Letzteres ebenfalls eigene Proteine für die Eiweißsynthese besitzt. Weitere beschriebene Vertreter wie *Courdivirus* müssen erst noch eingehender untersucht werden, bevor es möglich ist, sie richtig einzuordnen. Wissenschaftler wie Fischer und Claverie vermuten aber noch mehr virale Giganten in den Weiten der Welt-

meere. Neue Informationen erhoffen sie sich beispielsweise vom TARA-Oceans-Projekt, das sich der Suche nach unbekanntem Mikroorganismen, Viren und Planktonarten widmet.

Ein ähnliches Unternehmen, Craig Venters Global Ocean Sampling Expedition, sorgte letztes Jahr kurzzeitig für Aufruhr. Die beteiligten Wissenschaftler hatten Erbgutchnipsel aus dem Meer gefischt, die sich ebenfalls keiner bekannten Lebensform zuordnen ließen – und brachten die Diskussion um weitere Zweige im Baum des Lebens wieder zum Brodeln (*PloS One* 6, e18011, 2011). Mit den Riesenviren hat diese Entdeckung jedoch vermutlich nichts zu tun. »Es zeigt aber, wie wenig wir über die Vielfalt und Evolution der mikrobiellen Welt sowie über das Leben im Meer wissen«, betont Fischer.

---

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

---

## QUANTENCOMPUTER

# Bald Qubits auf der Datenautobahn?

Auf dem langen Weg zu einer Datenautobahn für Quantencomputer ist es Tübinger Forschern gelungen, ultrakalte Atomwolken und winzig kleine »Lichtpunkte« kontrolliert wechselwirken zu lassen.

VON STEFAN A. MAIER

Was werden die Quantencomputer der Zukunft wohl unter der Chiphaube haben? Die Frage ist reizvoll, doch es lohnt nicht, über Einzelheiten zu spekulieren; der Weg zu einem Rechenriesen, der nach den Gesetzen der Quantenmechanik arbeitet, ist schließlich noch weit. Eines gilt jedoch als sicher: Eine solche Maschine benötigt wie heutige Computer einen Speicher, um Informationen zuverlässig in so genannten Quantenbits, kurz Qubits, aufzubewahren, sowie einen Datenbus zum Informationsaustausch zwischen den einzelnen Komponenten des Rechners.

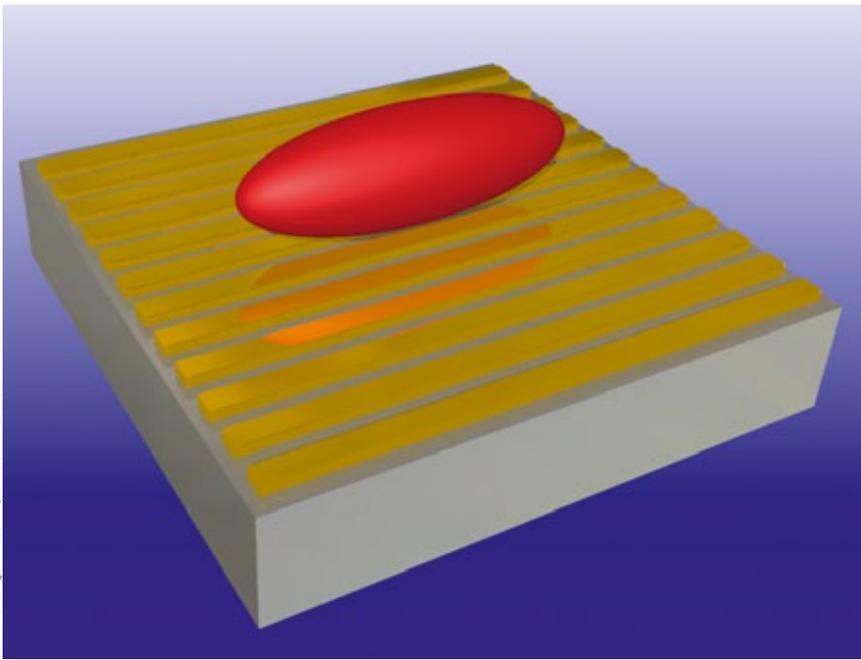
Ein möglicher Kandidat für den Speicher sind bis fast auf den absoluten Nullpunkt abgekühlte Gaswolken. In solchen

so genannten Bose-Einstein-Kondensaten befinden sich sämtliche Atome im selben quantenmechanischen Zustand. Forscher haben in den letzten Jahren gezeigt, dass diese ultrakalten Wolken eine Unmenge von Informationen speichern können und sich mit Hilfe mikroskopisch kleiner Magnetfallen auch gezielt manipulieren lassen. Für den Datenbus wiederum eignen sich wohl Photonen am besten, die Grundeinheiten des Lichts – man denke nur an die rasanten Übertragungsgeschwindigkeiten im Internet, die durch Licht leitende Glasfasern möglich wurden.

Arbeitet der Speicher ebenso wie der Datenbus mit Licht, sollten sich beide auch miteinander verknüpfen lassen.

Der Realisierung einer solchen Schnittstelle steht allerdings ein großes Problem im Weg: die Beugungsgrenze der Optik. Sie ist dafür verantwortlich, dass sich Licht nicht auf beliebig kleinen Raum einengen lässt. Darum träumt die Halbleiterindustrie bislang vergeblich von optischen Leiterbahnen auf ihren Chips, welche die Transistoren miteinander verbinden. Infolge dieser Grenze können die Forscher weder Glasfasern so verkleinern, dass sie die üblichen Kupferleitbahnen ersetzen könnten, noch sind sie in der Lage, optische Verbindungen zwischen den extrem miniaturisierten Transistoren und den vergleichsweise großen Lichtleitern herzustellen.

Eine auf wenige milliardstel Kelvin abgekühlte Rubidiumatomwolke (rot) wird einer metallischen Struktur aus Golddrähten angenähert. Bei der entstehenden Wechselwirkung zwischen der Atomwolke (dem »Datenspeicher«) und elektromagnetischen Wellen (dem »Datenbus«) auf den Golddrähten kann im Prinzip auch Information ausgetauscht werden.



OBERFLÄCHEN-QUANTENOPTIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Die Sache wird zwar nicht einfacher, wenn man mit Atomwolken statt Transistoren arbeitet. Doch nun hat eine von Sebastian Slama geleitete Nachwuchsforschergruppe am Physikalischen Institut der Universität Tübingen einen wichtigen Fortschritt erzielt (*Nature Photonics* 5, S. 494–498, 2011). Dem Team ist es erstmals gelungen, ein Bose-Einstein-Kondensat kontrolliert mit Lichtpunkten wechselwirken zu lassen,

deren winzige Abmessungen unterhalb der Beugungsgrenze lagen.

Es gibt nämlich doch einen Trick, um Licht über diese Grenze hinweg einzuengen. Bestrahlt man eine Metalloberfläche mit einem Laser, können die Photonen mit den frei beweglichen Elektronen im Metallgitter so in Kontakt treten, dass sich eine Art elektromagnetische Oberflächenwelle ausbildet. Die freien Elektronen bilden dabei

so etwas wie ein Elektronenplasma; Fachleute bezeichnen die entstehenden Wellen darum als Oberflächenplasmonen. Man kann sie sich aber auch einfach wie Wasserwellen vorstellen, die über eine sonst glatte Wasseroberfläche wandern – nur dass sie eben aus Licht bestehen. Auch so genannte lokalisierte Plasmonen können auf diese Weise entstehen; dies sind Wellen, die an ein und demselben Ort auf- und abspringen.

ANZEIGE

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

Vortrag (Englisch) von Lisa Randall:  
26. April, Potsdam  
Einstein Forum, 19 Uhr



## Den letzten Geheimnissen auf der Spur

In keiner anderen Naturwissenschaft kündigen sich so umwälzende und aufregende Erkenntnisse für Mensch und Kosmos an wie in der Physik. Die Harvard-Professorin und Bestsellerautorin Lisa Randall entwirft anschaulich und spannend das Bild der gegenwärtigen Physik in all ihren Facetten. Ein unterhaltsamer, lehrreicher Einblick aus erster Hand in die faszinierende Welt der Wissenschaft.

496 Seiten, gebunden, € (D) 24,99 **Ein Buch von S. FISCHER**



LISA  
RANDALL  
DIE VERMESSUNG  
DES UNIVERSUMS



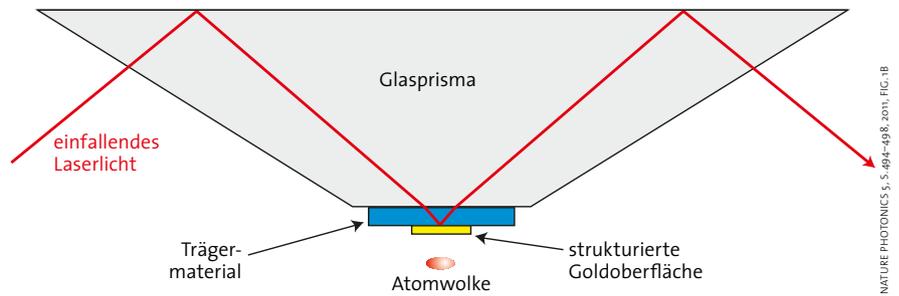
S. FISCHER

Nun folgt der Clou: Die räumliche Ausdehnung der elektromagnetischen Plasmonen ist nicht der Beugungsgrenze unterworfen. Die Intensität des Lichtfelds nimmt in alle Richtungen so schnell ab, dass seine Abmessungen unterhalb der Grenze liegen. Wenn die Oberfläche strukturiert ist, zum Beispiel als Hügellandschaft mit typischen Abmessungen von einigen hundert Nanometern, verteilt sich das Licht entsprechend. Mit einer schachbrettartigen Struktur lässt sich so ein regelmäßiges zweidimensionales Gitter aus winzigen »Lichtpunkten« erzeugen, also aus lokalisierten Plasmonen mit hoher Feldintensität.

Die Tübinger Forscher haben in ihrem Experiment nun gezeigt, dass sie die Wechselwirkung derartiger Lichtfelder mit einem Bose-Einstein-Kondensat präzise kontrollieren können. Dazu überzogen sie ein Trägermaterial mit einer dünnen Goldschicht. Diese Schicht strukturierten sie dann mittels einer Lithografiemethode aus der Halbleitertechnik. Anschließend verbanden sie das Prisma mit dem Trägermaterial (Grafik rechts oben) und steckten es in eine Vakuumröhre.

Nun ging es zur Sache. Vorsichtig brachten die Forscher Rubidiumatome in das Vakuum ein. In unmittelbarer Nähe zur Metalloberfläche wurden diese zunächst mit Hilfe von Laserstrahlen abgekühlt und dann mittels einer magnetischen Falle zu einem wolkenförmigen Bose-Einstein-Kondensat verdichtet. Ein Computer steuerte die genaue Position der Magnetfalle, so dass sich die Wolke mit kontrollierter Geschwindigkeit der strukturierten Metalloberfläche annähern ließ.

Gleichzeitig sorgte ein auf das Prisma gerichteter Laserstrahl für die Entste-



NATURE PHOTONICS 5, 484-498, 2011, FIG. 1B

**Ein Laserstrahl, der durch ein Prisma geschickt wird, regt in einer gezielt strukturierten Goldoberfläche Oberflächenplasmonen an. Anschließend untersuchen die Forscher deren Wechselwirkung mit einer langsam angenäherten ultrakalten Atomwolke, einem so genannten Bose-Einstein-Kondensat.**

hung von Plasmonen auf der Metalloberfläche. Die Wellenlänge des Laserstrahls war so ausgewählt, dass sich in den entstehenden Lichtfeldern elektrische Dipolmomente ausbildeten, welche die Atome der Wolke abstießen – und zwar umso stärker, je mehr sich die Wolke der Oberfläche näherte. In unmittelbarer Nähe zur Metalloberfläche kam allerdings eine weitere Kraft ins Spiel, die so genannte Casimirkraft. Im Gegensatz zu den Lichtfeldern wirkte sie anziehend auf die Wolke.

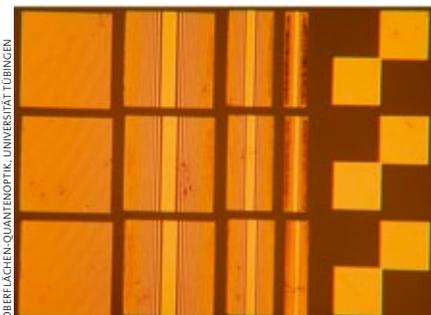
**Wechselspiel zwischen Casimirkraft und abstoßenden Lichtfeldern**

Nun hing alles von der Geschwindigkeit der Gaswolke ab. Waren deren Atome schnell genug, um trotz Abbremsung in den Bereich der Casimirkraft einzudringen, verließen sie die Wolke und lagerten sich an der Metalloberfläche an. Waren sie hingegen zu langsam, wurden sie reflektiert. Indem die Forscher die Zahl der reflektierten Atome bestimmten, konnten sie das Wechselspiel zwischen der die Wolke anziehenden Casimirkraft und den abstoßenden Lichtfeldern ausmessen.

Tatsächlich beeinflusste die Struktur der Metalloberfläche die Stärke der abstoßenden Lichtkraft genau so, wie es die Theorie der Oberflächenplasmonen vorhersagt. Das Team um Slama hatte damit nachgewiesen, dass strukturierte Lichtfelder mit Abmessungen unterhalb der Beugungsgrenze kontrolliert mit Bose-Einstein-Kondensaten in Wechselwirkung treten können – ein konzeptueller Durchbruch.

Während die Beugungsgrenze in Lichtmikroskopen schon in den 1990er Jahren überwunden worden war (siehe zuletzt *SdW 2/2012, S. 18*), ist dies nun also auch für die Quantenoptik gelungen. Vor dem Einsatz der Technik in einem möglichen Quantencomputer ist allerdings noch viel Arbeit nötig. Den Tübingern ist klar, dass sie bislang keine Information zwischen Bose-Einstein-Kondensat und plasmonischen Lichtfeldern austauschen konnten. Als Nächstes wollen sie daher eine im quantenmechanischen Zustand des Kondensats kodierte Information, ein Qubit, auf kontrollierte Weise in die Lichtfelder übertragen, diese dann über die Metalloberfläche bewegen und schließlich dazu veranlassen, das Qubit an ein zweites Kondensat abzugeben. Die Information würde also vom Speicher über den Datenbus zu einem anderen Speicher transportiert. Damit wäre das Grundprinzip eines Datenbusses für Quanten praktisch demonstriert.

**Stefan A. Maier** ist Professor für Physik am Imperial College in London.



OBERFLÄCHEN-QUANTENOPTIK, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

**Mit einer schachbrettartigen Struktur (Foto) der teilweise nur tausendstel Millimeter dicken Golddrähte sorgen die Forscher dafür, dass Oberflächenplasmonen, also über das Metall wandernde Lichtfelder, die gewünschte Form annehmen.**

# Der große Immobilien-Check: Städte, Preise, Prognosen.



Ein Haus ist ein Haus, eine Wohnung eine Wohnung? Weit gefehlt. Ob im Norden, Süden, Westen oder Osten des Landes: Die Qualitätsunterschiede sind riesig. Hinzu kommt die Frage: Steht die Immobilie auf dem Land oder in der Stadt – und wie viel ist sie wert? Großstädte, Studienorte, Ferienregionen – FOCUS hat sie unter die Lupe genommen. Kaufpreise, Mieten und Preisprognosen für 100 Städte. Außerdem: wertvolle Tipps zur Baufinanzierung und zu Krediten.

Das FOCUS SPEZIAL Immobilien-Atlas erhalten Sie auch unter Tel.: 0180 5 480 1000\*,  
Fax: 0180 5 480 1001\* oder unter [www.focus-spezial.de](http://www.focus-spezial.de)

\*€ 0,14/Min. aus dem dt. Festnetz. Aus dem Mobilnetz max. € 0,42/Min.

**Jetzt am Kiosk**

# Feinfühlige Spinnen

Die Jagdspinne *Cupiennius salei* erlegt ihre Beute mit einem gezielten Sprung – und das sogar in völliger Dunkelheit. Denn sie ortet ihre Opfer anhand der winzigen Erschütterungen des Untergrunds, die diese beim Laufen verursachen.

VON CLEMENS SCHABER

**C***upiennius salei* ist mit zehn bis zwölf Zentimeter Beinspannweite recht groß. Sie lebt vor allem im südlichen Mexiko und im nördlichen Guatemala und hält sich häufig auf Bromelien und Bananenpflanzen auf. Ihr Gift ist für den Menschen ungefährlich, wirkt aber äußerst effektiv gegen die Insekten, die auf dem Speiseplan der Spinne stehen. Bei Anbruch der Dunkelheit verlässt *Cupiennius salei* ihren Schlupfwinkel, setzt sich auf lange schmale Blätter und lauert dort. Wenn ein Beutetier näherkommt – häufig sind es nachtaktive Schaben, Grillen, kleine Frösche und Nachtschmetterlinge –, springt sie es mit einem gezielten Satz an, umklammert es mit ihren Beinen und beißt zu. Im Laborexperiment gelingt den Spinnen das sogar dann, wenn ihre Augen abgedeckt sind.

Offenkundig reagieren sie auf die Frequenzen und Amplituden der Vibrationen, die das Beutetier bei seinen Bewegungen auf den Untergrund überträgt. Anhand dieser Schwingungsmuster bemerkt die Spinne auch das Näherkommen eines natürlichen Feinds, woraufhin sie flüchtet. Hochempfindliche Vibrationsdetektoren, die sich an den äußersten Gelenken ihrer acht Beine befinden, erlauben es der Spinne, solche feine Erschütterungen zu registrieren. Indem sie die Zeitunterschiede auswertet, mit denen ein Vibrationssignal bei den einzelnen Sensoren ankommt, kann sie die Richtung zur Quelle sehr genau ermitteln.

Bei Spinnen ist die äußere Körperdecke (Cuticula) durch Proteine und Chitinfasern zu einem Außenskelett verstärkt. Es ist ähnlich elastisch wie die Knochen von Wirbeltieren. Jedes Spinnenbein besteht aus sieben starren Röh-



CLEMENS SCHABER

Ein ausgewachsenes Weibchen der Spinnenart *Cupiennius salei*. Die Pfeile deuten auf die Stellen, an denen die Vibrationsensoren sitzen.

rengliedern, die durch Gelenke flexibel verbunden sind. Muskeln, Sehnen und Nerven liegen innerhalb des schützenden Cuticulapanzers. Die Vibrationsdetektoren, die bei *Cupiennius salei* und anderen Spinnentieren an den Beingelenken sitzen, zählen zu den so genannten lyraförmigen Organen, die Spannungen im Außenskelett registrieren.

### Extrem empfindlicher Bewegungssensor

Diese Organe bestehen im Wesentlichen aus winzigen Schlitzen in der Cuticula, zwei bis vier Mikrometer breit und bis zu 200 Mikrometer lang, die mit einer dünnen, nach innen gewölbten Membran bedeckt und mit Sinneszellen ausgestattet sind. Wenn der Untergrund vibriert oder die Spinne sich fortbewegt, wirken Kräfte auf ihre Beine. Dadurch verändert sich die Lage der Beinglieder zueinander, und es entstehen mechanische Spannungen im Außenskelett, die die Schlitze zusammendrücken. Infolgedessen verformen sich die Fortsätze der Sinneszellen, die mit der spaltbedeckenden Membran verbunden sind, was Ionenflüsse in den

Sinneszellen und letztlich Aktionspotenziale auslöst.

Beim Vibrationsdetektor von *Cupiennius salei* sind 21 solcher Schlitze nahezu parallel angeordnet und charakteristisch gruppiert. Wenn der Untergrund zittert, schwingt das äußerste Beinglied der Spinne, der Tarsus, mit. Dadurch drückt dessen Oberkante gegen die Unterkante des nächsthöheren Beinabschnitts, des Metatarsus (siehe Bild oben). Dies komprimiert die Schlitze der lyraförmigen Organe auf der Oberseite des Metatarsus.

Um die Vibrationsdetektoren zu reizen, genügen bereits Untergrundschwankungen mit einer Auslenkung von 4,5 Nanometern (bei der Reizfrequenz von 1000 Hertz) – das ist weniger als die Dicke einer Zellmembran! Diese winzigen Vibrationen verändern den Winkel zwischen Tarsus und Metatarsus um gerade einmal 0,05 Grad. Sie entsprechen einer vom Untergrund auf den Tarsus wirkenden Kraftänderung um 0,9 Mikronewton, wie meine Kollegen und ich gemessen haben.

Die Kraft, mit der der Tarsus gegen den Metatarsus drückt, steigt mit grö-

ßeren Winkeln exponentiell an. Das Anordnungsmuster der Schlitze und ihre unterschiedlichen Empfindlichkeiten ermöglichen es dem Vibrationsdetektor, einen breiten Bereich von Reizstärken zu verarbeiten. Das ist sinnvoll, da aus der Umwelt der Spinne je nach Reizquelle – Beutetier, Geschlechtspartner oder Feind – stark variierende Vibrationsamplituden zu erwarten sind, die sich über einen Bereich von mehreren Zehnerpotenzen erstrecken.

### Aufgereiht wie Orgelpfeifen

Ein anderes lyraförmiges Organ, der so genannte Propriozeptor, misst Verformungen des Außenskeletts, die von aktiven Beinbewegungen der Spinne herrühren. Er sitzt am nächsthöheren Gelenk des Spinnenbeins, also zwischen Metatarsus und Tibia, und erfasst dessen seitliche Auslenkung. Sie verändert sich relativ wenig, während die Spinne läuft, deshalb spricht der Rezeptor auf einen vergleichsweise schmalen Reizbereich an.

Auch beim Propriozeptor sorgen Sensoren mit abgestufter Empfindlichkeit dafür, dass verschiedene Reizstärken verarbeitet werden können. Das hat die Natur durch unterschiedlich lange Schlitze des lyraförmigen Organs realisiert (siehe Bild S. 22). Der größte ist 200 Mikrometer lang und für Kompressionen der Cuticula zehnmals sensibler als der kürzeste, der nur 20 Mikrometer misst. Im vergangenen Jahr wiesen wir nach, dass bereits Schlitzkompressionen zwischen 1,4 und 30 Nanometern ausreichen, um die Propriozeptoren zu reizen.

Welche Perfektion die Spinnen in mindestens 400 Millionen Jahren Evolution erreicht haben, lässt sich auch an den Materialeigenschaften ihrer Cuticula erkennen, die sich je nach Einsatz stark unterscheiden können. So filtert ein weiches cuticulares Polster zwischen dem Untergrund und den Vibrationssensoren biologisch unwichtige Signale weg – etwa Schwingungen, die von Blättern ausgehen, die im Wind schaukeln. Im Unterschied zum harten Außenskelett wirkt die Cuticula hier als viskoelastischer Stoßdämpfer, der nied-

## Neutrinos doch nicht schneller als Licht

### Ein Messfehler versetzte die Physiker monatelang in Aufregung.

Am 23. September 2011 trat das Team des Neutrinodetektors OPERA mit einer sensationellen Nachricht an die Öffentlichkeit. Das in Italien errichtete Instrument misst Neutrinos, die am Teilchenbeschleuniger SPS des Forschungszentrums CERN bei Genf erzeugt werden. Dabei hatten die OPERA-Forscher festgestellt, dass Myon-Neutrinos die etwa 731 Kilometer weite Reise durch die Erdkruste schneller als mit Lichtgeschwindigkeit (»superluminal«) zurücklegen.

Die Meldung traf in Fachkreisen meist auf ungläubiges Staunen. Denn seit Albert Einstein 1905 die spezielle Relativitätstheorie formulierte, gilt als unumstößliche Tatsache, dass sich kein Signal schneller ausbreiten kann als Licht im Vakuum. Auch sonst hatten die Forscher guten Grund für ihre Skepsis. Dass die Geschwindigkeitsobergrenze ebenso für Neutrinos gilt, war schon bei früheren Experimenten belegt worden. 1979 hatten Forscher am Fermilab bei Chicago Neutrinos (und Myonen) durch mehr als 500 Meter Stahl und Erde geschickt und keine Abweichung gefunden. Einen weiteren Hinweis lieferte die Supernova 1987A. Wären die OPERA-Daten korrekt, hätten erste Neutrinos bereits rund 4,2 Jahre vor dem ersten Lichtsignal auf der Erde eintreffen müssen – was nicht der Fall war. Denkbar schien allenfalls noch, dass die Neutrinogeschwindigkeiten stark von der Energie der Teilchen abhängen. Doch damit rechnet niemand ernsthaft.

Gleichwohl war der Ehrgeiz einiger begabter Theoretiker geweckt. Binnen weniger Monate erschienen mehr als 150 Arbeiten online auf dem Preprint-Server arXiv. Vielleicht, so spekulierten die Forscher, breiten sich die Neutrinos ja durch zusätzliche Raumdimensionen aus und nehmen so gewissermaßen eine Abkürzung. Oder die drei bekannten Neutrinoarten bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Andrew Cohen und Nobelpreisträger Sheldon Glashow, beide von der Boston University, rechneten zudem vor, wie viel Energie superluminale Neutrinos durch die Erzeugung von Elektronen und Positronen verlieren würden.

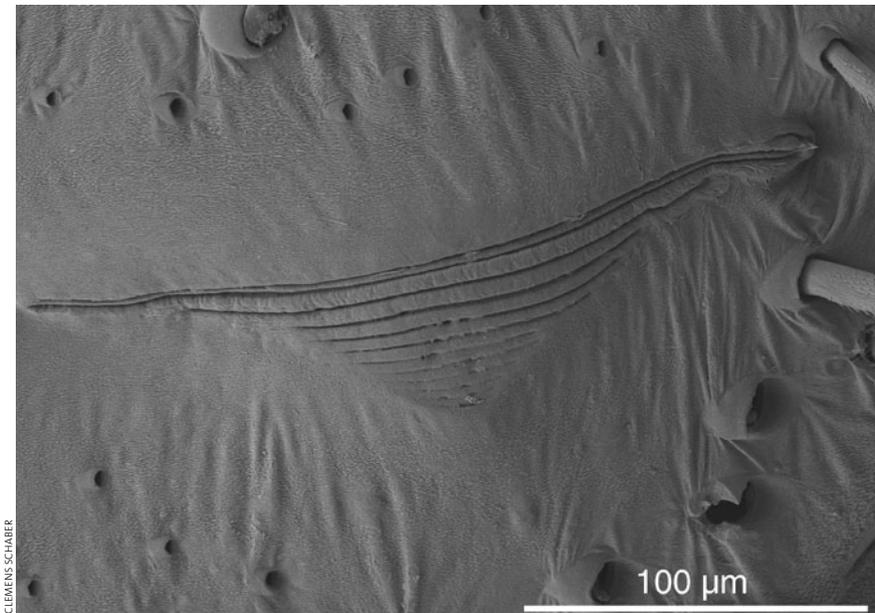
**Viele der Arbeiten konzentrierten sich aber auf die Suche nach denkbaren Messfehlern.** Offenbar zu Recht, denn am 15. März hieß es plötzlich: falscher Alarm. Die OPERA-Forscher waren auf zwei mögliche Fehlerursachen gestoßen, deren Entdeckung bei einem so großen und komplexen Detektor akribische Kleinarbeit erfordert hatte. Insbesondere war der Lichtleiter nicht richtig gesteckt, der das externe GPS-Signal zu der in OPERA eingebauten Uhr transportiert. Dadurch wird das Zeitsignal verzögert, was eine kürzere Neutrinolaufzeit vortäuscht. Der zweite Effekt wirkt sich entgegengesetzt aus, hebt die Verzögerung des Zeitsignals aber nicht völlig auf.

Weil eine plausible Erklärung keine harten Messdaten ersetzt, sollen im Mai neben OPERA auch die ebenfalls im Gran-Sasso-Labor beheimateten Experimente Borexino, LVD und Icarus neue Laufzeitmessungen am Neutrinostrahl aus Genf vornehmen. Noch im März aber stellte das Icarus-Team Resultate vor (preprint 1203.3433), die auf sieben Neutrinoereignissen von Ende 2011 beruhen. Die Daten weisen darauf hin, dass sich die Teilchen mit Vakuumlichtgeschwindigkeit ausbreiten – ganz wie es sich gehört. Auch fanden die Icarus-Experimentatoren keine Belege für das von Cohen und Glashow berechnete Szenario.

Vorbehaltlich der Messungen im Mai lässt sich konstatieren: Trotz gründlichster Prüfungen hatten die OPERA-Kollegen am Ende leider doch zwei entscheidende Details übersehen. Wir können also aufatmen. Die Neutrinos scheinen die Überholspur verlassen zu haben und bewegen sich wieder mit Richtgeschwindigkeit.

**Georg Wolschin** ist Physiker und Wissenschaftsjournalist;

er ist Professor an der Universität Heidelberg und forscht in theoretischer Physik.



Propriorezeptoren messen, wie stark sich das Außenskelett der Spinne verformt, während sie ihre Beine bewegt. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt deutlich, dass die Schlitze dieser Rezeptoren unterschiedlich lang sind.

rige Frequenzen und geringe Geschwindigkeiten absorbiert, so dass sich das Nervensystem der Spinne erst gar nicht

damit befassen muss. Diesen Effekt entdeckten wir bereits vor vier Jahren gemeinsam mit Materialwissenschaftlern

um Vladimir Tsukruk vom Georgia Institute of Technology.

Zusätzlich verfügt die Spinne über feine Härchen, die so genannten Trichobothrien, die aus der Cuticula herausragen und winzigste Luftbewegungen registrieren. Sie bewegen sich so leicht, dass schon mechanische Reize mit einem Energiegehalt von wenigen trillionstel Joule genügen, um in ihren Sinneszellen ein Aktionspotenzial auszulösen. Das ist vergleichbar mit der Energie eines Lichtquants! Diese außerordentliche Empfindlichkeit ermöglicht es der Spinne, fliegende Insekten wahrzunehmen und zu orten – und zwar so präzise, dass sie eine Fliege in der Luft fangen kann. Eine derart detaillierte Anpassung der mechanischen Sinne an die Reizmuster, die für das Überleben der Spinne von Bedeutung sind, bringt auch erfahrene Biologen immer wieder zum Staunen über das Wunder Natur.

**Clemens Schaber** ist Biologe und arbeitet am Department für Neurobiologie der Universität Wien.

## MATHEMATIK

# Abelpreis für Endre Szemerédi

Die nach dem Vorbild des Nobelpreises gestaltete Auszeichnung geht dieses Jahr an den ungarisch-amerikanischen Forscher für seine bahnbrechenden Beiträge zur Kombinatorik und zur extremalen Graphentheorie.

VON CHRISTOPH PÖPPE

**K**ombinatorik – das ist doch diese Rechenübung mit dem Ziel, zu ermitteln, wie viele verschiedene Möglichkeiten es gibt, sechs Zahlen aus 49 für den Lottotipp auszuwählen oder 30 von 32 Karten an drei Skatspieler auszuverteilen. Das Ergebnis ist immer eine sehr große Zahl – häufig weit mehr als die Anzahl der Atome im Universum –, und sie auszurechnen, ist entsprechend mühsam, aber nicht wirklich tiefsinnig.

Mit der Zuerkennung des diesjährigen – zehnten – Abelpreises zeichnet die zuständige Kommission nicht nur

wie üblich einen großen Meister für sein Lebenswerk aus; sie lehrt uns nebenher auch, dass die genannte landläufige Sicht die Kombinatorik unterschätzt. Das unscheinbare Fach hat Ergebnisse von großer Bedeutung hervorgebracht, und Szemerédi war maßgeblich daran beteiligt.

Gleichwohl sind die Sätze der Kombinatorik vergleichsweise einfach zu formulieren und die Beweise elementar – was nicht mit »einfach« zu verwechseln ist. Wenn von einem Sachverhalt zu seiner Begründung ein weiter



**Endre Szemerédi**, geboren am 21. August 1940 in Budapest, studierte zunächst ein Jahr Medizin und arbeitete in einer Fabrik, bevor er sich der Mathematik zuwandte. Er schloss 1965 sein Studium in Budapest ab und promovierte 1970 in Moskau bei Israel Gelfand. Seit 1990 ist er Professor an der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey); zugleich gehört er dem Alfréd-Rényi-Institut für Mathematik der ungarischen Akademie der Wissenschaften an.

## Ein Minimum an Ordnung ist unvermeidlich – ein Kleinbeispiel

Es ist nicht möglich, die Menge der natürlichen Zahlen von 1 bis 9 so in zwei Teilmengen zu zerlegen, dass keine von ihnen eine arithmetische Progression der Länge 3 (»Dreierprogression«) enthält.

Anders ausgedrückt: Einerlei wie man die Zahlen von 1 bis 9 mit zwei Farben einfärbt – sagen wir rot und blau –, es gibt immer eine Dreierprogression von Zahlen gleicher Farbe.

Beweis: Wir zeigen, dass der Versuch, eine Färbung ohne eine solche Dreierprogression herzustellen, misslingen muss. Färben wir zuerst die Zahlen 1, 5 und 9. Sie dürfen nicht alle drei dieselbe Farbe bekommen, sonst wäre das schon eine Dreierprogression. Also müssen zum Beispiel 1 und 5 rot, 9 blau sein. Das erzwingt 3 blau, denn sonst gäbe es die rote Dreierprogression 1, 3,

5. Wegen 3 und 9 blau muss 6 rot sein, sonst droht 3, 6, 9 blau. 5 rot und 6 rot erzwingt 4 blau und 7 blau; 7 blau und 9 blau erzwingt 8 rot; 3 blau und 4 blau erzwingt 2 rot. Das ergibt unvermeidlich die rote Dreierprogression 2, 5, 8.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Alle anderen zulässigen Einfärbungen der Zahlen 1, 5 und 9 führen in ähnlicher Weise auf Widersprüche.

Die Zahl 9 ist übrigens die kleinste mit dieser Eigenschaft. Für die Zahlen von 1 bis 8 gibt es Zweifärbungen ohne einfarbige Dreierprogression, zum Beispiel:

1 2 3 4 5 6 7 8

gedanklicher Weg zurückzulegen ist, dann konstruieren die Mathematiker normalerweise – bildlich gesprochen – unter großem Aufwand ein Flugzeug, das sie einigermaßen komfortabel von A nach B bringt. Die Kombinatoriker gehen zu Fuß; aber die Entfernungen sind in ihrem Fach nicht unbedingt kürzer.

Viel Struktur bringen die Objekte der Kombinatorik nicht mit. Typischerweise sind es irgendwelche Dinge ohne Eigenschaften, von denen man nur weiß, zu welchen von ihresgleichen sie eine Beziehung haben. Was für eine Beziehung das ist, bleibt ebenfalls offen. Man nennt die Dinge Knoten, die Beziehungen zwischen ihnen Kanten und das Ganze einen Graphen. Die hübschen Diagramme der Graphentheorie machen uns glauben, die Knoten hätten einen bestimmten Platz im Raum – aber den gibt es nicht.

Selbst wenn sich ein Kombinatoriker mit den natürlichen Zahlen beschäftigt, legt er vielleicht keinen Wert auf die Tatsache, dass man sie multiplizieren kann, sondern begnügt sich mit der additiven Struktur. So ist es zu verstehen, wenn das Abelpreiskomitee explizit Szemerédis Beiträge zur »additiven Zahlentheorie« rühmt.

Kombinatoriker setzen nun ihren Ehrgeiz in den Nachweis, dass ein solcher strukturloser Haufen eben doch ein gewisses Minimum an Ordnung enthalten muss. Das klassische Beispiel stammt aus der Ramsey-Theorie: Auf

jeder Party mit sechs (oder mehr) Teilnehmern gibt es mindestens drei Leute, die einander sämtlich bekannt oder sämtlich unbekannt sind. Für die abstrakte Formulierung ersetze man »Party« durch »Graph«, »Mensch« durch »Knoten« und »Bekanntschaft« durch »Kante«.

Während dieser Sachverhalt noch einigermaßen einfach zu beweisen ist, geraten die entsprechenden Probleme für größere Bekanntenzahlen rasch in den Bereich des Unlösbaren. Nach dem frühen Tod des Initiators Frank P. Ramsey (1903–1930) erzielte der legendäre Pál Erdős (1913–1996) bedeutende Fortschritte (*Spektrum der Wissenschaft* 9/1990, S. 112–118) – und übertrug seine Begeisterung auf seinen jungen Studenten Endre Szemerédi, dessen Talent er in Budapest entdeckt hatte. Der Beweis 1975 eine lange offene Vermutung von Erdős und seinem Fachkollegen Pál Turán (1910–1976). Das Ergebnis heißt heute »Satz von Szemerédi«.

Ein strukturloser Haufen natürlicher Zahlen ist einfach eine beliebige Teilmenge derselben, und »Ordnung« in diesem Haufen ist hier zu verstehen als die Existenz einer »arithmetischen Progression« innerhalb dieser Teilmenge, das heißt von gewissen Zahlen, die alle im selben Abstand aufeinander folgen. 3, 7, 11, 15, 19 ist eine arithmetische Progression der Länge 5 mit Abstand 4, und 436, 521, 606, 691 ist eine der Länge 4 mit Abstand 85.

Erdős und Turán stellten sich die Frage, ob eine Teilmenge der natürlichen Zahlen arithmetische Progressionen beliebiger Länge enthält. Nennen wir eine solche Teilmenge »ordentlich«.

Eine Teilmenge, der zur Gesamtmenge nur endlich viele Zahlen fehlen, ist sicher ordentlich, eine endliche Teilmenge dagegen sicher nicht. Wenn man aber die natürlichen Zahlen in zwei, drei oder endlich viele unendliche Teilmengen zerlegt? Dann ist mindestens eine von ihnen ordentlich, so ein Satz, den Bartel Leendert van der Waerden 1926 bewies.

Der Satz von Szemerédi geht über dieses Resultat weit hinaus. Er besagt, dass eine Teilmenge nur »einen nennenswerten Prozentsatz aller natürlichen Zahlen« umfassen muss, um ordentlich zu sein; da man aber von einer unendlichen Menge keine Prozentsätze bilden kann, muss man erst definieren, was damit gemeint ist. Für eine endliche Zahl  $N$  kann man den Anteil der Zahlen von 1 bis  $N$ , die in unserer Teilmenge enthalten sind, bestimmen. Der Grenzwert dieser Zahl für  $N$  gegen unendlich heißt die »Dichte« der Teilmenge (die Definition ist erweiterbar auf den Fall, dass der Grenzwert nicht existiert). Wenn man nach dem Zufallsprinzip jeder natürlichen Zahl die Chance von einem Prozent gibt, dazuzugehören, hat die so erzeugte Menge eine Dichte von einem Prozent. Die geraden Zahlen haben die Dichte  $1/2$ , aber die

## Fliegen wie ein Vogel

**Roboter können es mittlerweile.**

**F**lattern Sie auch so viel im Schlaf? In meinen Flugträumen spüre ich wenig von der verkappten Libido, die laut Freuds Traumdeutung im Spiel sein soll. Immer muss ich heftig mit den Armen rudern und den Beinen strampeln, um nicht auf den Boden zu sacken, und komme nur mühsam voran. Völlig außer Atem wache ich auf.

Historisch sind alle Versuche, den alten Menschheitstraum zu verwirklichen, ähnlich frustrierend verlaufen. Wer es den Vögeln nachtun wollte wie der Schneider von Ulm oder Otto Lilienthal, der stürzte zu Tode – oder landete bestenfalls in der Donau. Erst mit Hilfe von festen Tragflächen und Propellerantrieb hüpften die Gebrüder Wright ein Stück durch die Luft.

Dennoch wurden immer wieder auch unbemannte Schwingflügler konstruiert, die das Vogelflattern kopieren sollten. Bis vor Kurzem machten sie eine noch schlechtere Figur als ich in meinen Träumen: Nach kurzem Gezappel plumpsten sie ins Gras. Aber auf einer Tagung in Edinburgh im Juli 2011 präsentierte der deutsche Forscher Markus Fischer eine täuschend naturgetreue Roboter Möwe, deren Flugkunst Begeisterungstürme auslöste ([www.youtube.com/watch?v=Fg\\_JcSHUuQ](http://www.youtube.com/watch?v=Fg_JcSHUuQ)).

Der SmartBird ist nicht viel größer als eine ausgewachsene Möwe, aber nur halb so schwer. Er startet und landet auf einer ausgestreckten Menschenhand, dreht dazwischen ferngesteuert mehrere Runden durch den Saal und bewegt die Flügel ungenau naturgetreu. Dafür sorgt ein durchdachtes Getriebe im Rumpf, das leise surrend die Schwingen bei ihrem Auf und Ab so verdrillt, dass sie wie beim echten Vogel für optimalen Auf- und Vortrieb sorgen.

Die Theorie dahinter entwickelte Wolfgang Send vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln, der seit seiner Pensionierung die auf Automatisierungsaufgaben spezialisierte Firma Festo beim Bau des SmartBird beraten hat. Dessen größte Errungenschaft ist das aktive Verbiegen der Flügel bei jedem Schlag (*Science* 335, S. 1430–1433, 2012).

**Ein etwas kleinerer Schlagflügler namens Phoenix**, der in den USA am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt wurde, muss ohne aktives Verdrillen auskommen: Die weichen, nur an der Vorderkante versteiften Flügel deformieren sich passiv während des Schlagens. Das geht auf Kosten des aerodynamischen Wirkungsgrads: Der SmartBird erreicht 80, der Phoenix nur 30 Prozent. Darum ähnelt Phoenix eher einem rasch flatternden Insekt als einem Vogel ([groups.csail.mit.edu/locomotion/videos.html](http://groups.csail.mit.edu/locomotion/videos.html)).

Wozu sind solche Spielzeuge gut? Zum einen bringen sie die komplizierte Theorie des Vogelflugs voran, an der sich Forscher seit dem Ende des 19. Jahrhunderts die Zähne ausbeißen. Zum anderen ebnen sie den Weg zu Flugrobotern, die anders als herkömmliche Drohnen keine Start- und Landebahn brauchen und in geschlossenen Räumen mindestens so gut navigieren können wie kleine unbemannte Helikopter – insbesondere dort, wo Menschenleben in Gefahr sind. Kein Wunder, dass der MIT-Phoenix von der US-Marine finanziert wird.

Der größte Vorzug von Schlagflüglern ist, dass sie Luftströmungen zu ihrem Vorteil nutzen können. Adler oder Möwen segeln mit dem Rücken- oder Aufwind und sparen kostbare Energie. Denn wie beim Elektroauto ist der Akku die technische Schwachstelle der kleinen Flugroboter. Der SmartBird bleibt höchstens elf Minuten in der Luft. Eine natürliche Möwe segelt bei günstigem Wind dagegen bis zu 100 Kilometer weit. Dann lädt sie sich auf, indem sie einen Fisch fängt oder menschliche Essensabfälle plündert.



Michael Springer

Quadratzahlen und sogar die Primzahlen sind dünn gesät: Ihre Dichte ist null.

Szemerédi beweist seinen Satz, indem er zeigt, dass jeder Versuch, eine unordentliche Menge positiver Dichte herzustellen, scheitern muss. Zunächst ist nicht schwer zu beweisen, dass es unter den Zahlen von 1 bis  $N$  eine Teilmenge mit maximal vielen Elementen geben muss, die keine arithmetische Progression der Länge – zum Beispiel – 5 enthält. (Eine solche Menge anzugeben wäre allerdings überaus mühsam.) Szemerédi zeigt, dass diese Maximalzahl an Elementen geteilt durch  $N$  (die Dichte) für  $N$  gegen unendlich gegen null geht, und das nicht nur für Progressionen der Länge 5, sondern für beliebige Länge.

Der Beweis geht in der Tat »zu Fuß«, aber durch extrem schwieriges Gelände. Als wesentliches Hilfsmittel verwendet Szemerédi sein so genanntes Regularitätslemma für sehr große Graphen: Man kann deren Knoten derart in nicht allzu viele Eimer werfen, dass die von einem Eimer zu einem anderen verlaufenden Kanten sich einigermaßen gleichmäßig verteilen. Dieses Lemma hat in der Graphentheorie allgemein große Bedeutung gewonnen.

Der Satz von Szemerédi ist auch deswegen so schwer zu beweisen, weil die genannte Dichte zwar gegen null strebt, aber quälend langsam. Der Kehrwert der Dichte muss ja gegen unendlich streben, wenn  $N$  gegen unendlich geht, aber er tut das – jedenfalls soweit man das beweisen kann – nicht proportional zum Logarithmus von  $N$ , was schon sehr langsam ist, sondern zum Logarithmus vom Logarithmus von  $N$ , was die Qual noch potenziert.

In einem spektakulären Schritt bewiesen Ben Green und Terence Tao 2004, dass die Primzahlen ordentlich sind (*Spektrum der Wissenschaft* 4/2005, S. 114–117). Da die Primzahlen eine dünne Menge sind, ist das nicht einfach eine Folgerung aus dem Satz von Szemerédi. Aber Green und Tao haben ihn bei ihrem Beweis verwendet.

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

# Thema Nanotechnologie bei

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

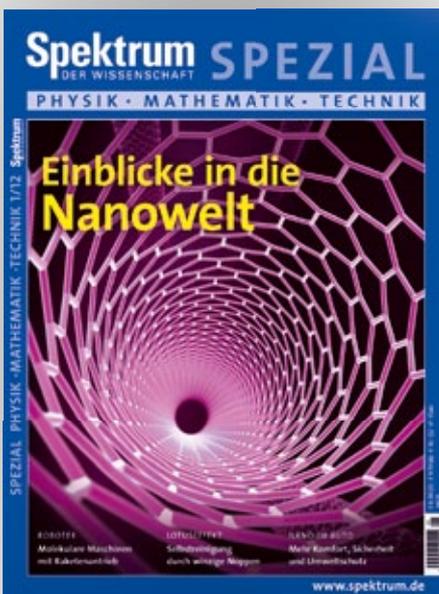


Neu!

## Als PDF direkt in Ihr Postfach

Lassen Sie sich schnell und kompakt über die wichtigsten Erkenntnisse im Bereich Nanotechnologie informieren! »Briefings Nanotechnology« erscheint monatlich digital und in englischer Sprache.

[spektrum.com/briefings](http://spektrum.com/briefings)

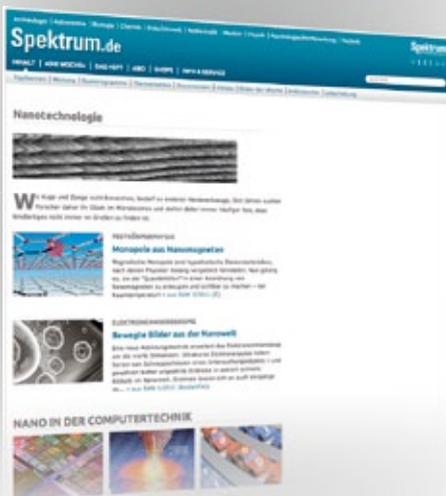


Spektrum-Spezial – Physik • Mathematik • Technik 1/2012

## »Einblicke in die Nanowelt«

Die Nanotechnologie ist unaufhaltsam auf dem Vormarsch und wird das 21. Jahrhundert prägen. Schon heute hat sie Eingang in unseren Alltag gefunden. Dieses »Spektrum-Spezial« bietet eine Sammlung wichtiger Artikel zum Thema Nanotechnologie aus »Spektrum der Wissenschaft«, die schlaglichtartig den aktuellen Stand und die Zukunft dieses Gebiets beleuchten – und wie es unser aller Leben beeinflussen wird.

[spektrum.de/spezialabo](http://spektrum.de/spezialabo)



## Themenseite »Nanotechnologie«

Hier finden Sie eine Zusammenstellung der wichtigsten Beiträge aus den Magazinen und Onlineberichten des Verlags rund um das Thema Nanotechnologie.

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

ADAM VOORHES PHOTOGRAPHY



TITELTHEMA: NEUROWISSENSCHAFT

# Die Grenzen des Gehirns

Forscher bezweifeln, dass sich unsere Intelligenz noch wesentlich steigern könnte. Physikalische Gesetze verhindern dies.

Von Douglas Fox

**E**ine Honigbiene bewältigt mit ihrem nur rund ein Milligramm schweren Gehirn höchst anspruchsvolle Aufgaben – so kann sie sich ähnlich gut wie viele Säugetiere in der Umgebung zurechtfinden. Zwar ist die Leistungsfähigkeit ihres Minihirns durch die geringe Anzahl der Nervenzellen begrenzt, doch aus der verfügbaren neuronalen Kapazität scheint sie das Letzte herauszuholen.

Weit am anderen Ende der Skala befindet sich der Elefant mit seinem fünf Millionen Mal größeren Gehirn. Dessen Effizienz erinnert an die Bürokratie eines mesopotamischen Königreichs: Signale brauchen für den Weg zwischen den beiden Hirnhälften 100-mal länger; ähnlich sieht es mit der Reizleitung vom Gehirn zu den Füßen aus, so dass sich das Tier weniger auf seine Reflexe verlassen kann und daher schlicht und einfach langsamer geht. Ein Elefant muss also wertvolle neuronale Ressourcen dafür verschwenden, jeden einzelnen Schritt zu planen.

Ganz so schlimm sieht es bei uns Menschen nicht aus, und wir gelten mit einiger Berechtigung sogar als klügste Tierart auf der Erde – auch wenn es zugegebenermaßen schwierig ist, Intelligenz zu messen oder überhaupt erst einmal exakt zu definieren. Doch selbst unseren geistigen Fähigkeiten sind klare Grenzen gesetzt, obwohl gerade sie

uns einen einzigartigen Vorteil gegenüber anderen Lebewesen verschaffen. Man könnte nun erwarten, dass der Evolutionsdruck die Anzahl der Nervenzellen in unseren Gehirnen oder die Geschwindigkeit der Signalübertragung zwischen den Neuronen fortwährend erhöht – und dass uns solche Veränderungen auch tatsächlich immer klüger machen.

Vielleicht ist unser Gehirn aber bereits am Limit seiner informationsverarbeitenden Fähigkeiten angelangt? Anthropologen rätseln schon lange, ob bestimmte anatomische Voraussetzungen ein weiteres Wachstum des menschlichen Denkapparats verhindern: ob zum Beispiel ein größeres Gehirn in einem entsprechend größeren Schädel überhaupt durch den Geburtskanal einer Frau passen würde, denn ihre Beckenform ist durch den aufrechten Gang bestimmt. Vermutlich hätte jedoch die Evolution dieses Problem lösen können, vielleicht durch einen früheren Geburtszeitpunkt, weshalb es tiefere Gründe für die Grenzen des Hirnwachstums geben dürfte. Neuere Forschungsergebnisse weisen nun darauf hin, dass bestimmte physikalische Faktoren der Evolution von Intelligenz, die auf Neuronennetzen basiert, klare Grenzen setzen – und dies nicht nur beim Menschen, sondern bei allen Tieren.

Ein größeres Gehirn wäre wohl wirklich die offensichtlichste Möglichkeit, die Denkleistung zu verbessern. Mehr Neurone könnten seine Komplexität erhöhen. Tatsächlich fasziniert der Zusammenhang von Hirngröße und Intelligenz Wissenschaftler seit mehr als 100 Jahren. Im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert suchten Biologen nach allgemein gültigen Gesetzen des Lebens und dabei auch nach mathematischen Formeln, die den Zusammenhang von Körpermasse und Hirnvolumen im Tierreich beschreiben.

Doch schon damals war klar, dass die Gehirngröße allein kein Maßstab für Intelligenz sein kann: Das Hirn einer Kuh ist 800-mal größer als das einer Maus, und dennoch ist sie wohl nicht wirklich klüger. Es sieht eher so aus, als ob Gehirne zwangsläufig mit der Körpermasse wachsen. Größere Tiere scheinen umfangreichere neuronale Netze für »Hausarbeiten« abstellen zu müssen. Es gilt zum Beispiel mehr Signale von Tastrezeptoren in der Haut und von der ausgedehnteren Netzhaut zu verarbeiten sowie mehr Muskelfasern zu koordinieren.

Der holländische Anatom Eugène Dubois (1858–1940), der 1893 auf Java den Schädel des *Homo erectus* entdeckte, suchte nach einem Weg, die Intelligenz von Tieren auf Grundlage der Maße ihrer Schädel abzuschätzen. Dazu wollte er das Verhältnis zwischen Gehirn- und Körpergröße der jeweiligen Arten mathematisch präzise beschreiben. Er ging dabei davon aus, dass Tiere mit – im Vergleich zu ihrem Körpergewicht – überdurchschnittlich großen Hirnen auch besonders klug seien. Dubois und andere Wissenschaftler trugen eine beachtliche Datenmenge zusammen: Eine ihrer Abhandlungen umfasste etwa Angaben zum Gewicht von Körper, Organen und Drüsen von insgesamt 3690 Tierarten – von Waldkakerlaken über Gelbschnabelreiher bis zum Zwei- und Dreifingerfaultier.

Dubois' Nachfolger fanden dann heraus, dass das Gehirngewicht bei Säugern nur mit dem Körpergewicht hoch  $3/4$  zunimmt, also weniger als proportional. So hat eine Bisamratte, deren Körper etwa 16-mal schwerer ist als der einer

Maus, ein ungefähr achtmal größeres Gehirn. Damit war der gesuchte mathematische Zusammenhang gefunden: der Enzephalisationsquotient (EQ), der die tatsächliche Hirnmasse einer Tierart mit der auf Grund des Körpergewichts zu erwartenden vergleicht. Der EQ gibt also an, in welchem Maß eine Spezies von der Regel mit dem Exponenten  $3/4$  abweicht.

Beim Menschen beträgt der EQ 7,5 (unser Gehirn ist 7,5-mal größer, als es die Formel vorhersagt), beim Großen Tümmler 5,3. Affen erreichen 4,8 und Rinder wenig überraschend nur 0,5 (siehe Kasten rechts). Intelligenz hängt also möglicherweise davon ab, wie viel neuronale Reserven übrig bleiben, wenn die grundlegenden Aufgaben des Gehirns, etwa Reaktionen auf Berührungen der Haut, abgedeckt sind. Die Hirngröße spielt somit durchaus eine Rolle – zumindest oberflächlich betrachtet.

### Das berühmt-berüchtigte »law of diminishing returns«

Säugetiere und Vögel profitierten in ihrer Entwicklung sicherlich von zunehmender Hirnmasse. Zum Beispiel: Je größer die Anzahl der möglichen Wege, die ein Signal zu nehmen vermag, desto höher ist sein Informationsgehalt. Die Nervenzellen müssen nun für das gleiche Resultat weniger häufig feuern. Doch lässt sich die Intelligenz nicht unbegrenzt durch fortwährend anwachsende Neuronenzahl steigern. »Ich halte es für ziemlich wahrscheinlich, dass hier das »law of diminishing returns« (Gesetz der abnehmenden Erträge) zum Tragen kommt«, erklärt der Physiker Vijay Balasubramanian, der an der University of Pennsylvania in Philadelphia über die neuronale Verschlüsselung von Informationen forscht. Eine größere Zahl an Zellen bedeutet ja auch eine höhere Belastung, etwa durch zusätzlichen Energieverbrauch.

Beim Menschen ist das Gehirn das Organ mit dem höchsten Energiebedarf. Bei nur zwei Prozent des Körpergewichts beansprucht es immerhin 20 Prozent der in Ruhe verbrauchten Kalorien – bei Neugeborenen sind es sogar 65 Prozent. Einen Großteil der benötigten Energie verwendet das Gehirn für die Kommunikation in seinen neuronalen Netzen. In der menschlichen Großhirnrinde entfallen darauf etwa 80 Prozent des Verbrauchs. Doch mit zunehmender Größe wird die neuronale Vernetzung auch aus weniger offensichtlichen, strukturellen Gründen schwieriger.

Schon als die Biologen noch Daten zum Hirngewicht sammelten, beschäftigten sie sich nebenbei mit einer viel anspruchsvolleren Frage: der nach den Konstruktionsprinzipien des Gehirns – und inwieweit diese bei verschiedenen Hirngrößen beibehalten werden. Ein typisches Neuron hat einen langen Fortsatz zum Versenden von Signalen: das Axon, das sich an seinem Ende verzweigt und über Synapsen mit anderen Nervenzellen Kontakt aufnimmt (siehe Kasten S. 31). Axone verbinden wie Telegrafenkabel verschiedene Hirnregionen oder verlaufen – zu Nerven gebündelt – vom Gehirn zu anderen Teilen des Körpers.

In diesen frühen Studien vermaßen die Biologen unter dem Mikroskop den Durchmesser von Axonen, bestimmten

## AUF EINEN BLICK

### EVOLUTION AM ANSCHLAG

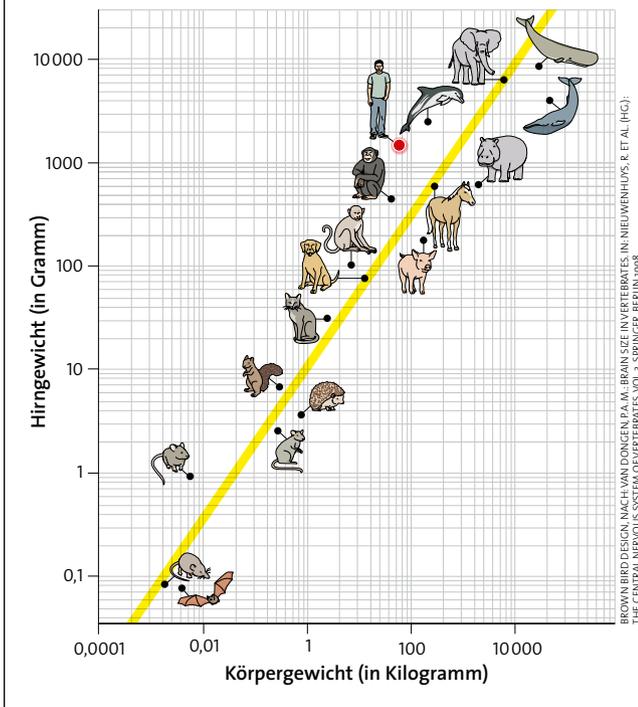
**1** Die **menschliche Intelligenz** scheint sich bereits an ihrem evolutionär möglichen Maximum zu befinden. Dafür sprechen Forschungsergebnisse der letzten Jahre, denen zufolge **physikalische Gesetze** eine wesentliche Leistungssteigerung verhindern.

**2** Eine höhere Hirnleistung durch Vergrößerung des Gehirns würde zu viel **Energie** verbrauchen und die neuronalen Prozesse verlangsamen, da größere Strecken zu überwinden wären. Auch würden die Verbindungen zwischen den Nervenzellen übermäßig viel **Platz** beanspruchen.

**3** Diese Nachteile ließen sich theoretisch durch die Evolution kleinerer Nervenzellen und dünnerer Axone ausgleichen, doch dem stehen dieselben **thermodynamischen Gesetze** entgegen, die auch die Verkleinerung der Schaltelemente in Computerchips begrenzen: Unterhalb einer bestimmten Größe nimmt das **zufällige Signalrauschen** überhand und verhindert eine effektive Informationsübermittlung.

## Abweichler beim Hirngewicht

**Große Tiere haben auch größere Gehirne.** Deren Masse nimmt jedoch nicht direkt proportional zum Körpergewicht zu, sondern zu diesem hoch  $3/4$ . In der doppelt logarithmischen Skala des Diagramms drückt sich das als gerade Linie geringer Steigung aus. Besonders intelligente Tiere weichen von dieser Regel aber ab: Sie liegen oberhalb der Linie. Der Mensch etwa übertrifft den von der Formel vorausgesagten Wert um den Faktor 7,5 und ist damit der Spitzenreiter unter allen Tierarten. Ab einem bestimmten Punkt bringt eine weitere Vergrößerung des Gehirns immer weniger Zugewinn an Leistung (siehe Kasten S. 32).



die Größe und Dichte der Zellen und die Anzahl der Synapsen pro Neuron. Sie untersuchten in den Gehirnen von Dutzenden verschiedener Tierarten hunderte, manchmal tausende Nervenzellen. Um ihre mathematischen Formeln zu verfeinern und dazu möglichst große Tiere einzubeziehen, entnahmen sie sogar Walkadavern das gesamte Gehirn. Der norwegische Biologe Gustav Adolf Guldberg (1854–1908) beschrieb in den 1880er Jahren die fünfstündige Prozedur, in der zwei Männer mit einer großen Holzfällersäge, Axt, Meißel und viel Muskelkraft den Schädel eines toten Wals wie den Deckel einer Konservenbüchse öffneten.

Diese Untersuchungen zeigten, dass bei den verschiedenen Spezies mit zunehmender Hirnmasse allmählich Veränderungen auftreten, die aber wohl nicht beliebig extrapolierbar sind. So werden die Nervenzellen im Durchschnitt größer. Dadurch können sie bei steigender Gesamtzahl zu immer mehr anderen Neuronen Kontakt aufnehmen, weil sie den nötigen Platz für zusätzliche Synapsen bieten. Aller-

dings lassen sich größere Zellen in der Hirnrinde weniger dicht packen, so dass auch die Entfernung zwischen den Neuronen und damit die Länge der Axone zunimmt. Und da das wiederum die Signalübertragungszeit erhöht, müssen die Zellausläufer zum Ausgleich dicker werden – denn die Leitungsgeschwindigkeit wächst mit dem Durchmesser.

Zudem unterteilen sich die Gehirne mit zunehmender Größe in immer mehr abgrenzbare Areale. Diese Kompartimente lassen sich erkennen, wenn man das Gewebe anfärbt und unter dem Mikroskop betrachtet, denn sie nehmen die Farbstoffe unterschiedlich stark an. Sie entsprechen oft auch funktionellen Einheiten, etwa für Sprachverständnis oder Gesichtserkennung. Mit weiter steigender Gehirngröße erfolgt noch in einer anderen Dimension eine Spezialisierung: Anatomisch vergleichbare Areale in der linken und rechten Hirnhälfte übernehmen tendenziell unterschiedliche Aufgaben, zum Beispiel einerseits räumliches und andererseits sprachliches Denken.

### Spezialisierung – ein Zeichen höherer Intelligenz?

Jahrzehntlang galt eine derartige Unterteilung des Gehirns als offensichtliches Anzeichen für höhere Intelligenz. Es könnte aber auch profanere Erklärungen dafür geben, hält Mark Changizi dagegen, ein theoretischer Neurobiologe bei 2AI Labs in Boise, US-Bundesstaat Idaho: Die Spezialisierung der Areale beseitigt lediglich ein grundlegendes Problem der Verknüpfung zwischen Nervenzellen, das mit steigender Hirngröße auftritt. Denn je mehr Neurone ein Gehirn enthält, desto schwieriger wird es, den gleichen Vernetzungsgrad aufrechtzuerhalten. Die Lösung besteht darin, Neurone mit ähnlichen Funktionen zu Einheiten zusammenzufassen, die jeweils in sich hoch vernetzt sind, aber untereinander nur mit deutlich weniger und dafür langen Axonen Kontakt halten. Auch die Spezialisierung der rechten und linken Hirnhälfte dient einem solchen Zweck: Dadurch müssen weniger Informationen von einer Seite zur anderen gelangen, und das Gehirn benötigt entsprechend weniger Axone, um die beiden Hemisphären zu verbinden. »All die anscheinend komplexen Organisationsprinzipien in größeren Gehirnen sollen letztlich nur das Vernetzungsproblem lösen«, argumentiert Changizi, »und sind nicht unbedingt Hinweise auf höhere Intelligenz.«

Jan Karbowski, Neuroinformatiker an der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Warschau, teilt diese Auffassung. »Das Gehirn muss mehrere Parameter gleichzeitig optimieren, und das geht nur mit Kompromissen«, sagt er. »Verbessert man nur einen Aspekt, vermässelt man einen anderen.« Was würde etwa geschehen, wenn der Balken (das Axonbündel, das rechte und linke Hirnhälfte verbindet) bei steigender Hirngröße so viel dicker wird, dass der Vernetzungsgrad zwischen rechts und links gleich bleibt? Und wenn zudem der Querschnitt der Axone so anwächst, dass die Signale zwischen den Hirnhälften nicht langsamer laufen? Als Ergebnis würde der Balken stark anschwellen und die Hirnhälften dadurch auseinanderdrängen. Damit wären

die denkbaren Verbesserungen der Hirnfunktion dank der Vergrößerung gleich wieder zunichtegemacht.

Derlei Kompromisse treten bei Experimenten, die den Zusammenhang von Axonquerschnitt und Signalleitgeschwindigkeit demonstrieren, deutlich zu Tage. Wie Karbowski zusammenfasst, vergrößern sich die Neurone zwar mit zunehmender Masse des Gehirns, jedoch nicht genug, um gleich gut vernetzt zu bleiben. Ebenso werden die Axone mit steigendem Hirngewicht dicker – aber eben nicht so sehr, dass es die Signalverzögerungen durch die längeren Leitungen ausgleichen würde. Das wäre auch nicht effizient. Denn während ein doppelter Axonquerschnitt den Energieverbrauch ebenfalls verdoppelt, steigt die Übertragungsgeschwindigkeit gleichzeitig nur um etwa 40 Prozent.

Grundsätzlich nimmt aber trotzdem mit steigender Hirnmasse die weiße Substanz (Axone) rascher zu als die graue Substanz (Zellkörper der Neurone). Tiere mit größerem Gehirn müssen also anteilmäßig mehr Hirnvolumen für die Verdrahtung reservieren als für die Zellen, welche die eigentliche Rechenarbeit leisten. Eine weitere Vergrößerung dürfte demnach irgendwann nicht mehr die Leistung verbessern.

Wie lässt sich das Problem lösen? Als Jon H. Kaas, Neurobiologe an der Vanderbilt University in Nashville, und seine Kollegen 2007 die Hirnzellen verschiedener Primaten miteinander verglichen, stießen sie auf eine Besonderheit, die uns Menschen vermutlich einen erheblichen Vorteil verschafft. Kaas stellte nämlich fest, dass bei Primaten die meisten Neurone in der Hirnrinde – im Gegensatz zu anderen Tieren – mit steigendem Hirnvolumen kaum an Umfang zulegen. Nur ein kleiner Teil der Zellen wird größer, und diese wenigen scheinen für die Verbindung der verschiedenen Hirnareale verantwortlich zu sein.

Daher ist die Neuronendichte bei Primatenspezies mit deutlich verschiedenem Hirnvolumen ziemlich konstant. Nachtaffen haben ein etwa doppelt so großes Gehirn wie die deutlich kleineren Seidenäffchen und auch eine doppelt so hohe Zahl von Nervenzellen. Bei Nagern dagegen nimmt die Neuronenzahl für ein zweifaches Hirnvolumen lediglich um 60 Prozent zu. Dieser Unterschied hat erhebliche Konsequenzen. Menschen verfügen bei 1,4 Kilogramm Hirngewicht über 100 Milliarden Neurone. Das Gehirn eines Nagetiers mit ebenso vielen Nervenzellen wäre hingegen 45 Kilogramm schwer! Und dieses riesige Organ würde sämtliche verfügbare Stoffwechselenergie verbrauchen. »Das dürfte einer der Gründe sein, weshalb die großen Nagerarten nicht schlauer sind als die kleinen«, erklärt Kaas.

Tatsächlich scheint ein Gehirn höhere Leistungen erbringen zu können, wenn es aus kleineren und dichter gepackten Neuronen aufgebaut ist. Im Jahr 2005 beschrieb der Neurobiologe Gerhard Roth von der Universität Bremen einige Parameter, die bei unterschiedlichen Tierarten noch deutlicher mit höherer Intelligenz – sprich komplexerem Verhalten – verknüpft sind als der Enzephalisationsquotient: »Die einzigen eindeutigen Korrelationen«, so Roth, »finden sich bei der Neuronenzahl in der Großhirnrinde sowie bei der Geschwin-

digkeit der neuronalen Aktivität.« Letztere sinkt mit zunehmendem Abstand zwischen den Neuronen und steigt mit dem Ausmaß der so genannten Myelinisierung. Myelin ist das Material der Isolierschicht um die Axone, die eine viel schnellere Signalübertragung erlaubt.

Damit würde sich die geringe Größe der Primatenneurone doppelt positiv auswirken: Ihre Zahl kann mit der Hirngröße stärker zunehmen, und die Zellen können schneller kommunizieren, da sie näher beieinanderliegen. Elefanten und Wale sind zwar ziemlich intelligent, doch die Größe ihrer Nervenzellen und des Hirnvolumens beeinträchtigen die neuronale Effizienz. »Die Packungsdichte der Zellen ist bei diesen Tieren wesentlich geringer«, erläutert Roth. »Das bedeutet einen größeren Abstand zwischen den Neuronen und damit eine deutlich langsamere Signalübertragung.«

### **Schnelle und direkte Verbindungen zwischen Hirnarealen fördern die Denkfähigkeit**

Neurowissenschaftler haben mittlerweile ähnliche Zusammenhänge auch zwischen verschiedenen Menschen entdeckt. Jene mit der schnellsten Signalübertragung zwischen den Hirnarealen sind offenbar am intelligentesten. Martijn P. van den Heuvel vom Medizinischen Zentrum der Universität Utrecht untersuchte mit seinem Team 2009 mittels funktioneller Kernspintomografie, wie direkt die verschiedenen Hirnregionen bei einzelnen Personen miteinander kommunizieren, das heißt, wie viele Areale jeweils dazwischengeschaltet sind. Demnach gehen kürzere Wege mit einem höheren Intelligenzquotienten einher. Ähnliche Ergebnisse gewann im selben Jahr eine Forschungsgruppe unter der Leitung des Neurowissenschaftlers Edward Bullmore von der University of Cambridge, jedoch mit einem anderen Ansatz. Das Team verglich zunächst das Arbeitsgedächtnis von 29 gesunden Probanden anhand dessen, wie gut sie sich mehrere Zahlen gleichzeitig merken konnten. Dann schätzten sie mit Hilfe magnetenzephalografischer Ableitungen an der Kopfhaut die Übertragungsgeschwindigkeit zwischen den Hirnarealen. Resultat: Die Probanden mit der direktesten und schnellsten neuronalen Kommunikation verfügten auch über das beste Arbeitsgedächtnis.

Das ist eine entscheidende Erkenntnis. An sich sparen ja größere Gehirne Platz und Energie, indem sie die direkten Verbindungen zwischen den verschiedenen Arealen reduzieren. Das menschliche Denkorgan weist tatsächlich relativ wenige solche langen Verknüpfungen auf. Doch laut Bullmore und van den Heuvel sind diese seltenen direkten Verbindungen trotzdem äußerst bedeutsam für die Intelligenz: Wenn auch nur einige zu viel davon eingespart werden, sinkt die Leistungsfähigkeit rapide. »Intelligenz hat ihren Preis«, stellt Bullmore fest. »Die Zahl der Verbindungen innerhalb des Gehirns lässt sich nicht einfach immer weiter verringern.«

Falls also tatsächlich der neuronale Signaltransport die Intelligenz begrenzt, gäbe es theoretisch zwei elegante Auswege für die weitere Evolution. So sollte die Entwicklung kleinerer Nervenzellen – die näher zusammenrücken und schnel-

ler kommunizieren können – leistungsfähigere Gehirne ermöglichen. Und auch verbesserte Axone, die Informationen rascher leiten, ohne dass ihr Querschnitt zunimmt, könnten die Hirnleistung steigern. Doch ein wichtiger Faktor verhindert eine Miniaturisierung von Neuronen und Axonen unter eine bestimmte Grenze: Die Ionenkanäle, mit denen die Zellen ihre elektrischen Signalimpulse erzeugen, funktionieren nicht besonders präzise.

Ionenkanäle sind Proteine in der Zellmembran, die wie winzige Ventile arbeiten. Sie öffnen und schließen sich durch Veränderungen ihrer Form. Im offenen Zustand lassen sie Natrium-, Kalium- oder Kalziumionen durch die Zellmembran passieren und erzeugen so jene elektrischen Signale, mit denen Neurone untereinander kommunizieren. Doch da sie so klein sind, können bereits rein durch Wärme bewirkte Eigenbewegungen der Moleküle solche Vorgänge auslösen. Ein Verfahren namens Patch-clamp-Technik illustriert dieses Problem: Forscher können einen einzelnen Ionenkanal isolieren

und seine elektrischen Eigenschaften messen, indem sie ein mikroskopisch feines Glasröhrchen auf der Membran aufsetzen – so wie man eine Ameise einsperren kann, indem man ein Glas darüberstülpt. Verändern sie dann die elektrische Spannung am Ionenkanal, um ihn zu öffnen oder zu schließen, reagiert er beileibe nicht so vorhersehbar wie etwa ein Lichtschalter. Stattdessen klappt er mitunter scheinbar zufällig auf und zu. Manchmal öffnet er sich gar nicht, und manchmal tut er es grundlos. Denn die veränderte Spannung beeinflusst nur die Wahrscheinlichkeit, dass sich der Kanal öffnet.

Das klingt nach einem schweren evolutionären Konstruktionsfehler – in Wirklichkeit ist es aber ein notwendiger Kompromiss. »Wenn die Rückstellfeder am Kanal zu weich eingestellt ist, wird er von Zufallseinflüssen gesteuert«, erklärt Simon Laughlin, theoretischer Neurowissenschaftler an der University of Cambridge. »Ist sie zu hart, nimmt das Rauschen ab, doch es braucht dann einen höheren Aufwand, um den Kanal zu schalten.« Anders ausgedrückt: Die Neurone

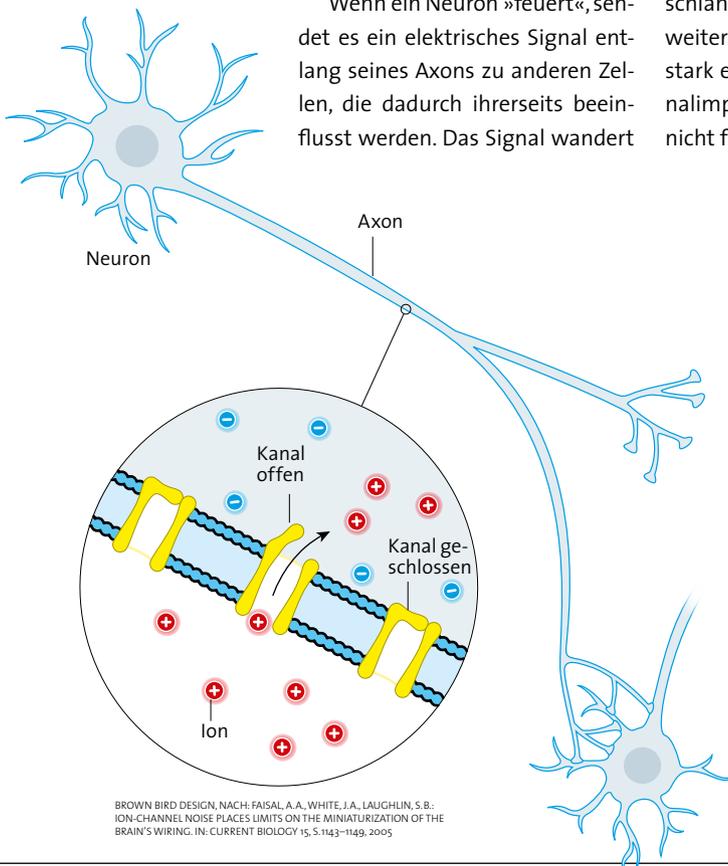
## Die Grenzen der Miniaturisierung

**Genau wie schrumpfende Transistoren** die Rechengeschwindigkeit von Computern erhöhen, könnten Gehirne mit mehr und kleineren Zellen bessere Leistungen erzielen. Menschliche Neurone und insbesondere ihre langen »Kabel«, die Axone, sind jedoch vermutlich in puncto Miniaturisierung bereits nahe an der Grenze der physikalischen Möglichkeiten angelangt.

Wenn ein Neuron »feuert«, sendet es ein elektrisches Signal entlang seines Axons zu anderen Zellen, die dadurch ihrerseits beeinflusst werden. Das Signal wandert

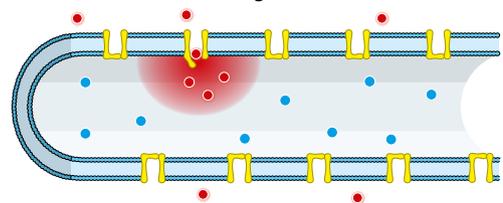
am Axon entlang, indem es Ionenkanäle in der Zellmembran öffnet. Wenn genügend Ionen durch den Kanal fließen, ändert dies das elektrische Potenzial der Membran, was in einer Art Dominoeffekt weitere Kanäle öffnet.

Dünnere Axone würden Platz sparen und weniger Energie verbrauchen. Die Evolution hat die Axone jedoch schon fast so schlank gemacht, wie es mit ihrer Funktion vereinbar ist. Eine weitere Abnahme des Durchmessers würde das Signalrauschen stark erhöhen: Die Axone würden zu viele zufallsbedingte Signalimpulse erzeugen, auch wenn das Neuron eigentlich gar nicht feuern soll.



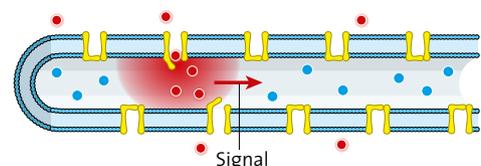
### ZUFALLSFLACKERN OHNE FOLGEN

Öffnet sich ein einzelner Ionenkanal in einem normalen Axon zufällig, schließt er sich wieder, bevor dies Auswirkungen hat.



### UNBEABSICHTIGTE SIGNALKASKADE

In einem dünneren Axon steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelner, zufällig geöffneter Ionenkanal auch benachbarte Kanäle öffnet und damit eine Kettenreaktion auslöst.



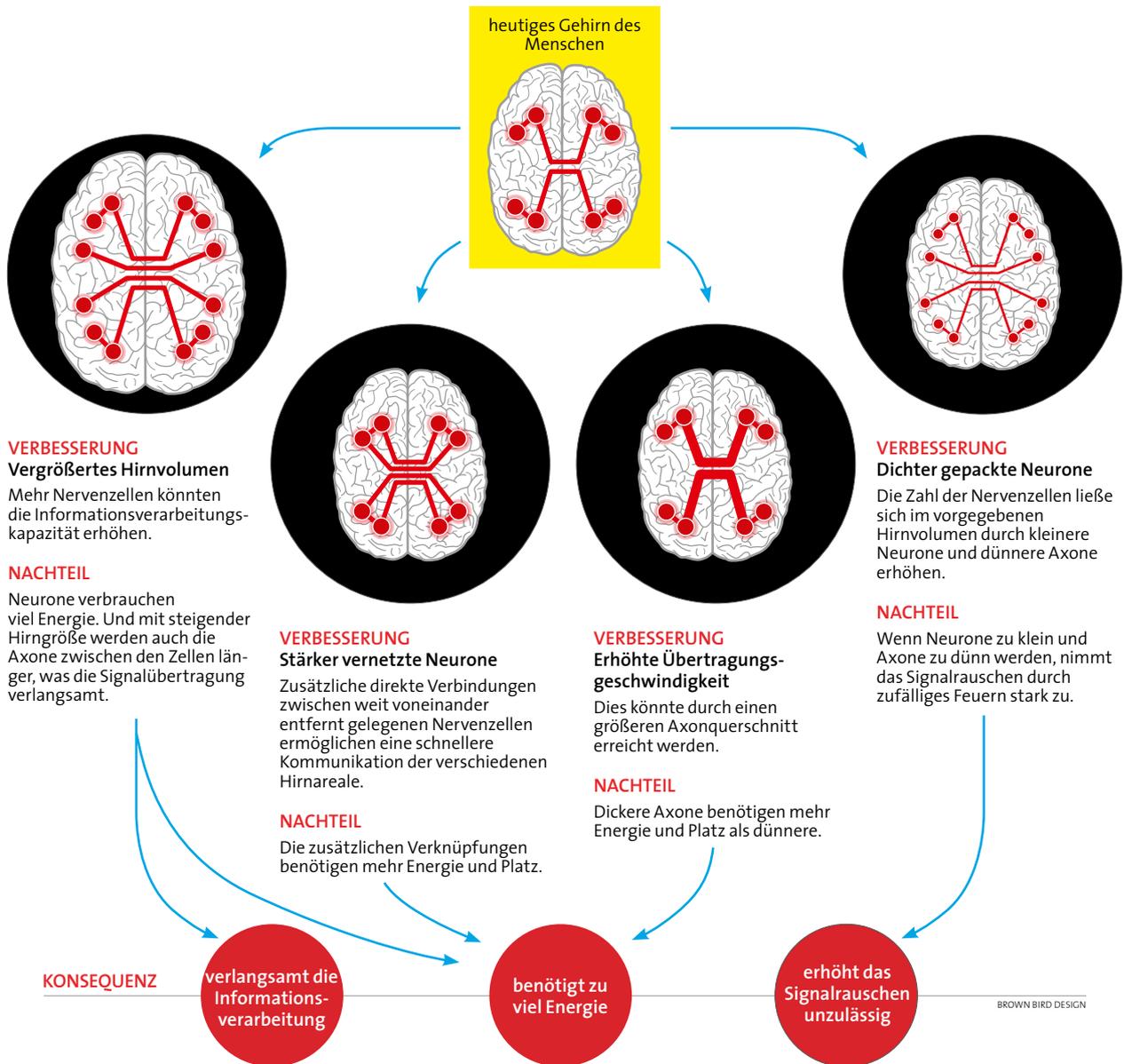
sparen Energie, indem sie leichtgängige Schalter verwenden, doch das führt dazu, dass sich die Kanäle auch zufällig öffnen und schließen. Ionenkanäle arbeiten deshalb nur dann zuverlässig, wenn eine größere Anzahl davon wie bei einer Volksabstimmung entscheidet, ob das Neuron auf einen Reiz hin ein Signal erzeugen soll oder nicht. Dieser Prozess wird umso fehleranfälliger, je kleiner das Neuron ist. »Mit der Neuronengröße nimmt auch die Anzahl der Kanäle ab, die zur Verfügung stehen«, sagt Laughlin, »und damit wächst das Rauschen.«

In zwei Untersuchungen berechneten der Forscher und seine Mitarbeiter 2005 und 2007, inwieweit die benötigte Mindestanzahl von Ionenkanälen die Miniaturisierung der Axone begrenzt. Die Ergebnisse waren eindeutig: »Sinkt der Axondurchmesser unter 150 bis 200 Nanometer, wird das Rauschen zu hoch«, berichtet Laughlin. Dann enthält ein Axon so wenige Ionenkanäle, dass schon das zufällige Öffnen eines einzelnen davon ein Signal auslösen kann, obwohl das Neuron eigentlich gar nicht feuern sollte (siehe Kasten S. 31).

## Weshalb wir vermutlich nicht viel schlauer werden können

**Theoretisch ließe sich unsere Intelligenz** auf mehreren evolutionären Wegen weiter steigern. Sie alle bringen jedoch Nachteile mit sich und stoßen rasch an thermodynamische Grenzen.

Vielleicht sind wir daher schon annähernd so intelligent, wie wir mit einem Denkorgan überhaupt werden können, das auf Neuronen basiert.



Tatsächlich erzeugen die dünnsten Axone des menschlichen Gehirns bereits etwa sechs solcher zufallsbedingten Aktionspotenziale pro Sekunde. Eine nur geringfügige weitere Verkleinerung würde schnell zu mehr als 100 Zufallspotenzialen pro Sekunde führen. Die Axone unserer Hirnrinde arbeiten also bereits nahe am Limit.

Dieser Kompromiss zwischen Information, Energie und Rauschen findet sich nicht nur in der Biologie. Er gilt auch für technische Apparate wie Glasfaserkabel, Funkgeräte und Computerchips. Wie die Ionenkanäle im Nervensystem dienen die Transistoren in der Elektronik als Schalter für elektrische Signale. Über 50 Jahre lang haben Ingenieure stets kleinere Transistorelemente in immer größerer Anzahl auf Siliziumchips untergebracht und so immer schnellere Computer konstruiert. Die aktuelle Generation der Schaltelemente misst nur noch 22 Nanometer. Da wird es bereits sehr schwierig, Silizium gleichmäßig mit geringen Mengen anderer Elemente zu »dotieren«, wie es für Halbleitertransistoren nötig ist. Bei einer Größe von etwa zehn Nanometern wird schon die An- oder Abwesenheit eines einzelnen Fremdatoms unvorhersehbares Verhalten hervorrufen können.

### Die Evolution fängt nicht wieder von vorn an

Möglicherweise werden die Ingenieure dieses Problem lösen, indem sie Computerchips mit Hilfe anderer Technologien von Grund auf neu entwickeln. Doch die Evolution kann nicht einfach von vorn anfangen: Sie muss mit den seit mindestens einer halben Milliarde Jahren existierenden Prinzipien und Bauelementen von Nervensystemen weiterarbeiten, erläutert der Entwicklungsbiologe Heinrich Reichert von der Universität Basel. Ein komplett neues Gehirn zu entwickeln, wäre so, als wollte man aus Flugzeugteilen ein Kriegsschiff bauen.

Es gibt noch einen weiteren Grund zu bezweifeln, dass ein Evolutionssprung zu wesentlich intelligenteren Gehirnen führen könnte. Als die ersten Neurone entstanden, mag ihnen eine ganze Reihe von Entwicklungsmöglichkeiten offenstanden haben. Doch heute, über 600 Millionen Jahre später, zeigt sich bei näherer Betrachtung: Obwohl sich die Gehirne von Bienen, Tintenfischen, Krähen und Affen auf den ersten Blick kaum ähneln, weisen die neuronalen Netze, die den Hirnfunktionen wie Sehen, Riechen, episodischem Gedächtnis und Navigation zu Grunde liegen, dieselben grundlegenden Eigenschaften auf. Eine solche evolutionäre Konvergenz bedeutet in der Regel, dass eine anatomische oder physiologische Lösung ausgereift ist und damit wenig Verbesserungsmöglichkeiten bleiben.

Vielleicht hat das Leben also bereits einen optimalen neuronalen Bauplan entwickelt, der evolutionär fest verwurzelt ist. Kann das menschliche Gehirn demnach gar nicht mehr komplexer und leistungsfähiger werden? Laughlin glaubt hier nicht an eine starre Obergrenze, vergleichbar etwa mit der Lichtgeschwindigkeit in der Physik. »Es ist eher so, dass vermehrter Aufwand immer weniger zusätzliche Hirnleistung erbringt«, erläutert er. »Weitere Investitionen lohnen

sich also kaum noch.« Das Gehirn kann nur eine bestimmte Anzahl Neurone sinnvoll unterbringen, diese können nur eine begrenzte Zahl an Verbindungen herstellen, und auch die Menge der pro Sekunde übertragenen elektrischen Impulse lässt sich nicht endlos steigern. Zudem wächst der Energieverbrauch mit zunehmender Größe des Gehirns und des Körpers, die Wärmeabfuhr wird schwieriger, und die Signalübertragung von einem Hirnareal ins andere dauert länger.

Vielleicht aber kann das menschliche Gehirn auch ohne fortgesetzte biologische Weiterentwicklung noch leistungsfähiger werden. Honigbienen und anderen sozialen Insekten gelingt das jedenfalls: Sie schaffen durch Kooperation mit ihren Geschwistern im Stock ein Kollektiv, das klüger ist als das Individuum. Auch Menschen vereinen bei Gemeinschaftsunternehmungen die intellektuellen Fähigkeiten der Einzelnen und erzielen damit höhere Leistungen.

Zudem hilft uns der technische Fortschritt. Seit Jahrtausenden erlaubt uns das geschriebene Wort, Informationen zu speichern, die unser Gedächtnis überfordern würden. Manche betrachten heute das Internet als vorerst letzten Schritt zur Erweiterung der Intelligenz außerhalb des menschlichen Körpers. Allerdings könnte das World Wide Web uns auch dümmer machen: Möglicherweise verringert kollektive menschliche Intelligenz – sei es als Kultur oder als Computernetzwerk – den Evolutionsdruck, größere individuelle Intelligenz zu entwickeln. Die Zukunft wird es zeigen. ~

#### DER AUTOR



**Douglas Fox** arbeitet als freier Journalist in San Francisco. Er schreibt regelmäßig für »New Scientist«, »Discover« und »The Christian Science Monitor«. Fox wurde bereits mit mehreren Preisen ausgezeichnet, zuletzt mit dem Award for Reporting on a Significant Topic der American Society of Journalism and Authors.

#### QUELLEN

- Herculano-Houzel, S. et al.:** Cellular Scaling Rules for Primate Brains. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 104, S. 3562–3567, 2007
- van den Heuvel, M. P. et al.:** Efficiency of Functional Brain Networks and Intellectual Performance. In: Journal of Neuroscience 29, S. 7619–7624, 2009
- Roth, G., Dicke, U.:** Evolution of the Brain and Intelligence. In: Trends in Cognitive Sciences 9, S. 250–257, 2005

#### LITERATURTIPPS

- Güntürkün, O.:** Wann ist ein Gehirn intelligent? In: Spektrum der Wissenschaft 11/2008, S. 124–132  
*Überblick über die neuroanatomischen Grundlagen der Intelligenz*
- Wolf, C.:** Intelligenz 2.0. In: Gehirn&Geist 4/2010, S. 42–48  
*Darstellung, wie die modernen elektronischen Medien auf die menschliche Intelligenz einwirken*

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146807](http://www.spektrum.de/artikel/1146807)

# Zutritt verboten für HIV

Forscher manipulieren Immunzellen von HIV-Infizierten außerhalb des Körpers. So wollen sie diese genetisch dauerhaft gegen das Virus resistent machen. Im Visier haben die Wissenschaftler ein zentrales Einlassprotein für den Erreger.

Von Carl H. June und Bruce L. Levine

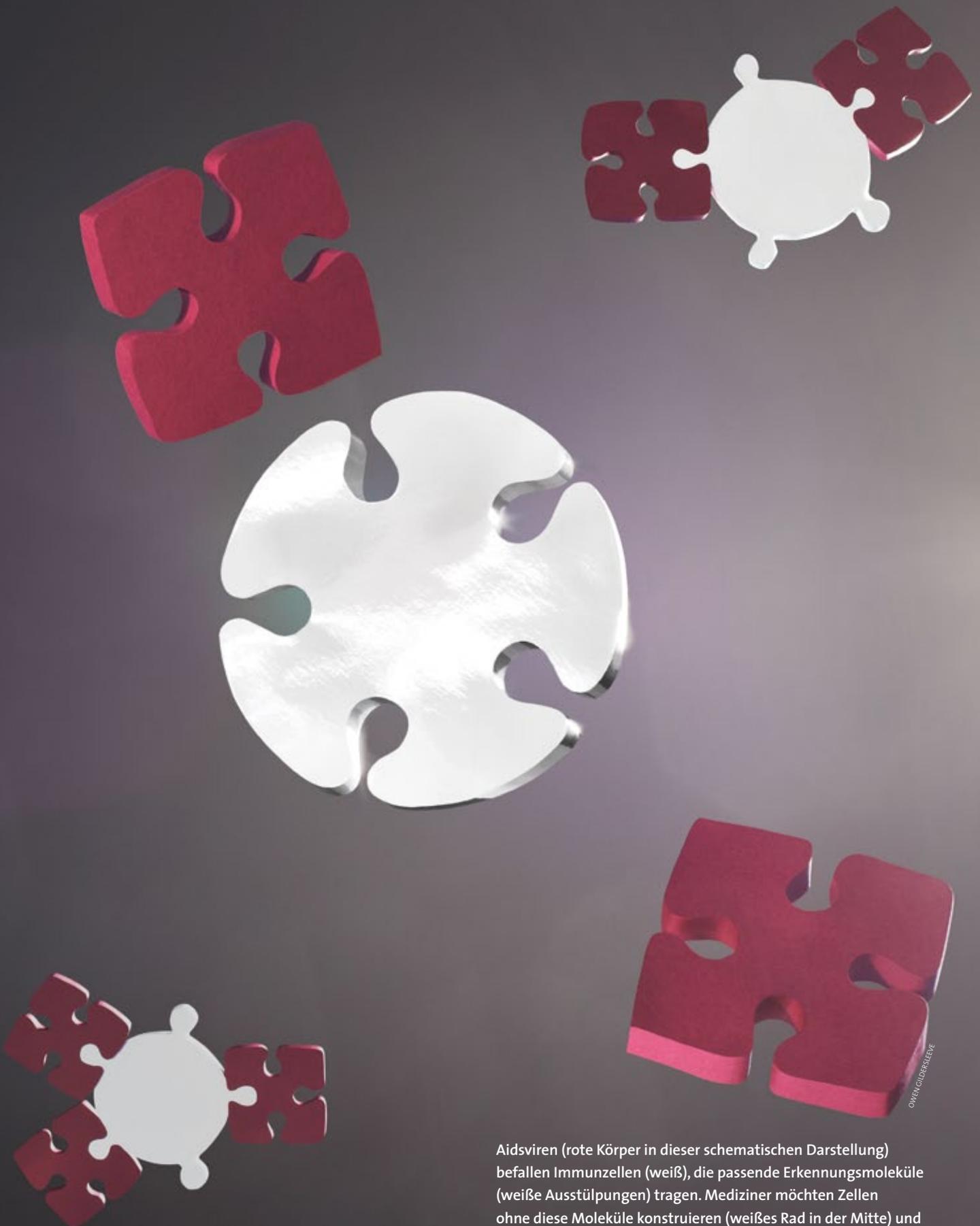
Vor gut drei Jahren erschien eine medizinische Veröffentlichung über eine spektakuläre HIV-Behandlung, deren Erfolg noch heute fast unglaublich klingt. Mitarbeiter der Berliner Charité und des Robert Koch-Instituts hatten einem langjährigen HIV-Patienten fremde Knochenmark, also neue Blutstammzellen, übertragen, als er eine Leukämie bekam. Das Material stammte aber von einem Spender, der auf Grund einer genetischen Besonderheit resistent gegen das HI-Virus ist, denn seine Immunzellen lassen den Erreger einfach nicht hinein. Die Ärzte hofften, mit dieser Transplantation gleichzeitig mit dem Blutkrebs auch die HIV-Infektion einzudämmen. Ihre Erwartung wurde sogar noch übertroffen: Nach einiger Zeit ließen sich bei dem Patienten mit verschiedenen Tests keinerlei Virusspuren mehr nachweisen – nicht einmal in jenen Geweben, in denen sich der Erreger oft lange zu verbergen pflegt.

Auch fünf Jahre nach dem Eingriff zeigt Timothy Ray Brown keinerlei Anzeichen, dass er das Virus noch in sich trägt. Seine Identität gab er inzwischen preis: Er ist Kalifornier und lebte damals in Berlin. Medikamente gegen HIV nimmt er schon seit der Transplantation nicht mehr. Über 60 Millionen Menschen haben sich bislang mit dem Aidsvirus infiziert, aber einzig dieser Amerikaner scheint es allen medizinischen Tests zu-

folge wieder vollständig losgeworden zu sein.

Das in seinem Fall angewandte Verfahren einer Blutstammzelltransplantation lässt sich allerdings kaum bei weiteren HIV-Infizierten einsetzen. Allzu vieles spricht dagegen – nicht zuletzt, dass man zuvor das Immunsystem des Patienten zerstören müsste, immer ein lebensgefährliches Unterfangen. Außerdem muss der Spender gleichzeitig mit dem Patienten möglichst weit gehend immunkompatibel sein und resistent gegen den Aidserreger – was beides schon für sich allein selten genug auftritt. Aber der Erfolg der Berliner Ärzte spornt nun weltweit Wissenschaftler an, nach weniger riskanten und kostspieligen Wegen zu suchen, um HIV-Infizierten quasi ein neues, gegen das Virus resistentes Immunsystem zu geben. Dessen genetisch veränderte Zellen würden dem Erreger gewissermaßen die Tür vor der Nase zuschlagen. Das Virus könnte sie nicht befallen, sich nicht weiter vermehren und darum auch nicht länger im Körper ausbreiten. Statt wie mit bisherigen Therapien das HI-Virus nur zu unterdrücken, könnte ein solcher genetischer Ansatz möglicherweise Infizierte wirklich heilen.





Aidsviren (rote Körper in dieser schematischen Darstellung) befallen Immunzellen (weiß), die passende Erkennungsmoleküle (weiße Ausstülpungen) tragen. Mediziner möchten Zellen ohne diese Moleküle konstruieren (weißes Rad in der Mitte) und sie damit vor der Infektion schützen.

Eine solche neue Behandlungsmethode entwickeln und testen wir und unsere Mitarbeiter derzeit. Laborversuche damit waren viel versprechend, und nun führen wir an einer kleinen Zahl von HIV-Patienten erste klinische Studien durch. Uns erwartet zwar noch viel Forschungsarbeit, und wir haben auch keine Gewähr, dass unser Ansatz Erfolg haben wird. Aber es spricht doch einiges dafür, dass sich diese Methode eignen könnte, um das Leben von Millionen HIV-Infizierten grundlegend zu verbessern.

Unsere Vorgehensweise kombiniert zwei medizinische Ziele im Kampf gegen das Aidsvirus, die Wissenschaftler schon länger verfolgen. Zum einen geht es darum, wie man das Immunsystem auf HIV ansetzen kann. Zum anderen würden Mediziner die Viren gern von vornherein daran hindern, in ihre Lieblingszellen einzudringen: bestimmte so genannte T-Zellen des Immunsystems, nämlich die T-Helferzellen oder CD4+-Zellen.

Diese T-Helferzellen fungieren gewissermaßen im Mittelfeld des Immunsystems. Sie koordinieren das Zusammenspiel aller möglichen Sorten von Immunzellen. Infizieren HI-Viren T-Helferzellen, richten sie nicht gleich sonderlich großen Schaden an. Später aber, wenn diese Immunzellen zwecks Abwehr einer anderen Infektion aktiviert werden, spucken sie stattdessen neue Viren aus. Schlimmer noch: Der Erreger tötet schließlich diese vermittelnden T-Zellen und somit entscheidende Mitspieler des Immunsystems. Damit schwächt er allmählich die Abwehrkräfte so massiv, dass der Organismus Infektionen immer schlechter zu bekämpfen vermag – bis hin zum Endstadium Aids.

Forscher suchen schon lange nach Möglichkeiten, das Immunsystem gegen Krebserkrankungen oder Virusinfektionen anzustacheln. Beispielsweise werden dem Patienten T-Zellen entnommen, die man dann im Labor vermehrt und gleichzeitig so manipuliert, dass sie sich stärker gegen den Krebs beziehungsweise gegen die Infektion richten. Die sol-

chermaßen getrimmten Immunzellen erhält der Patient dann wieder zurück.

Wir beide schlossen uns diesem Forschungsgebiet vor 20 Jahren an. Damals kam Levine nach Bethesda (Maryland) an das heutige Walter Reed National Military Medical Center, wo einer von uns (June) arbeitete. Wir konnten bereits auf Untersuchungen anderer Wissenschaftler aufbauen, etwa von Philip Greenberg und Stanley Riddell vom Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle (Bundesstaat Washington) sowie Malcolm Brenner und Cliona Rooney, die heute am Baylor College of Medicine in Houston (Texas) tätig sind.

Wir wollten bessere Methoden zur Zucht von T-Zellen außerhalb des Organismus entwickeln. Denn sie ließen sich damals im Labor nur mit viel Aufwand vermehren, indem man verschiedenste Botenstoffe dazugab. Oder man mischte sie mit einer weiteren Immunzellensorte, die ebenfalls vom Patienten stammen musste: so genannten dendritischen Zellen. Sie veranlassen normalerweise T-Zellen, heranreifen und sich stark zu vermehren.

## Wir wollten bessere Methoden zur Zucht von T-Zellen außerhalb des Organismus entwickeln

Unsere Idee war nun, quasi künstliche dendritische Zellen zu benutzen. Das waren winzige Magnetperlen, etwas kleiner als T-Zellen, mit zwei verschiedenen Proteinen auf ihrer Oberfläche, die Moleküle auf dendritischen Zellen nachahmten. Als wir diese Perlen mit T-Zellen zusammengaben, erfüllten sie ihre Aufgabe sehr gut. Während wir ungefähr alle zwei Wochen neue Kügelchen nachgaben, wuchs die T-Zellkolonie mehr als zwei Monate lang auf ein Billionenfaches an.

Danach verwendeten wir die Methode für Blutproben von HIV-infizierten Versuchspersonen. Erstaunlicherweise waren die neu gewonnenen T-Zellen eine Zeit lang fähig, sich gegen ein Vordringen von HIV zu schützen. Der Effekt war signifikant, hielt aber nicht an. Als wir das Resultat 1996 veröffentlichten, konnten wir diese verblüffende Resistenz gegen das Virus noch nicht deuten.

Doch bereits im selben Jahr sollte sich von anderer Seite eine Erklärung anbahnen. Denn Virusforscher entdeckten zur gleichen Zeit einen molekularen Aspekt beim Angriff des Aidsreggers auf T-Zellen, was ihm mitunter zum Verhängnis wird. Zu Beginn der Aids-Epidemie hatte sich bald herausgestellt, dass einige Menschen offensichtlich gegen eine HIV-Infektion resistent sind. Auch wenn sie dem Virus mehrfach ausgesetzt werden, scheinen sie dagegen gefeit. Den Grund dafür konnten gleich mehrere Forscherteams Ende 1996 vermelden: T-Helferzellen sowie bestimmte andere Zellen tragen auf ihrer Oberfläche ein Protein, CCR5-Rezeptor genannt, das sozusagen als Türöffner agiert. Ohne dieses Protein bekommt das HI-Virus, zumindest in der Regel, keinen Zugang in die Zelle (siehe Kasten rechts). Und wer solche Eiweißmoleküle von Natur aus nicht besitzt, steckt sich offenbar nicht an (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/1998, S. 38).

### AUF EINEN BLICK

#### NEUE GENTHERAPIE FÜR HIV-PATIENTEN?

**1** Der Aids-erreger dringt in Immunzellen gewöhnlich mit Hilfe eines Oberflächenproteins ein. Menschen, die diesen Rezeptor – **CCR5** – wegen eines defekten Gens nicht haben, sind weitgehend gegen das Virus immun.

**2** Mit einem neuen, sehr präzisen gentechnischen Verfahren wollen Mediziner diesen **Gendefekt an Immunzellen** nachahmen. Sie hoffen, dadurch das Immunsystem von HIV-Infizierten auf Dauer stabil gegen das Virus machen zu können.

**3** Die ersten Tests hiermit scheinen bisher Erfolg versprechend. Trotzdem wartet auf die Forscher noch viel Entwicklungsarbeit, bis ein solches Verfahren möglicherweise in die **klinische Praxis** eingeführt werden könnte.

Bei diesen Menschen fehlen dem Gen für CCR5 einige Bausteine, genauer gesagt ein Abschnitt von 32 Nukleotiden. Dadurch ist der Proteinfaden zu kurz, und das verstümmelte Molekül findet den Weg zur Zelloberfläche nicht. Das defekte Gen namens *CCR5-Delta32* besitzen etwa ein Prozent der Kaukasier (Menschen europäischer Herkunft) zweifach, tragen es also auf beiden zusammengehörigen Chromosomen. Die Betroffenen sind gegen die Infektion in hohem Grad resistent. Bei Afrikanern, Asiaten und Indianern kommt die Mutation viel seltener vor. Wer sie aufweist, ist dadurch offenbar gesundheitlich nicht beeinträchtigt, vielleicht allerdings mehr als andere anfällig für eine Infektion mit dem Westnilvirus, das von Mücken übertragen wird und Fieber erzeugt.

Menschen, die das veränderte Gen nur einmal geerbt haben und auf dem zweiten Gen die nicht mutierte Erbsequenz tragen, können sich mit HIV infizieren. Es dauert aber meist länger, bis sie schwer an Aids erkranken. Wie sich herausstellte, sind bestimmte natürliche Botenstoffe – Beta-Chemokine – dazu fähig, die normalen CCR5-Rezeptoren zu blockieren und so den HI-Virusbefall von Zellen zu verhindern. Auf eine Rezeptorblockade zielt denn auch eine Klasse von Anti-HIV-Medikamenten. Es ist jedoch schwer, durch Zufuhr solcher Wirkstoffe ständig sämtliche dieser Rezeptoren auf allen damit ausgestatteten Zellen zu überfluten. Außerdem vermag das Virus so zu mutieren, dass es die künstliche Blockade austrickst.

### Veränderte Immunzellen aus dem Labor mit jahrelanger Lebensdauer

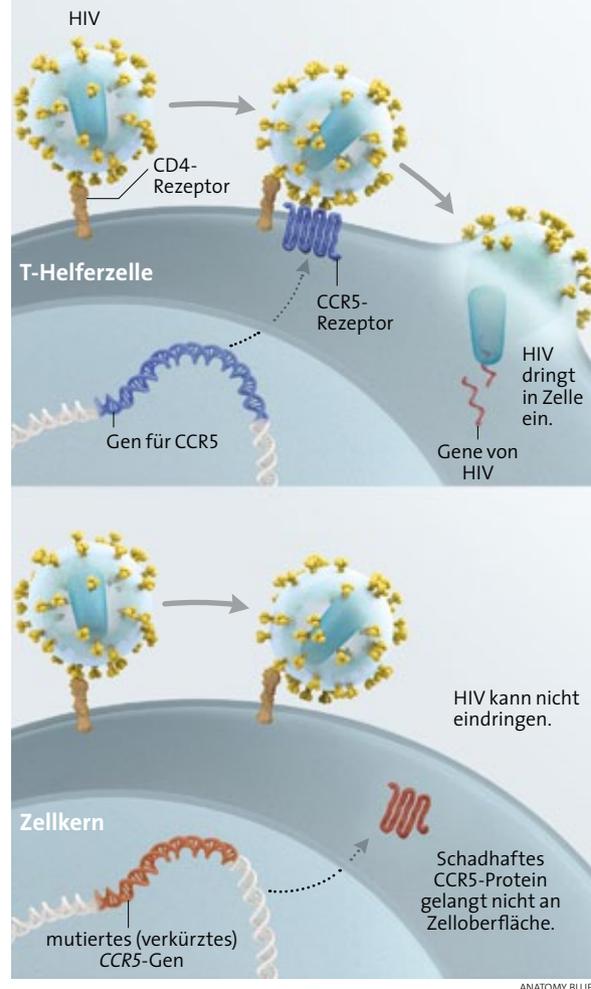
Die Funktion des CCR5-Rezeptors bei einer HIV-Infektion brachte uns darauf, warum unsere gezüchteten T-Zellen eine Zeit lang resistent gegen das Virus waren: Durch die Aktivierung mit den Magnetperlen stellten sie aus irgendwelchen Gründen ihre Produktion dieser Pfortner ein.

Als wir das erkannten, überlegten wir, ob sich daraus eine neue Behandlung gegen HIV entwickeln ließe. Beim ersten Schritt arbeiteten wir mit Kristen Hege und Dale Ando zusammen, die damals bei der in San Francisco ansässigen Biotechnologiefirma Cell Genesys beschäftigt waren. Klinische Sicherheitstests sollten zunächst klären, ob man Menschen gefahrlos mit genetisch veränderten T-Zellen behandeln kann, die mit unserer Magnetperlenmethode vermehrt wurden und nun HIV-infizierte Zellen finden und angreifen sollten. Tatsächlich erwiesen sich diese T-Zellen aus Laborzucht als ungefährlich, und sie blieben im Körper von Patienten noch Jahre nach der Infusion am Leben. Leider aber nutzten sie den Behandelten nicht viel, denn die von uns damals verwendete genetische Abwandlung trug nur wenig dazu bei, die Vermehrung des Virus einzudämmen. Deswegen stellte Cell Genesys das Projekt schließlich ein.

Wir beide waren schon einige Jahre an der University of Pennsylvania in Philadelphia, als uns Ando dort 2004 besuchte und ein zweites Experiment vorschlug. Sein neuer Arbeitgeber, das Unternehmen Sangamo BioSciences in Rich-

## Wie HIV Immunzellen entert

**HIV zerstört das Immunsystem**, weil es die wichtigen T-Helferzellen befällt und mit der Zeit zu Grunde richtet. Zutritt verschafft es sich über ein Protein auf diesen Zellen, den Rezeptor CCR5, an den es sich anlagert (oberes Bild). Manche Menschen sind gegen die Infektion resistent, da ihr Gen für den Rezeptor mutiert ist und dieser ihnen deswegen fehlt (unten). Künstliche Mutationen könnten einen ähnlichen Vorteil bringen.



mond (Kalifornien), hatte damals gerade ein Verfahren entwickelt, mit dem man den DNA-Strang eines gewünschten Gens an genau ausgewählter Stelle zerschneiden konnte, um es dann gezielt zu verändern. Die neue Methode funktionierte grundlegend anders und war zudem viel effektiver als bisherige Vorgehensweisen. Bis dahin konnte man nicht präzise steuern, welche Gene oder welche ihrer Abschnitte modifiziert werden.

Bei diesem mittlerweile oft eingesetzten Verfahren benutzt man eine Kombination aus zwei Proteintypen, die natürlicherweise nicht aneinandergesetzt vorkommen. Zum



Erkennen der gewünschten Schnittstelle dienen so genannte Zinkfingerproteine, zum Zerschneiden der DNA nimmt man Enzyme – bestimmte Nukleasen –, die beide Stränge einer DNA-Doppelhelix durchtrennen. Das Ganze heißt dann Zinkfinger-nuklease: ein künstliches molekulares Produkt, das Forscher gezielt zum Verändern spezifischer Gene von Pflanzen oder Tieren konstruieren.

Zinkfingerproteine bilden um zentrale Zinkatome herum kleine fingerartige Strukturen aus (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/1993, S. 54). Viele von ihnen binden sich mit ihren Fingern an bestimmte Buchstabenfolgen – Nukleotidsequenzen – in der DNA und dienen dadurch als »Transkriptionsfaktoren« zum Ablesen von Genen. Der Mensch hat rund 2500 verschiedene Zinkfingerproteine, die jeweils eine spezifische Nukleotidsequenz erkennen.

Ando hatte nun die Idee, das *CCR5*-Gen von T-Zellen mit Hilfe von speziellen Zinkfinger-nukleasen so zu verändern, dass kein funktionsfähiges Protein für den *CCR5*-Rezeptor mehr entstehen könnte, so dass diese Zellen fortan gegen das HI-Virus resistent wären. Praktisch handelte es sich um eine künstlich erzeugte, gezielte Mutation. Seine Firma müsste zuerst passende Zinkfingerproteine entwickeln, die sich im Gen vor und hinter einer von uns auszuwählenden Passage anlagern würden, die aus der Erbsequenz verschwinden sollte. Anschließend käme es darauf an, jene Proteine jeweils mit den betreffenden Nukleasen zu verkoppeln. Diese Werkzeuge würden dann in die T-Zellen eingebracht und aus dem DNA-Doppelstrang das gewünschte Stück heraustrennen (siehe Kasten rechte Seite). Sie müssten dabei so hochpräzise funktionieren, dass nicht versehentlich andere Gene zu Schaden kämen. Den Rest, nämlich die zerschnittenen Stränge wieder zusammenzufügen, würde die Zelle selbst erledigen. Ihr DNA-Reparaturapparat würde den Doppelstrangbruch bemerken und in Aktion treten. Der Clou hierbei, der noch zum Gendefekt beitrüge: Bei der Reparatur unterlaufen oft Fehler, wodurch an der früheren Schnittstelle später ein paar Bausteine zu viel oder zu wenig vorhanden sind.

Einen Versuch war es uns wert. Denn reizvoll war das Zinkfingersystem auf jeden Fall – nicht nur weil man mit der Methode sehr spezifisch ein ganz bestimmtes Stück aus dem *CCR5*-Gen ausschneiden könnte, sondern auch weil die dazu verwendeten Hilfsproteine nur für eine kurze Zeit zu funktionieren hatten und in den Zellen keine potenziell gefährlichen Rückstände hinterlassen würden.

Als einige Jahre später die erfolgreiche Behandlung des Berliner Patienten bekannt wurde, hatten wir bereits von der US-Arzneimittelbehörde FDA und den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) die Genehmigung erhalten, mit unserem vorne beschriebenen Verfahren Sicherheitsstudien am Menschen durchzuführen. Die Nachrichten aus Deutschland bestätigten unsere Hoffnung, dem Aidsvirus zu Leibe rücken zu können, indem wir HIV-Patienten Immunzellen entnahmen, deren *CCR5*-Gene beschädigten, die mutierten Zellen künstlich vermehrten und den Betroffenen wieder zurückgaben.

### Eine kaum wiederholbarer therapeutischer Ansatz

Eine HIV-Therapie, wie sie dem Ärzte- und Wissenschaftlerteam um den Hämatologen Gero Hütter von der Charité gelang, dürfte nicht leicht ein zweites Mal möglich sein. Der Patient war vorher über zehn Jahre lang HIV-infiziert gewesen und erfolgreich mit den üblichen antiviralen Medikamenten behandelt worden. Es ging ihm einigermaßen gut – doch dann bekam er eine akute myeloische Leukämie, die mit der HIV-Infektion nicht zusammenhing.

Gegen die Leukämie erhielt er zuerst eine Chemotherapie, doch nach einiger Zeit meldete sich der Blutkrebs zurück. Als einzig mögliche Rettung blieb schließlich eine Knochenmarktransplantation, somit die Zerstörung des alten Immunsystems und dann der Aufbau eines praktisch neuen – einschließlich neuer T-Zellen – aus Blutstammzellen eines Spenders. Es galt also, in den Datenbanken einen Knochenmarkspender zu finden, dessen immunologische Gewebeerkmale, die so genannten HLA-Antigene, mit denen des Patienten möglichst gut übereinstimmten. Eine hohe Gewebetragbarkeit oder Histokompatibilität ist für eine erfolgreiche Transplantation Voraussetzung. Andernfalls würden die fremden Immunzellen Gewebe des Empfängers angreifen, und umgekehrt könnten sich unter Umständen Reste des alten Immunsystems gegen das neue wehren.

Aber hierbei ließ Hütter es nicht bewenden. Er hätte gern einen Spender gehabt, der außerdem zwei mutierte *CCR5*-



MEHR WISSEN BEI  
Spektrum.de



»Nature«-Video über Gentechnik mit Hilfe von Zinkfinger-nukleasen:

[www.spektrum.de/methodedesjahres2011](http://www.spektrum.de/methodedesjahres2011)

Gene besaß. Dann könnte, so hoffte er, das im Körper ja weiterhin vorhandene Virus dem neuen Immunsystem nichts anhaben. Und das gelang! Unter mehr als 60 untersuchten Kandidaten fand sich tatsächlich jemand mit zwei defekten *CCR5*-Genen. Auch ein bisschen Glück half mit, denn der Patient besitzt ein sehr häufiges HLA-Muster. Trotzdem war der Fund unerwartet. Schließlich hat jeder Mensch andere HLA-Antigene, und überdies liegen deren Erbsequenzen nicht auf demselben Chromosom wie das *CCR5*-Gen. Wie selten solch ein Zusammentreffen ist, lässt sich daran ermes- sen, dass Ähnliches Medizinern auf der ganzen Welt trotz vie- len Bemühens bisher nicht wieder gelang.

Gleich zwei Knochenmarkübertragungen waren am Ende notwendig, um den Berliner Patienten von seiner Leukämie zu heilen. So sehr ihm die harten Behandlungen zugesetzt haben – über fünf Jahre nach der Transplantation lassen sich im Körper des Mannes selbst mit hochempfindlichen mole- kularen Tests keine HI-Viren mehr nachweisen: weder im Blut noch in der Leber, nicht im Darm oder Gehirn, im Lymphgewebe oder Blutplasma. Und dabei nimmt er seit dem Eingriff keine antiviralen Medikamente mehr. Aller- dings benötigt er wegen der Knochenmarktransplantation weiterhin medikamentöse Behandlung.

Niemand weiß, ob der Erreger bei diesem Mann wirklich ausgerottet ist, ob also die Virusinfektion völlig kuriert ist. Denn das HI-Virus kann seine Gene in verschiedenste Zellen des Körpers einbauen und dort jahrelang schlummern (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2009, S. 63). Doch vielleicht kommt es darauf jetzt gar nicht mehr an, wenn nämlich das neue Immunsystem jegliche frischen Infektionsschübe schon in ihren Anfängen lahmlegt. Das wäre dann zumin- dest eine funktionelle Heilung.

### Gleiches Resultat auf anderem Weg suchen

So bald dürfte es nicht wieder geschehen, dass eine HIV-Infektion mit einer Knochenmarktransplantation behandelt wird. Dem steht nicht nur im Weg, dass ein Zusammentref- fen aller dazu erforderlichen biologischen Merkmale extrem unwahrscheinlich ist. Am meisten sprechen dagegen die damit verbundenen Gefahren und Belastungen für den Patien- ten. Solch eine Transplantation ist für die Betroffenen hoch- riskant, und auch später brauchen sie fortlaufend Immun- suppressiva und müssen ihre Lebensführung in vielem an ihre besondere Situation anpassen. Zahlreiche HIV-Infizierte fühlen sich mit antiviralen Medikamenten einigermaßen ge- sund und leistungsfähig. Sie würden sich wohl nicht einer Knochenmarkübertragung mit all ihren Konsequenzen un- terziehen.

Zurück zu unserer eigenen Forschung. Zwar war anzuneh- men, dass der mutmaßliche HIV-freie Zustand des Berliner Patienten mit dem defekten *CCR5*-Gen der Knochenmark- spende zusammenhing. Aber dies musste nicht der einzige Grund sein. Möglicherweise hatte die jahrelange antivirale Behandlung das Reservoir schlummernder Viren schließlich erschöpft. Vielleicht waren letzte Reste aber auch mit der ge-

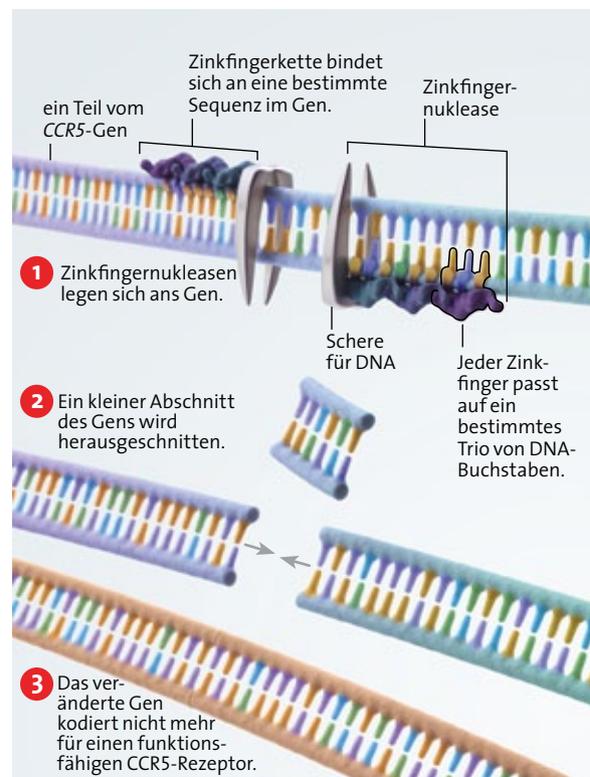
wollten Zerstörung des alten Immunsystems zu Grunde ge- gangen; oder es geschah, als der Mann einmal eine lebens- bedrohliche Attacke der neuen Immunzellen erlitt: Die könn- ten dabei noch übrige infizierte Zellen vernichtet haben. Trotzdem schien der Gendefekt bei der vermeintlichen Hei- lung im Vordergrund zu stehen, und wir setzten unsere For- schung hierzu mit neuem Elan fort.

Zu der Zeit hatte Sangamo BioSciences bereits den ver- sprprochenen Satz Zinkfinger-nukleasen entwickelt, die aus dem *CCR5*-Gen eine Passage in dem kritischen Abschnitt aus- schneiden, der im defekten Gen fehlt. Ganz genau musste die

## HIV-Therapie mit zielgenauen Genscheren?

**Bei einem neuen gentechnischen Verfahren** konstruieren Forscher aus zwei gekoppelten Proteinsorten molekulare Scheren, die den DNA-Doppelstrang an genau vorgesehener Stelle schneiden. Sie bestehen einerseits aus Nukleasen, die den Strang durchtrennen, und andererseits aus speziell für den Zweck maßgeschneiderten Zinkfingerproteinen zum Er- kennen der richtigen Stelle.

Mit dieser Methode, hier schematisch grob skizziert, lässt sich in Immunzellen auch das Gen für den Rezeptor *CCR5* so verändern, dass sie HIV keinen Einlass mehr gewähren. Die Zinkfinger-nukleasen trennen einen Teil aus dem Gen heraus (oben), und anschließend setzt die Zellmaschinerie das Gen verkürzt wieder zusammen (unten).





MEHR WISSEN BEI  
Spektrum.de



Unsere Themenseite »HIV«  
finden Sie unter

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

damit erzeugte Mutation mit der natürlich vorkommenden nicht übereinstimmen, denn es kam ja nur auf die Untauglichkeit des Proteins an.

Zusammen mit Elena Perez, die nach ihrer Promotion bei uns arbeitete, hatten wir zuvor nachgewiesen, dass die HIV-Infektion wohl auch selbst dazu beitragen könnte, das Immunsystem in Richtung stärkerer Virusresistenz umzugestalten, nachdem die Patienten einige der genetisch modifizierten T-Zellen erhalten hätten. In Laborstudien zumindest vermochten solche Zellen eine geschwächte T-Zellpopulation, die durch zugegebene HI-Viren Schaden erlitten hatte, wieder aufzufüllen und zu stabilisieren. Das leisteten sie sogar dann, wenn der Anteil an T-Zellen mit defektem *CCR5*-Gen zunächst gering war. Das heißt: T-Zellen mit funktionalem *CCR5*-Rezeptor gingen durch den Erreger zu Grunde, und die anderen, HIV-resistenten vermehren sich und gewannen langsam die Oberhand.

### Schutz ohne Virusmedikamente

Auch die vorläufigen Ergebnisse einer Sicherheitsprüfung des Verfahrens an HIV-Patienten stimmen recht zuversichtlich. Bei einer Studie in Philadelphia, die der Arzt Pablo Tebas leitet, erhielt der erste Teilnehmer im Sommer 2009 eine Rückinfusion von eigenen, aber am *CCR5*-Gen veränderten T-Zellen. Seitdem haben wir in den von den National Institutes of Health finanzierten Tests weitere elf Freiwillige behandelt. Eine ähnliche Studie führt Sangamo an der amerikanischen Westküste durch.

Solche Sicherheitsprüfungen sind an sich noch nicht dafür ausgelegt, schon die Wirksamkeit einer Behandlung nachzuweisen. Dennoch beobachten wir anhand der laufenden Blutuntersuchungen bei allen Patienten einen Anstieg der T-Helferzellen gegenüber dem anfänglichen Wert. Demnach scheint unser Eingriff T-Zellen wie erhofft zu schützen. Außerdem lassen sich jetzt im Blut und im Lymphgewebe des Darms dieser Personen T-Zellen nachweisen, denen funktionale *CCR5*-Rezeptoren fehlen. Sie müssen folglich von den manipulierten Immunzellen abstammen.

Als Nächstes wäre nun zu untersuchen, ob oder inwieweit diese T-Zellen die im Körper vorhandenen HIV-Partikel in Schach halten können. Hierfür wollen wir uns eines anerkannten und üblichen, aber dennoch gewagten Vorgehens bedienen: Unter strenger ärztlicher Kontrolle soll die antivirale Behandlung von Teilnehmern eine Zeit lang ausgesetzt werden. Ein erster Versuch damit erfolgte während zwölf Wochen bei einem Freiwilligen, der schon erblich be-

dingt auf einem Chromosom ein defektes *CCR5*-Gen besitzt und dadurch von selbst ein wenig gegen HIV gewappnet ist. Am Ende der medikamentenlosen Phase fanden wir bei ihm weder im Blut noch im Lymphgewebe Virusspuren. Die anderen, später behandelten Teilnehmer befinden sich noch in verschiedenen Phasen der Anschluss- und Verlaufskontrolle nach der Rückinfusion der T-Zellen, die während des nächsten Jahres abgeschlossen sein dürften.

Nun sind weitere klinische Studien vorgesehen, um diesmal die Wirksamkeit unseres Ansatzes eingehend zu prüfen. Sollten die verschiedenen Tests erfolgreich verlaufen, böte eine HIV-Behandlung unter Zuhilfenahme von Zinkfinger-nukleasen eine gute und deutlich preisgünstigere Alternative zu einer Knochenmarkübertragung – und auch zu einer lebenslangen antiviralen Medikation.

Noch vor wenigen Jahren wagten Mediziner kaum auf sichere, wirksame und nicht allzu teure Therapien zu hoffen, die Menschen mit HIV von der ständigen Medikamenteneinnahme mit all ihren Nebenwirkungen zu befreien, geschweige denn von der Infektion zu heilen vermögen. Auch wenn unsere neue Methode Letzteres nicht leisten sollte, so glauben wir doch, dass sie diesem Ziel so nahe kommt wie keine andere zuvor. ~

### DIE AUTOREN



**Carl H. June** (links) ist Arzt und Wissenschaftler an der Perelman School of Medicine der University of Pennsylvania in Philadelphia. Er erforscht, wie sich das Immunsystem mit Hilfe genetischer Eingriffe besser gegen Krebs und HIV wappnen

ließe. Dort arbeitet auch **Bruce L. Levine**. Der Immunologe leitet den Bereich Klinische Produktion von Zellen und Impfstoffen. Er befasst sich mit Zell- und Gentherapie.

### QUELLEN

- Cannon, P., June, C.:** Chemokine Receptor 5 Knockout Strategies. In: *Current Opinions in HIV and AIDS* 6, S. 74–79, Januar 2011
- Hütter, G. et al.:** Long-Term Control of HIV by *CCR5* *Delta32*/*Delta32* Stem-Cell Transplantation. In: *The New England Journal of Medicine* 360, S. 692–698, 12. Februar 2009
- Perez, E. E. et al.:** Establishment of HIV-1 Resistance in CD4+ T Cells by Genome Editing Using Zinc-Finger Nucleases. In: *Nature Biotechnology* 26, S. 808–816, 2008
- Urnov, F. D. et al.:** Genome Editing with Engineered Zinc Finger Nucleases. In: *Nature Reviews Genetics* 11, S. 636–646, September 2010

### LITERATURTIPP

25 Jahre HIV-Forschung – Schwerpunkt Aids. In: *Spektrum der Wissenschaft* 11/2009, S. 54–67  
*Forscher berichten, warum das Virus so schwer zu besiegen ist und wie sie es dennoch austricksen möchten.*

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146805](http://www.spektrum.de/artikel/1146805)

# Mehr politische Kultur wagen

Cicero, das Magazin für politische Kultur – Monat für Monat Standpunkte namhafter Autoren zum aktuellen Geschehen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft



**JETZT  
GRATIS  
LESEN!**

## Entdecken Sie Cicero

Wie kein anderes deutsches Magazin bietet Ihnen Cicero analytische Hintergrundberichte, Reportagen und spannende Geschichten zu aktuellen Themen aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Kultur. Überraschende Einsichten und die Auflösung komplexer Zusammenhänge machen Cicero für Sie zu einem anregenden Lesevergnügen.

## Jetzt Cicero gratis testen!

Telefon: 0800 282 20 04

E-Mail: [abo@cicero.de](mailto:abo@cicero.de)

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

Cicero-Leserservice

20080 Hamburg

Bestellnr.: 875182

**Cicero**  
Magazin für politische Kultur



Die Scheibe unserer Galaxis weist eine merkliche Verbiegung auf. Astronomen sehen darin nicht eine statische Deformation, sondern eine langsame Wellenbewegung, die der Schwingung eines Gongs gleicht. Vermutlich wird die Welle durch eine Störung in der Dunklen Materie angeregt, die wiederum ihrerseits von zwei kleinen Satellitengalaxien verursacht wird.

ILLUSTRATIONEN: ION DIXON



ASTROPHYSIK

# Die dunkle Seite der Milchstraße

Der Außenrand unserer Galaxis ist wellenförmig verbogen, ähnlich dem dezenten Schwung einer eleganten Hutkrempe. Als Erklärung bieten sich Schwerkrafteffekte der Dunklen Materie an.

Von Leo Blitz

**F**ür mein erstes Forschungsprojekt an der University of California in Berkeley maß ich 1978 die Rotationsgeschwindigkeit von riesigen sternbildenden Gaswolken, die weit draußen um das Zentrum unserer Galaxienscheibe kreisen. Ich hatte die damals genaueste Methode zur Bestimmung dieser Geschwindigkeiten entwickelt und zeichnete gerade die Resultate per Hand auf Millimeterpapier, als zwei weitere Milchstraßenexperten vorbeikamen, Frank Shu und Ivan King. An dem entstehenden Diagramm erkannten wir sofort, dass die Galaxis vor allem an ihren Rändern riesige Mengen nicht sichtbarer Materie enthalten muss. Wir überlegten hin und her, woraus diese »Dunkle Materie« wohl bestehen mochte, aber all unsere Spekulationen erwiesen sich rasch als falsch.

In den 1970er und 1980er Jahren kamen viele Astronomen zu dem Schluss, dass der größte Teil der Materie im Universum aus einer mysteriösen Substanz bestehen muss, die Strahlung weder aussendet noch absorbiert und sich nur durch ihre Schwerkraft bemerkbar macht. Wie die Messungen der WMAP-Raumsonde unterdessen bestätigt haben, trägt die Dunkle Materie fünfmal so viel zur Masse im Universum bei wie die gewöhnliche Materie aus Protonen, Neutronen, Elektronen und so fort. Mangels besseren Wissens wird derzeit meist angenommen, die Dunkle Materie bestehe aus exotischen Teilchen, die von bislang unbewiesenen Theorien vorhergesagt werden und noch nie in Teilchenbeschleunigern aufgetaucht sind (siehe »Der verborgene Bauplan des Universums« von Jonathan Feng und Mark Trodden, Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 38). Eine besonders radikale Hypothese behauptet gar, das newtonsche Gravitationsgesetz und Einsteins allgemeine Relativitätstheorie seien falsch oder müssten zumindest modifiziert werden.

Trotz dieser Ungewissheit erklärt die Dunkle Materie einige rätselhafte Eigenschaften der Milchstraße. Zum Beispiel wissen die Astronomen seit mehr als 50 Jahren, dass die Ränder der Galaxis verbogen sind wie eine auf der Heizung vergessene Schallplatte. Erst die Wirkung der Dunklen Materie liefert dafür eine plausible Erklärung. Außerdem sagen Computermodelle der Galaxienbildung mit Dunkler Materie voraus, unsere Galaxis sei von Hunderten oder gar Tausenden kleiner Satellitengalaxien umgeben. Zunächst

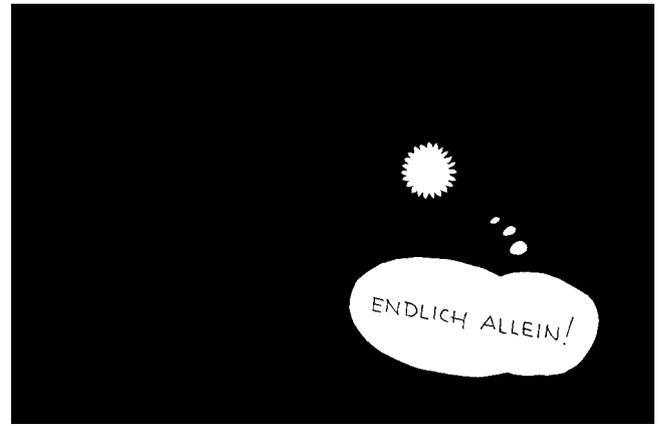
## AUF EINEN BLICK

### EINE GEHEIMNISVOLLE MACHT

**1** Obwohl das Wesen der **Dunklen Materie** noch unbekannt ist, vermag sie zu erklären, warum die äußere Scheibe der Milchstraße eine deutliche Verbiegung aufweist.

**2** Ohne Mitwirkung der Dunklen Materie reicht die **Schwerkraft** der um die Milchstraße laufenden **Satellitengalaxien** bei Weitem nicht aus, um die Scheibe so stark zu deformieren.

**3** **Modelle** sagen weitaus mehr Satellitengalaxien voraus, als tatsächlich beobachtet werden. Offenbar bestehen diese Objekte vorwiegend aus Dunkler Materie und lassen sich deshalb nur sehr schwer entdecken.



wurden zwar nur zwei Dutzend solcher Zwerggalaxien beobachtet, doch in den letzten Jahren entdeckten Astronomen immer mehr davon.

Um die Rolle der Dunklen Materie zu verstehen, brauchen wir zunächst ein grobes Bild vom Aufbau der Galaxis. Die gewöhnliche Materie – Sterne und Gas – bildet vier Strukturen:

- eine dünne Scheibe, welche die Spiralarme und den Ort unserer Sonne enthält;
- einen dichten Kern, der ein supermassereiches Schwarzes Loch birgt;
- eine längliche Verdickung namens Balken sowie
- einen kugelförmigen Hof oder »Halo« aus alten Sternen und Sternhaufen, der die übrige Galaxis umhüllt.

### Unsichtbarer Einfluss

Die Dunkle Materie ist ganz anders angeordnet. Obwohl wir sie nicht sehen können, lässt sich ihre Lage aus den Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne und Gase erschließen. Auf Grund ihrer Gravitationswirkung auf das sichtbare Material muss die Dunkle Materie annähernd kugelförmig verteilt sein und sich weit über den stellaren Halo hinaus erstrecken, wobei ihre Dichte im Zentrum am größten ist und mit dem Quadrat des Abstands vom Zentrum abfällt. Eine solche Verteilung wäre das natürliche Ergebnis einer so genannten hierarchischen Vereinigung: Nach einer gängigen Annahme verschmolzen im frühen Universum kleinere Galaxien sukzessive zu größeren wie der Milchstraße.

Jahrelang mussten sich die Astronomen mit dem simplen Bild der Dunklen Materie als einer riesigen Kugel aus unbekanntem Material begnügen. Doch in letzter Zeit konnten wir einige interessante Details herausarbeiten; demnach ist das Material nicht gleichmäßig verteilt, sondern bildet großräumige Klumpen.

Dieser Umstand vermag ein seltsames Phänomen zu erklären: warum die Galaxis verbogen ist. In den Außenbereichen der Scheibe, mehr als 50 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt, findet sich fast nur atomares Wasserstoffgas nebst wenigen Sternen. Und dieses Gas liegt, wie Vermessungen mittels Radioteleskopen zeigen, nicht in der Ebene der Milchstraße, wobei die Abweichung nach außen immer mehr zunimmt. Bei einem Radius von mehr als 75 000 Lichtjahren

weicht die Scheibe um gut 7500 Lichtjahre von der Ebene ab (siehe die Darstellung auf den folgenden Seiten).

Offenbar oszilliert das Gas auf und ab, durch die Ebene hindurch, während es mit der Scheibe um das galaktische Zentrum kreist. Diese Schwingungen dauern hunderte Millionen Jahre; wir beobachten nur einen winzigen Moment in diesem Zyklus. Im Grund verhält sich das Gas wie ein gewaltiger, in Zeitlupe vibrierender Gong – und wie ein solcher Klangkörper kann es mit mehreren Frequenzen schwingen, deren jede einer bestimmten Form des Körpers entspricht. Meine Kollegen und ich zeigten 2005, dass die beobachtete Verbiegung die Summe von drei Frequenzen darstellt, wobei der tiefste »Ton« 64 Oktaven unter dem eingestrichenen C liegt. Das Gesamtergebnis ist asymmetrisch: Auf der einen Seite der Galaxis liegt das Gas viel weiter außerhalb der Ebene als auf der anderen.

Als Radioastronomen in den 1950er Jahren die Verbiegung erstmals bemerkten, vermuteten sie als Ursache die Gravitationsanziehung der Magellanschen Wolken. Diese massereichsten Satellitengalaxien laufen schräg zur Milchstraßenebene und könnten mit ihrer Schwerkraft die Scheibe verzerren. Doch nach detaillierten Berechnungen erweisen sich diese Kräfte als viel zu schwach; im Vergleich zur Milchstraße sind die Magellanschen Wolken einfach winzig. Jahrzehntlang blieb der Grund für die ausgeprägte Verbiegung daher ein Rätsel.

### Der galaktische Gong

Das änderte sich erst, als man erkannte, dass die Milchstraße Dunkle Materie enthält; überdies wurde die Masse der Magellanschen Wolken durch neue Schätzungen nach oben korrigiert. Da die Gasscheibe einem riesigen Gong gleicht, kann

**Die Große Magellansche Wolke ist die massereichste Satellitengalaxie der Milchstraße. Anscheinend erzeugt sie in der Verteilung der Dunklen Materie Störungen, die ihrerseits die Form der Milchstraße beeinflussen.**



MIT FRIEDRICH VON ECKHARD SLAWIK

# Die deformierte Galaxis

Die meisten Sterne und Gasmassen der Milchstraße bilden eine riesige Scheibe. Sie ist nicht völlig eben, sondern merklich gewellt – ähnlich einer schadhaften Schallplatte.

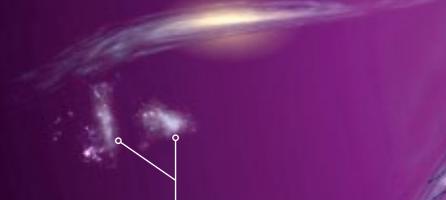
## RENAISSANCE EINER ALTEN HYPOTHESE

In den 1950er Jahren vermuteten Physiker, die Schwerkraft zweier Satellitengalaxien, der Großen und der Kleinen Magellanschen Wolke, verursache die Verbiegung. Die Hypothese wurde verworfen, weil die Satelliten viel zu wenig Masse haben, um die Galaxis zu deformieren. Doch wie Astronomen heute wissen, ist der sichtbare Teil der Milchstraße von einer riesigen Kugel Dunkler Materie umgeben. Sie könnte die Gravitationswirkung der Wolken verstärken und so die Verbiegung erklären.

klassische Ansicht der Milchstraße

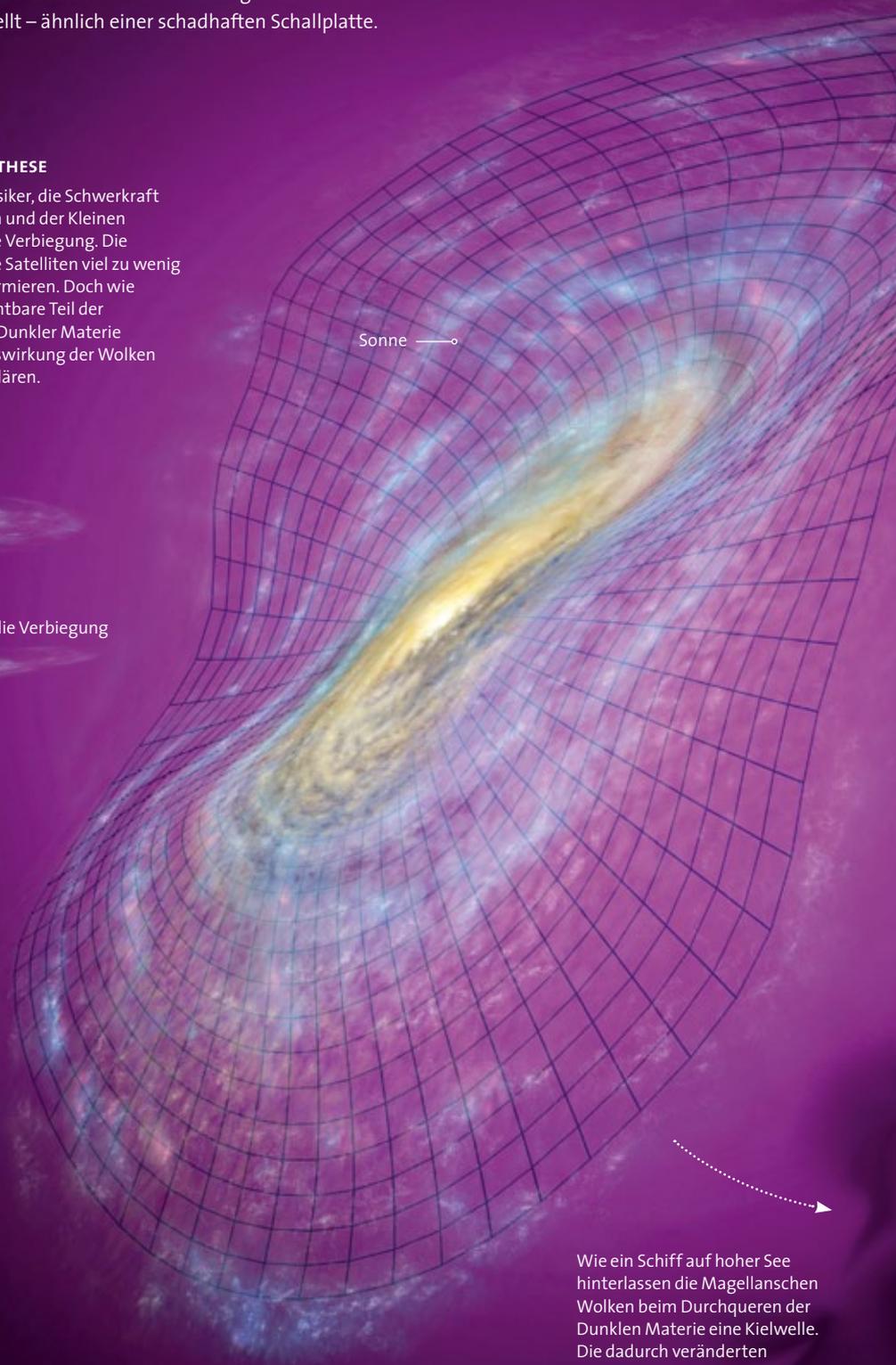


Die Magellanschen Wolken erklären die Verbiegung nur zum Teil.



Magellansche Wolken

Halo aus Dunkler Materie (violett)



Wie ein Schiff auf hoher See hinterlassen die Magellanschen Wolken beim Durchqueren der Dunklen Materie eine Kielwelle. Die dadurch veränderten Gravitationskräfte erzeugen die beobachtete Verbiegung der Milchstraßenscheibe.

Darstellung vertikal stark gedehnt



### EIN GEWALTIGER GONG

Die Verbiegung entspricht der Momentaufnahme einer Wellenbewegung, als wäre die Galaxis ein riesiger Gong. Die Welle setzt sich aus drei Resonanzschwingungen der Scheibe zusammen. Die durch Dunkle Materie verstärkte Schwerkraft der Magellanschen Wolken bildet den Schlegel, der den Gong in Schwingung versetzt.

der Umlauf der Magellanschen Wolken durch den Halo aus Dunkler Materie wie ein Schlegel wirken, der den Gong in Resonanzschwingungen versetzt – allerdings indirekt. Die Wolken erzeugen in der Dunklen Materie eine Nachströmung, ähnlich der Kielwelle hinter einem Ozeandampfer. Dadurch wird die sonst gleichmäßige Verteilung der Dunklen Materie lokal gestört, und erst das wirkt als der Gongschlegel, der die massearmen Außenbezirke der Scheibe in Schwingung versetzt. Allein wären die Magellanschen Wolken dafür zu schwach, aber die Dunkle Materie verstärkt ihre Wirkung gehörig.

Auf diese Idee kam Martin D. Weinberg von der University of Massachusetts Amherst 1998; später wandte er sie zusammen mit mir auf Beobachtungen der Milchstraße an, und damit konnten wir rechnerisch die drei Vibrationsmuster der Gasscheibe wiedergeben. Demnach wandelt sich die Form der Milchstraße kontinuierlich, während die Magellanschen Wolken ihre Kreise ziehen.

Die Verbiegung stellt nicht die einzige Asymmetrie in der Form der Milchstraße dar. Besonders ausgeprägt ist die einseitige Verdickung der äußeren Gasscheibe, die ebenfalls mit Radioteleskopen entdeckt wurde. Wenn man sich quer durch die Milchstraße eine Gerade vorstellt, auf der die Sonne und das galaktische Zentrum liegen, dann ist die Gasschicht auf der einen Seite der Galaxis rund doppelt so dick wie auf der anderen. Diese starke Asymmetrie ist instabil und sollte sich eigentlich mit der Zeit ausgleichen; es muss also einen Mechanismus geben, der sie aufrechterhält. 30 Jahre lang kannten die Astronomen das Problem, kehrten es aber unter den Teppich.

Zwei mögliche Erklärungen für das Phänomen berufen sich auf Dunkle Materie. Entweder ist die Milchstraße gegenüber dem kugelförmigen Halo der Dunklen Materie etwas verschoben, oder – wie Kanak Saha vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching meint – der Halo selbst ist nicht ganz symmetrisch. Beide Hypothesen stellen die alte Ansicht der Astronomen in Frage, Milchstraße und Halo wären gemeinsam aus der Verdichtung einer einzigen gigantischen Materiewolke hervorgegangen und hätten darum denselben Mittelpunkt. Insofern ist die Asymmetrie ein weiteres Indiz dafür, dass die Galaxis aus der Vereinigung kleinerer Einheiten hervorging und durch fortwährendes Einsammeln von intergalaktischem Gas weiterwuchs, denn beide Prozesse müssen nicht symmetrisch ablaufen. Da Gas, Sterne und Dunkle Materie sich unterschiedlich verhalten, muss das Zentrum der Galaxis nicht mit dem der Dunklen Materie übereinstimmen.

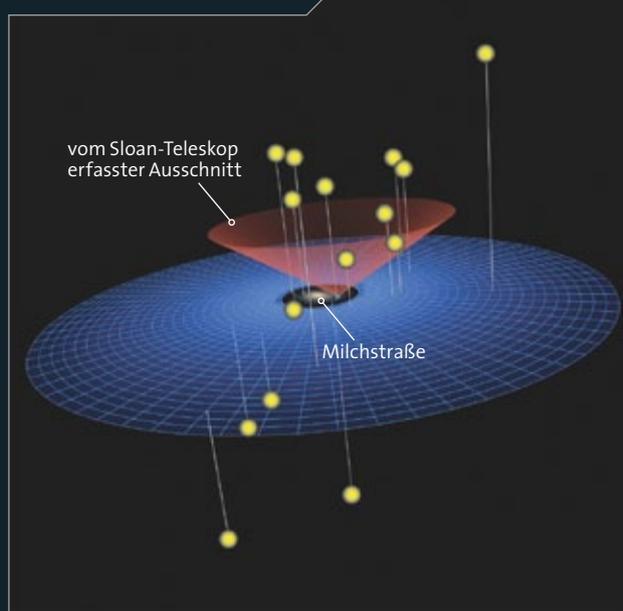
Um diese Idee zu prüfen, untersuchen Forscher die langen und dünnen Sternströme, die sich durch die Außenbereiche der Milchstraße ziehen. Diese Formationen sind die lang gezogenen Überbleibsel früherer Satellitengalaxien. Die meisten um die Milchstraße kreisenden Begleiter sind sphärische Zwerggalaxien: Sie sind rundlich, und ihre Masse beträgt meist nur ein Zehntausendstel von jener der Milchstraße. Mit der Zeit trudelt der Satellit aus seiner Bahn und gerät

# Unauffällige Begleiter

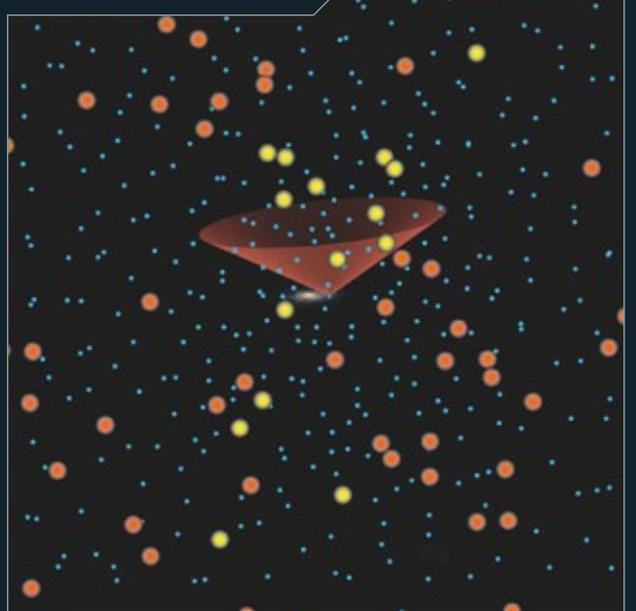
Theoretisch sollten hunderte Satellitengalaxien um unsere Milchstraße kreisen, doch zunächst fanden die Astronomen nur rund zwei Dutzend davon. Eine neue Auswertung des Sloan Digital Sky Survey, einer Durchmusterung von einem Viertel des

Sternenhimmels, hat kürzlich weitere Satelliten aufgespürt (links). Außerdem dürfte es noch viele lichtschwache und dunkle Begleitgalaxien geben, die sich der direkten Beobachtung entziehen (rechts).

BEKANNTE SATELLITENGALAXIEN



VERMUTETE SATELLITENGALAXIEN



● bekannte Satelliten    ● vermutete schwache Satelliten    ● vermutete dunkle Satelliten

DON DIXON; BEKANNTE SATELLITEN NACH JAMES BULLOCK, UC IRVINE

unter den Einfluss der galaktischen Gezeitenkräfte; diese ziehen die Zwerggalaxie zu einem dünnen Faden auseinander (siehe »Die Schatten galaktischer Welten« von Rodrigo Ibata und Brad Gibson, Spektrum der Wissenschaft 9/2007, S. 52).

Da die Sterne in diesen Strömen die Galaxis in riesigen Entfernungen umkreisen, wo die Gravitationseffekte der Dunklen Materie groß sind, gibt der Verlauf der Ströme Auskunft über die Form des Halos. Wäre der Halo nicht vollkommen kugelförmig, sondern etwas abgeflacht, würde er auf die Bahnen der Sterne im Strom eine Drehkraft ausüben und sie deutlich von einem Großkreis ablenken. Wie sich zeigt, sind die Ströme sehr dünn und bilden fast perfekte Großkreise um die Milchstraße. Computersimulationen von Ibata sprechen darum für eine annähernd sphärische Verteilung der Dunklen Materie; dennoch könnte sie ein klein wenig ungleichmäßig sein, wie beispielsweise Saha annimmt.

## Die versteckten Zwerge

Nicht nur die Zerstörung der Zwerggalaxien wirft Fragen auf, sondern auch ihre Entstehung. Nach den heutigen theoretischen Modellen beginnen Galaxien als Ansammlungen Dunkler Materie, die dann Gas und Sterne anziehen und so sichtbar werden. Der Vorgang erzeugt nicht nur große Galaxien wie unsere Milchstraße, sondern auch zahlreiche klei-

ne. Nun sagen die Simulationen zwar deren Eigenschaften halbwegs richtig voraus, ergeben aber viel mehr solche Zwerggalaxien, als bisher beobachtet wurden. Was ist der Grund?

Einen Teil der Antwort liefern neue Analysen des Sloan Digital Sky Survey, einer systematischen Durchmusterung eines Viertels des Sternenhimmels. Dabei wurde rund ein Dutzend neuer, extrem schwach leuchtender Galaxien gefunden, die um die Milchstraße ziehen. Ihre Entdeckung war eine Überraschung, denn der Himmel wird seit Langem so gründlich durchsucht, dass Galaxien auf unserer kosmischen Türschwelle doch wohl kaum unentdeckt bleiben konnten. Aber diese ultraschwachen Zwerge enthalten manchmal nur ein paar hundert Sterne. Sie sind so schwach und diffus, dass sie auf normalen Aufnahmen nicht erscheinen; erst spezielle Methoden der Datenverarbeitung halfen, sie zu identifizieren.

Hätte der Sloan Survey den gesamten Himmel erfasst, ließen sich darin vielleicht weitere 30 bis 40 ultraschwach leuchtende Galaxien entdecken. Doch auch das würde nicht erklären, warum so viele Zwerge »fehlen«. Darum suchen die Astronomen nach anderen Möglichkeiten. Gibt es viele solcher Galaxien, die für heutige Teleskope zu weit entfernt liegen? Der Sloan Survey vermag derartiger Zwerge nur bis zu ei-

ner Entfernung von 150 000 Lichtjahren aufzuspüren. Erik Tollerud von der University of California in Irvine nimmt an, dass rund 500 unentdeckte Galaxien die Milchstraße umkreisen – in Abständen von bis zu einer Million Lichtjahren vom Zentrum. Sie werden vielleicht mit einem neuen optischen Fernrohr gefunden, dem Large Synoptic Survey Telescope; es erfasst ein achtmal größeres Gebiet als das Sloan-Teleskop. Der Bau dieses Observatoriums begann im März 2011; gegen 2020 soll es den Betrieb aufnehmen.

Eine andere Hypothese besagt, dass um die Milchstraße Galaxien kreisen, die noch trüber sind als die schwächsten bisher nachgewiesenen Zwerge und vielleicht überhaupt keine Sterne enthalten. Sie bestünden fast nur aus Dunkler Materie. Solche Objekte sind nur sichtbar, wenn sie zudem auch Gas enthalten. Dieses wäre so diffus, dass es nur sehr langsam abkühlt – zu langsam, um Sterne zu bilden. Radioteleskope, die große Himmelsbereiche durchmustern, könnten das Gas dennoch entdecken.

Falls diese Galaxien jedoch überhaupt keine normale Materie enthielten, würden sie sich nur indirekt verraten: durch ihre Gravitationswirkung. Durchquert eine solche dunkle Galaxie die Scheibe der Milchstraße, stört sie – wie ein in einen stillen Teich geworfener Stein – die Geschwindigkeitsverteilung von Gas und Sternen. Leider wäre der Effekt sehr klein und von anderen Phänomenen kaum zu unterscheiden; denn alle Spiralgalaxien weisen in ihren Scheiben aus atomarem Wasserstoff Störungen auf, die Wellen auf rauer See gleichen.

Falls die dunkle Galaxie genügend Masse hat, lässt sich ihr Durchgang mit einer unter anderem von Sukanya Chakrabarti von der Florida Atlantic University in Boca Raton und mir ausgeheckten Methode nachweisen. Wie wir kürzlich zeigten, werden die größten Störungen in den Galaxienrändern oft von den Gezeitenkräften vorbeiziehender Galaxien erzeugt. Durch genaue Analyse der Störungen können wir auf Masse und Ort der Eindringlinge schließen. So lassen sich sogar solche aufspüren, deren Masse nur ein Tausendstel der Hauptgalaxie beträgt. Unser Team vermutet, dass sich in der Ebene der Milchstraße eine unentdeckte, möglicherweise dunkle Galaxie verbirgt, die rund 300 000 Lichtjahre vom galaktischen Zentrum entfernt liegt. Nun wollen wir in den vom Spitzer-Weltraumteleskop gesammelten Infrarotdaten nach dieser Galaxie suchen.

### Zu wenig Licht

Ultraschwache und dunkle Galaxien sind nicht nur schwer zu finden, sondern geben ein grundlegendes Rätsel auf, das die in ihnen enthaltene Materie betrifft. Normalerweise stellen Astronomen die Menge des in einer Galaxie vorhandenen Materials anhand des Masse-Licht-Verhältnisses dar: die Masse des Materials dividiert durch den Gesamtbetrag des ausgesandten Lichts. Als Norm gilt die Sonne; ihr Masse-Licht-Verhältnis wird als 1 definiert. Da ein durchschnittlicher Stern in unserer Galaxis etwas masseärmer und viel lichtschwächer als die Sonne ist, liegt das gesamte Masse-

Licht-Verhältnis der Milchstraße eher bei 3. Unter Einbeziehung der Dunklen Materie springt das gesamte Masse-Licht-Verhältnis auf rund 30.

Josh Simon von der Carnegie Institution in Washington und Maria Geha von der Yale University in New Haven (Connecticut) maßen die Sternengeschwindigkeiten in acht ultraschwachen Zwerggalaxien, um deren Masse zu bestimmen. In manchen Fällen beträgt das Masse-Licht-Verhältnis mehr als 1000 – bei Weitem der höchste jemals beobachtete Wert. Im gesamten Universum liegt das Verhältnis von Dunkler zu gewöhnlicher Materie fast exakt bei 5. Warum ist das Masse-Licht-Verhältnis des Milchstraßensystems so viel größer?

Es gibt zwei Möglichkeiten: Entweder haben Galaxien mit überdurchschnittlichem Masse-Licht-Verhältnis mehr Masse als erwartet, oder sie erzeugen weniger Licht. Die Astronomen glauben, dass Letzteres die Ursache ist. Da Galaxien mit geringerer Masse weniger Schwerkraft haben, verlieren sie mehr von ihrem Gas und leuchten infolgedessen außergewöhnlich schwach. Ein großer Anteil der gewöhnlichen Materie strahlt demnach so geringfügig, dass wir sie nicht sehen. Entweder hat sie sich niemals zu Galaxien und Sternen versammelt, oder sie hat zwar einmal Galaxien gebildet, wurde aber wieder in den intergalaktischen Raum ausgestoßen und ist dort in ionisierter Form für heutige Teleskope unsichtbar (siehe »Die verschwundenen Galaxien« von James E. Geach, Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 44).

Ironischerweise sind die Astronomen bei der Erforschung unserer Milchstraße auf eine doppelte Unsichtbarkeit gestoßen: Die durch die Dunkle Materie aufgeworfenen Probleme führen zu Überlegungen, in denen Unmengen gewöhnlicher, aber nicht sichtbarer Materie eine Rolle spielen. ~

### DER AUTOR



**Leo Blitz** ist Professor für Astronomie an der University of California in Berkeley und war früher Direktor des dortigen Labors für Radioastronomie.

### QUELLEN

**Chakrabarti, S. et al.:** Finding Dark Galaxies from Their Tidal Imprints. In: Astrophysical Journal (im Druck)

**Levine, E. S. et al.:** The Vertical Structure of the Outer Milky Way. In: Astrophysical Journal 643, S. 881–896, 2006

**Weinberg, M. D., Blitz, L.:** A Magellanic Origin for the Warp of the Galaxy. In: Astrophysical Journal Letters 641, S. L33–L36, 2006

### WEBLINKS

[www.scientificamerican.com/oct2011/blitz](http://www.scientificamerican.com/oct2011/blitz)

Ein Video zeigt, wie die Magellanschen Wolken zusammen mit Dunkler Materie die Milchstraße deformieren.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146808](http://www.spektrum.de/artikel/1146808)

# Schau nicht so genau hin!

Grob verpixelte Gesichter sind kaum zu erkennen – es sei denn, man vernichtet noch mehr Information.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Schon manch einer, der im westfälischen Münster am Picasso-Museum vorbeispazierte, betrachtete dort verblüfft den Boden. Das triste, graue Pflaster wird von Steinen in zwei unterschiedlichen Farben abgelöst, die seltsam ungeordnet verlegt zu sein scheinen (unten links). Selbst auf den zweiten Blick löst sich das Rätsel nicht ohne Weiteres. Erst wenn man den Platz von einem der oberen Stockwerke des Museumsgebäudes aus betrachtet, erkennt man – Picasso selbst (unten rechts).

Steigt man aber wieder herab und stellt sich erneut vor die Pflasterung, hat man allerdings kaum etwas dazugelernt: Wieder ist das Bild vor lauter Steinen kaum zu erkennen. Was sich

**Von der Treppe aus, die ins Kunstmuseum Pablo Picasso Münster führt, fällt der Blick der Besucher auf den Picassoplatz. Zu sehen ist dort eine scheinbar ungeordnete Ansammlung farbigter Pflastersteine. Das Anlitz des Meisters erkennt erst, wer aus einem höheren Stockwerk herabblickt.**

aus der Distanz mühelos zu einem klar gezeichneten Gesicht fügt, zerfällt bei geringem Abstand offenbar unvermeidlich in eine lose Ansammlung von Flächen.

Diese Erkenntnis steht in krassem Gegensatz zu einer schon vom österreichischen Physiker Ernst Mach 1896 aufgestellten These, dass der Mensch einen Gegenstand unabhängig davon, wie groß dieser ist, visuell identifizieren kann. Bei unterschiedlichem Abstand zu einem Objekt ändert sich zwar die Größe seines Abbilds auf der Netzhaut des Auges, trotzdem erkennen wir stets denselben Gegenstand. Der gesunde Menschenverstand hält es ebenfalls mit Mach: Wieso soll ein Gesicht anders erscheinen, wenn man es aus einem Meter oder eben aus zehn Meter Entfernung betrachtet?

Das nebenstehende Porträt (rechte Seite, Bild [a](#)) setzt sich aus 14 mal 20 quadratischen Pixeln mit unterschiedlichen Grauwerten zusammen. Erkennen Sie das Gesicht? Aus der Nähe ist das fast nicht möglich. Erst wenn Sie das »versteckte« Gesicht aus einigen Metern Entfernung betrachten, tritt es

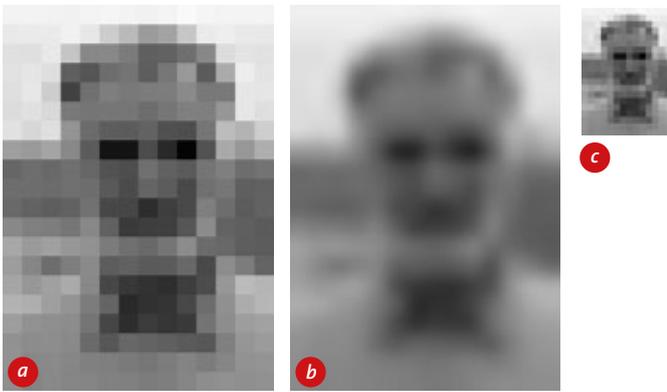
Manche Dinge lassen sich nur aus der Ferne gesehen ausfinden, und auch das Verkleinerungsglas kann auf Entdeckungen leiten. Das Detail versteckt die großen Züge des Ganzen.

*Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)*

zu Tage. Wider Erwarten hängt der Effekt nicht einmal davon ab, wie gut Sie die abgebildete Person kennen. Denn auch das Porträt eines Ihnen vertrauten Menschen wird Ihnen völlig fremd werden, wenn Sie es mit einer Bildsoftware auf wenige Pixel herunterskalieren.

Ein vergleichbares Verfahren namens »block masking« oder Blockmaskierung war erstmals 1973 von Leon D. Harmon und Béla Julesz erdacht worden. Die Wissenschaftler der Bell Labs in New Jersey gingen davon aus, dass einem Betrachter schon wenige charakteristische Stellen eines Gesichts genügen, damit er es erkennen kann. Über ein Porträt legten sie ein quadratisches Gitternetz und ermittelten für jedes Quadrat dessen mittlere Helligkeit. Als Nächstes identifizierten sie die Graustufe, die dieser Helligkeit entsprach, und füllten das Quadrat gleichmäßig damit. So ersetzten sie das Bild nach und nach durch wenige Quadrate unterschiedlicher Grauwerte. Berühmt wurde das nach dieser Methode »verpixelte« Porträt von Abraham Lincoln, wie es auf den amerikanischen Fünf-Dollar-Scheinen abgebildet ist.





Per Blockmaskierung lassen sich Fotos von Gesichtern radikal »verpixeln« (a) und dadurch unkenntlich machen. Dazu wird in je einer quadratischen Zelle des darübergelegten Gitters die mittlere Helligkeit ermittelt, dann wird die Zelle durch ein entsprechendes Grau ausgefüllt. Um das Gesicht wieder erkennbar zu machen, kann man die Kanten zwischen den Pixeln verwischen (b), oder aber man betrachtet das verpixelte Bild aus größerer Entfernung, was äquivalent zu einer verkleinerten Darstellung ist (c).

Während der Arbeit wurde den beiden klar, dass ein Betrachter ihrer Pixelbilder dem Erkennen nachhelfen konnte – nicht, indem er genauer hinsah, sondern im Gegenteil, indem er schielte, blinzelte, defokussierte oder den Kopf schnell hin- und herbewegte. Oder er wandte den Trick an, der schon Picasso zum Vorschein brachte, vergrößerte also den Abstand zum Bild. Wie kommt es, dass die Formen eines Gesichts in der Unschärfe plötzlich deutlich hervortreten, während sie sich einem noch so scharfen Blick entziehen?

### Pixeln, bis das Bild »kippt«

Harmon und Julesz zufolge nimmt – vereinfacht dargestellt – das visuelle System des Menschen unterschiedliche Strukturelemente über verschiedene Informationskanäle wahr. Grobe und feine Strukturen eines Bilds erreichen uns demzufolge durch je einen eigenen Kanal. Was bedeutet dies für Gesichter? Es entspricht dem physiologischen Befund ebenso wie der Erfahrung, dass wir bekannte Gesichter bereits aus großer Entfernung an ihrer Grobstruktur erkennen, selbst wenn wir noch keine Details unterscheiden können. Umgekehrt bedeutet dies: Wenn wir ein Porträtbild in grobe Pixel umwandeln und dadurch die Details auslöschen, dürfte sich an seiner bloßen Erkennbarkeit nichts ändern.

Bis zu einer gewissen Pixelgröße ist das tatsächlich der Fall. Jenseits dieser Grenze kippt das Bild aber, und das Gesicht zerfällt in eine Ansammlung grauer Blöcke. Der Wechsel kommt dadurch zu Stande, dass die Wahrnehmung zunehmend durch die scharfen Kanten

zwischen den Blöcken dominiert wird. Denn der Kanal für Details registriert nun nicht mehr die Einzelheiten des ursprünglichen Bilds, die ja herausgemittelt wurden, sondern vor allem die für das Gesicht völlig uncharakteristischen Kanten. Ab einer gewissen Pixelgröße springen sie so sehr ins Auge, dass sie all das unkenntlich machen, was uns über den Kanal für Grobstrukturen erreicht.

Erst wenn man die scharfen Kanten mit einer Software wieder herausfiltert (b), tritt eine ähnliche Wirkung wie beim unscharfen Betrachten ein: Die Kanten verschwinden, und das vergrößert dargestellte Gesicht wird wieder erkennbar. Kaum zu glauben, dass Bild (b) durch weitere Vernichtung von Information aus (a) hervorgegangen ist.

Verglichen mit den Fotos oben weist der »versteckte Picasso« übrigens Besonderheiten auf. Die Zahl der Graustufen ist auf ein Minimum, nämlich auf zwei, reduziert. Das erschwert das Erkennen, ebenso wie die perspektivische Verzerrung, die erst von einem höheren Stockwerk aus weit gehend aufgehoben wird. Andererseits sind die einzelnen Blöcke nicht so groß, die Verpixelung ist also weniger grob.

Eingesetzt wird das Phänomen vor allem in der Kunst. Schon die prächtigen Mosaiken der Antike kann man als Blockmaskierung auffassen. Aus der Nähe betrachtet lösen sie sich ebenfalls in farbige Fragmente auf. Aus der Entfernung, aus der ohnehin die meisten großen Kunstwerke erst überblickt werden können, verschmelzen die Fliesen zu einem »Gemälde«. In neuerer Zeit waren es die Pointillisten, welche die Wirkung der Unschärfe in ihren Werken

einkalkulierten. Deren Hauptvertreter Georges Seurat trug punktförmige Tupfer mit möglichst reinen Farben penibel rasterartig auf. So nebeneinandergesetzt überzogen sich die Farben mit einem komplementärfarbigem Schimmer der Nachbarfarbe. Der Farbeindruck ergab sich erst beim Sehvorgang des Betrachters: Die Farbe mischte sich sozusagen optisch, nicht auf der Palette oder auf der Leinwand.

»Schau doch genauer hin!«, sagen wir gelegentlich zu Menschen, die eine entscheidende Information übersehen haben. Überraschenderweise können Details aber auch stören. Dann ist mit diesem Rat niemandem geholfen, und es muss vielmehr heißen: »Schau nicht so genau hin, dann wirst du es schon erkennen!« ~

### DER AUTOR



**H. Joachim Schlichting** war bis 2011 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.

### QUELLE

**Harmon, L.D.:** The Recognition of Faces. In: Scientific American, S. 70–82, November 1973

### LITERATURTIPP

**Schlichting, H.J.:** Wenn der Pool ins Schwimmen gerät. Primus, Darmstadt 2012  
*Physikalische Alltagsphänomene anschaulich erklärt*

# Das Leuchten des Heiligenscheins

Glorien zählen zu den schönsten atmosphärischen Phänomenen, sind aber lange rätselhaft geblieben. Nun trug überraschend der optische Tunneleffekt zu ihrer Erklärung bei. Forscher haben dabei auch gelernt, den Einfluss von Wolken auf den Klimawandel besser vorherzusagen.

Von H. Moysés Nussenzweig

**W**enn Sie das nächste Mal eine Flugreise unternehmen, machen Sie doch mal ein kleines Experiment. Wählen Sie einen Fensterplatz, von dem aus Sie den Schatten des Flugzeugs auf den Wolken sehen können. Dafür müssen Sie herausfinden, wie die Sonne während des Flugs relativ zum Flugzeug steht. Wenn Sie Glück haben, belohnt Sie eine der schönsten atmosphärischen Erscheinungen für die Mühe: ein mehrfarbiger Strahlenkranz, der den Schatten des Flugzeugs auf der Wolktoberfläche umgibt. Auch Bergsteiger können dieses Glorie oder Gloriöle genannte Phänomen gelegentlich sehen. Erreichen sie bei Sonnenaufgang einen leicht in Wolken gehüllten Berggipfel, erscheint um den Schatten ihres Kopfs auf den nahen Wolken ebenfalls ein leuchtender Heiligenschein.

Die erste Beschreibung einer Glorie veröffentlichte 1748 ein französisches Expeditionsteam. »Eine Wolke, die uns umhüllt hatte, löste sich auf und ließ die Strahlen der aufgehenden Sonne hindurch«, berichteten die Mitglieder der wissenschaftlichen Entdeckungsreise über Beobachtungen, die sie ein Jahrzehnt zuvor auf dem Gipfel des Pambamarca im heutigen Ecuador gemacht hatten. »Dann sah jeder von uns seinen auf die Wolke fallenden Schatten ... und das Erscheinen eines Halos oder einer Glorie um den Kopf, bestehend aus drei oder vier konzentrischen Ringen in sehr hellen Farben ... Das Überraschendste daran war, dass jeder der sechs oder sieben Anwesenden das Phänomen nur um den Schatten seines eigenen Kopfes sah und nicht um die Köpfe der anderen.«

Auch wenn dieser Gedanke naheliegt: Für die Entstehung einer Glorie spielt der Schatten des Beobachters (oder des Flugzeugs) gar keine Rolle. Glorie und Schatten treffen nur deshalb zusammen, weil sie beide entgegengesetzt zur Sonne liegen. Das gibt uns einen ersten Hinweis auf die Natur von Glorien: Es muss sich um einen Effekt handeln, bei dem das Sonnenlicht um nahezu 180 Grad in seine Ursprungsrichtung zurückgestreut wird. Außerdem haben offenbar Wolken eine wichtige Funktion.

Man sollte denken, dass eine solche Erscheinung, die das altehrwürdige Gebiet der Optik betrifft, restlos aufgeklärt ist. Doch weit gefehlt. Für Wissenschaftler stellt dieses »Phänomen, das so alt sein muss wie die Welt«, wie es im Bericht von 1748 hieß, seit Jahrhunderten eine Herausforderung dar. Schließlich ist schon die physikalische Erklärung eines Regenbogens erheblich schwieriger, als uns viele Lehrbücher weismachen wollen – und der ist trotz mancher Ähnlichkeit mit einer Glorie viel einfacher zu verstehen.

Im Lauf der Jahrhunderte haben Forscher viele unterschiedliche Erklärungen angeboten, die sich aber allesamt als falsch herausgestellt haben. So schlug der deutsche Physiker Joseph von Fraunhofer Anfang des 19. Jahrhunderts vor, dass Sonnenlicht, welches an Tröpfchen tief im Inneren einer Wolke zurückgestreut wird, an anderen Tröpfchen in den äußeren Wolkenschichten erneut gebeugt wird.

Das Phänomen der Beugung folgt aus der Wellennatur des Lichts. Es erlaubt dem Licht, »um die Ecke zu gehen«, ähnlich, wie Meereswellen um kleine Inseln herumwandern und sich dahinter wieder so ausbreiten, als ob die Hindernisse gar nicht existierten. Fraunhofer vermutete, dass eine solche doppelte Streuung farbige Beugungsringe erzeugen könnte. Sie würden dem so genannten Hof ähneln, der gelegentlich nachts auf Wolken auftritt, die nahe der Sichtlinie zum Mond liegen. Erst 1923 konnte der indische Physiker Bidhu Bhusan Ray Fraunhofers Vorstellungen widerlegen. Bei seinen Experimenten mit künstlichen Wolken stellte Ray fest, dass sich Helligkeit und Farben in Glorien anders verteilen als in Mondhöfen. Er wies auch nach, dass Glorien direkt in den äu-

**Der vermeintliche Heiligenschein, den Flugreisende (Foto oben links) ebenso wie Bergsteiger unter bestimmten Umständen entdecken können, scheint exakt den jeweils eigenen Schatten zu umgeben. Beide Phänomene entstehen auf Wolken, die von der schräg stehenden Sonne beschienen werden.**



LINKS: STEVE JURVEISON, RECHTS: CLAUDIA HINZ



LINKS: BARBARA LAUGHON, RECHTS: CLAUDIA HINZ



ßeren Schichten der Wolken entstehen, und zwar durch jeweils einen einzigen Streuvorgang an einem Tropfen.

Ray versuchte, die Rückstreuung mit Hilfe der geometrischen Optik zu fassen. Diese beschreibt Licht nicht durch Wellen, sondern durch gerade Strahlen. Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenze zwischen zwei Medien – zum Beispiel auf die Tröpfchenoberfläche, an der sich Wasser und Luft berühren –, so dringt ein Teil des Lichts hindurch, während der andere Teil reflektiert wird. Das hindurchgehende Licht knickt dabei leicht ab, es wird »gebrochen«, wie Physiker sagen.

Innerhalb des Wassertropfens wird es ein oder mehrere Male an der Tropfenoberfläche reflektiert, bevor es wieder austritt. Doch selbst wenn Ray mehrfache Reflexionen berücksichtigte, waren die entstehenden Effekte viel zu schwach, um Glorien zu erklären.

Eine umfassende Beschreibung muss daher über die geometrische Optik hinausgehen. Diese ist historisch mit der Vorstellung von Licht als Teilchen verknüpft. Doch sie vernachlässigt dessen Wellennatur und damit insbesondere Effekte wie die Lichtbeugung. Dabei kann man leicht erkennen, dass es sich bei Glorien um Beugungsphänomene handelt. Im Gegensatz zur Brechung wird die Beugung nämlich stärker, wenn die Wellenlänge wächst. Darum ist der innere Ring einer Glorie blau und der äußere rot, was kürzeren beziehungsweise längeren Wellenlängen entspricht.

Im Prinzip lassen sich sowohl Regenbögen als auch Glorien mit einer Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelten Standardtheorie der Optik erklären. Damals fand der deutsche Physiker Gustav Mie eine exakte mathematische Lösung für das Problem der Lichtstreuung an Wassertropfen. Doch der Teufel steckt im Detail. Die Mie-Theorie basiert auf der Überlagerung so genannter Teil- oder Partialwellen. Um ein Ergeb-

nis für ein bestimmtes Problem zu erhalten, muss ein Forscher im Prinzip unendlich viele Partialwellen addieren. In der Praxis ist das natürlich nicht möglich – meist aber auch gar nicht nötig, da nur eine endliche Anzahl von Wellen signifikant zu einem optischen Phänomen beiträgt. Trotzdem müssen noch Hunderttausende von mathematischen Aus-

drücken berechnet werden, von denen schon jeder für sich ziemlich kompliziert ist.

Füttert man die Gleichungen in einen Computer, so erhält man zwar die richtige Lösung, versteht aber noch nicht die physikalischen Effekte, die für das Phänomen

verantwortlich sind. Die Mie-Theorie ist also eine Art mathematischer »Black Box«, oder, wie es der Nobelpreisträger Eugene Wigner formulierte: »Es ist sehr schön, dass der Computer das Problem versteht. Aber ich würde es auch gern verstehen.«

Ein wenigstens teilweise korrekter Einblick in die Physik der Glorien gelang erstmals Mitte des 20. Jahrhunderts. Hendrik C. van de Hulst, ein Pionier der modernen Radioastronomie, konnte zeigen, dass ein Lichtstrahl, der nahe am Rand in einen Tropfen eindringt, darin einen v-förmigen Weg nimmt (siehe Grafik 1 auf S. 56). Der Strahl wird an der Rückseite des Tropfens reflektiert und verlässt ihn nahezu in derselben Richtung, aus der er gekommen ist. Da die Wassertropfen in Wolken sehr klein sind, sind sie fast exakt kugelförmig. Auf Grund der Kugelsymmetrie verhalten sich in einem Bündel von Sonnenstrahlen, die auf einen Tropfen treffen, alle Strahlen, die denselben Abstand vom Tropfenmittelpunkt besitzen, in derselben Weise. Dieser Bündelungseffekt verstärkt die Rückstreuung enorm.

Will man damit Glorien erklären, stößt man allerdings schnell auf ein Problem. Wenn ein Strahl in ein Tröpfchen eindringt und es wieder verlässt, wird er durch die Brechung abgelenkt. Der Brechungsindex von Wasser ist aber nicht groß genug, um einen Lichtstrahl nach einer einzigen inneren Reflexion in die Ausgangsrichtung zurückzulenken. Wasser kann einen Lichtstrahl bestenfalls mit 14 Grad Abweichung in die ursprüngliche Herkunftsrichtung zurückschicken.

1957 hatte van de Hulst dann eine Idee, wie sich diese Lücke von 14 Grad schließen lässt. Er stellte sich vor, das Licht wandere ein Stück weit als Welle über die Oberfläche des Tropfens (siehe Grafik 2 auf S. 56). Oberflächenwellen auf Grenzflächen zwischen zwei Medien können unter unterschiedlichsten Bedingungen entstehen. Ein tangential auf den Tropfen treffender Strahl, so van de Hulsts Idee, breitet sich zunächst ein kurzes Stück auf der Oberfläche aus, dringt dann in den Tropfen ein und trifft von innen auf dessen hintere Begrenzung. Dort reflektiert, erreicht er schließlich wieder den Rand des Tropfens, wandert erneut ein Stück weit als Oberflächenwelle und verlässt schließlich den Tropfen. Ins-

**»Es ist sehr schön, dass der Computer das Problem versteht. Aber ich würde es auch gern verstehen«**

*Eugene Wigner,  
Physik-Nobelpreis 1963*

## AUF EINEN BLICK

### RÄTSELHAFTE GLORIEN

**1** Schaut man von einem Berggipfel oder aus einem Flugzeug auf eine Wolke herab, sieht man zuweilen eine **Glorie**: einen mehrfarbigen leuchtenden Ring, der sich um den eigenen Schatten oder um den des Flugzeugs legt. Ähnlich wie bei einem Regenbogen entstehen die Farben durch **mikroskopische Wassertropfchen** in den Wolken.

**2** Doch die Physik einer Glorie ist erheblich komplexer als die eines Regenbogens. Die Lichtenergie des Phänomens stammt laut Forschungen des Autors hauptsächlich vom **optischen Tunnel-effekt**: Selbst Licht, das einen Tropfen knapp verfehlt, überträgt Energie auf ihn.

**3** Die so gewonnenen Erkenntnisse helfen Klimaforschern bereits heute, in ihren Modellen den **Einfluss von Wolken** auf den Klimawandel besser zu berücksichtigen.

gesamt wird der Strahl dadurch in ebenjene Richtung zurückgeworfen, aus der er ursprünglich gekommen ist.

Zwar können die Oberflächenwellen Energie verlieren, indem sie tangential Strahlung aussenden. Van de Hulst vermutete indessen, dass der Bündelungseffekt diese Dämpfung mehr als kompensiert. Damals existierte allerdings noch kein Verfahren, um den Beitrag der Oberflächenwellen zu berechnen – van de Hulst konnte seine Ideen also nicht überprüfen.

Letztlich müssen alle Informationen über den physikalischen Ursprung der Glorien in den Partialwellen der Mie-Streuung enthalten sein. Die Herausforderung besteht darin, sie daraus zu extrahieren. Denn jede Partialwelle ist eine komplizierte Funktion der Tropfengröße und des Brechungsindex, der die Stärke der Lichtbrechung eines Mediums angibt. Außerdem hängt sie vom so genannten Stoßparameter ab, dem Abstand eines Lichtstrahls vom Tropfenzentrum. Ohne einen Hochleistungscomputer ist es daher kaum möglich, einen realistischen Fall zu berechnen, in dem Mie-Streuung gleichzeitig an vielen Tröpfchen unterschiedlicher Größen stattfindet. Erst ab den 1990er Jahren standen ausreichend schnelle Supercomputer für solche komplizierten Situationen zur Verfügung. Doch selbst diese lieferten keine Erkenntnisse darüber, was bei dem Phänomen wirklich vor sich geht.

### Selbst Lichtstrahlen, die ein Tröpfchen verfehlen, steuern Energie bei

Also musste ein anderer Weg beschritten werden. Schon 1965 hatte ich mit einem Forschungsprojekt begonnen, das unter anderem eine vollständige physikalische Erklärung für Glorien liefern sollte. Viel später, im Jahr 1987, stießen Warren Wiscombe vom Space Flight Center der NASA in Maryland und ich auf einen neuen Aspekt der Lichtbrechung: Auch Lichtstrahlen, die ein Tröpfchen knapp verfehlen, können einen signifikanten Beitrag zum gebrochenen Licht liefern (siehe Grafik 3 auf S. 57). Auf den ersten Blick erscheint das absurd. Wie kann ein Tropfen einen Lichtstrahl beeinflussen, der nicht einmal durch ihn hindurchgeht? Doch Wellen, insbesondere Lichtwellen, besitzen eine etwas unheimliche Eigenschaft: Sie können »tunneln«, also eine scheinbar undurchdringliche Barriere eben doch durchdringen.

Denn entgegen einem weit verbreiteten Irrtum ist der Tunneleffekt nicht nur Quantenphänomenen vorbehalten, sondern tritt auch bei klassischen Wellen wie zum Beispiel Licht auf. Issac Newton beobachtete den optischen Tunneleffekt bereits 1675. Als eines der verblüffendsten Phänomene der Physik kommt er derzeit bei neuartigen berührungsempfindlichen Bildschirmen zum Einsatz. Diese erkennen nicht nur den Ort, an dem ein Benutzer sie mit seinem Finger berührt, sondern auch, ob er fest oder leicht auf den Schirm drückt.

Wenn sich Licht durch ein Medium wie Glas oder Wasser ausbreitet und dann unter ausreichend flachem Winkel auf die Grenzfläche zu einem Stoff mit niedrigerem Brechungsindex trifft, wird es daran vollständig zurückgeworfen. Dieser

Effekt sorgt etwa dafür, dass Lichtsignale nicht seitlich aus einem Glasfaserkabel austreten können. In unserem Fall wird ein Lichtstrahl, der von innen auf die Grenzfläche des Tropfens mit der Luft trifft, vollständig ins Tropfeninnere zurückgeworfen. Doch selbst bei Totalreflexion reichen die elektrischen und magnetischen Felder des Lichts im Moment der Reflexion noch ein Stück weit über die Grenzfläche hinaus. Diese Felder bilden extrem schwache »evaneszente« Wellen, die aber die unmittelbare Umgebung der Grenzfläche nicht verlassen und daher keine Energie nach außen tragen.

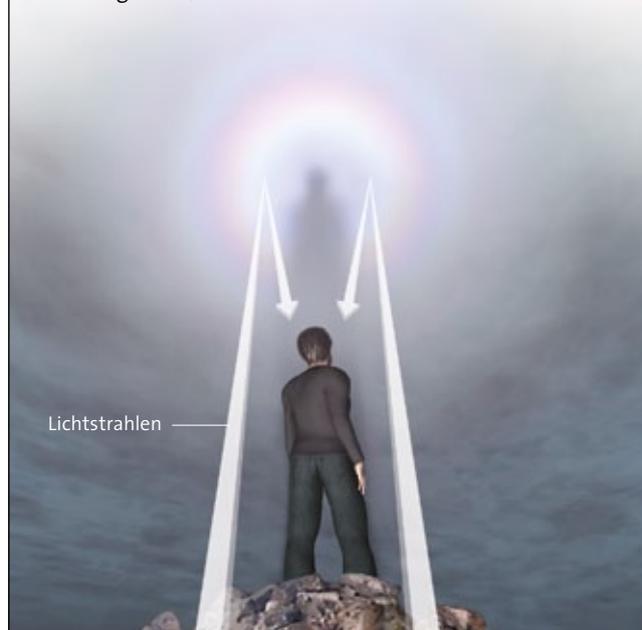
Nun kommt der Tunneleffekt ins Spiel: Befindet sich ein drittes Medium in so geringem Abstand von der Grenzfläche, dass es mit den evaneszenten Wellen überlappt, dann können die Wellen aus dem Tropfeninneren das zweite Medium – das zuvor als Barriere gewirkt hat – durchtunneln und sich im dritten weiter ausbreiten. Die Wellen tragen jetzt Energie fort und schwächen dadurch die innere Reflexion im Tropfen ab.

Zu einem nennenswerten Tunneleffekt kommt es nur, wenn die Lücke nicht viel größer ist als eine Wellenlänge – im Fall von sichtbarem Licht höchstens etwa ein tausendstel Millimeter. Newton war auf das Phänomen gestoßen, als er

## Licht und Schatten

### Warum umhüllt eine Glorie stets den Schatten des Beobachters?

Das Phänomen beruht auf Licht, das nahezu exakt in die Richtung zurückgeworfen wird, aus der es gekommen ist. Deshalb erfordert seine Beobachtung eine spezielle räumliche Anordnung: Sonne, Beobachter und Wolke müssen auf einer Linie liegen. Daraus ergibt sich unmittelbar, dass eine Glorie als Halo um den Schatten des Beobachters auf der Wolke erscheint. Wie bei einem Regenbogen werden die unterschiedlichen Farben des Spektrums unterschiedlich stark abgelenkt, wodurch ein irisierendes Muster entsteht.



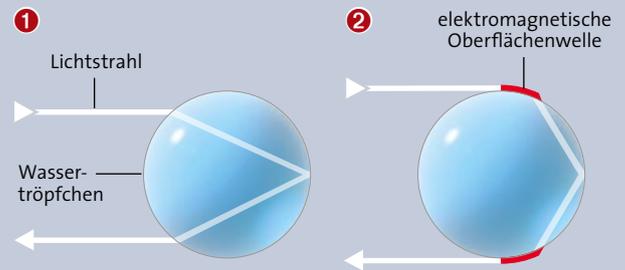
## Licht am Ende des Tunnels

**Glorien wurden schon vor Jahrhunderten** beschrieben. Doch erst in jüngster Zeit – und nach einigen Fehlversuchen – ist es Physikern gelungen, einen Einblick in die physikalische Ursache der faszinierenden Erscheinung zu erhalten. Sie basiert auf dem so genannten optischen Tunneleffekt.

### DREI ERKLÄRUNGSANSÄTZE

#### 1 FALSCH

Zunächst haben Forscher versucht, das Phänomen mit der Reflexion von Licht innerhalb mikroskopischer Wassertropfchen zu erklären. Wolken bestehen aus einer Unzahl solcher Tropfen. Dringen Lichtstrahlen in einen davon ein, werden sie gebrochen, innerhalb des Tropfens zurückgeworfen und erneut gebrochen, wenn sie den Tropfen wieder verlassen. Sie kehren dann – so die Idee – in die Richtung zurück, aus der sie gekommen sind (Grafik 1). Doch Wasser



bricht das Licht nicht stark genug, um es exakt in die Herkunftsrichtung zurückzuschicken.

#### 2 BESSER

Ein zweiter Erklärungsversuch betrachtet Lichtstrahlen, die ein Tropfchen gerade eben am Rand treffen. Solche Strahlen können elektromagnetische Oberflächenwellen anregen. Diese folgen der gekrümmten Oberfläche des Tropfens ein kleines Stück (stark übertrieben in Grafik 2).

Interferenzmuster untersuchte, die man heute als newtonische Ringe bezeichnet. Er legte eine konvexe Linse auf eine ebene Glasplatte und erwartete, dass sich die Ringe nur zeigen, wenn Licht direkt von der Linse in die Platte eintreten kann. Doch er beobachtete die Muster auch dann noch, als er zwischen Linse und Platte für eine extrem dünne Schicht aus Luft sorgte – als die beiden Oberflächen sich also gerade nicht mehr berührten. Ein wenig von dem Licht, das eigentlich total reflektiert werden sollte, musste die Lücke überwunden haben.

Wiscombe und ich untersuchten 1987 zunächst den idealisierten Fall einer total reflektierenden Sphäre, beispielsweise eine silberbeschichtete Kugel. Wir fanden heraus, dass Partialwellen eines Strahls, der die Sphäre knapp verfehlt, bis zu ihrer Oberfläche tunneln und so einen signifikanten Beitrag zur Lichtbrechung liefern können. Ist die Sphäre transparent wie etwa ein Wassertropfchen, kann eine solche Welle sogar in sein Inneres eindringen. Anschließend trifft sie unter einem flachen Winkel von innen auf die Grenzschicht, wird vollständig reflektiert und bleibt in dem Tropfchen gefangen.

Ein ähnlicher Effekt ist von Schallwellen bekannt. Wendet man sich auf der berühmten Flüstergalerie in der Londoner St. Paul's Cathedral zur Außenwand und sagt einige leise Worte, so kann eine zweite Person auf der entgegengesetzten Seite diese deutlich verstehen. Denn die gekrümmte Wand reflektiert die Schallwellen wieder und wieder und leitet sie so zur anderen Seite.

Im Fall von Lichtwellen in einem Tropfchen kommt es bei bestimmten Wellenlängen nach mehreren Reflexionen zu einer konstruktiven Interferenz, einer so genannten Mie-Resonanz. Man kann dieses Phänomen mit einer Schaukel vergleichen, die man genau im Rhythmus ihrer natürlichen Schwingungsdauer anstößt, so dass sie höher und höher schwingt. Schon eine winzige Änderung der Wellenlänge reicht aus, um die Resonanzen, die man wegen ihrer Analo-

gie in der Akustik auch als Flüstergaleriemoden bezeichnet, wieder verschwinden zu lassen. Anders gesagt: Mie-Resonanzen sind auf einen sehr kleinen Frequenzbereich beschränkt; in diesem können sie die Intensität aber besonders drastisch verstärken.

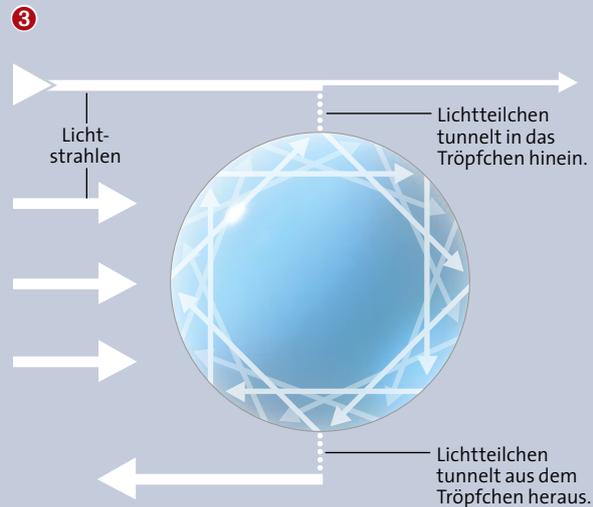
### Tunneleffekt »sichtbar« und nutzbar gemacht

Wir kennen nun also drei Effekte, die zum Phänomen der Glorien beitragen könnten: Strahlen, die auf Tropfen treffen und axial zurückgestreut werden, so wie Ray dies mit den Mitteln der geometrischen Optik beschrieb; nahezu tangential auftreffende Strahlen, die nach van de Hulst Oberflächenwellen hervorrufen; und schließlich Mie-Resonanzen, wie sie durch den optischen Tunneleffekt entstehen. 1977 untersuchte ich zusammen mit Vijay Khrae, damals an der University of Rochester, den Beitrag von tangentialen Strahlen unter Berücksichtigung der Oberflächenwellen. Und 1994 nahm ich mit Luiz Gallisa Guimarães von der Universidade Federal do Rio de Janeiro Resonanzwellen unter die Lupe. Bei einer detaillierten Analyse fand ich dann 2002 heraus, dass sowohl die axiale Rückstreuung als auch die Oberflächenwellen vernachlässigbar sind. Der Hauptbeitrag stammt von Resonanzen infolge des Tunneleffekts. Glorien sind also eine makroskopisch sichtbare Folge des Tunneleffekts von Lichtwellen!

Dieser lässt sich aber auch technisch nutzen. Flüstergaleriemoden finden etwa beim Bau von Lasern Verwendung. Dabei kommen Mikrowassertropfen, Mikrosphären und andere geometrische Formen wie beispielsweise mikroskopische Scheiben aus festen Stoffen zum Einsatz. Bei neuartigen Multitouch-Bildschirmen, die gleichzeitige Berührungen an unterschiedlichen Stellen erkennen, spielt der Finger die Rolle von Newtons konvexer Linse: Licht kann aus dem Bildschirm heraustunneln, vom Finger wieder zurückgestreut werden und so ein Signal auslösen. Durch den Tunneleffekt erzeugte evaneszente Lichtwellen finden außerdem Anwendung in der so genannten Nahfeldmikroskopie. Denn sie lö-

dargestellt), bevor sie in den Tropfen eindringen. Als Nächstes werden sie an der Rückwand des Tröpfchens reflektiert, wandeln sich bei Erreichen der Grenzfläche erneut in eine Oberflächenwelle um und verlassen schließlich den Tropfen. Die Ausbreitung als Oberflächenwelle führt dazu, dass die Ablenkung der Strahlen gerade groß genug ist, um sie exakt in ihre Herkunftsrichtung zurückzuwerfen. Wie sich herausstellte, trägt dieser Effekt aber nur in sehr geringem Maß zur Gesamtenergie einer Glorie bei.

**3 GUT** Dank einer von Gustav Mie entwickelten mathematischen Theorie der Lichtstreuung lassen sich Glorien inzwischen korrekt beschreiben – allerdings nur durch umfangreiche Berechnungen, die keinerlei Einblick in die zu Grunde liegende Physik erlauben. Der Autor konnte jedoch zeigen, dass der größte Teil des Lichts einer Glorie durch den so genannten optischen Tunneleffekt zu Stande kommt (Grafik 3). Dabei dringt auch Energie von Lichtstrahlen, die das Tröpfchen knapp verfehlen, in dieses ein. Der Tunneleffekt ist vor allem aus der Quantenphysik bekannt, tritt aber bei klassischen Wellen ebenfalls auf.



ALFRED T. KAMAJIAN

sen Einzelheiten auf, die kleiner sind als ihre Wellenlänge, und durchbrechen so die berühmte Beugungsgrenze, jenseits deren gewöhnliche Mikroskope nur noch verschwommene Bilder liefern.

Darüber hinaus lässt sich nun die Rolle von Wolken für den Klimawandel besser abschätzen (siehe »Wolken im Klimawandel«, SdW 7/2011, S. 80). Eine wichtige Frage haben die Klimaforscher nämlich noch nicht beantwortet: Was geschieht, wenn sich in Zukunft der durchschnittliche Bewölkungsgrad erhöht? Kühlt dies unseren Planeten, weil mehr Sonnenlicht in das Weltall zurückgestreut wird – oder trägt es im Gegenteil zur Aufheizung bei, weil die Wolken wie eine zusätzliche Schicht wirken, die infrarote Strahlung absorbiert?

Im sichtbaren Spektralbereich ist Wasser mehr oder weniger durchsichtig. In bestimmten infraroten Frequenzbereichen, so genannten Bändern, absorbiert es aber Strahlung, ähnlich wie Kohlendioxid und andere Treibhausgase. Da Mie-Resonanzen gewöhnlich mit langen Wegen und einer großen Zahl interner Reflexionen verknüpft sind, können Wassertröpfchen einen signifikanten Anteil der für das Klima wichtigen infraroten Strahlung absorbieren, insbesondere dann, wenn das Wasser Fremdstoffe enthält und nicht kristallklar ist.

Eine typische Wolke besteht aus vielen Tröpfchen mit ganz unterschiedlichen Durchmessern. Bis vor etwa einem Jahrzehnt haben Forscher bei Mie-Simulationen der Lichtstreuung an Wolken jeweils nur eine relativ kleine Zahl unterschiedlicher Tropfendurchmesser berücksichtigt. Diese Vereinfachung verringerte zwar die notwendige Rechenzeit. Doch sie hat einen unerwarteten Haken, wie ich 2003 mit einer für Regenbögen und Glorien entwickelten Methode zeigte: Die übliche Simulationstechnik führt in schmalen Bändern des Spektrums zu Fehlern von bis zu 30 Prozent. Denn sie kann wichtige Beiträge durch Resonanzen übersehen, die in diesen Bändern auftreten. Werden Berechnungen für Tröpfchengrößen von ein, zwei, drei Mikrometern und so

weiter durchgeführt, dann verfehlt das Verfahren die scharfe Resonanz, die bei einer Tröpfchengröße von 2,4 Mikrometern auftritt. Eine Untersuchung, welche die reale Verteilung der Tröpfchengrößen in der Atmosphäre zu Grunde legte, bestätigte 2006 schließlich meine Vorhersage. Seither berücksichtigen die Forscher zunehmend mehr Tröpfchengrößen, um ihre Modelle zu verbessern.

Schon Wigner hatte uns gewarnt: Selbst die Ergebnisse der modernsten Supercomputer können in die Irre führen, wenn man sie ohne ausreichende physikalische Einsicht verwendet. Vielleicht denken Sie ja daran, wenn Sie das nächste Mal im Flugzeug sitzen und eine Glorie erblicken. ∞

#### DER AUTOR



**H. Moysés Nussenzveig** ist emeritierter Professor für Physik der brasilianischen Universidade Federal do Rio de Janeiro und Träger der Max-Born-Medaille der Optical Society of America. Er hat neue theoretische Verfahren zur Berechnung vieler optischer Phänomene entwickelt. Zurzeit leitet er Studien über die Biophysik von Zellen.

#### QUELLEN

- Nussenzveig, H. M.:** Diffraction Effects in Semiclassical Scattering. Cambridge University Press, 1992
- Nussenzveig, H. M.:** Light Tunneling in Clouds. In: Applied Optics 42, S. 1588–1593, 20. März 2003
- Nussenzveig, H. M.:** Light Tunneling. Progress in Optics 50. Elsevier, New York 2007
- Zender, C. S., Talamantes, J.:** Solar Absorption by Mie Resonances in Cloud Droplets. In: Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 98, S. 122–129, März 2006

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146810](http://www.spektrum.de/artikel/1146810)



HEINZ PETER ZNOJ, MIT FRED. GEN. VON DOMINIK BONATZ

SÜDOSTASIEN-ARCHÄOLOGIE

# Megalithen im Regenwald

Noch vor wenigen Jahrzehnten galten die behauenen Steinkolosse im Hochland von Sumatra als Zeugnisse einer prähistorischen Kultur, die lange vor den prachtvollen Tempelanlagen und Palästen des Tieflands existierte. Jetzt aber haben archäologische Grabungen ergeben: Beide Kulturen standen in engem Austausch, ja hingen sogar voneinander ab.

Von Dominik Bonatz

Goldland, »Suvarna-bhumi«, nannten Indiens Fürsten das zweigrößte Eiland des indonesischen Archipels und prägten damit seinen heutigen Namen: Sumatra. Im 7. Jahrhundert n. Chr. erblühte dort das Königreich Srivijaya. Während zeitgleich im fernen Europa Machtkämpfe das Frankenreich erschütterten und in China die Tang-Dynastie den Thron eroberte, entstanden im Tiefland Sumatras Städte und Tempel. Srivijaya lieferte Gold nicht nur nach Indien, sondern auf dem Seeweg auch den Anrainerstaaten des Persischen Golfs. Dem chinesischen Kaiser überbrachten Gesandtschaften allerlei Kostbarkeiten: Elfenbein, Rhinoceroshorn, Federn des Nashornvogels, Honig, aromatische Tropenhölzer sowie die Duftharze Kampfer und Benzoin, die in Asien eine dem Weihrauch vergleichbare Bedeutung bei rituellen Handlungen hatten.

Macht und Reichtum Srivijayas und seines Nachfolgers Malayu spiegelten sich in prachtvollen Tempelanlagen und Palästen wider. Lange standen deren Überreste im Fokus der Historiker und Archäologen. Erst in den letzten Jahren wurde deutlich, dass sie ein Pendant in den Urwäldern der Gebirge hatten, wenn auch ein weit schlichteres: eine bis heute unbekannt Zahl von behauenen Steinkolosse. Jüngere Grabungskampagnen ergaben, dass diese Megalithen Zeugen eines inselweiten Handelsnetzes sind, das die Grundlage für den Seehandel schuf.

Die Geografie der Insel ist voller Gegensätze (Karte S. 60). Im Westen verläuft die Bergkette des Barisan entlang der gesamten Küste, östlich davon erstreckt sich eine weite, von großen Flüssen durchzogene Ebene bis zum Meer. Um sich gegen die Hochwasser der Regenzeit zu wappnen, lebten die



Die Megalithen, die heute im dichten Dschungel des Hochlands von Sumatra verborgen liegen, haben auf den ersten Blick wenig mit den Ruinen der Tempelanlagen und Palästen im Tiefland gemein. Tatsächlich aber waren behauene Steinblöcke wie der im Gebiet des heutigen Kerinci entdeckte (Bild links) wohl das Pendant zu den buddhistischen Tempelanlagen und Palästen der Srivijaya- und der Malayu-Könige, die im Tiefland residierten (rechtes Bild: ein Tempel der in der Malayu-Zeit errichteten Anlage Muara Jambi). Beide Kulturen waren über einen regen Tauschhandel miteinander verbunden – und profitierten so voneinander.

Menschen dort in Pfahlbauten und auf Hausbooten. Problematischer als Überschwemmungen waren die sumpfigen Böden insbesondere der Küstenregion, denn sie eigneten sich nicht für den Anbau von Feldfrüchten. Der Tropenwald des Hochlands hingegen lieferte seinen Bewohnern Baumaterial, Gewürze und andere pflanzliche Produkte. Verschiedene im Gebirge lebende ethnische Gruppen wie die Batak im Norden, die Minangkabau im mittleren Westen und die Rejang im Süden konnten bis heute ihre kulturelle Eigenständigkeit bewahren – dank der schwer zugänglichen Täler und vielleicht auch wegen des Gerüchts, dort lebten Kannibalen.

Während Gruppen von Jägern und Sammlern die Regenwälder durchstreiften, entstanden an den Ufern der Flüsse, weit entfernt von den Mündungssümpfen, erste urbane Zentren, die Gold, Nahrungsmittel, Holz und anderes aus dem Hochland eintauschten. Im Gegenzug lieferten sie Produkte aus Metall, Glas und Keramik, vermutlich auch Textilien und Salz. In Palembang am Unterlauf des Batang Musi regierte die Dynastie der Srivijaya-Könige (Rajas). Sie knüpften ein weit reichendes Netz politischer und wirtschaftlicher Beziehungen, dem sich mehr und mehr Städte und kleinere Königtü-

mer anschlossen. In Stein gemeißelte Sanskritinschriften, die sich bis an die Grenzen zum Bergland finden, berichten über die Schwüre, die diese Vasallen auf Srivijaya leisten mussten. Um ihre Macht zu demonstrieren und um ihr Reich unter dem Dach des Buddhismus ideologisch zu einen, ließen die neuen Herrscher vielerorts Tempelanlagen errichten. Im 9. und 10. Jahrhundert kontrollierten sie die Meeresstraße von Malakka zwischen Sumatra und dem malaiischen Festland – und damit auch den Warenverkehr zwischen Persien und Indien im Westen bis nach China im Osten. Von dort brachten ihre Gesandten Porzellan, Metalle und Seidenstoffe, die dann bis in den Mittelmeerraum weitergehandelt wurden. Fremde Schiffe mussten Zölle entrichten, um die Meeresstraße passieren oder einen der Häfen Sumatras anlaufen zu dürfen.

1025 wurde Palembang von einem indischen Invasionsheer zerstört, und die in Jambi am Fluss Batanghari residierenden Malayu-Könige lösten die Herrscher von Srivijaya als Führungsmacht ab. Doch sie vermochten nicht mehr an den alten Glanz anzuknüpfen, da Teile der Insel bereits an andere Reiche auf der Nachbarinsel Java gefallen waren. Kriegerische Auseinandersetzungen mit diesen Nachbarn schwächten Ma-

## AUF EINEN BLICK

### STEINZEIT ODER MITTELALTER?

**1** Ab dem 7. Jahrhundert n. Chr. war **Sumatra** ein wichtiger **Knotenpunkt im südostasiatischen Handelsnetz**. Die Könige der Srivijaya- und der späteren Malayu-Dynastie unterhielten gute Kontakte bis an den chinesischen Kaiserhof.

**2** Unter der holländischen Kolonialherrschaft begannen im 19. Jahrhundert erste archäologische Untersuchungen. Dabei kamen im Hochland Sumatras auch **Megalithen** zum Vorschein. Sie wurden aber als Zeugnisse einer steinzeitlichen Kultur angesehen.

**3** Erste Forschungen der letzten Jahre widerlegen diese Einschätzung. Demnach waren die Megalithen zumindest in der Kerinci-Region **Ausdruck eines Tauschhandels** zwischen den Königreichen des Tieflands und den Stämmen des Hochlands.

layu, bis es im 14. Jahrhundert seine Eigenständigkeit an Java verlor. In dieser unruhigen Zeit etablierten sich im Norden der Insel zudem einige islamische Sultanate. Ab dem 17. Jahrhundert geriet Sumatra dann immer stärker in den Sog der Kolonisierung. Briten und Niederländer rangen um die lukrative Insel, Letztere obsiegten schließlich im 19. Jahrhundert.

Während nun allenthalben Plantagen den Dschungel verdrängten, befassten sich Europäer erstmals mit den dortigen Altertümern. Der Kolonialbeamte Thomassen à Thuessink van der Hoop veröffentlichte 1932 ein Buch, das die auf dem Pasemah-Plateau in der Provinz Bengkulu entdeckten Megalithen systematisch auflistete und beschrieb. Sieben Jahre später folgte Friedrich M. Schnitgers Buch »Forgotten King-

doms of Sumatra«. Der aus Österreich stammende Archäologe hatte auf Sumatra im Auftrag der Royal Netherlands Geographical Society Feldforschung betrieben und dabei auch van der Hoops Werk einbezogen. Schnitger und andere Forscher schätzten das Alter der behauenen Steinblöcke auf 3000 bis 4000 Jahre, denn diese wirkten vorzeitlich und erinnerten an jene Dolmengräber, die von Westeuropa bis in die Levante zu finden waren. Altertumsforscher postulierten deshalb eine steinzeitliche Megalithkultur, die im östlichen Mittelmeer aufgekommen und sich ab dem 6. Jahrtausend v. Chr. gen Westen und Osten verbreitet haben sollte. Diese Hypothese war bis Mitte des 20. Jahrhunderts die allgemein akzeptierte Lehrmeinung. Sie hatte leider zur Folge, dass sich Südostasienarchäologen primär mit den leichter zugänglichen Monumenten des Tieflands befassten – die Megalithen betrachteten sie als Angelegenheit für Prähistoriker.

Am 27. Dezember 1949 entließen die Niederlande ihre Kolonien in Indonesien in die Unabhängigkeit (Westneuguinea folgte erst 1962). Von nun an oblag es einheimischen Wissenschaftlern, antike Monumente zu erforschen und zu erhalten. Internationale Kooperationen begannen erst allmählich Ende des 20. Jahrhunderts. Die ersten systematischen Ausgrabungen im Hochland erfolgten dank der Förderung durch die Schweizerisch-Liechtensteinische Stiftung für Archäologische Forschung im Ausland (SLSA).

Die in den verschiedenen Importfunden dokumentierten Verflechtungen mit Südostasien führten mich von meinem ursprünglichen Forschungsfeld, der Vorderasiatischen Archäologie, in das Hochland von Kerinci. Dort leitete ich 2003

Ab dem 7. Jahrhundert kontrollierte das Srivijaya-Königreich auf Sumatra von seiner Hauptstadt im heutigen Palembang aus wichtige Seehandelsrouten; an seine Stelle traten ab dem 9. Jahrhundert die Malayu-Könige in Jambi. Beide Reiche handelten mit Gütern, die sie aus dem Hochland Sumatras bezogen. Sichtbarer Ausdruck dieses Austauschs waren in der Region Kerinci Megalithen, mit denen Gruppen der Hochlandbewohner ihre Territorien markierten.



Schon 1931 fotografierte und dokumentierte der holländische Kolonialbeamte van der Hoop Steinskulpturen auf dem Plateau von Pasemah. Archäologen erschienen diese aber nicht als lohnende Forschungsobjekte, galten sie doch als Überbleibsel einer steinzeitlichen, von Südostasien bis nach Europa reichenden Megalithkultur.



VAN DER HOOP, A.N.J. I.T.H.: MEGALITHISCHE OUDHEDEN IN ZUID-SUMATRA, W.I.T.H.E.M.E. & C.F. ZUIPPHEN 1932, ILL. 34

bis 2008 ein Projekt, an dem Kollegen aus Jakarta, Palembang und Jambi beteiligt waren; ihm folgte ab 2010 eine von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Untersuchung in dem weiter nördlich gelegenen Minangkabau-Hochland (siehe Kasten S. 64). Gut 70 Jahre nach van der Hoop befassten sich damit erstmals wieder Altertumsforscher mit den Megalithen Sumatras.

Der Name Kerinci steht für eine Region im gebirgigen Westen. Am Rand einer fruchtbaren Hochebene liegt der gleichnamige See, südlich davon erstrecken sich schwer erreichbare Täler, die zu einem der letzten großen Regenwälder Sumatras gehören, einem weitläufigen Naturschutzgebiet. Dort leben etliche vom Aussterben bedrohte Tierarten wie Sumatra-Tiger und -Nashorn. Ausgrabungen und systematische Geländebegehungen (Surveys) erfolgten von unterschiedlichen Standorten aus. Während wir zu Orten südlich des Sees mit Fahrzeugen gelangten, ließ sich das Serampas-Gebiet nur in ein- bis zweitägigen Fußmärschen erreichen. Einheimische Träger transportierten Gerätschaften sowie die Ausrüstung für fünf bis sechs Personen, die einen mehrwöchigen Aufenthalt in einer der entlegensten Dschungelregionen Sumatras planten. Endpunkt dieser für Europäer eindrucksvollen, aber auch strapaziösen Dschungelstrecke war das Dorf Renah Kemumu (siehe Bild S. 63 oben), wo unser Team Jahr für Jahr gastliche Aufnahme fand. Seine gut 400 Einwohner leben am Rand der Illegalität, da seit der Ausweisung ihres ursprünglichen Lebensraums als Naturschutzgebiet, dem 1990 eröffneten Kerinci Seblat National Park, jegliche Siedlungsaktivitäten offiziell untersagt sind. Bislang konnte sich das Dorf

allen Umsiedlungsbestrebungen widersetzen. Die archäologischen Reste einer weit zurückreichenden Vergangenheit lieferten ihnen ein Argument, da sie eine Siedlungstradition an diesem Ort bestätigen.

### Die vielfältige Megalithkultur Indonesiens

Pro Kampagne unterstützten durchschnittlich 25 Arbeiter die Ausgrabungen in der Umgebung des Dorfs, eine davon in unmittelbarer Nähe eines bei Feldarbeiten entdeckten Megalithen (siehe Bild S. 63 unten). Andere Mitarbeiter des Forschungsteams erkundeten gemeinsam mit einheimischen Führern das Gebiet. Dabei folgten sie beispielsweise Gerüchten um mystische Steine, die sich mitunter tatsächlich als Megalithen herausstellten.

Wir kartierten im Lauf der Kampagnen 21 dieser Monumente, von denen zuvor nur wenige bekannt und in offiziellen Verzeichnissen aufgeführt waren; etliche mehr dürften noch im Urwald verborgen sein. Die meisten Megalithen Sumatras und anderer Inseln Indonesiens stehen aufrecht und bilden Gruppen aus einigen wenigen bis zu mehreren hundert Exemplaren wie etwa auf der Insel Nias (siehe Bild S. 62 oben). Dagegen sind die Steine der Kerinci-Region ohne Ausnahme Einzelgänger und wurden zudem niemals aufgestellt, sondern liegend installiert.

Ihre Grundform ist konisch oder zylindrisch, wobei sie eine Länge von bis zu 4,5 Meter und einen Durchmesser von gut einem Meter erreichen. Auf den Oberflächen und trommelförmigen Enden entdeckten wir häufig Flachreliefs mit figürlichen oder geometrisch-floralen Darstellungen. Im Un-



Der Brauch, Megalithen zu errichten, war in Indonesien weit verbreitet. Meist wurden sie in Gruppen aufgestellt, wie die menschen- und pfeilerförmigen Steine auf der Insel Nias (Foto oben) oder der Megalith aus dem Mahat-Tal im Minangkabau-Hochland Sumatras (links). Aus der Region Pasemah stammt der liegende »Elefantenstein« (unten links), dessen plastisches Relief einen Krieger zeigt, der sich an den Ohren eines Elefanten festhält (hier nicht zu erkennen: Er trägt eine so genannte Kesseltrommel auf dem Rücken). Die Megalithen der Kerinci-Region hingegen wurden einzeln und liegend gesetzt (Foto unten rechts), sie weisen oft nur abstrakte Flachreliefs auf, wie dieses bei Pondok entdeckte Exemplar (Linien mit Kreide nachgezogen).



ALLE FOTOS: DIESEER/DOPPELSEITE, DOMINIK BONATZ

terschied dazu zieren Steine im Gebiet um Pasemah in Südsumatra zum Teil detailliert gearbeitete, aus dem Stein herausgearbeitete plastische Darstellungen. Die Minangkabau wiederum formten Pfeiler mit gekrümmtem Kopfende aus den Rohlingen (siehe Foto links, Mitte).

Auch hinsichtlich der mutmaßlichen Funktion zeigen sich Unterschiede. Die letztgenannten Megalithen markierten Begräbnisstätten. Ihre Form wurde später in der islamischen Zeit Sumatras bei Grabsteinen beibehalten. Das Volk der Toraja auf Sulawesi errichtet sogar heute noch Steine im Rahmen von Totenritualen, weshalb ihre Zahl an einem entsprechenden Kultplatz ständig zunimmt.

Die Megalithen in Kerinci waren offenbar etwas Besonderes, da sie stets solitär auftraten, meist an exponierten Stellen wie Bergrücken oder Talrändern. Archäologische Grabungen in ihrem unmittelbaren Umfeld brachten Scherben von Tongefäßen, Klingen aus Obsidian und Metallfragmente zum Vorschein, zudem Vertiefungen, in denen wohl einst Pfosten steckten. Da im Forschungsgebiet nach wie vor Pfahlhäuser gebaut werden, können wir aus deren Konstruktion auf die vor gut 1000 Jahren in dieser Region gebräuchlichen Techniken schließen (siehe Bilder S. 64 und 65 oben). Die Pfosten mussten witterungsbeständig sein, da sie in die Erde gerammt wurden und nicht auf Steinfundamenten aufsaßen, die Feuchtigkeit ferngehalten hätten. Als Baumaterial kommen deshalb theoretisch Eisenholz und Bambus in Frage. Letzterer ist allerdings weniger belastbar, was durch eine größere Zahl von Stützen hätte ausgeglichen werden müssen. Die Zahl der Eintiefungen und ihr Abstand zueinander zeigen, dass wohl meist Eisenholz verwendet worden ist.

### Ackerbau im Dschungel

In Pondok südlich des Kerinci-Sees belegen zwei Pfostenlöcher, die der Langseite eines Hauses vorgelagert waren, dass es dort einen speziellen Eingangsbereich gegeben haben muss. In einer Eintiefung in der Hausmitte entdeckten wir zudem ein Gründungsoffer: ein Tongefäß mit über 600 Glasperlen und einem eisernen Messer. Auch hier lässt sich eine Brücke in die Gegenwart schlagen: Opfergaben unter dem zentralen Hauspfosten sollen heute noch Ahnen oder Geister wohlgesinnt stimmen.

Die für das Hochland Sumatras typischen Reisfelder kamen erst im 18. Jahrhundert im Zuge der Kolonisierung auf. Umweltstudien zufolge wurden bis dahin durch Brandrodung Gärten für den Anbau von Feldfrüchten, vor allem von Knollengewächsen wie Taro oder Yams, angelegt, wie es in entlegeneren Regionen Kerincis nach wie vor üblich ist. Dass es in der Vergangenheit nicht anders war, zeigen Keramikfunde, die bei unseren Begehungen im Dschungel zu Tage kamen. Weil die Bauern sehr weite Wege zu ihren Feldern zurücklegen müssen, bleiben sie dort häufig für mehrere Tage und errichten Hütten. Nach zwei bis drei Jahren überlassen sie die Äcker wieder dem Dschungel, denn die Landwirtschaft laugt die Böden aus und der Ertrag sinkt. Diese Form der Feldwirtschaft verlangte eine mobile Lebensweise, bei

der das Dorf zwar den Mittelpunkt einer Lebensgemeinschaft bildete, der Nahrungserwerb jedoch teilweise fernab davon erfolgte. Die Vielzahl kleinerer, durch einfache Gebrauchskeramik gekennzeichneter Fundplätze entspricht also Siedlungskammern, das heißt von den Wäldern abgrenzbaren Bereichen menschlicher Aktivität, die sich nach den naturräumlichen Gegebenheiten richteten. Nun wird auch die Funktion der Megalithen verständlich: Sie markierten den Mittelpunkt einer solchen Kammer und unterstrichen die Bedeutung des zugehörigen Dorfes.

Ihre bislang gültige Datierung beruhte einzig auf ihren Ähnlichkeiten zu Monumenten des Mittelmeerraums und Westeuropas aus nachweislich prähistorischer Zeit. Einen



In der Kerinci-Region macht vor allem das Serampas-Tal (Foto oben), das zu einem Nationalpark gehört, jede archäologische Forschung zum Abenteuer. Die alten Siedlungsplätze liegen auf den umliegenden Kuppen, doch im dichten Dschungel lassen sich ihre Spuren vom Stützpunkt im Dorf Renah Kemumu aus (im Hintergrund zu sehen) nur in langen Fußmärschen entdecken. Doch die Mühe lohnt: Auf dem Bukit Batu Larung genannten Hügel, von dem aus das Bild aufgenommen wurde, kam ein weiterer Megalith zum Vorschein (unten). Um seine Funktion zu ergründen, graben die Archäologen mit einheimischen Arbeitern gemeinsam rund um den Stein nach Artefakten.

Ausgrabung am Megalithen von Pondok (im Hintergrund das über dem Stein errichtete Schutzhaus) brachten Pfostenlöcher zu Tage: Offenbar stand dort ein großes Pfahlhaus. Durch Vergleich mit einem in den Ausmaßen ähnlichen heutigen Gebäude (Foto ganz rechts) hat der Ingenieur Zámolyi Ferenc das Haus rekonstruiert (Grafik).



DOMINIK BONATZ

der wenigen Anhaltspunkte für eine realistischere Altersangabe liefern Reliefs auf Steinen aus Pasemah, die schon van der Hoop 1932 als Darstellung so genannter Kesseltrommeln identifiziert hatte. Diese im Original aus Bronze gefertigten und aufwändig dekorierten Kultgeräte wurden um die Zeitenwende von den Dongson in Nordvietnam gefertigt und als Prestigeobjekte im indonesischen Raum gehandelt; einheimische Metallhandwerker lernten schließlich, sie nachzubauen. Ein Fragment solch einer Kesseltrommel wurde 1936 südlich des Kerinci-Sees entdeckt. Wann es aber dorthin gelangte, ist genauso ungewiss wie das genaue Alter der erwähnten Reliefs.

Eindeutige archäologische Hinweise erbrachten erst unsere Ausgrabungen. So ließen sich Tonscherben aus der Umgebung der Megalithen mit Optischer Lumineszenz-Datierung, einer für Keramiken gut geeigneten physikalischen Technik, auf das 11. bis 13. Jahrhundert eingrenzen. Das deckt sich mit dem Alter einiger Importfunde, die im Hochland überraschen: Rund um die Megalithen kamen Porzellan und Steingut der chinesischen Song-Dynastie (960–1279) sowie indo-

pazifische Glasperlen aus dem 10. bis 14. Jahrhundert ans Licht. Demnach stammen die Monumente in Kerinci also aus der Blütezeit des Malayu-Königreichs. Dies ist das erste gesicherte Datum für einen der Megalithkomplexe auf Sumatra.

Aus jüngerer Zeit, als die islamischen Sultanate bereits die Nachfolge der buddhistischen Reiche angetreten hatten, stammt eine Redewendung, die vielleicht hilft, die Bedeutung der Megalithen in ihrem historischen Kontext zu verstehen: »Serah naik, jaja turun«, das bedeutet wörtlich übersetzt »Das Geschenk geht hinauf, der Tribut kommt herab«. Diese Formulierung beschreibt vermutlich auch die Beziehungen zwischen Hoch- und Tiefland in den Jahrhunderten zuvor: einen regen Gütertausch. Der Reichtum Srivijayas wie Malayus verdankte sich also dem Seehandel mit Produkten, die aus dem Hochland stammten.

## Auf den Spuren des ersten Hochlandkönigtums

**Adityawarman (1343–1375), Herrscher von Malayu,** ließ seine Hauptstadt von Jambi im Tiefland in das Hochland Sumatras verlegen, in das Gebiet des Volks der Minangkabau. Die Gründe dafür liegen noch im Dunkeln. Vermutlich hoffte er, dort besser vor den Angriffen seiner kriegerischen Nachbarn geschützt zu sein, vielleicht wollte er auch größeren Anteil am Goldreichtum dieser Region haben.

Vom Umzug des Königshofs zeugen Darstellungen des Herrschers als Wächtergottheit an den Reichsgrenzen (siehe Bild) sowie zahlreiche Inschriften auf Steinstelen, die in Sanskrit verfasst sind. Nur ein Teil davon wurde bislang übersetzt. Adityawarman rühmt sich darin, Tempel, Klöster und einen Palast gebaut sowie Bewässerungssysteme angelegt zu haben. Diese und andere Aktivitäten des Königs will ein Projekt archäologisch nachweisen, das 2010 unter der Leitung des Autors begann.



Auf dem Hügel Bukit Gombak am Rand des Hochtals Tanah Datar entdeckten die Forscher etliche Pfostenlöcher – ein Beleg, dass dort Häuser und vielleicht auch ein Palast standen. Scherben chinesischen Porzellans aus der späten Song- und Yuan-Periode (12.–14. Jahrhundert) zeugen von engen Kontakten zu den Überseemärkten Sumatras. Ob es sich um den Herrschaftssitz Adityawarmans handelt, lässt sich noch nicht sagen. Seine Beziehung zu anderen Fundplätzen – auch zu den Megalithen Kerincis – ist ebenfalls noch unklar. Parallel zu weiteren Grabungen wird der Sanskritexperte Arlo Griffiths von der École française d'Extrême-Orient das Inschriftenwerk Adityawarmans erstmals vollständig übersetzt. Ins Blickfeld der Forschung rücken dabei auch die Minangkabau, die wie alle Ethnien des Hochlands keine eigene Geschichtsschreibung besitzen – und von den Chronisten des Tieflands ungeachtet ihrer Bedeutung für den Wohlstand der Königreiche Sumatras weitgehend ignoriert wurden.



ZÄHM/ITERENC, MIT FRIEDL. GEN. VON DOMINIK BONATZ



DOMINIK BONATZ

Auch wenn dessen Bewohner der Redewendung zufolge Tribute zu entrichten hatten, waren sie wohl doch in einer strategisch günstigen Position. Die Täler waren schwer erreichbar, und die Ressourcen des Regenwalds zu nutzen, verlangte spezielle Kenntnisse. Ohne das »Geschenk« aus dem Tiefland kam also kein Handel zu Stande. Mochten die Mächtigen in Palembang und später Jambi auch in höfischer Rhetorik von Tribut sprechen – tatsächlich war es ein Tauschhandel. Während das Malayu-Reich seine Ansprechpartner zumindest unter anderem in der Kerinci-Region fand, dürfte Srivijaya zuvor im Hochland von Pasemah eingekauft haben. Denn seine Hauptstadt Palembang liegt geografisch näher an dieser Region, und die dortigen Megalithen erwecken zumindest durch die Art und Weise der Darstellung von Objekten der Dongson-Kultur den Eindruck eines höheren Alters.

Das Auftreten der Kerinci-Megalithen lässt sich letztlich als Folge der intensivierten Beziehungen zu den frühen Königreichen im Tiefland erklären. Mit einem Mal gewannen die Ressourcen des Regenwalds und das Gold in seinen Flüssen an Wert, der Zugriff darauf erhielt eine politische Dimension. Jäger und Sammler, die wie ihre Vorfahren Jahrhunderte zuvor den Regenwald durchstreift hatten, ohne Besitzansprüche anzumelden, gründeten Siedlungen und begannen mit dem Anbau von Feldfrüchten. Denn wer vom Prestige und Reichtum profitieren wollte, den die »Geschenke« aus dem Tiefland verschafften, blieb von nun an in seinem Territorium und schützte es vor dem Eindringen anderer. Niederlassungen entstanden dort, wo Flussläufe und Gebirgstäler den Handel erleichterten. Wahrscheinlich organisierten sich die Siedlungen in Form von Dorfallianzen. Den ideologischen Mittelpunkt einer solchen Zweckgemeinschaft bildete der Megalith, der ihr Territorium markierte und ihren Anspruch auf dauerhafte Präsenz unterstrich.

Allein der Transport eines tonnenschweren Steins und seine Bearbeitung verlangen viele starke Helfer und gute Planung. Bei den letzten aktiven Megalithkulturen Indonesiens, zum Beispiel auf Sumba in Ostindonesien oder auf der Insel Nias vor der Westküste Sumatras, sind es in der Regel einflussreiche Gesellschaftsmitglieder, die ein solches Unternehmen leiten. Mit der Errichtung eines Steins erwerben sie sich besonderes Verdienst; der Stifter lebt durch ihn symbolisch

als Ahne im Gedächtnis der Gemeinschaft fort. In ähnlicher Weise dürfte auch die Errichtung der Megalithen in Kerinci und der Region Pasemah die Sozialstruktur der Gemeinschaften beeinflusst haben. Dafür spricht ebenfalls ein Edikt des Sultans von Jambi, der im 18. Jahrhundert die offenbar gängige Praxis der Verehrung von Steinen verbot.

Nicht nur der Aufstieg, auch der Untergang von Malayu am Ende des 14. Jahrhunderts spiegelt sich im archäologischen Befund: Importwaren finden sich immer seltener und fehlen in Siedlungen des 15. Jahrhunderts ganz, denn Kerinci verlor seinen Handelspartner. Wahrscheinlich endete damit der Brauch, Megalithen aufzustellen. Heute ersetzen Mythen alles Wissen über ihre Geschichte. Besonders populär ist in Kerincis Dörfern die Erzählung von hinduistischen Göttern, die einst auf den Vulkanen Sumatras thronten und sich im Streit mit den Steinen bewarfen. Erst die Archäologie erinnert wieder an eine Zeit, in der die Dörfer des Hochlands den Königreichen des Tieflands zu ihrem glanzvollen Aufstieg verhalfen. ~

#### DER AUTOR



**Dominik Bonatz** ist Professor für Vorderasiatische Archäologie an der Freien Universität Berlin. Neben einer Ausgrabung in Syrien leitet er seit 2003 archäologische Untersuchungen auf Sumatra. Mit der Forschung in zwei unterschiedlichen geografischen Regionen verbindet sich das Interesse am Kulturvergleich und am Transfer politischer, religiöser und künstlerischer Konzepte.

#### QUELLEN

- Bonatz, D. et al. (Hg.):** From Distant Tales. Archaeology and Ethnohistory in the Highlands of Sumatra. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle upon Tyne 2009
- Brinkgreve, F., Sulistianingsih, R. (Hg.):** Sumatra. Crossroads of Cultures. KITLV Press, Leiden 2009
- Miksic, J. (Hg.):** Indonesian Heritage: Ancient History. Edition Didier Millet, Singapur 2003
- Ptak, R.:** Die maritime Seidenstraße. C.H.Beck, München 2007

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146813](http://www.spektrum.de/artikel/1146813)

RAUMFÜLLUNGEN

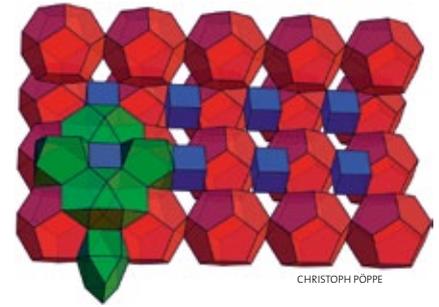
# Wundergarten der Polyeder

Räumliche Körper fügen sich auf überraschende Weise zu neuen Gebilden zusammen.

VON NORBERT TREITZ

Im Märzheft bin ich einem Zusammenhang zwischen geometrischen Körpern nachgegangen, die auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun haben. Einerseits lassen sich reguläre Dodekaeder, jene platonischen Körper, die von zwölf regelmäßigen Fünfecken be-

grenzt sind, Kante an Kante in einem periodischen Gitter anordnen. Dabei stellt sich heraus, dass die Lücken zwischen ihnen präzise durch andere Körper gefüllt werden, die ihrerseits von regelmäßigen Vielecken begrenzt werden; alle vorkommenden Vielecke ha-



CHRISTOPH POPPE

Ein Ausschnitt der Raumfüllung mit Dodekaedern (rot), Würfeln (blau) und Bilunabirotunden (grün). Ein Würfel hat an jeder Ecke Kontakt mit einem Dodekaeder; jedes Dodekaeder hat entlang einer ganzen Kante Kontakt mit acht seinesgleichen (siehe die Darstellung im Märzheft).

ROBERT WEBB (SOFTWARE)3D.COM/STELLA.HTML; PRISMA UND ANTIPRISMA UNTEN: MATHWORLDWOLF.COM/JOHNSONSOLID.HTML

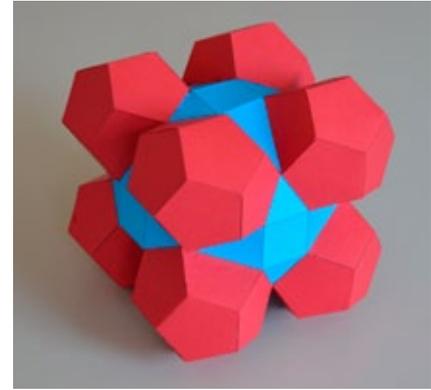
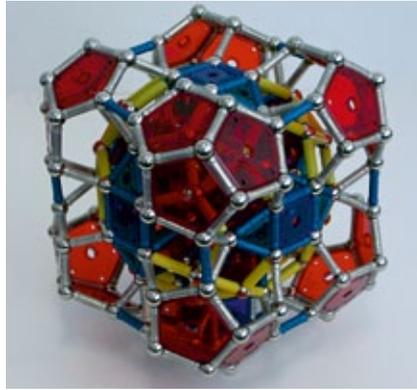
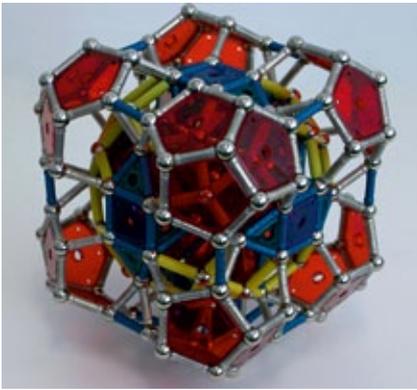
Tetraeder (3, 3, 3)	Würfel (4, 4, 4)	Oktaeder (3, 3, 3, 3)	Dodekaeder (5, 5, 5)	Ikosaeder (3, 3, 3, 3, 3)
Tetraederstumpf (3, 6, 6)	Würfelstumpf (3, 8, 8)	Oktaederstumpf (4, 6, 6)	Dodekaederstumpf (3, 10, 10)	Ikosaederstumpf (5, 6, 6)
Kuboktaeder (3, 4, 3, 4)	kleines Rhombenkuboktaeder (3, 4, 4, 4)	Ikosidodekaeder (3, 5, 3, 5)	kleines Rhombenikosidodekaeder (3, 4, 5, 4)	
großes Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8)	schiefer Würfel (3, 3, 3, 3, 4)	großes Rhombenikosidodekaeder (4, 6, 10)	schiefes Dodekaeder (3, 3, 3, 3, 5)	
achtseitiges Prisma (4, 4, 8)	fünfsseitiges Antiprisma (3, 3, 3, 5)			

Die platonischen (oberste Zeile) und die archimedischen Körper, sortiert nach Familien. Alle Mitglieder einer Familie haben dasselbe Sortiment an Symmetrien. Aus den unendlichen Familien der Prismen und Antiprismen sind das vierseitige Prisma (der Würfel) und das dreiseitige Antiprisma (das Oktaeder) zugleich platonische Körper.

ben die gleiche Kantenlänge. Bei den Lückenfüllern handelt es sich pro Dodekaeder um einen Würfel sowie drei Exemplare eines hübschen, wenig bekannten Körpers aus zwei Quadraten, acht Dreiecken und vier Fünfecken namens Bilunabirotunda, der Thema des Artikels im März war (Bild oben).

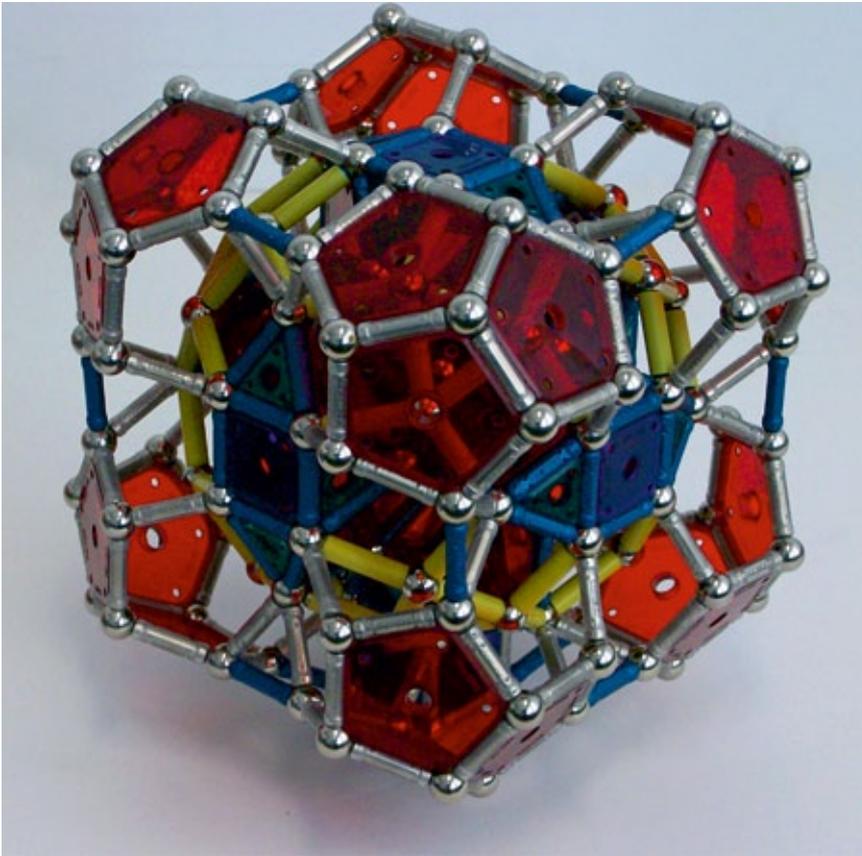
Andererseits lässt sich die Zusammensetzung aus einem Würfel und sechs Bilunabirotunden auf quasi natürliche Weise zu einem archimedischen (halbregelmäßigen) Körper ergänzen. Da sein Name »kleines Rhombenikosidodekaeder« wenig erhellend ist und obendrein nicht einheitlich verwendet wird, nennen wir ihn lieber (3, 4, 5, 4), was seine »Eckenfigur« kennzeichnet: An jeder Ecke liegen ein Dreieck, ein Viereck, ein Fünfeck und ein Viereck – in dieser Reihenfolge. Das Bild rechts zeigt beide Beziehungen ineinander verschränkt.

Leider lässt sich diese bemerkenswerte Übereinstimmung nicht in eleganter Weise fortsetzen. Man kann zwar aus der Raumfüllung mit Dodekaedern, Würfeln und Bilunabirotunden in periodischer Weise kleine Rhombenikosidodekaeder ausschneiden. Dabei bleibt zwischen zweien von ihnen jeweils ein Würfel als Abstandhalter stehen. Aber die Dodekaeder und die nicht verwen-



CHRISTOPH KOPPE

DREI FOTOS: NORBERT TREITZ



deten Bilunabirunden werden in unansehnliche Teile zerschnitten, was der ganzen Sache etwas von ihrem Reiz nimmt.

Einerlei – es gibt erstaunlich viele Möglichkeiten, mehr oder weniger regelmäßige Körper zu periodischen Füllungen des Raums zusammenzusetzen oder neue Körper zu erzeugen, indem man von einem Körper einen anderen, kleineren wegschneidet. Je symmetrischer die Beteiligten, desto größer ist das Erstaunen, wenn eine solche Anordnung beziehungsweise Zerlegung tatsächlich funktioniert.

Ein bisschen Systematik ist hilfreich, um in der Vielfalt der Polyeder, das heißt von ebenen Flächen begrenzten Körper, den Überblick nicht zu verlieren.

Die höchsten Forderungen an die Regelmäßigkeit und damit Symmetrie erfüllen die fünf platonischen Körper. Sie sind konvex, das heißt, die Verbindungslinie zweier Punkte des Körpers verläuft stets durch das Innere des Körpers; sie sind begrenzt von lauter gleichen, regelmäßigen Vielecken; und alle Eckenfiguren sind gleich, das heißt, um jede Ecke herum liegen dieselben Flächen in derselben Anordnung.

In der Mitte dieses Gebildes (Stereobildpaar links oben; darunter dessen linkes Bild vergrößert) sitzt ein (unsichtbarer) Würfel mit sechs angrenzenden Bilunabirunden. Von deren Außenflächen sind ein Quadrat und zwei angrenzende Dreiecke durch blaue Flächen dargestellt. Die gelben Stangen ergänzen diese Flächen zu einem kleinen Rhombenikositodekaeder (3, 4, 5, 4). Die acht Dodekaeder, die den zentralen Würfel in je einer seiner Ecken berühren, ragen zu etwas mehr als der Hälfte aus dem (3, 4, 5, 4) heraus. Je drei ihrer äußeren Fünfecksflächen sind durch rote Scheiben realisiert. In der Ausführung mit undurchsichtigen Flächen (oben) sind vom (3, 4, 5, 4) nur noch wenige Flächen (teilweise) sichtbar (blau).

Lässt man Vielecke verschiedener Arten in ein und demselben Körper zu, hält jedoch die anderen Bedingungen aufrecht, so ergeben sich die archimedischen Körper. Deren gibt es 13 Stück plus die unendlich vielen von regulären Vielecken begrenzten Prismen und Antiprismen (Bilder ganz links). Auch diese »halbregelmäßigen« Körper sind durch die Angabe ihrer einzigen Eckenfigur bereits eindeutig bestimmt; zum Beispiel ist (3, 4, 5, 4) das kleine Rhombenikositodekaeder.

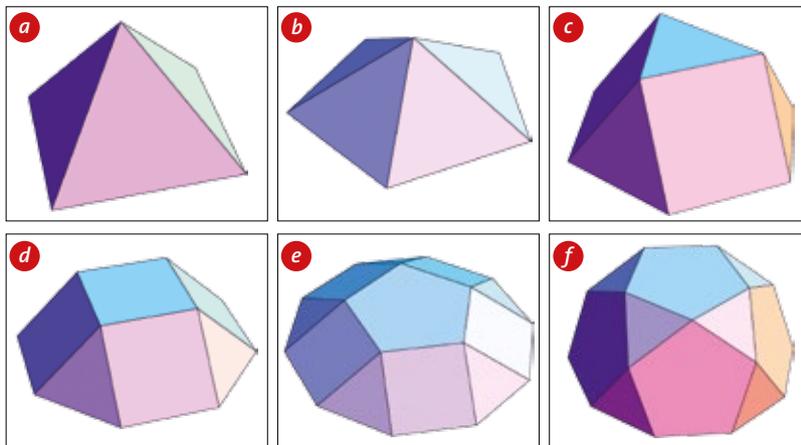
Lässt man darüber hinaus die Forderung nach Gleichheit aller Eckenfiguren fallen, so gewinnt man das unübersichtliche Sortiment der 92 Johnson-Polyeder hinzu, aus dem die Bilunabirunden da die Nummer 91 ist. Von ihnen brauchen wir für unsere Zwecke vor allem die Pyramiden, die Kuppeln und die Runde (Kasten S. 68).

## Die einfachsten Johnson-Polyeder

Die Liste der 92 Polyeder, die Norman Johnson 1966 aufstellte, beginnt mit der vierseitigen Pyramide nach altägyptischer Art (a); die dreiseitige Pyramide ist das platonische Tetraeder und daher nicht in der Liste enthalten). Es folgt die fünfseitige Pyramide (b); eine sechs- oder mehrseitige wäre mit der Forderung nach einheitlicher Kantenlänge nicht zu vereinbaren.

Eine  $n$ -zählige Kuppel hat ein reguläres  $2n$ -Eck als Boden und ein  $n$ -Eck als Dach. Als Seitenwände benötigt man dann  $n$  Quadrate und  $n$  gleichseitige Dreiecke. Kuppeln gibt es für  $n=3$  (c), 4 (d) und 5 (e).

Eine Alternative zur fünfzähligen Kuppel ist die noch etwas schönere Rotunde (f). Man bekommt sie durch Halbieren des Ikosidodekaeders (3, 5, 3, 5). Bei ihr ist der Abstand zwischen Boden und Decke, also zwischen dem Zehneck und dem dazu parallelen Fünfeck, größer als bei der Kuppel, und zwar genau um die Höhe des fünfzähligen Antiprismas. Die Eckenfigur aus zwei regulären Fünfecken und den zwei Dreiecken dazwischen tritt im (3, 5, 3, 5) ebenso auf wie in der Rotunde und in der Bilunabironda und hat zum Namen der Letzteren beigetragen.



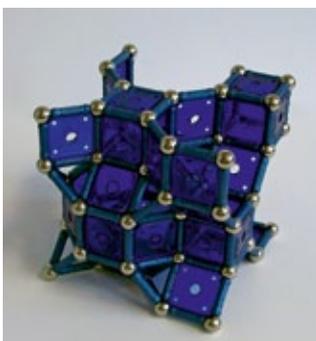
MATHWORLDWOLFRAM.COM/JOHNSONSOLID.HTML

Gibt man schließlich auch noch die Forderung nach Konvexität auf, so öffnet man einer unübersehbaren Vielfalt Tür und Tor. Bonnie Stewart, Mathematikprofessor an der Michigan State University, hat in jahrelanger Kleinarbeit die schönsten unter ihnen aufgelistet, weswegen symmetrische Polyeder mit Hohlräumen heute allgemein Stewart-Toroide heißen.

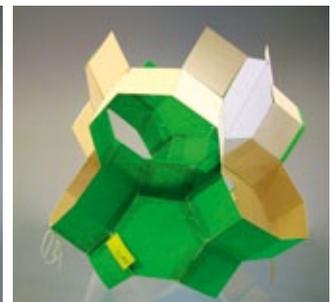
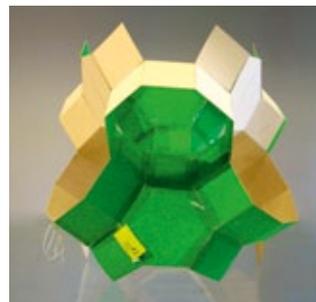
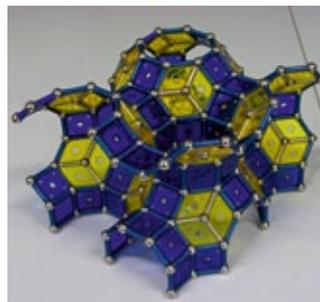
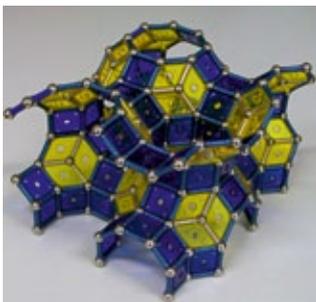
Früher gab es Milch- und Safttüten in Tetraederform, die lückenlos einen Behälter in Form eines sechsseitigen Prismas füllten. Aber das funktionierte nur, weil die Tütenkanten nicht genau gleich lang waren. Das reguläre Tetraeder allein, das heißt nur zusammen mit seinesgleichen, ist kein Raumfüller, wohl aber in Kombination mit dem regulären Oktaeder (3, 3, 3, 3) oder dem Tetraederstumpf (3, 6, 6) oder auch dem Würfelstumpf (3, 8, 8). Interessante Raumfüllungen ergeben sich auch durch Kombination von mehr als zwei verschiedenen Körpern (Bilder unten).

### Schwammpolyeder: Ein Universum für zwei verfeindete Insektenstämme

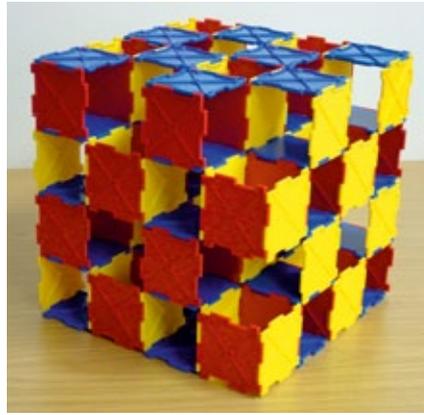
Das große Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8) ist zu kugelhähnlich, um den Raum zu füllen. Einerlei wie man zwei von ihnen aneinandersetzt, der Spalt zwischen ihnen ist zu eng, um noch ei-



Links eine raumfüllende Elementarzelle aus vier kleinen Rhombenkuboktaedern (3, 4, 4, 4), vier Würfeln (4, 4, 4) und acht Tetraedern (3, 3, 3). Eine Raumfüllung aus großen Rhombenkuboktaedern und achtseitigen Prismen führt auf eine Zerlegung des Raums in zwei deckungsgleiche, einander vielfach umschlingende Teilräume. Im Geomag-Modell (links unten) ist jedes Sechseck aus drei Rauten zusammengesetzt; in der Kartonversion (unten) kann ein Ameisenvolk mit gelben, das andere mit grünen Wänden leben.



FOTOS DIESER DOPPELSEITE: NORBERT TREITZ



In diesem Jovo-Modell des einfachsten Schwammpolyeders aus Würfeln hat der eine Teilraum ausschließlich glatte Wandseiten, der andere genau deren gerippte Rückseiten.

nem weiteren Exemplar Platz zu bieten. Aber wenn man auf die Achtecke lauter achtseitige Prismen (4, 4, 8) als Abstandshalter aufsetzt, ergibt sich eine perfekte Raumfüllung.

Wer diese mit einem Baukasten (zum Beispiel Jovo) aus flächigen Bauteilen herstellen will, kommt fast von selbst auf die Idee, die Achtecke wegzulassen, vor allem wenn der Baukasten die gar nicht hat. Und siehe da – alle übrigen Wände zusammen teilen den Raum in zwei deckungsgleiche, gegeneinander versetzte Hälften. Man kann sich in jeder von ihnen ungehindert bewegen, kommt aber nie von der einen Hälfte in

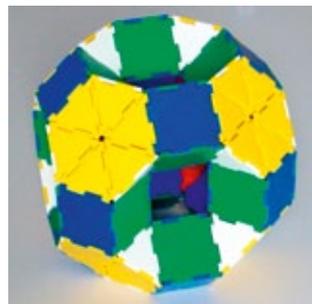
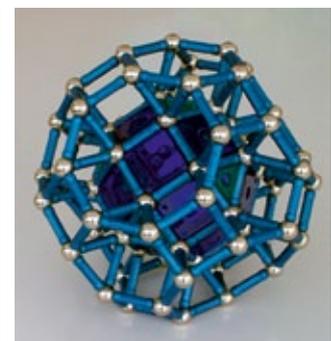
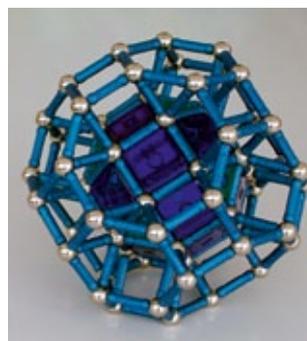
die andere. Man könnte also zwei Insektenstämme voneinander isoliert in den Hälften unterbringen oder die beiden Seiten aller Wände in verschiedenen Farben anmalen, so dass in jeder Hälfte nur eine Farbe zu sehen ist (Bilder links unten). Die beiden Teilräume umschlingen sich gegenseitig, ohne Inseln zu bilden, vergleichbar mit den Teilräumen, die in einem Schwamm von Gummi und Luft eingenommen werden.

Man verwandle durch gezieltes Entfernen von Wänden eine Raumfüllung in ein Schwammpolyeder: Das funktioniert auch mit der einfachsten unter ihnen. Zerschneidet man eine Würfel-

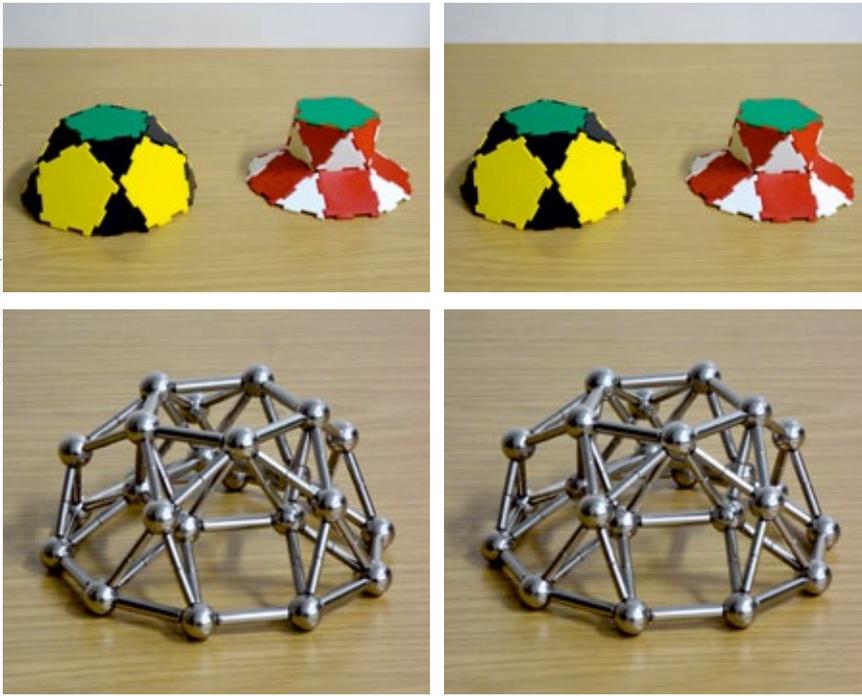
packung entlang einer ihrer Ebenen, so gleicht die Schnittfläche einem unendlich großen Schachbrett. Man setze einen Presslufthammer auf jedes schwarze Feld an und breche nicht nur dieses heraus, sondern alle Wände, die dem – unendlich langen – Hammer auf seinem Weg begegnen. Das tue man für alle drei Koordinatenrichtungen. Dadurch entstehen in der ehemaligen Würfelpackung lauter unendlich lange Gänge, während quer zu deren Laufrichtung die Wände so dicht stehen wie nur möglich. Wieder ergeben sich zwei Teilräume für die friedliche Koexistenz verfeindeter Ameisenvölker (Bild links).

Zum selben Ergebnis kommt man auch auf völlig anderem Weg. Man betrachte die Summe der an einer Ecke anliegenden Winkel. Sind es weniger als 360 Grad, so kann man die dort angrenzenden Vielecke – denken wir sie uns aus Papier – in den Raum hochfalten, woraus sich – manchmal – ein platonischer Körper ergibt. Sind es mehr, was zum Beispiel bei sechs Quadraten der Fall ist, dann muss man die Vielecke teils nach oben, teils nach unten falten, damit sie überhaupt zusammenpassen. Die Forderung, dass obendrein alle Eckenfiguren gleich sein sollen, führte 1926 den Mathematiker Donald Coxeter (1907–2003) und den Ägyptologen

Um gibt man das kleine Rhombenkuboktaeder (3, 4, 4, 4) mit Würfeln sowie Dreier- und Viererkuppeln (rechts), so ergibt sich das große Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8). Das Jovo-Modell (unten links) zeigt aus Mangel an Achtecken das Toroid aus den Würfeln und den dreizähligen Kuppeln: An die Stelle der Viererkuppel treten sechs Löcher, die den Weg von außen zum hohlen (3, 4, 4, 4) eröffnen. Im Modell aus Fensterfolie (unten rechts) hat man viel größere Freiheiten, ein Bauteil wegzulassen oder auch nicht.



FOTOS: DIESE R. DOPPELSEITE (SO FERN NICHT, ANDERS ANGELEBEN), NORBERT TREITZ



Flinders Petrie (1853–1942) zur Entdeckung der unendlich ausgedehnten Polyeder, die sie »skew polyhedra« nannten (Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 66; siehe auch die bewegten Bilder in dem Artikel »Regular skew polyhedra« der englischen Wikipedia).

**Vom kleinen zum großen archimedischen Rhombenkörper**

Die archimedischen Körper, deren Namen mit »Rhomb« beginnen, kommen in beiden großen Familien vor, das heißt, manche haben die Symmetrie des Würfels und des Oktaeders, andere diejenige des Dodekaeders und des Ikoeders (Bilder S. 66). Mehr noch: Es gibt sie in beiden Familien in einer kleinen und einer großen Version.

In der Tat ist bei gleicher Kantenlänge das große Rhombenkuboktaeder

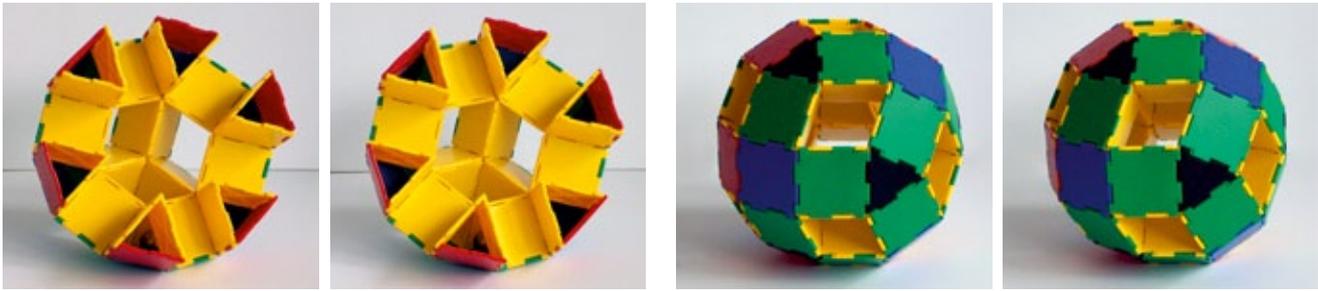
Eine Rotunde und ein Hut (fünzfählige Kuppel mit aufgesetztem fünfseitigem Antiprisma) haben genau die gleiche Höhe und können als Außen- und Innenwand eines Stewart-Toroids (unten) dienen. Wegen der kleinen Winkel an Boden und Deckel erfordert die Konstruktion besonders dünne Magnetstäbe.

Dieses Stewart-Toroid (a: im halb fertigen Zustand, b: mit Blick auf eine Rotunde, c: mit Blick auf einen Hut und d: mit Kugeln und Magnetstäbchen), das zwischen dem (3, 4, 5, 4) und dem (4, 6, 10) vermittelt, hat sechs Rotunden und sechs Hüte. Das Papiermodell (rechts) zeigt die hochsymmetrische Variante mit zwölf Rotunden.



CHRISTOPH POPPE





Dieses »schräge« Toroid entsteht aus dem Rhombendodekaeder durch Aufsetzen von Tetraedern, vierseitigen Pyramiden und dreiseitigen Prismen. In diesem Modell (links im halb fertigen Zustand) ist das Rhombendodekaeder selbst »leer«; ausgeführt sind nur die sichtbaren Wände der aufgesetzten Körper.

(4, 6, 8) größer als das kleine (3, 4, 4, 4). Beide haben die volle Symmetrie von Würfel und Oktaeder. Aus dem kleinen gewinnt man das große, indem man ihm Körper aus unserem Sortiment aufsetzt. Auf jedes seiner acht Dreiecke kommt eine dreizählige Kuppel, auf jene sechs Quadrate, die nur mit Quadraten Kanten gemeinsam haben, setzt man vierzählige Kuppeln und auf die restlichen zwölf Quadrate jeweils einen Würfel (Bilder S. 69 unten).

Aus dem kleinen Rhombenikositodekaeder (3, 4, 5, 4) kann man nach demselben Muster ein großes machen, indem man jedem seiner Fünfecke eine Rotunde aufsetzt. Damit sitzen die Zehnecke des großen Rhombenikositodekaeders (4, 6, 10) bereits an der richtigen Stelle. Die restlichen Flächen kann man allerdings nicht auf elegante Weise mit Johnson-Polyedern besetzen.

Auch die fünfzählige Kuppel vermittelt zwischen Fünf- und Zehneck, diesmal mit je fünf Drei- und Vierecken. Aber Kuppeln werden mit zunehmender Seitenzahl immer flacher, und die Fünferkuppel kommt ihrer sechsseitigen Kollegin, die im Wortsinn flachfällt, schon gefährlich nahe. Erst wenn man ihr ein fünfseitiges Antiprisma aufsetzt, ergibt sich eine Art Hut, der an einen Lautsprecher erinnert; und der ist wundersamerweise genauso hoch wie die Rotunde. Man kann die beiden Körper ineinanderstecken und bekommt ein Stewart-Toroid in Form eines doppelwandigen Lampenschirms (Bilder S. 70 oben).

Wenn man also die beiden Rhombenikositodekaeder in passender Ori-

entierung zentriert, passen zwischen je ein Fünfeck des inneren und ein Zehneck des äußeren wahlweise eine Rotunda oder ein Hut. Lässt man alle Zehnecke und Fünfecke weg und setzt entweder zwölf Rotunden oder aber zwölf Hüte ein, so erhält man ein Stewart-Toroid mit voller Symmetrie. Zahlreiche Varianten ergeben sich, indem man Rotunden und Hüte gemischt verwendet (Bilder S. 70 unten).

### Quadrate mit schiefen Fenstern

Wenn man aus Jovo-Bauteilen (bei denen als Vierecke nur Quadrate vorkommen) von einem Würfel lediglich die vier Seitenwände baut und Boden und Decke weglässt, sind die beiden fehlenden Flächen nur als Rauten festgelegt und noch nicht als Quadrate. Auf diese Weise bin ich zufällig auf ein toroidales Polyeder gestoßen, das als »echte« Wände nur gleichseitige Dreiecke und Quadrate hat, aber als frei bleibende Flächen auch Rauten und als Hohlräume gerade Prismen über Rauten enthält. Alle Rauten haben die Wurzel aus 2 als Verhältnis der Diagonalenlängen.

Der Kern des Körpers ist ein Rhombendodekaeder, das von zwölf solchen Rauten gebildet wird. Es hat 14 Ecken; in sechs von ihnen (den »spitzen« Ecken) treffen sich vier Rauten mit den spitzwinkligen Ecken. Die restlichen acht Ecken sind »stumpf«; dort stoßen je drei Rauten mit ihren stumpfwinkligen Ecken zusammen. Das Rhombendodekaeder hat eine Vielzahl interessanter Eigenschaften. So ist es ein Raumfüller (SdW 11/2007, S. 36), und eine Raumfüllung mit diesen Körpern wird durch ge-

zieltes Wegnehmen von Wänden ebenfalls zu einem Ameisenhügel, in dem zwei Insektenstämme friedlich und berührungslos koexistieren können.

Jetzt kommt wieder etwas (gedankliche oder echte) Bastelarbeit: Wir stellen aus Jovo-Teilen zwölf decken- und bodenlose Würfel her und setzen sie mit einer ihrer Öffnungen auf die rautenförmigen Flächen eines Rhombendodekaeders. Die jeweils andere Öffnung liegt an der Außenseite des so entstandenen Gebildes und ist ebenso rautenförmig. Die Lücken, welche die verzerrten Würfel auf der Außenseite zwischen sich lassen, lassen sich wunderschönerweise genau mit regelmäßigen Vielecken zudecken: ein Quadrat (grün im Bild oben) über jeder der 24 Kanten des Rhombendodekaeders, ein Quadrat (blau) über jeder spitzen Ecke und ein Dreieck (schwarz) über jeder stumpfen. So ergibt sich ein Toroid mit rautenförmigen Löchern. ~

### DER AUTOR



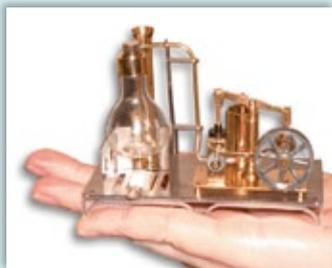
**Norbert Treitz** ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146812](http://www.spektrum.de/artikel/1146812)



## Unser besonderer Tipp:



### DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50 (D), € 149,50 (A)

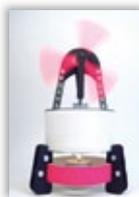
Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769.

Dieser Maschinentyp wurde zunächst zum Pumpen von Wasser aus Bergwerken eingesetzt, später auch als Antriebsmaschine in Fabriken. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfcondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

### DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50 (D), € 136,50 (A)



### STIRLINGMOTOR MIT TEELICHT-ANTRIEB

Bausatz für Tüftler ab 14 Jahre

Ca. 150 Einzelteile, ausf. Anleitung, aufgebaut knapp 25 cm hoch, Kraul

Bestell-Nr. 3520

€ 38,- (D), € 38,- (A)

Dieser Stirlingmotor entsteht buchstäblich aus der Dose, in der er verpackt ist. Angetrieben wird er durch die Wärme eines Teelichts und der Luftkühlung. Für den Zusammenbau der ca. 150 Teile brauchen Bastler 2-3 Stunden. Die gründliche Anleitung mit exakten Bildern führt Schritt für Schritt zum fertigen Motor. Zusätzlich benötigt werden nur einfache Werkzeuge und ein Teelicht.



### STIRLING-AUTO A1 – FERTIGMODELL

Schrauben aus Edelstahl, Seitenteile aus poliertem Edelstahl, Räder aus Vollmessing mit rundem Gummibelag, Gabel und Kühlergrill aus Aluminium,

Maße: 13 x 16 x 8,7 cm, Gewicht: 1.200 Gramm, Böhm

Bestell-Nr. 3475 € 398,- (D), € 398,- (A)

Robert Stirling, der Erfinder des Stirlingmotors, und Carl Benz haben eines gemein: Sie erhielten Patente für außergewöhnlich revolutionäre Technik. Im Stirling-Auto A1 wurden die Ideen dieser beiden Entwickler zusammengeführt. Die feinen Messingspitzen erinnern an die Pickelhauben aus der Kaiserzeit und an die antiken Automobile aus der Zeit um 1885.

Weitere Infos finden Sie unter:

[www.science-shop.de/artikel/1130551](http://www.science-shop.de/artikel/1130551)

Auch als Bausatz lieferbar:

### STIRLING-AUTO A1 – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3474 € 398,- (D), € 398,- (A)



### PLATONISCHE KÖRPER – EXPERIMENTIERKASTEN Geometrie im Raum

30 Messingröhrchen, 63 Messingdrahtstifte, Schnur, transp. Perlondraht, Kraul

Bestell-Nr. 3270 € 44,- (D), € 44,- (A)

Tetraeder, Würfel, Oktaeder, Dodekaeder und Ikosaeder sowie verwandte Körper können aus Messingröhrchen aufgebaut werden. Im Inneren dieser Gebilde entstehen durch eingespannte farbige Schnüre neue geometrische Figuren. Das Anleitungsheft führt anschaulich in die klassische Raumgeometrie ein. Ab 14 Jahren

Besuchen Sie uns im Internet unter: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)



### FASTFOOD NaCl – SALZSTREUER AUF RÄDERN

Ei auf Rädern, Salzstreuer, Porzellan /Kunststoff, mit Rückziehmotor, weiß mit farbigem Aufdruck;

L x B x H: ca. 6 x 5,5 x 6,5 cm, Troika

Bestell-Nr. 3540 € 27,- (D), € 27,- (A)

»Kannst du mal bitte das Salz rüberrollen?« Wenn Sie das am Tisch hören, dann ist *Fastfood* im Spiel, das rollende Salzstreuer-Ei aus Porzellan. Der unsichtbare Rückziehmotor macht es zum Geschmacksflitzer auf jedem Tisch. Das Salz in der Suppe (oder auf dem Ei) des modernen Lebens.

Neues Design: bedruckt mit Rennstreifen und »NaCl«

Ebenfalls lieferbar ohne Aufdruck in weiß:



### FASTFOOD – SALZSTREUER AUF RÄDERN

Bestell-Nr. 3317 € 27,- (D), € 27,- (A)



Ulrich E. Stempel

### LERNPAKET EXPERIMENTE MIT ULTRASCHALL

2012, 2 Ultraschallsensoren, 2 Steckboards, Fledermausohr und viele Bauteile, Experimentierhandbuch mit 160 S., Franzis

Bestell-Nr. 3533 € 49,95 (D), € 49,95 (A)

Dieses Lernpaket vermittelt die Grundlagen der Ultraschalltechnik und führt Sie mit spannenden Experimenten zu vielen interessanten Einsatzmöglichkeiten. Große Vorbereitungen sind nicht notwendig – Sie können sofort loslegen und forschen. Dabei lernen Sie auch die Hintergründe praktischer Ultraschallanwendungen kennen, die aus unserem modernen Alltag nicht mehr wegzudenken sind – sei es in der Medizin oder im wissenschaftlich-technischen Bereich. Hier werden neue, verblüffende und oft wegweisende Möglichkeiten entwickelt. Löten nicht erforderlich.



### POWERLUX – LEUCHTLUPE KALTWEISS

Linsengröße: Ø 58 mm, cera-tec®, Vergrößerung:

28 dpt / 7x (Doppellinse), punktgenaue Ausleuchtung, Abschaltautomatik nach 30 Min., Lichtfarbe: kaltweiß, ca. 8000 K, Hartschaumetui. Benötigt werden 3 Mignon Batterien, im Lieferumfang enthalten, made in Germany, Eschenbach

Bestell-Nr. 3476 € 99,- (D), € 99,- (A)

Die neue Generation der Leuchtlupe – in einer neuen geometrischen Gestaltung: kompakt, robust, bequem, vertraut. Die einzigartige und vertraute Form der Computermaus hat sich millionenfach bewährt und sorgt für eine entspannte Handhaltung auch bei längerem Gebrauch.

- liegt sehr gut in der Hand
- sehr einfache, intuitive Führung auf dem Lesegut durch kompakte Bauform
- gleichmäßig helle und blendfreie Ausleuchtung durch zwei SMD-LED



### JELLYFISH-LAMPE Das LED-Wunder mit Touchpad-Steuerung

Die Lampe besteht aus einer oberen Anzeigefläche (schwarz), einer unteren Röhre (transparent), einer Berührungsfläche, einer Anschlussfassung und einem beigelegten WS-Adapter

(100-Volt- bis 240-Volt-Eingabe, Wechselstrombetrieb), Durchmesser ca. 23 cm, Yantouch

Bestell-Nr. 3495 € 139,95 (D), € 139,95 (A)

Die JellyFish-Lampe ist der absolute Hingucker. Sie ist besonders edel, hochwertig verarbeitet und wertet jede Räumlichkeit auf. Ob Wohnzimmer, Schlafzimmer, Bar oder Ihr Geschäft, die JellyFish-Lampe lässt es in neuem Licht erstrahlen. JellyFish ist die erste und einzige Lampe, die Sie selbst über ein Touchpad ganz leicht bedienen können. Wählen Sie eine aus 16 Millionen Farben – je nach Laune, Lieblingsfarbe oder Ihrer Inneneinrichtung.

Bequem bestellen:

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



**MICRO HELICOPTER X-RAZOR GSY RTF**  
**Ready-to-fly-Helikopter**  
 195 x 125 x 104 mm, Ø Rotor 190/32 mm, rot, Revell Control

**Bestell-Nr. 3336 € 49,95 (D), € 49,95 (A)**

Ready-to-fly-4-Kanal-IR-Helikopter mit stabiler, sehr attraktiver Rumpfgestaltung aus Aluminium-Leichtmetall mit seitlichen Zusatzrotoren, die seitwärts Flugbewegungen zulassen. Zusammen mit dem elektronischen Kreislagesystem (GSY) lässt sich dieser Hubschrauber kinderleicht und sehr realistisch fliegen! Er ist nur für den Innenbereich geeignet. Altersempfehlung: ab 15 Jahre / Einsteigermodell.



**FLUGTECHNIK EXPERIMENTE – EXPERIMENTIERKASTEN**  
**9 verschiedene Experimente**

2011, enthält Material für 9 Experimente, HCM Einzel

**Bestell-Nr. 3448 € 11,95 (D), € 11,95 (A)**

Warum fliegt ein Flugzeug, wie funktioniert ein Propeller, und warum fällt eigentlich ein Fallschirm langsam zu Boden? Die Antworten auf diese Fragen finden Sie mit diesem Experimentierset. Es enthält 9 verschiedene Experimente, die sich ganz um das Thema Flugtechnik drehen und deren Grundprinzipien spielerisch erklären. Für Kinder ab 8 Jahren. Achtung, verschluckbare Kleinteile, nicht für Kinder unter 3 Jahren geeignet!



**LEONARDO DA VINCI VITRUV MANN, HOLZBAUSATZ**

13 Einzelteile, L x B x H: 210 x 210 x 290 mm, Maßstab: 1:16, Revell

**Bestell-Nr. 3433 € 29,95 (D), € 92,95 (A)**

Für viele war Leonardo der große Humanist der Renaissance. Er versuchte alles über den Menschen nachzuvollziehen – Proportionen, Funktionen und Emotionen. Seine berühmteste Studie hierzu ist der Vitruv-Mann. Er stellt ein echtes Stück Kunstgeschichte dar, das nun erstmals als Holzmodell erhältlich ist.



**RETRORADIO DELUXE**  
**UKW-Röhrenradio zum Selberbauen**

2011, Komplettbausatz mit Schleifenantenne.

Benötigt werden: Vier 1,5-V-Mignon-Batterien (Typ AA), LötKolben und Lötzinn für den Aufbau, Franzis

**Bestell-Nr. 3456 € 79,95 (D), € 79,95 (A)**

Radio hören macht Spaß, ein Radio selbst bauen umso mehr. Dieser Komplettbausatz macht es Ihnen leicht: Ohne viel Mühe zaubern Sie daraus ein voll funktions-fähiges UKW-Röhrenradio im Retro-Stil. Der hochwertige Lautsprecher und das edle Holzgehäuse lassen dabei den typischen, warmen Klang eines Röhrengeräts voll zur Geltung kommen. Ein Genuss – akustisch wie optisch!

**NEU**



**VERSCHÄTZT NOCH MAL!**  
**Sinnloses Wissen, nutzlose Fakten und verrückte Fragen!**

2012, 106 Fragekarten, ab 12 Jahren, Kyskaps poesie

**Bestell-Nr. 3566 € 21,95 (D), € 21,95 (A)**

Wieviele Haare hat eine Augenbraue? Und wie lange wäre der Bart eines Mannes, wenn er sich zeit seines Lebens nicht rasieren würde? Wie nah liegen Sie mit Ihrer Einschätzung bei einer korrekten Antwort? Liegen Sie dichter dran, als Ihre Freunde? Hier ist eine Menge an gesundem Menschenverstand und Kreativität gefordert. Seien Sie gefasst auf jede Menge absurde Schätzungen, von Ihnen selbst und Ihren Freunden! Das perfekte Spiel für jeden Fan von sinnlosem Wissen und schrägen Fakten, gewürzt mit einer ordentlichen Prise Humor.

**Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich**



**WASSERRAKETE SHOOTINGER**

**Raketenbausatz inklusive Startrampe**

Höhe: ca. 52 cm, Durchmesser: ca. 9 cm, Academy Europe

**Bestell-Nr. 3467 € 39,90 (D), € 39,90 (A)**

Flughöhe bis zu 100 Meter nur mit Wasser und Druckluft! Der Bausatz enthält zwei PET-Flaschen, die zu einer schönen Rakete kombiniert werden können. Die stabile Raketenspitze aus Gummi aufgesetzt, die Leitflossen ans Heck montiert und die schicken Aufkleber angebracht und schon kann es los gehen. Nein, kann es nicht! Erst noch die stabile Startplattform montieren, aber auch das ist keine Rocket-Science. Alles in allem braucht man vielleicht eine Stunde Vorbereitung und eine Luftpumpe (nicht enthalten), bevor es losgehen kann.



**SOLAR FUNK-THERMO-HYGROMETER**

Solarbetriebene, kabellose Übertragung der Außentemperatur und Außenluftfeuchtigkeit über Sender (max. 100 m), Anzeige der Innentemperatur und Innenluftfeuchtigkeit, Höchst- und Tiefsttemperaturen, Uhrzeit, zum Hängen oder Stellen, Messbereich Temperatur außen: -40...+60°C, innen: -10...+60°C, Luftfeuchtigkeit außen: 1...99%, innen: 20...95%, Zubehör: Solar-Außen-Sender für Temperatur und Luftfeuchtigkeit, 2 x 1,5 V AAA Sender (Basisstation kann optional mit nicht aufladbaren Batterien betrieben werden), TFA Dostmann

**Bestell-Nr. 3436 € 36,- (D), € 36,- (A)**

**Stimmt Ihr Raumklima?** Mit dem formschönen, solarbetriebenen Funk-Thermo-Hygrometer haben Sie die Innen- und Aussentemperaturen sowie die Innen- und Außenluftfeuchtigkeit immer im Blick.

**Paper-Fun**



**NEU**

**DAS HAND-SPEKTROSKOP**  
**Bausatz mit Beugungsgitter, Vergrößerungslinse und Nanometerskala**

Abmessung: circa 11 x 10 x 2 cm, Sunwatch

**Bestell-Nr. 3549 € 7,90 (D), € 7,90 (A)**

In diesem einfach zu bauenden Gerät zerlegt ein hochpräzises Durchlicht-Beugungsgitter mit 1.000 Linien pro mm das Licht in seine Spektralfarben und ermöglicht so die Untersuchung unterschiedlicher Lichtquellen – vom kontinuierlichen Spektrum glühender Körper wie der Sonne oder einer Glühbirne, bis hin zu den Linienspektren von Leuchtstofflampen u.a. Auf einer in der Helligkeit regulierbaren Skala kann die Wellenlänge auf circa fünf Nanometer genau abgelesen werden.



**DIE KLEINE PAPIERKUGELBAHN**

**Bausatz für Bastler ab 10 Jahren**

2011, Grundfläche der Kugelbahn: 20 x 20 cm, Gewicht: 240 g, Kraul

**Bestell-Nr. 3271**

**€ 12,80 (D), € 12,80 (A)**

Die kleine Papierkugelbahn wird aus vorgestanzten Papieren aufgebaut. Nach etwa 2 Stunden Bastelzeit dürfen die Stahl- und Holzketten über die Kurven mit einem Meter Lauflänge runtersausen. Ein schöner Bastelspaß für Bastler ab 10 Jahren oder für kleinere Kinder mit Hilfe großer Bastler.

**Weitere Produkte finden Sie hier: [www.science-shop.de/paperfun](http://www.science-shop.de/paperfun)**



Klaus Hünig

**DIE UMKEHRBRILLE**  
**Bausatz für eine Prismenbrille mit Totalreflexion**

2011, Lichtdichtes, belüftetes Gehäuse, Prismenhalter aus stabilem MDF, 2 hochwertige Dove-Prismen aus leichtem PMMA, 25 x 20 mm große Sichtfenster, Prismen-Visier hochklappbar, Anleitung, Sunwatch

Bestell-Nr. 3429 € 39,90 (D), € 39,90 (A)

Mit einer Umkehrbrille können Sie viele Versuche selbst nacherleben. Wie lange dauert es, bis ich wieder Wasser in ein Glas gießen oder jemandem sicher die Hand reichen kann? Oder einen Text lesen? Oder etwas schreiben?! In der Umkehrbrille kommen hochwertige Dove-Prismen aus Acrylglas zum Einsatz, in denen die Bildumkehr durch Totalreflexion bewirkt wird. Der Zusammenbau ist einfach, es müssen nur die Prismen in ihre Halterungen geklebt und diese in das Brillengestell eingesetzt werden.



SERIE ENERGIE | TEIL 6

# Hoffnungs(energie)träger Wasserstoff



## SERIE IM ÜBERBLICK

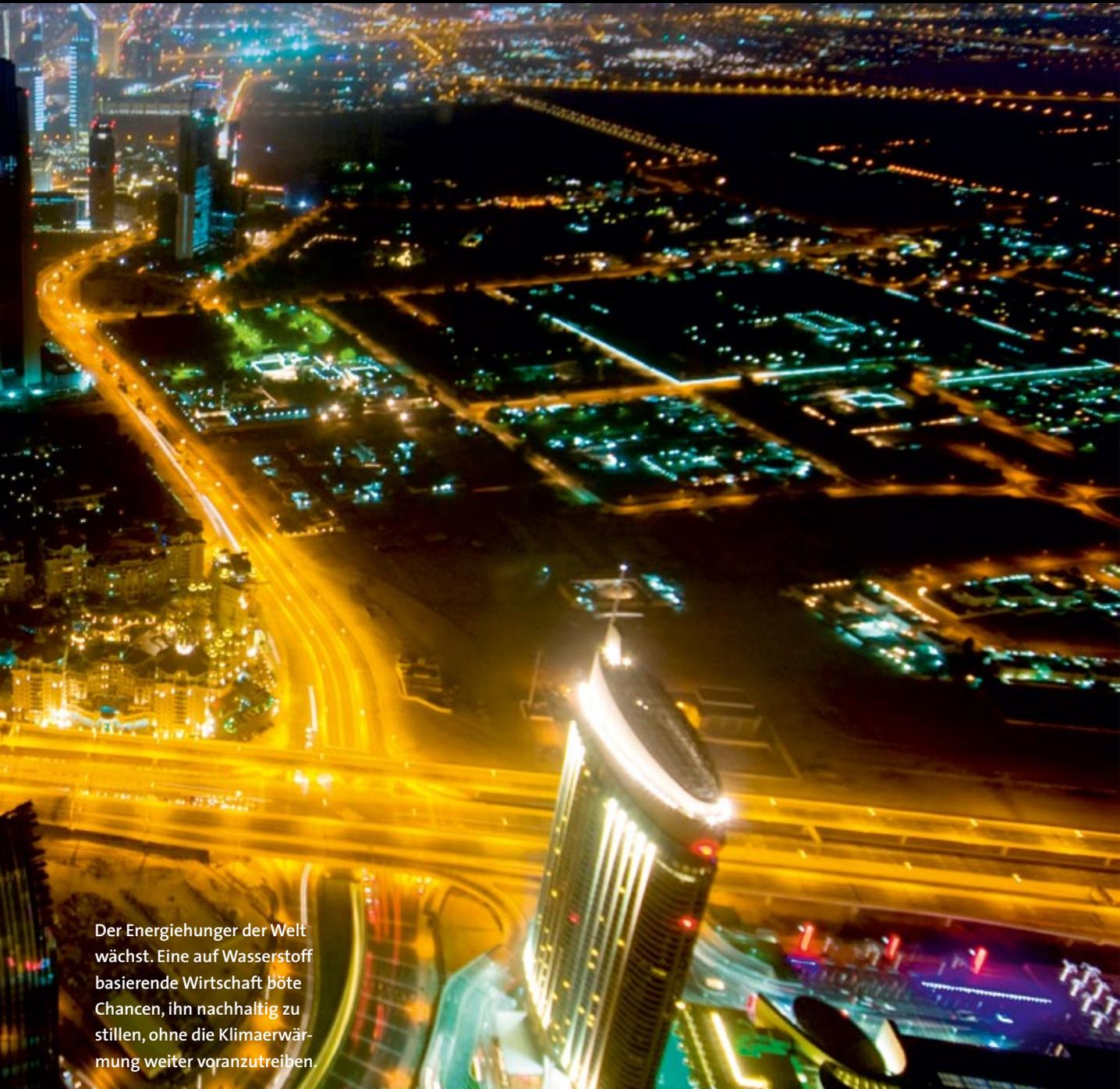
### DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher	April 2012
Teil 6	Wasserstofftechnologie	Mai 2012

Aus Wasser oder Gas hergestellt, gespeichert, transportiert und schließlich in Brennstoffzellen zur Stromgewinnung verbrannt – Wasserstoff birgt das Potenzial, drängende Probleme der Energieversorgung zu lösen. Doch nur, wenn es gelingt, bei all diesen Schritten die Kosten deutlich zu senken.

Von Vincent Artero, Nicolas Guillet, Daniel Fruchart und Marc Fontecave



Der Energiehunger der Welt wächst. Eine auf Wasserstoff basierende Wirtschaft böte Chancen, ihn nachhaltig zu stillen, ohne die Klimaerwärmung weiter voranzutreiben.

SHUTTERSTOCK/ENUR-AMIRSHIRYEV

Nun, was wird an Stelle der Kohle zum Brennen dienen?

Das Wasser, antwortete Cyrus Smith.

Das Wasser!, rief Pencroft erstaunt. Um Dampfschiffe und Lokomotiven zu treiben? Wasser, um damit zum Beispiel Wasser zu erhitzen?

Jawohl, doch das in seine Elementarbestandteile zerlegte Wasser, belehrte ihn Cyrus Smith. Zerlegt durch Elektrizität. Ich bin davon überzeugt, meine Freunde, dass das Wasser dereinst als Brennstoff Verwendung findet, dass Wasserstoff und Sauerstoff, die Bestandteile desselben, zur unerschöpflichen Quelle der Wärme und des Lichtes werden.

Jules Verne, »Die geheimnisvolle Insel«, 1875

Was Leser im Jahr 1875 noch fantastisch anmuten musste, klingt heute nach einer realisierbaren Vision. Kaum ein Automobilhersteller, der inzwischen nicht Elektrofahrzeuge entwickelt, die entweder Batterien oder Brennstoffzellen mit Strom versorgen. Jules Vernes Protagonist Cyrus Smith schätzte zwar, dass die Ära der Kohle noch mindestens 300 Jahre währen sollte, doch wusste der Autor nichts von den Folgen des Verbrennens fossiler Energieträger für das Erdklima. Wohl aber kannte man längst das Prinzip, gasförmigen Wasserstoff ( $H_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) durch Elektrolyse zu gewinnen, sowie auch den umgekehrten Prozess: Der britische Jurist und Physiker Sir William Robert Grove baute 1839 die erste »galvanische Gasbatterie«. Doch erst die Ingenieure der NASA machten sich im Rahmen der Missionen Gemini und Apollo daran, eine praxistaugliche Brennstoffzelle zu entwickeln.

Heute erscheint sie als Hoffnungsträger. Nicht nur ist Wasser reichlich vorhanden, während die Vorräte an Erdöl und auch an Uran begrenzt sind. Vor allem sollte eine Wasserstoffwirtschaft helfen, die Klimaerwärmung zu reduzieren, denn wenn ein  $H_2$ -Molekül durch die Reaktion mit Sauerstoff in der Brennstoffzelle aufgebrochen wird, entstehen als Nebenprodukte lediglich Wärme und Wasser. Ausgangs- und Endprodukt sind also identisch, es ergibt sich ein geschlossener Kreislauf.

Das macht diese Technologie zum idealen Baustein einer nachhaltigen Energieversorgung. Wohlgemerkt: Es geht hier nicht um die heute meist zur Wasserstoffbereitstellung für die chemische Industrie eingesetzten Verfahren, etwa die Dampfreformierung von Erdgas. Diese basieren fast ausschließlich auf der Umwandlung von Kohlenwasserstoffen, und am Ende des Prozesses entsteht neben  $H_2$  auch Kohlendioxid ( $CO_2$ ) – jenes Treibhausgas, das wir künftig gern vermeiden würden. Bislang erfolgen nur gut 2,5 Prozent (Stand 2010) der weltweiten Wasserstoffproduktion über die im Vergleich teurere Elektrolyse, zumeist in unmittelbarer Nachbarschaft großer Wasserkraftwerke, um Stromüberschüsse zu nutzen.

Und genau das macht das Gas für die dezentrale Energieversorgung auf Grundlage regenerativer Energien so reiz-

voll: Da Sonne und Wind nicht überall auf der Welt ausreichend zur Verfügung stehen, das Angebot überdies mit den Tages- und Jahreszeiten sowie den Wetterbedingungen variiert, sucht diese Branche nach Möglichkeiten, produzierte Elektrizität »zwischenzulagern«. Stromüberschüsse lassen sich zur Elektrolyse nutzen und so in Form von Wasserstoff speichern. Auf der Insel Utsira, 18 Kilometer von der norwegischen Küste entfernt, geschieht das schon heute. Dort liefern Windräder Strom für ein Dutzend Häuser. Gibt es einen Überschuss, zersetzt ein Elektrolyseur Wasser. Lässt der Wind später nach, läuft eine Brennstoffzelle an. Ähnliche Projekte laufen auf den Inseln Korsika und La Réunion. Sie sollen klären, ob es möglich ist, abgelegene Wohnorte allein durch Fotovoltaik mit Strom zu versorgen.

Doch noch sind das Pilotstudien. Eine breite Markteinführung der Technologie steht weiterhin aus, allen Visionen zum Trotz. Leistungsfähige Brennstoffzellen sind nach wie vor eine kostspielige Angelegenheit. Es hapert auch bei den vorgelagerten Schritten: Wasserstoff muss kostengünstig hergestellt und gespeichert, danach sicher und günstig bereitgestellt werden. Immerhin zeichnen sich inzwischen für jeden dieser Schritte Lösungen ab.

Aus Wasser lässt sich Wasserstoff durch Elektrolyse herstellen (die Erzeugung von Wasserstoff aus Biomasse ist noch Grundlagenforschung, siehe Kasten S. 78/79): Fließt elektrischer Strom durch eine schwach alkalische oder saure Lösung, blubbert alsbald Wasser- beziehungsweise Sauerstoff an den Polen empor. Schon hier zeigen sich erste Schwierigkeiten: Die elektrochemischen Vorgänge an den Elektroden ebenso wie die aufsteigenden Gasbläschen können den elektrischen Widerstand erhöhen, damit aber sinkt der Wirkungsgrad. Die dank der verwendeten Materialien günstigste und am weitesten entwickelte Variante ist wohl die alkalische Elektrolyse, bei der zwei Elektroden aus Stahl oder Nickel in eine basische Flüssigkeit eintauchen. Leider beanspruchen industrielle Anlagen dieser Art nicht nur viel Platz – starke Stromschwankungen, wie sie bei Fotovoltaik- oder Wind-

#### AUF EINEN BLICK

##### ALLHEILMITTEL WASSER

1 Die in Wasserstoffmolekülen ( $H_2$ ) gespeicherte chemische Energie lässt sich mit **Brennstoffzellen** in elektrische umwandeln. Dabei entsteht nur Wasser als »Abfallprodukt«, nicht das Treibhausgas  $CO_2$ .

2 Die ökologisch sinnvollste Art und Weise,  $H_2$  zu produzieren, ist die **Elektrolyse von Wasser**. Denn dazu könnte Strom aus regenerativen Energiequellen genutzt und so Überschussproduktion zwischengespeichert werden.

3 Sowohl die Elektrolyse als auch die Wasserstoffspeicherung müssen noch weiterentwickelt werden, um mit den etablierten Verfahren der Energieversorgung wie dem System Erdölindustrie/**Verbrennungsmotor** konkurrieren zu können.

4 Lösungsansätze imitieren **biologische Vorbilder** bei der Wasserstoffproduktion und nutzen **Metallhydride für die Speicherung**.

kraftanlagen auftreten, können auch allerlei Schäden anrichten. Entsteht beispielsweise zu viel Wasserstoff auf einmal, perlt er aus und verdrängt den Elektrolyten. Störungen der Pumpen und Probleme, die Reaktionsprodukte zu trennen, sind die Folge. Wächst die Stromzufuhr innerhalb kürzester Zeit von einem niedrigen auf einen hohen Wert, kann dieser Effekt sogar die Elektroden angreifen. Denn der Strom fließt nur durch jene Flächen, die mit dem Elektrolyten in Kontakt stehen. Diese heizen sich auf, und das Material nimmt Schaden. Eine Alternative ist die Elektrolyse bei Temperaturen von 750 bis 800 Grad Celsius, die hohe Wirkungsgrade erreicht. Die nötige Wärme aber mindert die Ausbeute wieder, es sei denn, man nutzt zum Beispiel die Abwärme aus den Kühltürmen eines AKW, um die Elektrolyse in Gang zu setzen. Hier zu Lande wäre das aber wegen des Atomausstiegs kein dauerhaft gangbarer Weg mehr.

### Eine Membran als Elektrolytersatz

Praktikabler erscheint der Einsatz einer »Protonaustauschmembran« (englisch: proton exchange membrane, Abkürzung PEM), die aus einem Polymer besteht und mit 100 bis 200 Mikrometer so dünn wie ein Haar ist. Für Gase und Elektronen undurchlässig, vermag sie Protonen von der Anode zur Kathode zu leiten und ersetzt somit den Elektrolyten. PEM-Systeme laufen bei Temperaturen zwischen 21 und 80 Grad Celsius bei elektrischen Strömen von bis zu vier Ampere pro Quadratcentimeter. Sie verarbeiten destilliertes Wasser und beanspruchen wenig Platz, doch vor allem verkraften sie plötzliche Stromschwankungen.

Diese drei Betriebstypen der Elektrolyse – alkalisch, bei hohen Temperaturen und mit Protonaustauschmembran – gelten auch für Brennstoffzellen, die den Prozess wieder umkehren, also chemische in elektrische Energie umwandeln. Alkalische Brennstoffzellen sind zwar günstig, vertragen aber kein Kohlendioxid, da es mit dem Kaliumhydroxid des Elektrolyten reagiert. Sie können also nicht mit Luft versorgt werden, sondern benötigen teuren reinen Sauerstoff.

PEM-Brennstoffzellen bieten prinzipiell eine breite Leistungspalette zwischen 0,1 Watt und 100 Kilowatt, theoretisch erreichen sie Wirkungsgrade von 50 bis 70 Prozent. Nicht nur für die Selbstversorgung abgelegener Häuser sind sie interessant, auch die meisten Automobilhersteller haben sich dafür entschieden, wenn sie über ein Elektrofahrzeug mit Brennstoffzellen nachdenken. PEM-Systeme eignen sich im Übrigen ebenfalls dafür, Kohlenwasserstoffe statt reinen Wasserstoff zu verstromen. Das wird etwa im Rahmen des Projekts Callux für einen Praxistest von Brennstoffzellen-Heizgeräten genutzt, der 2015 abgeschlossen sein soll. Als Brennstoff dienen dort Erdgas und aus Biomasse gewonnenes Gas. Schließlich kommen modifizierte PEM-Geräte auch bei Direkt-Methanol-Brennstoffzellen (DMFC) zum Einsatz. Solche Systeme sind vor allem für die Stromversorgung von Elektromobilen gedacht, da sich Methanol einfacher tanken lässt. Der Nachteil dieser Alternative zur Wasserstoffwirtschaft: Bei der elektrochemischen Reaktion entsteht CO<sub>2</sub>.



Natur  
Energie  
Plus

## Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf  
Monaten haben sich über  
25.000 Bürger für Strom  
aus 100 % Wasserkraft von  
NaturEnergiePlus entschieden.  
Wann wechseln Sie zum  
Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!



Auch für die Wasserstoffherzeugung per Elektrolyse gilt die Protonaustauschmembran als wichtigster Hoffnungsträger. Es ist sogar möglich, beide Funktionen in einem Gerät zu vereinen: Die »reversible Brennstoffzelle«, ergänzt um einen Wasserstoffspeicher, produziert bei Stromüberschuss Gas und bei Strombedarf Elektrizität. Sie ist vergleichsweise platzsparend und kommt mit wenig Wartung aus, würde sich also für Privathaushalte eignen. Nur die beträchtlichen Kosten

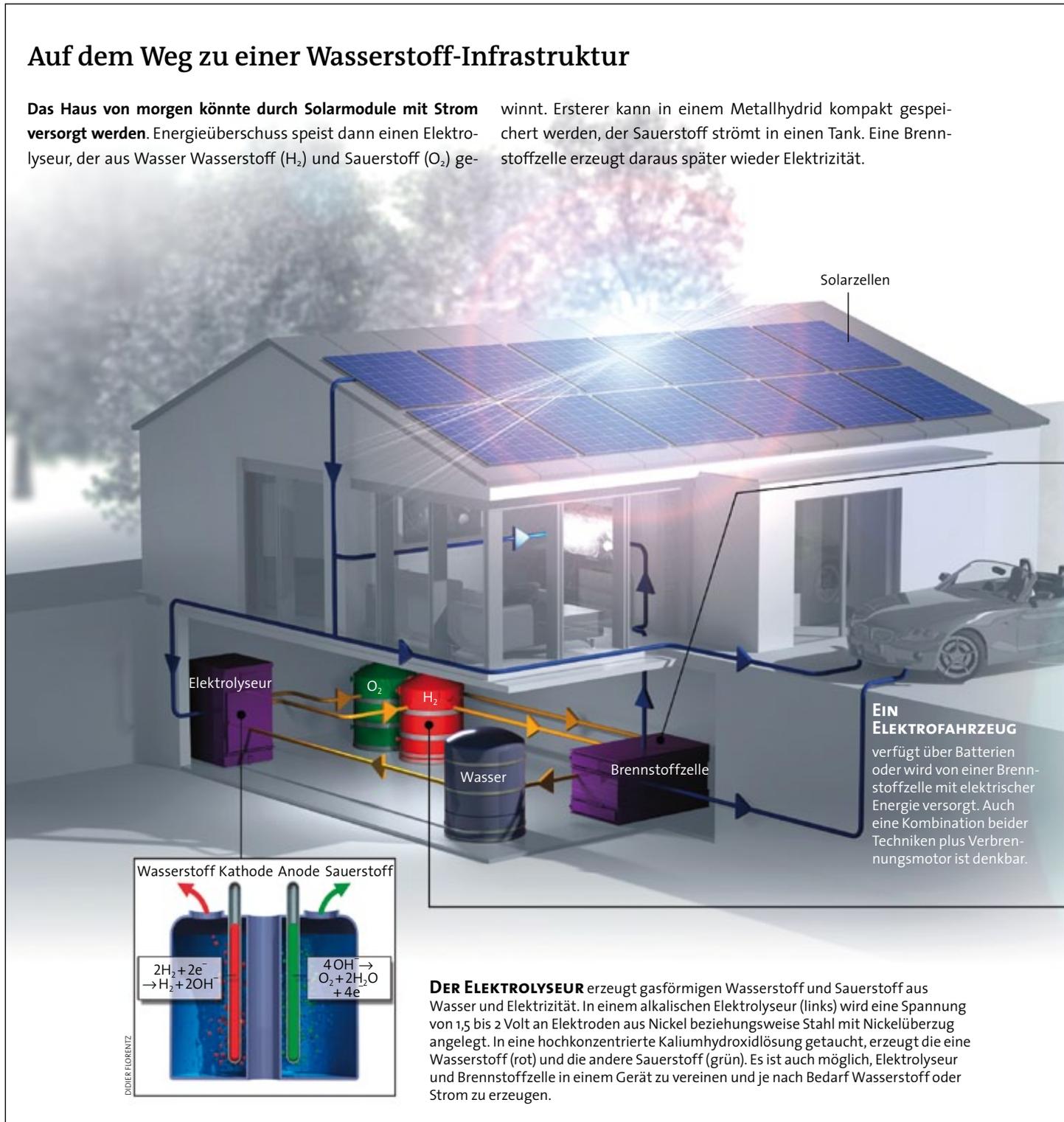
der eingesetzten Materialien, vor allem für Membran und Katalysator, stehen dem entgegen.

Denn bei PEM-Systemen dürfen die Elektroden nicht aus herkömmlichen Metallen wie Eisen, Kobalt oder Nickel bestehen. Sie würden oxidieren und sich schnell auflösen. Zudem erfordert die niedrige Betriebstemperatur einen Katalysator, der die Energieschwelle der Reaktion herabsetzt. In Frage kommen Edelmetalle wie Platin, Palladium und Iridium,

## Auf dem Weg zu einer Wasserstoff-Infrastruktur

**Das Haus von morgen könnte durch Solarmodule mit Strom versorgt werden.** Energieüberschuss speist dann einen Elektrolyseur, der aus Wasser Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) ge-

winnt. Ersterer kann in einem Metallhydrid kompakt gespeichert werden, der Sauerstoff strömt in einen Tank. Eine Brennstoffzelle erzeugt daraus später wieder Elektrizität.



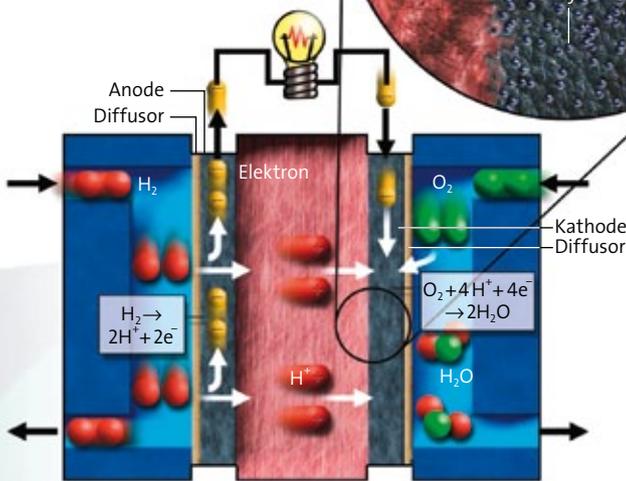
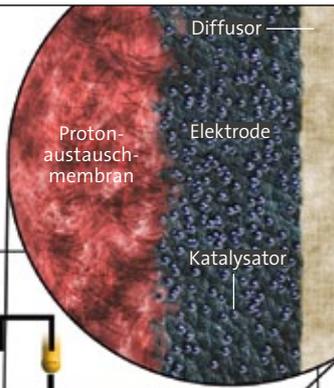
doch die sind teuer: Ein Kilogramm Platin kostet auf dem Weltmarkt mitunter 40 000 Euro!

Derzeit enthält eine Brennstoffzelle, die den Elektromotor eines mittelgroßen Pkw mit Strom beliefern könnte, 20 bis 30 Gramm des Edelmetalls, was bei einer Serienfertigung mehr als 20 Prozent der Produktionskosten ausmacht. Die Vorkommen würden aber ohnehin nicht ausreichen, um alle Fahrzeuge der Welt auszurüsten. Experten schätzen die noch

abzubauenen Platinressourcen auf 30 000 Tonnen. 200 Tonnen werden jährlich gewonnen, was gerade einmal für die Brennstoffzellen von zehn Millionen Fahrzeugen reichen würde. Doch auf der Welt dürften mehr als 700 Millionen Pkws im Umlauf sein! Obendrein konkurriert die Wasserstofftechnik mit anderen Verwendungen von Platin, etwa in Abgaskatalysatoren. Und am Ende der Nutzungsdauer lässt sich nur etwa die Hälfte davon aus einer Brennstoffzelle wiedergewinnen.

Daher gilt es, die benötigte Menge Platin auf zwei bis drei Gramm pro Fahrzeug-PEM-Zelle zu reduzieren, das entspräche 0,1 Gramm pro Kilowatt erzeugter elektrischer Energie. Eine Möglichkeit dafür bietet die Nanotechnologie. Kommt das Edelmetall in Form winziger Partikel in die Elektroden, vergrößert sich die katalytisch wirksame Gesamtoberfläche. Weniger ist dann wirklich mehr! Ein zweiter Ansatz kombiniert Platin mit anderen, preiswerten Katalysatoren, insbesondere Übergangsmetallen wie Nickel, Kobalt, Mangan oder Eisen. Nanopartikel aus solchen Legierungen sind sogar leistungsfähiger als Platin allein. Schließlich würden auch höhere Betriebstemperaturen – 150 statt derzeit 80 Grad Celsius – die benötigte Menge an Edelmetallen senken und gleichzeitig deren Blockierung durch Verunreinigungen und Gase wie Kohlenmonoxid oder Stickoxide verhindern, die über die Reaktionsgase in die Zelle gelangen. Dafür müssten aber neue Protonaustauschmembranen entwickelt werden, die in einem breiteren Temperaturbereich arbeiten.

**IN DER PEM-BRENNSTOFFZELLE** wird Wasserstoff durch einen porösen Diffusor zur Anode geleitet, wo er in zwei Protonen ( $H^+$ ) und zwei Elektronen ( $e^-$ ) zerfällt. Letztere wandern zur Kathode durch einen Stromkreis, während die Protonen in Richtung Kathode eine Polymermembran durchqueren – daher der Name.



### DIE ELEKTRODEN

Anode und Kathode bestehen aus Kohlenstoffnanoröhrchen oder 50-Nanometer-Rußpartikeln, die mit einem Katalysator beschichtet sind: entweder Platinteilchen von wenigen Nanometern Durchmesser oder einem so genannten biomimetischen Katalysator.

### Die Natur als Vorbild

In den letzten fünf Jahren gelang es zudem, durch die Modellierung von Wasserstoff produzierenden Mikroorganismen zumindest im Labor mit nur 0,25 Gramm Platin ein Kilowatt elektrische Energie zu erzeugen. Zum Beispiel gewinnen in zahlreichen Bakterien und Mikroalgen Hydrogenasen genannte Enzyme Wasserstoff aus Wasser – mit Nickel oder Eisen im katalytischen Zentrum. Chemiker lassen sich nun davon zu Katalysatoren inspirieren, die einige der strukturellen und funktionellen Eigenschaften ihrer natürlichen Vorbilder besitzen.

Diesen »biomimetischen« Ansatz verfolgen auch zwei von uns: Marc Fontecave und Vincent Artero im Labor für Chemie und Biologie der Metalle der Universität J. Fourier in Grenoble (CEA-CNRS Grenoble). Indem sie biomimetische Chemie mit Nanotechnologien kombinierten, entwickelten sie kürzlich ein gänzlich edelmetallfreies Material, das sowohl Wasserstoff aus Wasser liefert wie auch den umgekehrten Prozess katalysiert. Dafür betteten sie ein Nickelatom in ein Molekül, das Hydrogenasen nachahmt. Das wiederum brachten sie auf Kohlenstoffnanoröhrchen auf, was große Oberflächen und hohe elektrische Leitfähigkeit ergab (siehe Grafik S. 80).

Dieses Experiment, das in Zusammenarbeit mit Serge Palacin und Bruno Josselme aus dem Labor für Chemie der Oberflächen und Schnittstellen (CEA Saclay) gelang, war ein Erfolg: Als Beschichtung einer Elektrode erwies sich das

### DER WASSERSTOFFSPEICHER

Wasserstoff wird bei niedrigen Temperaturen in Metallgittern eingelagert und so in fester Form gespeichert (a). Dabei entstehende Wärme verflüssigt ein spezielles Material (PCM) und wird so als latente Wärme gespeichert. Indem man die Temperatur erhöht – auch durch die Wiederfreisetzung der Wärme –, gibt das Metallhydrid das Gas wieder frei (b).



Material als robust und geeignet für das saure Milieu einer PEM. Zwar sind die bis jetzt möglichen Stromdichten noch 100- bis 1000-mal geringer als jene, die mit Platin erreicht werden, doch der biomimetische Katalysator wird auf jeden Fall kostengünstiger sein. Überdies verträgt er Kohlenmonoxid, das Wasserstoff oft verunreinigt, vor allem wenn dieser aus Biomasse erzeugt wurde.

Biomimetik könnte auch die Entwicklung neuer Protonenaustauschmembranen voranbringen. Bis jetzt bestehen diese meist aus einem sulfonierten perfluorierten Polymer (das bekannteste ist Nafion, das seit den 1960er Jahren von der Firma DuPont vermarktet wird). Fluor erhöht allerdings die Produktionskosten und setzt eine effiziente Wiederverwertung voraus. Dabei findet in allen Lebewesen ein Transport von Protonen durch Membranen statt – es gibt also auch hier biologische Vorbilder. Thomas Berthelot und seinen Kollegen vom CEA in Saclay ist es gelungen, mit einer präparierten Membran die Struktur der Protonenpumpen nachzuahmen, die in Mitochondrien Teil der Energie liefernden Atmungskette sind. Die Hoffnung ist, dass solche Materialien in nicht zu ferner Zukunft mit Nafion konkurrieren können, dabei aber weniger zum Austrocknen neigen und mechanisch stabiler sind.

Doch die kostengünstige Herstellung des Gases ist nur ein Aspekt – so muss Wasserstoff auch komfortabel und sicher gespeichert und bereitgestellt werden. Die bei vielen industriellen Anwendungen genutzte Verflüssigung kommt nicht in Frage, denn um die erforderlichen minus 253 Grad

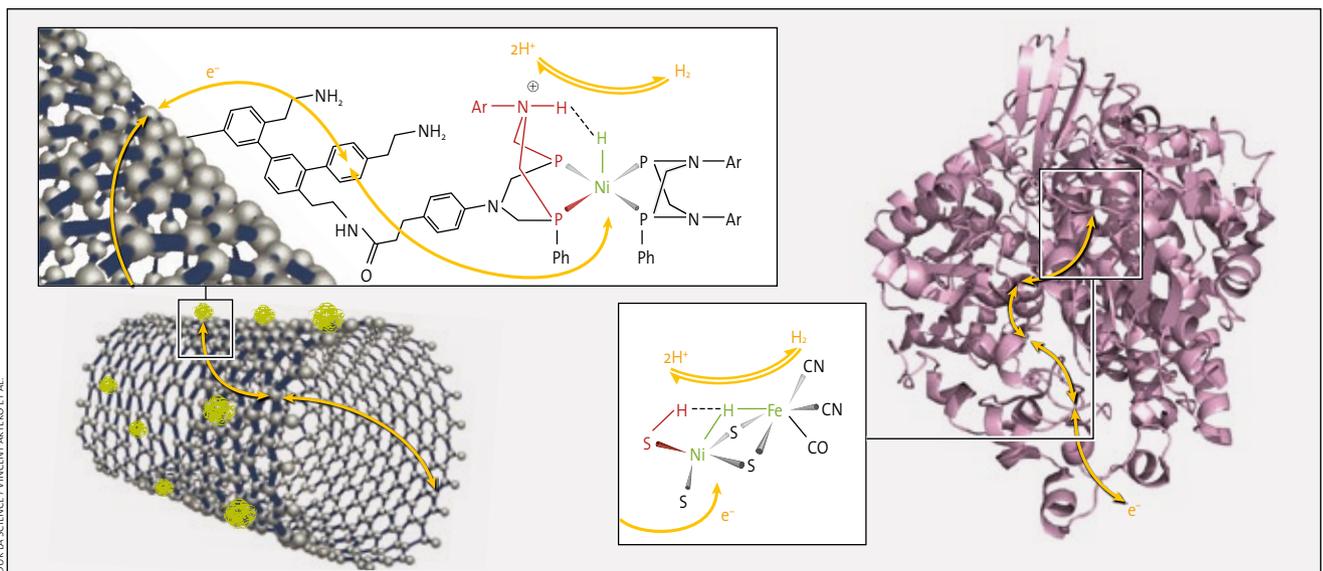
Celsius (bei Normaldruck) zu erreichen und dauerhaft aufrechtzuerhalten, erforderte sie nahezu halb so viel Energie, wie in den Wasserstoffmolekülen überhaupt gespeichert ist. Hinzu kommen Verluste durch Verdampfen während der Lagerzeit.

Wasserstoffgas lässt sich aber komprimieren, und der Transport in Druckgasflaschen aus Edelstahl oder Aluminium bei einem Druck bis 20 Megapascal ist gängige Praxis. Für Autotankentwickeln Forscher nun Hochdruckbehälter, die 35 bis 70 Megapascal aushalten – das 350- bis 700-Fache des Luftdrucks – und etwa 5000 Füll- und Entleerungszyklen sicher und effizient leisten. Ein Problem dabei ist, dass dieses Gas durch viele Metalle diffundieren kann und dabei deren Korrosion fördert. Als Alternative bauten die Wissenschaftler vom CEA daher einen Pkw-Tank für 4,2 Kilogramm Treibstoff aus Kunststoffguss.

### Speichern im Kristallgitter

Ein anderer Ansatz nutzt gerade diese Eigenschaft des Wasserstoffs, in metallische Strukturen einzudringen und dort Plätze des Kristallgitters zu besetzen – es entsteht ein Metallhydrid. Einen solchen Feststoffspeicher entwickelt das französische Unternehmen McPhy-Energy. Es nutzt dabei Ergebnisse von einem von uns, Daniel Fruchart, Materialwissenschaftler am Institut Néel des CNRS in Grenoble: Ein Werkstoff, der großenteils aus metallischem Magnesium (Mg) besteht, wird zu Magnesiumhydrid ( $MgH_2$ ), wenn er Wasserstoff bei einem Druck von einem Megapascal ausge-

Der nickelbasierte Katalysator (Formel links oben), den Vincent Artero und seine Kollegen entwickelt haben, imitiert eine Hydrogenase (rechts): ein Enzym, wie es einige Bakterien und Mikroalgen nutzen, um Wasserstoff aus Wasser zu gewinnen und umgekehrt. Der Reaktionsweg ist hier angedeutet: Im Enzym leiten metallische Gruppen (nicht dargestellt) die Elektronen ( $e^-$ ) zum aktiven Zentrum (grün), das aus einem Nickel- (Ni) und einem Eisenatom (Fe) besteht. Dort kommt die jeweilige Umwandlung in Gang. Der künstliche Katalysator wird auf Kohlenstoffnanoröhrchen (unten links) aufgebracht, das die Elektronen zu seinem Nickelzentrum leitet.



MEHR WISSEN BEI  
Spektrum.de



Unsere Themenseite »Energie«  
finden Sie unter  
[www.spektrum.de/energie](http://www.spektrum.de/energie)

setzt ist. Er absorbiert dabei mehr als sechs Prozent seines Eigengewichts an Wasserstoff. Dieser wird freigesetzt, sobald der Druck unter 0,2 Megapascal sinkt.

Forscher experimentieren auch mit Latentwärmespeichern (Phase Change Material, PCM), also Materialien, die Wärme speichern, indem sie ihren Aggregatzustand ändern und diese Wärme auch wieder abgeben können. Dergleichen ist heutzutage in vielen Haushalten anzutreffen: Gele, die man in der Mikrowelle erhitzt, werden flüssig und wärmen im Winter die Hände, während sie wieder fest werden. Die Aufnahme des Wasserstoffs im Metallgitter erfolgt spontan, und dabei entsteht Wärme, die das PCM absorbiert. Während der Gasentnahme gibt es sie wieder ab, was den Austritt des Gases aus dem Kristallverbund erleichtert. Die H<sub>2</sub>-Abgabe geht damit deutlich schneller, allerdings nimmt die PCM-Hülle noch so viel Platz ein, dass bei einem so aufgerüsteten Container nur noch ein Zehntel des Volumens für den Wasserstoff zur Verfügung steht. Hier ist noch einiges an Entwicklung erforderlich.

Metallhydride erfordern keinen Energie verbrauchenden Kompressor wie Druckgasbehälter. Auch für den Einsatz in Privathäusern oder Tankstellen taugen sie, einerlei ob man dort Wasserstoff mit Solarzellen oder Windrädern herstellt oder damit nur beliefert wird. Der Nachteil aber ist das hohe Gewicht, weshalb Metallhydridspeicher in Fahrzeugen noch auf sich warten lassen. Einen Kompromiss sucht der Automobilhersteller Toyota gemeinsam mit den Grenobler Forschungseinrichtungen LITEN (CEA) und Institut Néel: Sie kombinieren einen Verbrennungsmotor mit einem Brennstoffzellenantrieb und nutzen für diesen einen Feststoffspeicher auf der Basis von Titan-, Vanadium- oder Chromhydriden in Kombination mit einem 300-Bar-Druckgasspeicher. Mit Tankgewicht und Tankvolumen vergleichbar einem herkömmlichen Pkw soll das eine Reichweite von 600 Kilometern ergeben. Die Energieausbeute sei gut, die Kosten niedriger als für Lithiumbatterien, wie sie gegenwärtig in Elektrofahrzeugen eingebaut sind. Auch ließe sich solch ein Tank schneller aufladen als ein Akku. Allerdings fallen hohe Materialkosten an. Immerhin testet man solche Komponenten bereits in Pkws, obwohl sie vor wenigen Jahren noch den ganzen Kofferraum und die hinteren Sitze eines Minivans in Anspruch nahmen.

Als Energiepuffer bei der Nutzung regenerativer Quellen werden diese Technologien aber zunächst wohl vor allem in Nischenmärkten wie bei der Versorgung abgelegener Siedlungen zum Einsatz kommen, also überall dort, wo es kaum

Alternativen zur Sonnen- oder Windenergie gibt. Doch wird sich dies im Lauf der kommenden Jahre allmählich ändern – Wasserstoff bietet zu viele Vorteile als Zwischenspeicher. Obendrein ermöglicht eine Wasserstoffwirtschaft die Möglichkeit zur dezentralen Energieversorgung. Für den amerikanischen Ökonomen Jeremy Rifkin verbindet sich damit mehr als eine Option für die Zukunft. Er spricht in seinem Buch »Die dritte industrielle Revolution« von einer Chance der »Demokratisierung von Energieerzeugung und -verteilung«. Wenn Millionen Menschen selbst zu Energieerzeugern werden, entfällt der Aufbau großer und kostspieliger Produktionsanlagen und Verteilungsnetze. Das würde auch Strom- und Spannungsverluste reduzieren, die während der Verteilung auftreten.

Gewiss könnte der Übergang vom jetzigen Modell der Energieversorgung zu einer dezentralen nur schrittweise verlaufen. Zunächst dürften die von Solarmodulen oder Windrädern bedeckten Flächen noch wachsen, und ein Netz aus Pipelines wird das dort produzierte Wasserstoffgas zu den Verbrauchern leiten. Aber es sind bereits alternative Konzepte am Start, beispielsweise in Kalifornien und Norwegen: Dort warten kleine Wasserstoffherstellungssysteme an Tankstellen entlang großer Verkehrsadern auf ihre Nutzer. Bis jetzt handelt es sich nur um Prototypen, doch das ist immerhin schon ein Anfang. ~

#### DIE AUTOREN



**Vincent Artero** (von links nach rechts) forscht am Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux des Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA, Forschungszentrum für Kernenergie und alternative Energien) in Grenoble. **Nicolas Guillet** ist dort Forschungsingenieur im Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux (LITEN). **Daniel Fruchart** ist emeritierter Forschungsleiter am Institut Néel des CNRS in Grenoble und wissenschaftlicher Direktor der französischen Firma McPhy-Energy. **Marc Fontecave** lehrt Chemie der biologischen Prozesse am Collège de France in Paris.

#### QUELLEN

**Le Geoff, A. et al. (Hg.):** From Hydrogenases to Noble Metal-Free Catalytic Nanomaterials for H<sub>2</sub> Production and Uptake. In: Science 326, S. 1384–1387, 4. Dezember 2009  
**Lucchese, P.:** L'hydrogène est-il incontournable? In: Pour la Science, Dossier 69, S. 112–117, 2010  
**Menanteau, P. et al.:** Une analyse économique de la production d'hydrogène pour des usages transport à partir d'électricité éolienne. In: Revue de l'Énergie 61, S. 322–333, 2010

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146814](http://www.spektrum.de/artikel/1146814)

## »Wir wollen die Welt retten«

Bessere Katalysatoren sind der Schlüssel für bessere Elektrolyseure und Brennstoffzellen – und damit auch für die effiziente Speicherung elektrischer Energie im Rahmen einer Wasserstoffwirtschaft. Ihre Entwicklung hat sich **Robert Schlögl** zur Aufgabe gemacht. Im Interview erläutert der renommierte Chemiker, warum Katalysatoren so kompliziert sind und welche Bedeutung vernetzte Forschung hat.

*Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Schlögl, es ist sehr schwer, Sie in Ihrem Büro anzutreffen. Sind Sie viel unterwegs?*

**PROF. DR. ROBERT SCHLÖGL:** Ja, ich habe derzeit zwei Teams und pendle deshalb zwischen Berlin und Mülheim an der Ruhr – natürlich mit der Bahn, um möglichst wenig zu den Kohlendioxidemissionen beizutragen.

*Aber wozu der Aufwand?*

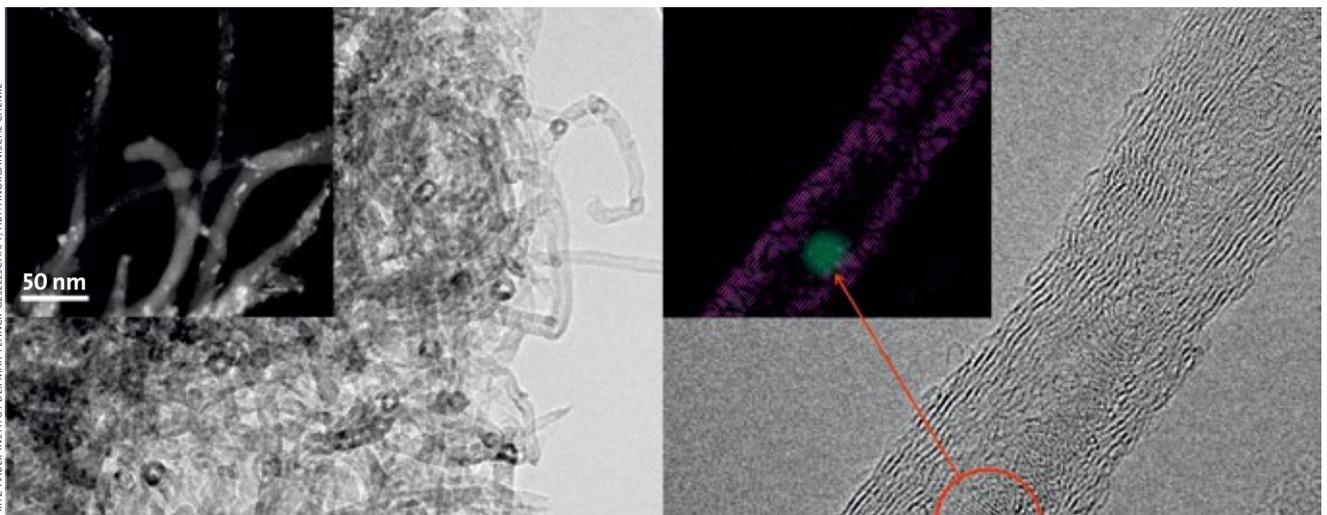
**SCHLÖGL:** Weil wir bisher getrennte Kompetenzen zusammenbringen wollen. So gibt es am Institut in Mülheim Erfahrung damit, die Fotosynthese nachzuahmen. Jetzt kombinieren wir dieses Knowhow mit dem über konventionelle Katalysatoren am Fritz-Haber-Institut.

*Hofft die Max-Planck-Gesellschaft, auf diese Weise Deutschlands Energieprobleme zu lösen?*

**SCHLÖGL:** Ja, denn um Wind- und Sonnenenergie optimal zu nutzen, muss man sie zwischenspeichern können – indem etwa ein Elektrolyseur Wasser zerlegt, der Wasserstoff dann in Tanks gespeichert und später mit einer Brennstoffzelle wieder in Strom umgewandelt wird. Wir konzentrieren uns auf den ersten Teil dieses Zyklus, auf die Elektrolyse. Wobei Brennstoffzellen bezüglich der Katalysatoren nur die Kehrseite derselben Medaille darstellen.

*Geht es dabei um Verbesserungen im Detail oder um Grundlegendes?*

**SCHLÖGL:** Seit gut 30 Jahren untersucht man inzwischen, wie Katalysatoren arbeiten. Es gibt ausgetüftelte Modelle dazu. Doch wenn es darum geht, Oberflächen- und Quantenphysik in großtechnische Prozesse zu übertragen, gehen die Berechnungen meist völlig an der Realität vorbei. Heute kennen wir



Manganoxid-Cluster auf Kohlenstoffnanoröhren sollen die Elektrolyse katalysieren. Links eine Übersichtsaufnahme; im dazugehörigen Inset erscheinen die Cluster als helle Flecken, in der rechten Detailaufnahme einer Nanoröhre grün.



Robert Schlögl leitet die Abteilung für anorganische Chemie am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft (Berlin), dessen Direktor er ist. Seit 2011 ist Schlögl auch Gründungsdirektor des neuen Max-Planck-Instituts für chemische Energiekonversion in Mülheim an der Ruhr.

FRITZ-HABER-INSTITUT DER MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT [M]

den Grund: Die Moleküle der reagierenden Stoffe sitzen nicht einfach auf der Oberfläche des Katalysators, wie man früher dachte, sondern beeinflussen dessen eigene Moleküle, wodurch sich sogar seine chemische Zusammensetzung verändert. Dieser Prozess hängt zudem vom Druck ab: Bei mehr als einem Tausendstel des Atmosphärendrucks findet Katalyse statt, darunter nicht. Das ist erst seit Kurzem bekannt.

Im Kontext Elektrolyse hat man sich zudem früher nur die Wasserstoffelektrode angeschaut und diese optimiert, weil dort ja sozusagen geerntet werden soll. An dieser Elektrode läuft auch alles nach Lehrbuch ab. Mittlerweile wissen wir aber, dass sich die Sauerstoffelektrode ganz unerwartet verhält. Bei der elektrochemischen Reaktion reagiert der Katalysator Platin nämlich mit dem Sauerstoff. Mit anderen Worten: Das Edelmetall rostet, und das verschlechtert die Ausbeute.

*Sicher haben Sie schon ein Konzept, wie man das umgehen kann.*

**SCHLÖGL:** Zunächst kommt mir eine Standardlösung in den Sinn: Passivierung verhindert Korrosion. Dazu bringt man eine dünne Schicht aus einem anderen Metall auf, die oxidiert und nun weiteren Sauerstoff fernhält. In Frage kämen hierfür Iridium und Ruthenium, aber die sind selten und daher zu teuer. Wir gehen deshalb einen anderen Weg und entwickeln biomimetische Katalysatoren.

*Was ist damit gemeint?*

**SCHLÖGL:** Biomimetisch bedeutet: Prinzipien aus der Natur werden in technische Verfahren übersetzt. Wir imitieren die Fotosynthese in Blättern. Auch dort findet Katalyse statt, und dabei spielt Mangan eine zentrale Rolle. Also nehmen wir Kohlenstoff als elektrischen Leiter für unsere Elektrode, modifizieren aber seine Oberfläche mit Nanostrukturen aus Manganoxid. Diese Art von Kompositkatalysator gibt es in der Natur zwar nicht, sie funktioniert jedoch gut. Andere For-

scherguppen untersuchen andere Paarungen. Weltweit ist inzwischen ein regelrechtes Wettrennen um die beste Kombination entbrannt.

*Wie weit ist Ihr Ansatz noch von einer breiten Anwendung entfernt?*

**SCHLÖGL:** Noch sehr weit, sofern wir ihn allein in der Max-Planck-Gesellschaft weitertreiben müssen. Wenn wir allerdings kooperieren könnten, zum Beispiel mit der Fraunhofer-Gesellschaft, würden wir vielleicht schon in drei Jahren einen Elektrolyseur auf die Beine stellen, der ein Megawatt elektrische Leistung durch Spaltung von Wasser speichert.

*Was sollte Sie daran hindern?*

**SCHLÖGL:** Das deutsche Wissenschaftssystem. Es fördert Kooperation leider nicht. Wissenschaftliche Reputation wird auf Einzelpersonen bezogen, und davon hängen dann die Fördermittel ab. Macht nichts, könnte man denken, dann stellt halt jede Gesellschaft eigene Anträge, und das Geld wird anschließend in einen gemeinsamen Topf geworfen. Aber das wäre eine verbotene Quersubventionierung. Vertreter aller deutschen Forschungseinrichtungen fordern mittlerweile Möglichkeiten, Vernetzungsprojekte zu finanzieren; passiert ist bisher aber noch wenig. Ich habe deshalb beim Bundesministerium für Bildung und Forschung einen Antrag gestellt, der die Max-Planck-Gesellschaft intern und mit den relevanten anderen Organisationen vernetzen soll, wobei die Themen von den Forschern definiert werden. Leider gab es dazu bis heute keine positive Reaktion. Das beantragte Volumen von 100 Millionen Euro mag groß erscheinen, ist aber wenig verglichen mit Vernetzungsprojekten in den USA, die mit zwei Milliarden Dollar pro Jahr gefördert werden. Wir wollen ja schließlich nicht weniger als die Welt retten. ☺

Das Gespräch führte **Bernd Müller**, Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

# Vermehrungsfähige Maschinen

Was sind die wesentlichen Eigenschaften des Lebens, auf einer abstrakten Ebene betrachtet? Aufschlüsse könnte ein mathematisches Modell in Form eines zellulären Automaten geben. Ein solcher ist nun auf einem Computer realisiert worden – 60 Jahre nach dem ersten theoretischen Entwurf.

Von Jean-Paul Delahaye

Lebende Organismen sind komplizierte Aggregate einfacher Bestandteile. Gemäß allen Theoremen der Wahrscheinlichkeitstheorie oder Thermodynamik sind sie sehr unwahrscheinlich. Der einzige Aspekt, der dieses Wunder erklären oder plausibel machen kann, ist die Tatsache, dass sie sich reproduzieren. Ist erst einmal ein Exemplar zufällig entstanden, so finden die Gesetze der Wahrscheinlichkeitsrechnung keine Anwendung mehr, weil dann viele Exemplare entstehen.

*John von Neumann,  
Theory of Self-Reproducing Automata, 1966*

Es ist ein beliebtes Thema der Sciencefiction: Ein Roboter stellt eine perfekte Kopie seiner selbst her, ohne Instruktionen von außen zu benötigen. Seine Interaktion mit der Umwelt beschränkt sich darauf, dass er ihr Materie und Energie entnimmt. Unvermeidlich folgt im Roman das nächste Ereignis: Der neu geschaffene Roboter tut es seinem Erzeuger gleich, und alsbald vermehren sich die Blechwesen wie die Karnickel, die Killerbienen oder die Menschen.

Folgerichtig enden die meisten Romane in der großen Katastrophe. Aber von solchen düsteren Endzeitvisionen war die Aufbruchsstimmung Anfang der 1950er Jahre weit entfernt. Die Erbauer der frühen Computer in den USA begannen, die theoretisch ungeheure Leistungsfähigkeit ihrer Geräte zu erfassen und deren Grenzen auszuloten. Wäre es prinzipiell möglich, einen Roboter so zu programmieren, dass er nach einer Anleitung, die in ihm enthalten ist, sich selbst nachbaut? Und was wären dafür die minimalen Voraussetzungen?

Mit dieser Frage beschäftigte sich vor allem John von Neumann (1903–1957), der legendäre amerikanische Mathema-

tiker ungarischer Abstammung, dem wir auch die Architektur der heute verbreiteten Computer verdanken. Sein Freund Stan Ulam (1909–1984), den er aus gemeinsamer Arbeit an der Entwicklung der Atombombe kannte, schlug ihm vor, das Problem im Rahmen einer vereinfachten abstrakten Welt zu studieren. Nach von Neumanns Tod führte Arthur W. Burks (1915–2008), einer der Entwickler des frühen amerikanischen Elektronenrechners ENIAC, dessen Ansätze fort und veröffentlichte sie 1966 in dem Buch »Theory of Self-Reproducing Automata«. Das Werk wurde berühmt und regte eine Vielzahl von Forschungsprojekten an.

Die abstrakte Welt, die Ulam seinem Freund nahegelegt hatte, war die der zellulären Automaten (Kasten rechts). Diese elementaren Rechner, die ein gedachtes unendliches Schachbrett bevölkern, sind mittlerweile Gegenstand einer eigenen wissenschaftlichen Disziplin im Grenzbereich von Mathematik und Informatik – und in der im Prinzip höchst primitiven Welt kann eine Menge passieren!

## AUF EINEN BLICK

### KÜNSTLICHES LEBEN – DIE FORTPFLANZUNG

- 1 Ein **zellulärer Automat** ist ein zweidimensionaler, fiktiver Raum mit physikalischen Gesetzen, die nach Belieben definierbar sind.
- 2 Eine zu einem Anfangszeitpunkt in einem zellulären Automaten gesetzte Konfiguration entwickelt sich in **diskreten Zeitschritten** deterministisch und einfach berechenbar auf Grund von **lokalen Wechselwirkungen**.
- 3 Manche Konfigurationen **reproduzieren sich selbst**, das heißt, sie erscheinen nach einer gewissen Anzahl von Zeitschritten in mehreren Exemplaren.
- 4 Für ein brauchbares, gleichwohl immer noch sehr abstraktes Modell des Lebens muss zur Selbstreproduktion noch eine gewisse **minimale Komplexität** sowie die Fähigkeit zur **Mutation** hinzukommen.

In der Tat gelang es von Neumann, einen zellulären Automaten mit einer Konfiguration zu finden, die sich selbst repliziert. (In der Fachsprache unterscheidet man die Replikation, die absolut genaue Verdoppelung, von der Reproduktion, bei der die Kinder sich von ihren Eltern unterscheiden dürfen.) Sie ist allerdings aberwitzig kompliziert. Obendrein hat von Neumann sie zwar mathematisch korrekt definiert, aber nicht angegeben, wie sie Zelle für Zelle zu realisieren wäre.

Diese überaus mühsame Detailarbeit haben erst 1995 Renato Nobili an der Università di Padova und Umberto Pesavento an der Princeton University geleistet. Um die Sache zu vereinfachen, veränderten sie von Neumanns Entwurf geringfügig: Ihre Zellen können 32 statt 29 verschiedene Zustände annehmen. Die selbstreplizierende Konfiguration besteht aus 6329 Zellen plus einem 145 315 Zellen langen Band,

das vergleichbar dem Erbgut von Lebewesen eine Konstruktionsanweisung zum Ablesen enthält. Ein Fortpflanzungszyklus, das heißt das Duplizieren der Konfiguration einschließlich des Bands, erfordert 63 Milliarden Zeitschritte. Jahrzehntelang hätte die verfügbare Rechenleistung nicht ausgereicht, um die Konstruktion von Nobili und Pesavento in akzeptabler Zeit auf einem Computer nachzuvollziehen; dieser Kraftakt ist erst vor wenigen Jahren gelungen.

Inzwischen ist auch von Neumanns originale Konstruktion mit 29 Zuständen ausgearbeitet und programmiert worden. William R. Buckley, der 2000 seine Masterarbeit über ein Problem in diesem Zusammenhang geschrieben hatte, arbeitete an dem von ihm gegründeten California Evolution Institute die Einzelheiten aus. Die sich selbst replizierende Konfiguration umfasst 18 589 Zellen, das Kodierungsband besteht aus 294 844 Zellen, und eine Verdopplung benötigt

## Zelluläre Automaten und das Spiel des Lebens

Ein zellulärer Automat besteht aus einem – im Prinzip unendlich großen – Schachbrett; auf jedem Feld (jeder »Zelle«) sitzt eine kleine Maschine (ein »Automat«). Alle Automaten sind gleich.

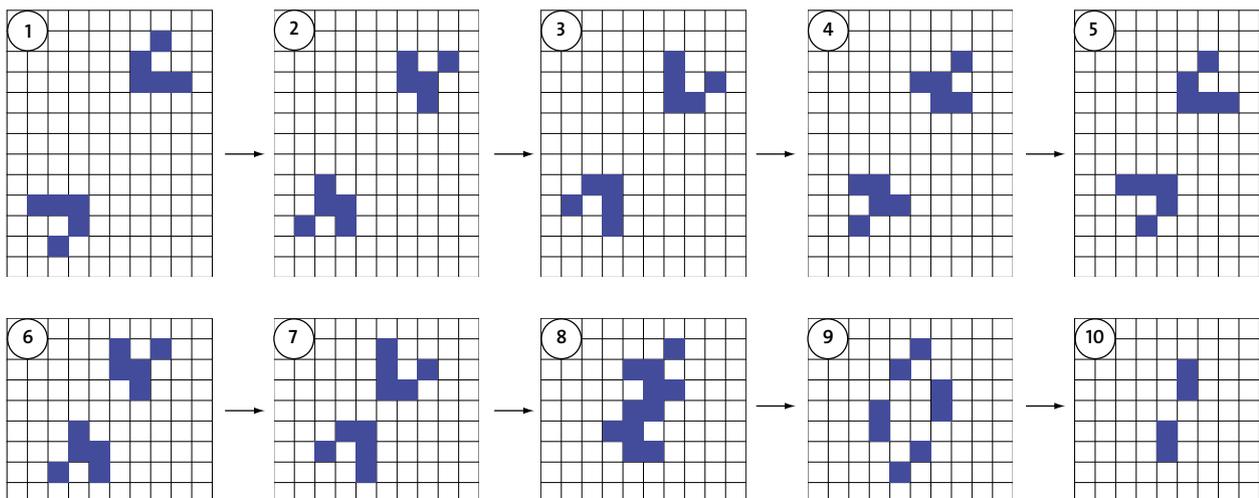
Ein Automat befindet sich zu jedem Zeitpunkt in einem von endlich vielen, vorab festgelegten Zuständen. Die Zeit verläuft in diskreten Schritten; und zwar hängt der Zustand jedes Automaten zum Zeitpunkt  $t+1$  nach einer bestimmten Funktion von seinem eigenen Zustand und von dem seiner Nachbarn zum Zeitpunkt  $t$  ab.

Typischerweise erklärt man zu Nachbarn die acht Felder, die – über Kante oder über Eck – an das aktuelle Feld angrenzen. Andere Nachbarschaftsdefinitionen sind möglich und gehören ebenso wie die Funktion, die den neuen Zustand jedes Automaten aus dem alten errechnet, zu den »Naturgesetzen«, die der

Schöpfer dieser primitiven Kunstwelt nach seinem Belieben bestimmen kann.

Der meiststudierte zelluläre Automat ist der zum »Spiel des Lebens« (»Game of Life«) von John Conway. Seine Zellen haben die zwei Zustände »tot« (weiß) und »lebendig« (blau). Hat eine lebende Zelle zwei oder drei lebende Nachbarn, so bleibt sie am Leben, andernfalls stirbt sie. Hat eine tote Zelle genau drei lebende Nachbarn, so wird sie lebendig, andernfalls bleibt sie tot.

Diese einfachen Regeln erzeugen eine überraschend reichhaltige Dynamik. Insbesondere gibt es »Gleiter«, Anordnungen, die diagonal über das Brett wandern und dabei in regelmäßigen Abständen immer wieder dieselbe Gestalt annehmen. In der abgebildeten Folge der Ereignisse prallen zwei Gleiter aufeinander und vernichten sich dabei gegenseitig: Im elften Zeitschritt sind alle Zellen tot.



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: POUR LA SCIENCE

261 Milliarden Schritte. Heute kann jedermann mit Hilfe des kostenfreien Programms Golly auf dem PC in wenigen Viertelstunden dieses bemerkenswerte mathematische Theaterstück verfolgen, das mehr als 50 Jahre unspielbar war. Das gilt sowohl für die Version von Nobili und Pesavento als auch für die von Buckley. Letztere kommt derjenigen von Neumanns näher, ist aber auch heute noch viel langsamer.

### Vereinfachte Modelle

Es geht allerdings auch viel einfacher. Christopher Langton hat 1984 eine Konfiguration gefunden, die zu Beginn aus bescheidenen 86 Zellen besteht und sich gleichwohl selbst reproduziert. Diese Entdeckung und weitere, die ihr folgten, lassen von Neumanns komplexe Konstruktion auf den ersten Blick hoffnungslos ungeschickt erscheinen. Erst wenn man sie im Kontext seiner Zeit betrachtet und von Neumanns am lebenden Vorbild orientierte Vorstellungen mit einbezieht, kann man sie als wissenschaftlichen Durchbruch ersten Ranges erkennen und würdigen.

Damit man überhaupt von Selbstreplikation sprechen kann, muss man den Schauplatz des Geschehens festlegen, sprich eine »Welt« mit präzisen »physikalischen Gesetzen«. Das kann unsere Welt sein oder aber auch eine vereinfachte, deren Gesetze durch wenige mathematische Regeln eindeutig und erschöpfend beschrieben werden. Unter diesen künstlichen Einfachwelten sind aus mehreren Gründen die zellulären Automaten besonders reizvoll.

Erstens sind sie »diskrete Welten«: Sowohl Ort als auch Zeit sind keine kontinuierlichen Variablen, sondern nehmen »diskrete« Werte an, das heißt solche, deren Differenz nicht beliebig klein wird. Das macht sie einfach programmierbar, vor allem weil im Gegensatz zur echten Welt die ganze Diffe-

renzialrechnung mit ihren begrifflichen und rechnerischen Schwierigkeiten entbehrlich ist. Zweitens sind in einem zellulären Automaten – wie in unserem Universum – alle Wechselwirkungen lokal: Ein Punkt wirkt auf einen anderen, weit entfernten, nicht unmittelbar und schon gar nicht ohne Zeitverzug, sondern stets nur durch Vermittlung dazwischenliegender Punkte. Drittens dürfen die Gesetze, die man zu Grunde legt, extrem einfach sein, was den entsprechenden zellulären Automaten nicht hindert, ein überaus komplexes Verhalten zu zeigen. Konrad Zuse (1910–1995), der Erfinder des ersten programmierbaren Rechners, ging sogar so weit, in seinem »Rechnenden Raum« von 1967 das ganze Universum als einen zellulären Automaten – mit ungeheuer kleinen Zellen – zu interpretieren (Spektrum der Wissenschaft Spezial 3/2007 »Ist das Universum ein Computer?«, S. 6).

Hat man sich auf ein Universum – zum Beispiel einen zellulären Automaten – festgelegt, bleibt zu definieren, was genau unter Selbstreplikation zu verstehen ist. Mathematiker neigen dazu, eine solche Definition auf das absolut Unerlässliche zu beschränken, um nicht aus Versehen einen möglicherweise interessanten Fall auszuschließen. Insbesondere soll dadurch nicht schon ein spezielles Verfahren festgelegt werden. Dementsprechend würde man definieren:

*Selbstreplikation findet statt, wenn ein Objekt, das in Gestalt eines einzigen Exemplars vorliegt, später in mehreren Exemplaren anzutreffen ist.*

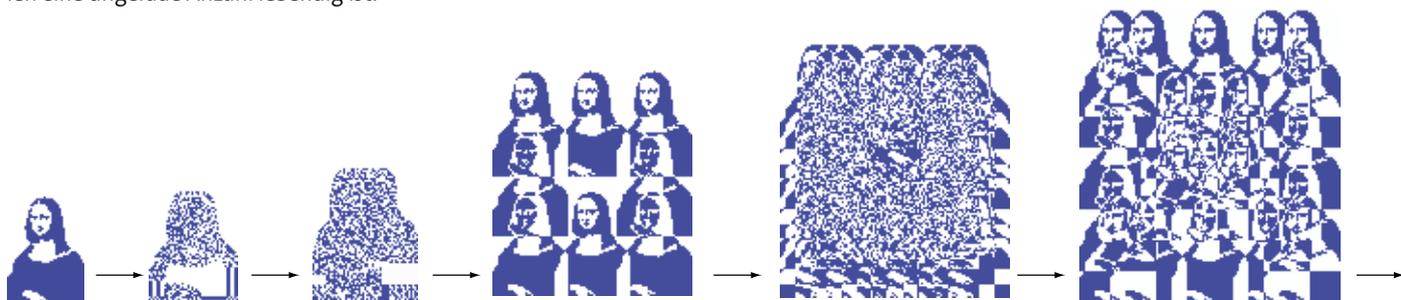
Diese Bestimmung stellt sich allerdings sehr rasch als unbrauchbar heraus. Sie schließt nämlich Prozesse ein, die bereits unmittelbar durch die Festlegung der Gesetze erzwungen werden. Nehmen wir als Beispiel einen zellulären Automaten namens »Trivial« mit dem folgenden Gesetz:

## Ein überraschend einfacher Vervielfältigungsautomat

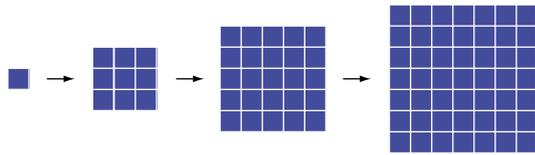
**Edward Fredkin, Serafino Amoroso und Gerald Cooper** verdanken wir eine erstaunliche Entdeckung: einen zellulären Automaten namens Replicator, der von jeder beliebigen noch so komplexen Struktur perfekte Kopien erzeugt. Die Regeln für diesen Automaten lauten: Eine Zelle ist entweder lebendig (blau) oder tot (weiß). Sie ist im nächsten Zeitschritt genau dann lebendig, wenn im aktuellen unter ihren acht Nachbarzellen eine ungerade Anzahl lebendig ist.

Aus der Ausgangsanordnung (hier eine in Pixel aufgelöste Silhouette der Mona Lisa) wird nach 256 Schritten dasselbe Muster in achtfacher Ausfertigung. Es ist nicht schwer zu beweisen, dass jede Ausgangsanordnung in dieser Weise vervielfältigt wird.

Das Prinzip lässt sich verallgemeinern. An Stelle von zwei darf die Anzahl der Zustände des Automaten eine beliebige Primzahl  $p$  sein. Die Regel lautet dann: Man nehme die Summe der Zustände



- Eine Zelle ist entweder tot (weiß im Bild unten) oder lebendig (blau).
- Eine Zelle bleibt im Zeitpunkt  $t+1$  lebendig, wenn sie dies zur Zeit  $t$  war; eine tote Zelle wird zum Leben erweckt, wenn eine ihrer acht Nachbarzellen lebendig ist.



Wenn es zum Zeitpunkt  $t=0$  im ganzen Universum eine einzige lebende Zelle gibt, dann erhält man nacheinander 9, 16, 25, 36 ... Exemplare dieses Urobjekts. Nach der obigen naiven Definition ist das ein Fall von Selbstreplikation. Allerdings ist sie so einfach, dass wir nichts von ihr lernen!

Obendrein dürfte man diesen zellulären Automaten auch als sehr grobes Modell unseres Universums nicht zu wörtlich nehmen. Dass aus nichts etwas entsteht, das verhindern im echten Universum bereits die Erhaltungssätze für Materie und Energie. Man könnte zwar im Prinzip einen stehenden Dominostein als »tot«, einen umgefallenen als »lebendig« definieren und daraufhin die Kettenreaktion, die man bei den sorgfältig arrangierten Domino-Fernsehschows bewundern kann, als Selbstreplikation bezeichnen – aber das wäre ziemlich albern.

Immerhin könnte der zelluläre Automat Trivial als Modell für die Ausbreitung einer Schimmelpilzkolonie dienen – mit gewissen Verfeinerungen, denn Schimmelpilze pflegen sich nicht in Form eines Quadrats auszubreiten. Das würde allerdings immer noch keinen großen Erkenntnisgewinn bringen. Schon etwas besser würde sich der Einfachautomat als

Modell für den Mechanismus eignen, der dem Rinderwahnsinn zu Grunde liegt. Die krankhaften Prionen namens Prp<sup>sc</sup> vervielfachen sich, indem sie Prionen mit der unschädlichen Konformation Prp<sup>c</sup> bei Kontakt in ihresgleichen verwandeln – genau so, wie eine blaue Zelle des Automaten Trivial die sie umgebenden weißen Zellen verändert.

Diese primitive Form der Selbstreplikation funktioniert nur mit sehr einfachen Objekten. Aber selbst größere Einheiten schützen nicht vor Trivialität. Der folgende Extremfall lässt sich in der Robotik einfach realisieren: Ein Roboter namens *A-B* besteht aus den zwei Teilen *A* und *B*, zum Beispiel aus einem Kopf und einem Rumpf. Jedes Teil ist für sich genommen handlungsunfähig. Nehmen wir an, dass *A* und *B*, sowie sie einander nahekomen, Anziehungskräfte aufeinander ausüben, zum Beispiel mittels Magneten, und sich daraufhin von selbst zum einem funktionsfähigen *A-B* zusammenkoppeln. Unterstellen wir weiter, dass die Teile *A* und *B* massenhaft in der Gegend herumliegen. Dann muss man nur noch einen *A-B* darauf programmieren, dass er ein *A* und ein *B* findet und zusammenbringt, und schon vermehren sich die *A-B* wie die Karnickel.

### Fredkins Replicator repliziert einfach alles

Das ist immer noch weit entfernt von der Vermehrungsweise der Lebewesen, aber nicht mehr ganz so abwegig. Dass sich ein Objekt durch Anziehungskräfte automatisch an den richtigen Platz bewegt, kennen wir von der Anlagerung der Atome an einen wachsenden Kristall. Und Viren entstehen dadurch, dass sich ihre Bestandteile mehr oder weniger von selbst zusammenfügen; allerdings hat das »Muttervirus« die Bestandteile nicht aufgesammelt, sondern ihre Herstellung der Wirtszelle »in Auftrag gegeben«.

Wenn wir also die Suche nach selbstreplizierenden Maschinen etwas genauer auf das lebende Vorbild ausrichten wollen, sollten wir den Roboter *A-B* nicht kategorisch ausschließen. Aber unsere naive Definition ist durch einige Einschränkungen zu ergänzen:

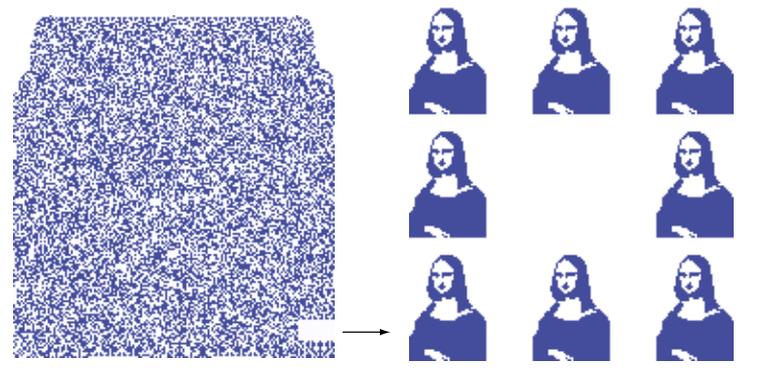
*Das sich selbst replizierende Objekt darf nicht zu einfach sein, und es darf nicht schon dadurch entstehen, dass einige wenige bereits in seiner Umgebung vorhandene komplexe Bestandteile zusammengebracht werden.*

Interessanterweise ist selbst damit die Selbstreplikation nicht auf die Art und Weise eingeschränkt, welche die Lebewesen praktizieren, weder in der realen Welt noch in der künstlichen.

Betrachten wir zuerst die letztere. Es gibt eine Familie von einfachen zellulären Automaten mit einer sehr überraschenden Eigenschaft, die von Neumann nicht kannte (sonst hätte er sie zweifellos erwähnt): Jede beliebig komplexe Konfiguration, die sich zum Zeitpunkt  $t=0$  auf dem Schachbrett befindet, erscheint in mehreren Exemplaren wieder, wenn man nur lange genug wartet, eine Weile später in noch mehr Exemplaren, und so weiter. Der einfachste dieser zellulären Automaten ist der »Replicator« von Ed Fredkin, einem der frühen Computerpioniere und »Digitalphilosophen« (siehe Kasten links).

der acht Nachbarzellen zum Zeitpunkt  $t$ . Der Zustand jeder Zelle im Zeitpunkt  $t+1$  ist gleich dieser Summe modulo  $p$ , das heißt, man nehme den Rest bei der Division durch  $p$ .

Auch die Anzahl der Kopien ist nicht auf acht festgelegt, sondern kann beliebig vorgegeben werden.



## Der fortpflanzungsfähige Automat

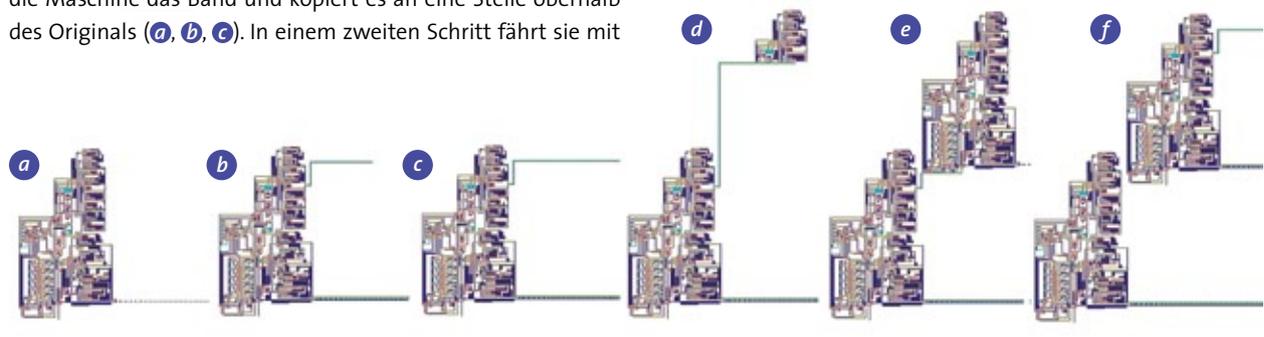
**John von Neumann erfand einen zellulären Automaten** mit einer selbstreplizierenden Konfiguration, die so komplex ist, dass ihre Aktivität auf den damals verfügbaren Rechnern nicht nachvollziehbar war – von Papier und Bleistift ganz zu schweigen. Das gelang erst 2008 mit einer geringfügigen Abwandlung, die Renato Nobili und Umberto Pesavento 1995 formulierten und die Tim Hutton im Detail programmierte. Eine große Fangemeinde für zelluläre Automaten stellt dieses Programm und viele andere auf der Website [golly.sourceforge.net](http://golly.sourceforge.net) bereit.

In der Version von Nobili und Pesavento besteht die Konfiguration aus zwei Teilen: einer Maschine, welche die Replikation ausführt, und einem Band, das in kodierter Form den Plan der Maschine enthält. Dieses an ein Genom erinnernde Band ist extrem lang und hier nur teilweise abgebildet.

Die Selbstreplikation verläuft in zwei Phasen. Zunächst liest die Maschine das Band und kopiert es an eine Stelle oberhalb des Originals (a, b, c). In einem zweiten Schritt fährt sie mit

einer Art beweglichem Arm – der aus Zellen der Maschine besteht – an der Kopie des Bands entlang, interpretiert die darauf verzeichneten Daten und setzt nach deren Anweisung Zelle für Zelle die neue Maschine zusammen (d, e, f). Sowie diese zweite Phase beendet ist, setzt sich die neue Maschine in Gang und produziert ihrerseits eine Kopie ihrer selbst sowie ihres Bands.

Das »Spiel des Lebens« von John Conway, der bestuntersuchte zelluläre Automat überhaupt, verfügt über zahlreiche universelle Eigenschaften. Daraus folgt, dass es auch in dieser künstlichen Welt eine sich selbst replizierende Anfangskonfiguration geben muss. Allerdings ist dieser Existenzbeweis nichtkonstruktiv, gibt also keinen Hinweis, wie diese Konfiguration zu finden wäre. Dies ist bis heute auch noch niemandem gelungen.



Es ist faszinierend, dem Replicator bei seiner Dynamik zuzusehen. Chaos scheint zu herrschen, bis von einem Zeitschritt zum nächsten plötzlich die Ursprungsstruktur makellos und in vielfacher Ausfertigung auf dem Bildschirm erscheint. Aber es ist nicht schwer zu beweisen, dass genau das eintreten muss. Letztlich ist das spektakuläre Phänomen die Konsequenz einer arithmetischen Eigenschaft des Systems, die nichts mit der belebten Welt zu tun hat und von dieser selbstverständlich auch nicht genutzt wird.

### Kopierer, die sich selbst kopieren

Nun zur realen Welt. Hier gibt es auch nichtbiologische Formen der Replikation; die geläufigste ist der Fotokopierer. Er dupliziert auch sehr komplexe Dinge, die auf dem Original geschrieben oder gedruckt sind. Es gibt sogar dreidimensionale Kopierer, die Objekte durch Stereolithografie reproduzieren. Stellen wir uns einen solchen Apparat nach dem Vorbild vieler Sciencefiction-Romane so perfektioniert vor, dass er jedes Objekt Atom für Atom duplizieren kann. Ein Bewohner dieser Zukunftswelt könnte sich dann – unerotisch, aber bequem – dadurch reproduzieren, dass er in einen Kopierer steigt und auf den Startknopf drückt. Selbstverständlich könnte sich ein Kopierer auch selbst vermehren.

Ein Extremfall der nichtbiologischen Selbstreproduktion komplexer Strukturen ist die Vielweltentheorie von Hugh

Everett (Spektrum der Wissenschaft 4/2008, S. 24). Zu ihr gehört die Annahme, dass sich das gesamte Universum in jedem Augenblick selbst vervielfältigt und die verschiedenen Exemplare von da an unterschiedliche Entwicklungen durchlaufen.

Auf der Suche nach lebensähnlichen Formen der Selbstreproduktion müssen wir also unsere Definition noch weiter verschärfen. Bekanntlich trägt jede lebende Zelle eine Art Bauanleitung in ihrer DNA. Wenn sich ein lebender Organismus vermehrt oder auch nur eine Zelle sich teilt, werden einerseits Teile dieser Konstruktionsbeschreibung in Proteine übersetzt, die den neuen Organismus bilden. Andererseits wird sie selbst kopiert, damit auch der neue Organismus über die nötigen Informationen zu seiner Replikation verfügt. Dieser doppelte Mechanismus von Übersetzung und Kopie ist die Existenzgrundlage jedes lebenden Organismus. Folglich sollte ein Schema der Selbstreplikation, das uns helfen könnte, das Leben zu verstehen, nach diesem »genetischen Prinzip« funktionieren.

Das wusste schon von Neumann, und zwar lange bevor die Struktur der DNA entschlüsselt wurde. In der Tat funktionieren seine selbstreplizierenden zellulären Automaten im Original ebenso wie in der Version von Nobili und Pesavento nach dem Prinzip »Maschine plus Band« (Kasten oben). Dabei entspricht das Band (von dem im Kasten nur

ein sehr kleiner Teil dargestellt ist) dem Genom eines Lebewesens. Bei der Selbstvermehrung wird zunächst eine Kopie des Bands hergestellt und dann diese abgelesen und in eine zweidimensionale Struktur übersetzt. Der Kopierer kopiert gewissermaßen seinen eigenen Bauplan und konstruiert mit der Kopie als Vorlage ein zweites Exemplar seiner selbst.

Damit wird klar, warum sich von Neumann nicht mit einem zellulären Automaten vom Typ Trivial oder Replicator zufriedengeben konnte. Ist es aber möglich, das Prinzip »Maschine plus Band« einfacher zu realisieren als mit von Neumanns gigantischem und extrem langsamem Apparat?



### Einfache Automaten mit Erbgut

Ja! Die Entdeckung geht auf das Jahr 1984 zurück und ist Christopher Langton zu verdanken. Der Informatiker, der auch den Begriff »künstliches Leben« prägte, wurde zuerst bekannt durch seine »Ameisen« (Spektrum der Wissenschaft 8/1995, S. 10, 9/1995, S. 12 und 10/1995, S. 10). Diese virtuellen Tierchen krabbeln über ein unendliches Schachbrett und verändern in Abhängigkeit von ihrem eigenen Zustand den Zustand des Felds, auf dem sie gerade stehen. Das Konzept des zellulären Automaten ist so allgemein, dass es auch die Welt von Langtons Ameisen beschreibt. Es ist kaum ein Zufall, dass sein selbstreplizierender Automat (»Langtons Schleife«) so wirkt, als würde er von einer Ameise betrieben: Nur an einer Stelle der Struktur findet Aktivität statt, und diese Stelle wandert typischerweise von Zelle zu Zelle.

Langtons Schleife besteht anfänglich aus 86 Zellen, angeordnet zu einem Schlauch mit einem »Genom« im Inneren. Aus ihr sprießt ein »Auswuchs«; der wächst in 150 Zeitschritten zu einer zweiten Schleife heran, in deren Innerem sich

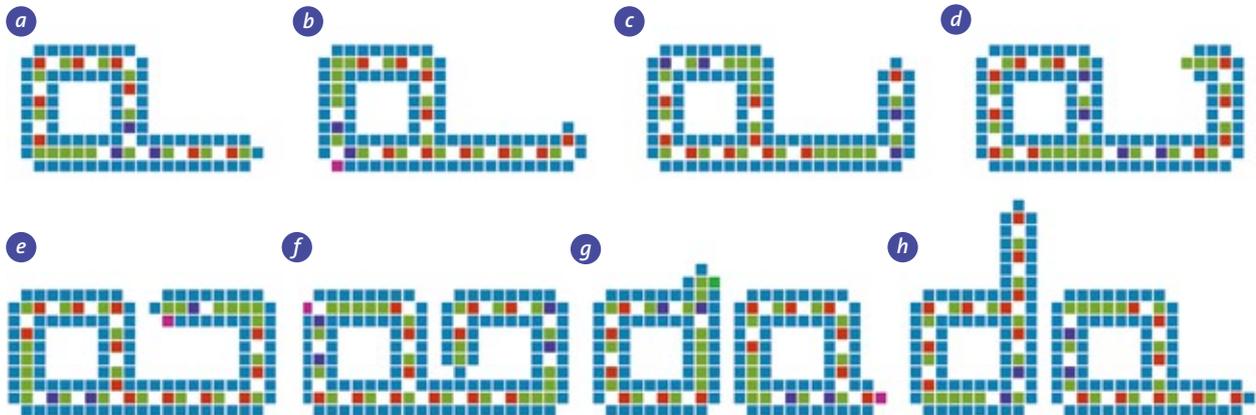
eine Kopie des Genoms der ersten Schleife befindet. Diese beiden Schleifen erzeugen wieder neue Schleifen, und so weiter. Nach und nach wird die gesamte Ebene mit Kopien der ursprünglichen Schleife bedeckt (Kasten unten).

Erstaunlicherweise gibt es selbst in diesem Modell noch Raum für Vereinfachung. So stellte sich der schützende Schlauch als entbehrlich heraus. Nach weiteren Untersuchungen fanden schließlich James A. Reggia und Hui-Hsien Chou von der University of Maryland 1993 eine selbstreplizierende Konfiguration, die aus nur noch sechs Zellen besteht (Spektrum der Wissenschaft 4/2002, S. 26). Welche von ihnen zählen zum Genom und welche zur Maschine? Diese Frage lässt sich wahrscheinlich nicht sinnvoll beantworten. Es sieht vielmehr so aus, als sei der Automat von Chou und Reggia eine Zwischenstufe in einem allmählichen Übergang vom Automaten Trivial zur Langton-Schleife. Damit wäre unser Versuch gescheitert, durch eine Definition die interes-

## Langton-Schleifen

Diese Konfiguration eines zellulären Automaten (a) kann man mit etwas Mühe noch als ein inneres Genom mit einer Außenhülle verstehen, vor allem weil eine einmal entstandene Zelle der Hülle sich im weiteren Verlauf nicht mehr verändert. Im

Prinzip bekommt ein schleifenförmiger »Körper« einen Auswuchs, der sich selbst zur Schleife krümmt (b bis f) und vom »Mutterkörper« abschnürt. Beide Schleifen vermehren sich so dann unabhängig voneinander weiter (g, h).

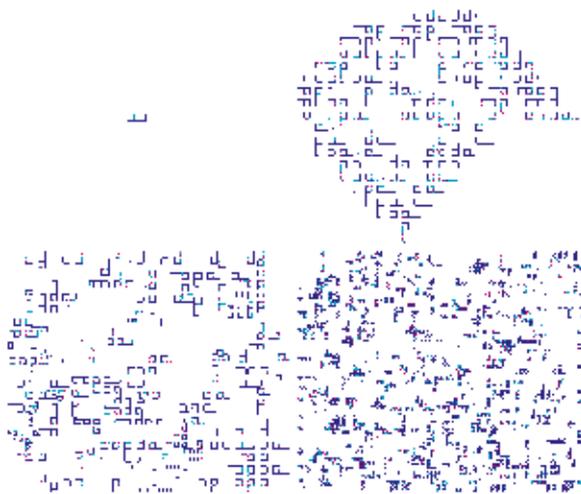


santen von den uninteressanten Formen der Selbstreplikation abzugrenzen.

Aber diesem unbefriedigenden Zustand lässt sich abhelfen. Wir haben bislang etwas missachtet, das in von Neumanns Augen wesentlich war: Das genetische System sollte nicht nur Kopien seiner selbst erzeugen können, sondern durch Veränderung seines Genoms auch andere Strukturen, die ihrerseits wieder zur Selbstreplikation fähig sind oder auch nicht. Das läuft darauf hinaus, ein wesentliches Element der biologischen Evolution in die künstliche Welt einzuführen, nämlich die Mutation. Wie kann das gelingen?

Auch dafür hat von Neumann schon die Grundidee geliefert. Er nannte seine fiktive Maschine »Universal Constructor«. Gemeint war eine Konfiguration in einem zellulären Automaten, die nicht nur sich selbst herstellen kann, son-

## Evolution der Schleifen



**Langtons Schleifen können außer Kopien ihrer selbst** keine anderen Objekte erzeugen, geschweige denn solche, die sich ebenfalls selbst reproduzieren. Das gelingt mit verallgemeinerten Schleifen, deren Genom veränderlich ist.

Die Schleife »Evoloop« von Hiroki Sayama bringt Nachkommen von unterschiedlicher Art und Größe hervor, die auch noch miteinander konkurrieren. Wer eine einzige Evolooop-Schleife im Raum des zellulären Automaten aussetzt, kann in der Folge eine Evolution im darwinschen Sinn beobachten! Zunächst vervielfältigen sich die Schleifen so gut wie unverändert. Wird es dann den Nachkommen zu eng, so entstehen durch Kollisionen zwischen den Schleifen Mutationen der Genome, und neuartige Schleifen treten auf. Manche von ihnen sind nicht lebensfähig und verschwinden nach kurzer Zeit wieder.

Im Kampf ums Überleben auf engem Raum setzen sich auf die Dauer die kleinen, robusteren Schleifen durch. Die Bilder zeigen vier Momentaufnahmen dieser Dynamik.

dern jede beliebige Konfiguration aus einer sehr großen Klasse. Und zwar gibt es zu jeder geforderten Konfiguration  $C$  ein Genom  $G$ , so dass der Universal Constructor  $C$  produziert, wenn er  $G$  abliest. Von Neumanns unförmige Maschine kommt dieser Idee zumindest nahe, während Langtons Schleifen zu solch universellen Leistungen nicht im Entferntesten fähig sind.

Unverkennbar hat von Neumann hier seine Ideen aus der Theorie der Computer auf die Welt der konstruierbaren Gegenstände übertragen – auch wenn diese Welt eigentlich wieder nur im Rechner existiert. Es gibt eine große Klasse von Aufgaben, die »berechenbaren Funktionen«, die eine Maschine im Prinzip lösen könnte. Ein Computer heißt universell, wenn er alle berechenbaren Funktionen berechnen kann. Der primitivste aller denkbaren Computer, die Turing-Maschine, die aus nichts als einem Magnetband und einem daran entlangwandernden Schreib-/Lesekopf mit etlichen inneren Zuständen besteht, ist bereits universell. Es ist kein Problem, eine Langton-Ameise zu definieren, die als Turing-Maschine arbeitet; und da man jede Langton-Ameise als einen speziellen zellulären Automaten definieren kann, gibt es zelluläre Automaten, die zugleich universelle Computer sind. Umgekehrt muss ein universeller Computer in Gestalt eines zellulären Automaten nicht unbedingt aus einer Langton-Ameise hergeleitet sein; selbst Conways »Game of Life« (Kasten S. 85) kann mit einer Anfangskonfiguration versehen werden, so dass er diese Eigenschaft besitzt.

## Sex im zellulären Automaten

Für von Neumann war also ein »universeller Konstrukteur« ein naheliegendes Analogon zum universellen Computer. Für ein System, das der Selbstreproduktion nach dem biologischen Vorbild fähig sein soll, wäre diese Fähigkeit allerdings zu viel verlangt. Lebende Organismen können nicht aus einem geeigneten Genom jeden beliebigen materiellen Gegenstand entstehen lassen – und haben das zum Leben auch gar nicht nötig. Für einen »lebensnahen« zellulären Automaten muss man ein vernünftiges Ausmaß an Konstruktionsfähigkeit fordern, aber keine Universalität und schon gar nicht die Fähigkeiten eines universellen Computers. Auch von Neumanns riesige Maschine war noch nicht in seinem Sinn universell.

Damit scheinen wir bei einem zufrieden stellenden Begriff von lebensähnlicher Selbstreplikation angelangt. Er ist allerdings weniger scharf definiert, als man hoffen könnte, weil das Ausmaß der geforderten Konstruktionsfähigkeit nur ungenau bestimmt ist.

Dass es von Neumann gelang, im Reich der zellulären Automaten ein lebensähnliches System mit der Fähigkeit zur Mutation auszuarbeiten, beweist, dass die Selbstreproduktion, die man in der Welt des Lebens beobachtet, kein »Wunder« ist (siehe das Zitat zu Beginn des Artikels). Der Nachweis, dass sein Modell des Lebens als materielle Grundlage nichts weiter braucht als eine diskrete, relativ einfache Physik, ist ein großer Fortschritt.

Langtons Schleifen sind zwar für von Neumanns Zwecke zu klein und zu unflexibel; gleichwohl haben sie einige Forscher zu Verallgemeinerungen inspiriert, die auf einfachere Versionen der Von-Neumann-Maschine hinauslaufen. So sind die Schleifen, die Gianluca Tempesti 1995 an der École polytechnique fédérale in Lausanne erfand, mit 148 statt 86 Zellen nur geringfügig komplizierter als die von Langton, können aber recht allgemeine Konstruktionen ausführen. Andere Modelle, wie der Evoloop von Hiroki Sayama, erzeugen eine ganze Familie selbstreproduzierender Schleifen unterschiedlicher Größe und Form, die einander auch noch den Platz streitig machen, mutieren, Erbgut aus verschiedenen Quellen zusammenführen («Sex») und damit dem darwinischen Kampf ums Dasein schon recht nahekommen (Kasten links). Das hätte von Neumann zweifellos gefallen.

Galilei und Newton haben gezeigt, dass die Planeten nicht Gottes ständiger Zuwendung bedürfen, um auf ihren Bahnen zu bleiben; es genügt, wenn sie den physikalischen Gesetzen folgen. Entsprechend hat von Neumann bewiesen, dass das Leben zu seiner Aufrechterhaltung kein immer währendes Wunder braucht. Das genetische Schema »Maschine plus Band« zusammen mit der Möglichkeit der Mutation genügt. Damit widerlegt von Neumanns Arbeit definitiv das vitalistische Argument, das Leben sei zu komplex, um sich auf die Physik reduzieren zu lassen. ~

## DER AUTOR



**Jean-Paul Delahaye** ist Professor an der Universität de Lille und forscht am Laboratoire d'Informatique Fondamentale de Lille (UFL).

## QUELLEN

**von Neumann, J.:** Theory of Self-Reproducing Automata. University of Illinois Press, Urbana 1966

**Pesavento, U.:** An Implementation of von Neumann's Self-Reproducing Machine. In: Artificial Life 2, S. 337–354, 1995

**Reggia, J. A. et al.:** Simple Systems that Exhibit Self-Directed Replication. In: Science 259, S. 1282–1287, 1993

## WEBLINKS

<http://golly.sourceforge.net>

Website mit Programmen für sehr viele zelluläre Automaten und Startkonfigurationen, lauffähig auf Windows und Mac

<http://psoup.math.wisc.edu/mcell/>

Mirek Wojtowicz: 1D and 2D Cellular Automata explorer. Sammlung zellulärer Automaten, mit kostenlosem Programm Mcell

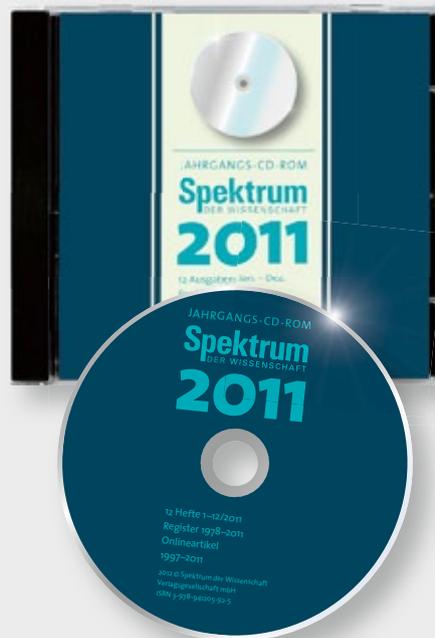
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1146816](http://www.spektrum.de/artikel/1146816)

## Praktisches aus dem Lesershop



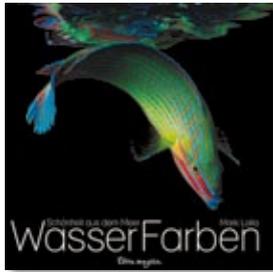
### Sammelkassette

Die Sammelkassette von **Spektrum der Wissenschaft** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).



### Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-941205-92-5



Mark Laita  
**WasserFarben**  
*Schönheit aus dem Meer*  
 Aus dem Englischen von Ursula Bischoff.  
 terra magica, München 2011. 200 S., € 49,99

MEERESBIOLOGIE

# Ohne Worte

Kein Beiwerk stört die optische Wirkung der eindrucksvoll fotografierten Meeresbewohner.

»**W**asserFarben« ist nicht mit »Wasserfarben« zu verwechseln! Denken Sie nicht an blasse Aquarelle. Knallbunt sind die vielen Fische und die wenigen Quallen und Kraken, die der amerikanische Fotograf Mark Laita eindrucksvoll ins Bild gesetzt hat. Der Verlag hat mit prachtvoll glänzendem Farbdruk und sattschwarzem Hintergrund das seinige dazugetan. Noch nicht einmal Seitenzahlen stören das ästhetische

Empfinden des Betrachters; die nötigsten Informationen stehen auf Erläuterungsseiten am Ende des Buchs.

Mit ihrer spektakulären Schönheit können die Meerestiere Artgenossen nie beeindrucken. Die meisten leben in Tiefen, in die nur noch die Blauanteile des Tageslichts vordringen. Laita hat sie deswegen eigens zum Fototermin in sein salzwasserhaltiges Studio gesetzt – so geräumig, dass immerhin ein Pazifi-

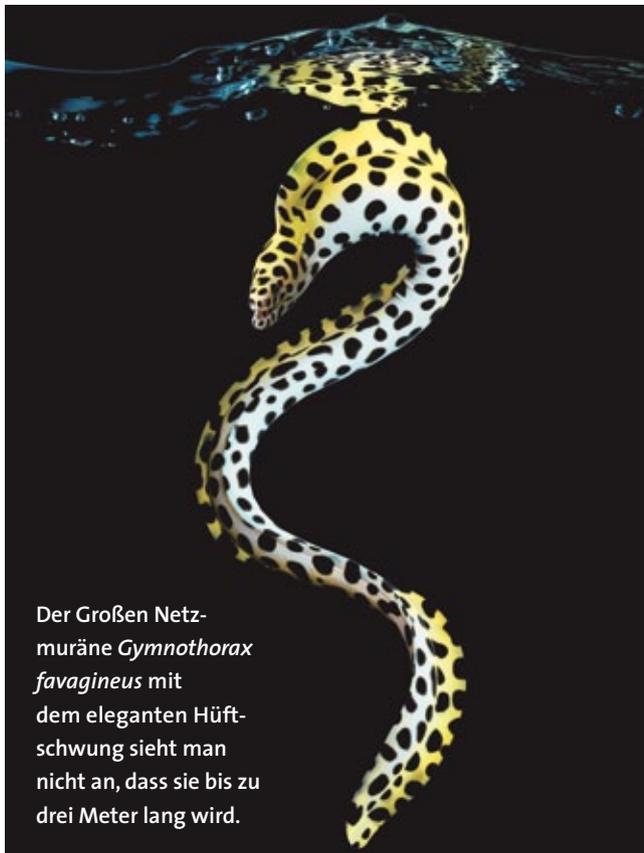
scher Riesenkrake mit einer Armspanne von viereinhalb Metern hineinpasst. Da ist die Wasseroberfläche nicht weit, und der Fotograf bezieht die Spiegelung an derselben als künstlerisches Element gern mit ein – häufig reizvoll, gelegentlich verwirrend und insgesamt etwas zu oft.

Nur den Walhai und den Tiefsee-Anglerfisch hat er – aus nachvollziehbaren Gründen – lieber in ihrem natürlichen Lebensraum aufgesucht: Für den 20 Meter langen Walhai wäre es doch etwas eng geworden, und der immense Wasserdruck der Tiefsee ist im Fotostudio schlechterdings nicht realisierbar.

Einzelporträtts liegen Laita sichtlich mehr als Gruppenaufnahmen. Sorgfältig für das Lehrbuch von der Seite abgelichtete Fische sind in diesem Buch die Ausnahme. Dafür ist die elegante, tänzelnde Bewegung, in der Laita seine Models eingefangen hat, beeindruckend und einmalig.

**Alice Krüßmann**

Die Rezensentin leitet die Bildredaktion von »Spektrum der Wissenschaft«.



Der Großen Netz-  
 muräne *Gymnothorax  
 favagineus* mit  
 dem eleganten Hüft-  
 schwung sieht man  
 nicht an, dass sie bis zu  
 drei Meter lang wird.



Der gewöhnliche  
 Krake *Octopus vulgaris*  
 ist in allen Welt-  
 meeren verbreitet.

MARK LAITA, ABRUCK MIT FRIHL. GEN. DER BUCHVERLAG LANGENMÜLLER



Roger Penrose  
**Zyklen der Zeit**  
*Eine neue ungewöhnliche Sicht des Universums*  
Aus dem Englischen von Thomas Filk.  
Spektrum Akademischer Verlag,  
Heidelberg 2011. 350 S., € 29,95

KOSMOLOGIE

## Spekulationen über den Urknall

Roger Penrose entwirft ein überaus gewagtes Weltmodell.

Wie wir heute wissen, fliegt das Universum mit steigender Geschwindigkeit auseinander. Wenn wir die kosmische Expansion zeitlich umkehren wie einen rückwärtslaufenden Film, landen wir bei einem ungeheuer heißen, dichten Anfangspunkt, dem Urknall. Über die Singularität, mit der Raum, Zeit, Strahlung und Materie ihren Anfang nahmen, wissen wir nichts.

Dennoch reizt es Kosmologen, über die Art des Anfangs zu spekulieren. Vielleicht ist unser Universum nur eines unter vielen Paralleluniversen, die unentwegt aus Quantenfluktuationen des Vakuums entstehen? Vielleicht gab es vor dem Urknall ein Vorgängeruniversum, das an seinem Ende zu einem singulären Punkt kollabierte, aus dem unser All hervorging?

Solche Spekulationen bereichert Roger Penrose um eine neue, eigenwillige Version. Der englische Mathematiker und Physiker ist eine Autorität auf dem Gebiet der allgemeinen Relativitätstheorie; zusammen mit seinem Kollegen Stephen Hawking hat er in den 1960er Jahren theoretisch bewiesen, dass es in der Raumzeit Singularitäten geben muss. Wie man heute weiß, lauern solche Risse im Raumzeit-Kontinuum zum Beispiel als supermassereiche Schwarze Löcher im Zentrum von Galaxien und machen sich gelegentlich als Quasare bemerkbar – die energiereichsten Strahlungsausbrüche überhaupt. Was eine solche Koryphäe über die Singularität am Anfang unseres Universums zu sagen hat, verdient gewiss Aufmerksamkeit.

Penrose beginnt seine Überlegung mit einem Problem, das der Urknall entwirft. Nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik strebt die Entropie eines Systems zu immer höheren Werten. Die Entropie ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Zustands, und die hängt wiederum mit der Unordnung des Systems zusammen. Penrose zitiert das Beispiel vom rohen Ei, das vom Tisch rollt und auf dem Teppich zerbricht. Der Vorgang erhöht die Entropie des Eis, das als unordentliche Masse auf dem Teppich liegen bleibt; der umgekehrte Prozess – der Teppich wird von selbst wieder sauber, das geplatze Ei setzt sich zusammen und landet auf der Tischkante – ist zwar mikrophysikalisch nicht unmöglich, da die Bewegungen aller einzelnen Eipartikel zeitlich umkehrbar sind, aber extrem unwahrscheinlich. Diese Vorzugsrichtung der zeitlichen Entwicklung drückt der Satz von der zunehmenden Entropie aus.

Das Problem ist nun: Wenn die Entropie seit Anbeginn der Welt immer nur zugenommen hat, muss sie beim Urknall winzig gewesen sein. Aber wieso soll jener heiße, dichte Ausgangspunkt, der Augenblick einer gigantischen Explosion, ausgerechnet ein Höchstmaß an Ordnung und Unwahrscheinlichkeit besessen haben? Das schreit geradezu nach einer Vorgeschichte, die uns erklärt, wodurch die Entropie des Universums beim Urknall quasi auf null gestellt wurde.

Wie Penrose dieses Problem im ersten Teil seines Buchs erläutert, das

macht ihm keiner nach. Er nimmt den Leser mit in abstrakte Phasenräume, die er mit virtuos gezeichneten Skizzen veranschaulicht. Wie in seinen früheren halb populärwissenschaftlichen Büchern – beginnend mit »The Emperor's New Mind«, das ich seinerzeit ins Deutsche übersetzt habe – erweist er sich als souveräner Erzähler von Geschichten aus der Welt der mathematischen Physik. Man ist gespannt auf den Ausgang: Wie wird Penrose das kosmologische Entropieproblem lösen?

Um es gleich zu sagen: Er verlässt die Physik und hebt in pure Geometrie ab. Ziemlich kurz angebunden – was sonst gar nicht seine Art ist – führt Penrose geometrische Transformationen ein, die er bescheiden »konforme Abbildungen zwischen Minkowski-Räumen« nennt. In der Fachwelt sind sie als Penrose-Diagramme bekannt. Experten der Gravitationstheorie dürften sie so anschaulich finden wie ein Teilchenphysiker die Feynman-Diagramme, aber dem gewöhnlichen Leser gibt Penrose keine Erklärung, sondern nur Hieroglyphen.

Diese konformen Abbildungen müssen nun die gesamte Beweislast des von Penrose vorgeschlagenen Modells tragen. Penrose-Diagramme zeichnen sich dadurch aus, dass beim Wegtransformieren der Unendlichkeiten mittels dieser Abbildungen nur die Lichtkegel, das heißt die Raumzeitlinien der Photonen, ihre Form behalten. Also nimmt Penrose einfach an, dass mit der Zeit die gesamte Materie des Universums in Schwarzen Löchern verschwindet, bis nur noch Photonen übrig sind – und dann macht eine konforme Transformation aus dem müden alten Universum schwuppdiewupp ein funkelnagelneues, das mit einem rein geometrisch herbeigezauberten – oder zumindest ermöglichten – Urknall beginnt.

Und wieso verschwindet dabei die hohe Entropie des alten Universums? Da wird Penrose ganz vage. Er behauptet, die alles verschlingenden Schwarzen Löcher würden als eine Art Entropiestaubsauger wirken. Das ist aber doppelt ungläubwürdig. Was nach Stephen Hawkings früherer Meinung – die dieser im Unterschied zu Penrose un-

terdessen revidiert hat – in Schwarzen Löchern auf Nimmerwiedersehen verschwindet, ist nicht Entropie, sondern Information. Letztere ist aber gewissermaßen das Gegenteil von Entropie. Wenn Information, das heißt geordnete Struktur, im Schwarzen Loch verschwindet, nimmt die Unordnung des restlichen Universums zu: Die Entropie wächst! Ganz zu schweigen davon, dass die allermeisten Physiker, Hawking inklusive, heute der Überzeugung sind, dass Schwarze Löcher die geschluckte Information mit der so genannten Hawking-Strahlung wieder komplett auswerfen.

So oder so: Die Schwarzen Löcher lösen das von Penrose aufgeworfene Rätsel der kosmologischen Entropie nicht. Der von der Exposition des Problems faszinierte Leser fühlt sich frustriert.

Unabhängig davon muss jedes kosmologische Modell, und sei es noch so spekulativ, irgendeine empirisch prüfbare Aussage machen. Das versucht auch Penrose. Er vermutet, in der kosmischen Hintergrundstrahlung müsste es charakteristische Spuren der letzten Phase vor dem Urknall geben, und zwar in Form großer Kreisbögen, die sich als winzige Abweichungen vom Strahlungshintergrund am Himmel abzeichnen

sollen. Es wurde im vergangenen Jahr sogar gelegentlich behauptet, man habe solche Spuren entdeckt. Die meisten Kosmologen bezweifeln aber, dass dahinter mehr steckt als Zufallsrauschen.

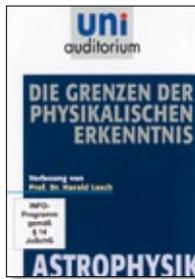
Alles in allem eröffnet das Buch einen interessanten, aber letztlich verwirrenden Blick in hochspezielle Bereiche der kosmologischen Hypothesenbildung. Ab der Mitte ist es nur noch für einen kleinen Kreis von Experten verständlich.

**Michael Springer**

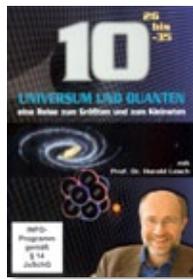
Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.



Harald Lesch, Jörn Müller  
**Sternstunden des Universums**  
Von tanzenden Planeten und kosmischen Rekorden  
C. Bertelsmann, München 2011.  
268 S., € 19,99



Harald Lesch  
**Die Grenzen der physikalischen Erkenntnis**  
DVD.  
Komplett-Media, Grünwald 2009.  
64 Minuten, € 14,95



Harald Lesch  
**10 hoch 26 bis -35 Universum und Quanten – Eine Reise zum Größten und zum Kleinsten**  
DVD.  
Komplett-Media, Grünwald 2010.  
85 Minuten, € 22,95



Harald Lesch  
**Die Ganze Natur**  
Goethes Naturphilosophie  
DVD.  
Komplett-Media, Grünwald 2010.  
55 Minuten, € 19,99



Wilhelm Vossenkuhl, Harald Lesch  
**Kant 3.0**  
Dialog über einen kritischen Geist  
DVD.  
Komplett-Media, Grünwald 2011.  
82 Minuten, € 14,99;  
Audio-CD,  
79 Minuten, € 12,95



Manfred Spitzer, Harald Lesch,  
Günther »Gunkl« Pahl  
**Gott!**  
Wo steckst Du?  
2 CDs.  
Galila, Etsdorf am Kamp (Österreich) 2011. € 19,90

PHYSIK UND MEHR

## Der Rand des Wahnsinns

Harald Lesch erklärt die Welt – und das macht wirklich Spaß.

Kommunikation wissenschaftlicher Sachverhalte ist schwierig. Umso mehr fallen Mitmenschen auf, denen es gelingt, die oft vertrackten Zusammenhänge auch für Laien nachvollziehbar und spannend darzustellen. Harald Lesch ist jemand, der es neben seiner wissenschaftlichen Arbeit als Astronom an der Universität München

wie kaum ein anderer schafft, auch größere Zuhörermengen in den Bann zu schlagen.

Lesch setzt ein an der Absturzkante des gesicherten Wissens, am »Rand des Wahnsinns« (in seinen eigenen Worten) oder auch an den »Grenzen der physikalischen Erkenntnis« (so der marktgängiger formulierte Titel der DVD) –

und fühlt sich dort am wohlsten. Denn da verlässt er bekanntes Terrain und begibt sich in das unwegsame Gelände großer – zumeist ungelöster – Fragen und spekulativer, ungeprüfter oder unüberprüfbarer neuer Theorien.

Harald Lesch spricht uns in zahlreichen Fernsehauftritten, im Radio und auf unzähligen DVDs an: direkt, scheinbar alltäglich und umgänglich. Und als Angesprochener lässt man sich die unglaublichen und oft jede Vorstellung sprengenden Ideen der modernen Physik und Kosmologie gerne gefallen, sogar seine wohlplatzierten Flap-

# Ein unwiderstehliches Angebot:



3 Ausgaben  
für Sie nur 11,70 €  
+ MINI MAGLITE® AA



#### MINI MAGLITE® AA

Sie passt in jede Westentasche und ist dennoch eine der Größten. Ausgestattet mit allen technischen Raffinessen der Großen setzt sie in ihrer kompakten Art eigene Akzente wie „Kerzenfunktion“ oder Drehschalter am Lampenkopf. Farbe: blau, ca. 14,5 cm lang. Inkl. Batterien und Etui.

Faszinierende Reportagen und grandiose Fotosessions • Verlässliche echte Insider-Tipps • Vor Ort überprüfte Adressen von Hotels und Restaurants  
Individuelle Städte-Touren, Traum-Reiseziele und Outdoor-Action • Sie erhalten jeweils die kommenden 3 Ausgaben und sparen 22%

Bestellen Sie noch heute 3 Ausgaben  
abenteuer und reisen –  
immer frei Haus, immer pünktlich.

Einfach Coupon ausfüllen und per Post  
absenden an: abenteuer und reisen,  
Abonnentenservice, Postfach 080,  
77649 Offenburg.

Oder per

Telefon: + 49(0)781/6394515

Fax: + 49(0)781/6394502

E-Mail:  
abenteuerundreisen@burdadirect.de

#### Ja, ich bestelle das Mini-Abo und erhalte die MINI MAGLITE® AA gratis dazu.

3 Hefte zum günstigen Preis von 11,70 € (Ausland 13,20 €, Schweiz 22,50 sfr), inkl. Zustellung und MwSt. Wenn ich abenteuer und reisen nicht mehr lesen möchte, teile ich das spätestens 10 Tage nach Erhalt des 3. Heftes mit. Andernfalls beziehe ich abenteuer und reisen automatisch für ein Jahr im Abo für nur 45,- € (Ausland 51,- €, Schweiz 86,- sfr). Mein Geschenk kann ich auf jeden Fall behalten. Lieferung nur solange Vorrat reicht. Vertrauensgarantie: Die Bestellung kann ich innerhalb von 14 Tagen ohne Begründung beim abenteuer und reisen Aboservice, Postfach: 080, 77649 Offenburg, widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Ich bin der neue Abonnent:  Frau  Herr

Name  Vorname

Straße  Hausnummer

PLZ  Ort

Telefon  E-Mail

Ich bezahle per:  Rechnung  Bankeinzug  Kreditkarte

BLZ / Kreditkarten-Nr.  Konto-Nr. / Kreditkarte gültig bis

Bank / Kreditkarten-Unternehmen  3-stellige Kreditkarten-Prüfnr.\*

Datum  Unterschrift

Ja, ich bin damit einverstanden (jederzeit widerruflich), dass Sie mich künftig per Post, Telefon und E-Mail über interessante Angebote von abenteuer und reisen und Partnerunternehmen informieren.

\* Die Prüfnummer setzt sich aus den letzten drei Ziffern der Nummer im Unterschriftsfeld auf der Rückseite Ihrer Kreditkarte zusammen.

abenteuer und reisen erscheint im Verlag:  
wdv GmbH & Co. OHG, Siemensstr. 6, 61352 Bad Homburg  
Handelsregister Bad Homburg v.d.H. HRA 3087

[www.abenteuer-reisen.de](http://www.abenteuer-reisen.de)

sigkeiten, die bei einem schlechteren Präsentator nur nerven würden. Wie er in Jeans und T-Shirt vor einer Schultafel steht, im lockeren Alltagston die schwierigsten Konzepte umreißt und – anachronistischer geht es gar nicht – mit Kreide einige Begriffe aufschreibt, das verführt auch solche, die bei Mathematik, Physik oder Astronomie eher an ihre schulischen Albträume erinnert werden.

Auf der DVD »Die Grenzen der physikalischen Erkenntnis« berichtet Lesch launig über die Grundlagen des physikalischen Weltbilds, also Quantenphysik, spezielle sowie allgemeine Relativitätstheorie – ein vergnüglicher Parcours durch schwieriges Gelände. Das gilt auch für die zahlreichen weiteren Videos von Lesch. Und bei allem Vergnügen sind es Vorlesungen von großem Nährwert für interessierte Laien, jeden Schüler oder Studenten, sei es die DVD über kosmische Dimensionen (»Universum und Quanten«) oder die über Gravitationswellen (»Kepler und

die Folgen«, oben nicht aufgeführt), bei der Lesch seine Darstellung gemeinsam mit den Astrophysikern Hanns Ruder und Karsten Danzmann in eine Tanztheatervorführung einbettet.

Es ist kein Wunder, dass Lesch als öffentliche Figur auch der Versuchung erliegt, buchstäblich über Gott und die Welt zu parlieren, so über Goethes Naturphilosophie (»Die Ganze Natur«) und über Philosophie allgemein (»Kant 3.0«) – auf der letztgenannten DVD im Gespräch mit dem Philosophen Wilhelm Vossenkuhl. Da geht es naturgemäß um die berühmten letzten Fragen: Was kann ich wissen? Was soll ich tun? Was darf ich hoffen? Oder zuletzt im Gespräch mit dem Hirnforscher Manfred Spitzer und dem Kabarettisten »Gunkl« ganz persönlich über Religion und Naturwissenschaft. Solches Cross-over geht oft schief – aber nicht bei Harald Lesch. Ich kann jedem, der sich gerade für die Beziehung von Religion und Wissenschaft interessiert, diese Dokumente nur empfehlen.

Wer gut sprechen kann, ist nicht notwendig auch ein guter Buchautor. Aber zusammen mit dem Astronomen Jörn Müller gelingt es Lesch in den »Sternstunden des Universums«, den lockeren Ton und die Anschaulichkeit seiner Vorlesungen in ein Buch zu übertragen. Auch hier blickt er über den Tellerrand der Naturwissenschaft hinaus und stellt – nach einem Rundumschlag von Kernenergie, Astronomie, Kosmologie bis zur Stringtheorie – die Grundsatzfragen: Warum gibt es überhaupt etwas und nicht nichts? Gibt es einen letzten Sinn? Gibt es Gott? In seinem Radiogespräch über Religion und Wissenschaft stellt Lesch fest: »Es ist der Zweifel, der uns alle verbindet.« Daher sollten aus seiner Sicht alle den fundamentalistischen Atheisten dankbar sein, weil diese es seien, die am heftigsten über Gott nachgedacht hätten.

**Reinhard Breuer**

Der Rezensent ist Editor-at-Large bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Bernulf Kanitscheider  
**Das hedonistische Manifest**  
Hirzel, Stuttgart 2011. 304 S., € 24,-

PHILOSOPHIE

## Lustvolle Ethik

Lebe so, dass du möglichst viele angenehme Erlebnisse hast. Diese ungeheuer attraktive Maxime erweist sich bei näherer Betrachtung als ergänzungsbedürftig.

Mein sechsjähriger Sohn Max pflegt sich den Mund bis zur Kapazitätsgrenze vollzustopfen – und manchmal darüber hinaus –, wenn es etwas Leckeres wie zum Beispiel ein fettes Hühnerbein gibt, und verzehrt mit Genuss die Produkte seiner Nase.

Wir werden ihm so etwas abgewöhnen müssen, aber das fällt nicht leicht.

Erstens ist es eine Wonne anzusehen, wie der Junge seinen Spaß hat. Zweitens steht das Argument, er störe das Empfinden anderer, auf wackligen Beinen: Die brauchen ja nicht hinzuschauen. Und drittens hat Max einen echten Philosophen auf seiner Seite. Der emeritierte Wissenschaftstheoretiker Bernulf Kanitscheider argumentiert auf 300

Seiten für den Hedonismus, die Ethik, welche die eigene Lust zum höchsten Ziel allen Handelns erhebt.

Die Idee ist nicht grundsätzlich neu. Unter den Griechen der Antike war sie durchaus verbreitet, am klarsten ausgedrückt nicht etwa von dem sprichwörtlichen Epikur, dem es eher um die Seelenruhe als die Lust an sich ging, sondern von seinem Kollegen Aristipp von Kyrene. Heute aber gilt sie als anrühlich oder zumindest minderwertig.

Der Standardphilosoph pflegt statt der Lust die Tugend zum höchsten Lebensziel zu erklären, oder wenigstens die Vervollkommnung des menschlichen Verstands. Und da es ihm um ewige, von jeder Beobachtung unabhängige Wahrheiten geht, muss ihm der Hedonismus schon deswegen suspekt sein, weil dieser sich auf eine empirische Beobachtung stützt: dass alle Menschen nach angenehmen Empfindungen streben und unangenehme zu vermeiden trachten.

Na ja: Ich kann damit leben, dass die Hedonisten bei der Beantwortung der



Damit aus Neugier  
Wissen wird.

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt **Spektrum NEO**. In jeder Ausgabe wird ein großes Thema behandelt – in Heft Nr. 2: »Die Welt im Jahr 2050«.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

 facebook

Bestellen Sie schon jetzt:  
[www.spektrum-neo.de](http://www.spektrum-neo.de)





Werner Kinnebrock

**Was macht die Zeit, wenn sie vergeht? Wie die Wissenschaft die Zeit erklärt**

C.H.Beck, München 2012. 160 S., € 12,95

Der Autor (»Bedeutende Theorien des 20. Jahrhunderts«) und ehemalige Reaktormathematiker Werner Kinnebrock hat sich einer dieser besonders nervigen Kinderfragen zugewandt, die leicht zu stellen, aber nur sehr schwer zu beantworten sind. Erfrischend bekennt er gleich zu Beginn: »Im Grunde weiß niemand, was ›Zeit‹ ist.« Über die »Zeitsparkasse« aus Michael Endes »Momo« und Goethes Klagen über die »veloziferische« Hektik seiner Zeit kommt er zu den klassischen Fragen: ob die Zeit rückwärts- oder langsamer laufen kann, wie man sie überhaupt misst, ob Zeitreisen möglich sind und wie es der Zeit in der Quantenphysik ergeht. Der Reigen endet mit Gedanken zu biologischen Uhren und Nahtoderlebnissen. Dank sparsamer Verwendung von Formeln und Tabellen und netten, kleinen Exkursen eine angenehme, einfache Lektüre für den Sonntagnachmittag. REINHARD BREUER



Bernd Harder

**Sie sind mitten unter uns. Die Wahrheit über Vampire, Zombies und Werwölfe**

Herder, Freiburg 2012. 200 S., € 14,99

Gar Schauerliches weiß der Autor zu berichten, aus Augenzeugenberichten wie auch aus Literatur und Film: von Gestaltwandlern, Untoten und Bluttrinkern, auch vom Ziegensauger Chupacabra, von Yeti und Big Foot. So mancher Geschichte nimmt er ihren Schrecken durch wissenschaftliche Erklärungen: warum Leichen mitunter nicht verwesen, Zombies eine Domäne Haitis zu sein scheinen und man die Jugend-Vampyr-Szene nicht fürchten muss. Gleichwohl lässt Bernd Harder viel Platz fürs Gruseln. Insbesondere in Sachen Werwölfe und Artverwandte fällt ihm wenig mehr ein als der Hinweis, die Fantasie des Menschen könne ihm im Dunkel der Nacht einen Streich spielen. Gibt es sie also wirklich? Eine Antwort bleibt uns der Autor schuldig. Eine hübsche Sammlung von Gruselgeschichten – aber ausgerechnet vom Chefreporter des Magazins »Skeptiker« würde man doch noch etwas mehr wissenschaftliche Vertiefung erwarten. KLAUS-DIETER LINSMEIER



Alain Hertz

**Der Graf der Graphen. Kriminalistische Verwicklungen mit mathematischer Pointe**

Aus dem Französischen von Micaela Krieger-Hauwede und Ines Laue.

Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2011. 192 S., € 29,95

Ein Kriminalist weiß nur, wer unter den sieben Verdächtigen welchem anderen innerhalb des gesicherten Bereichs begegnet ist, aus dem wichtige Beweisstücke gestohlen wurden. Allein daraus ermittelt er den Täter – am grünen Tisch, indem er sein Wissen in eine Gestalt aus Punkten und diese verbindenden Kanten bringt: einen Graphen. Ja, dieses mathematische Hilfsmittel kann die vielfältigsten realen Situationen auf einen abstrakten Kern reduzieren und dadurch handhabbar machen. Alain Hertz, Mathematikprofessor aus Montreal, führt uns mit neun Geschichten auf ebenso viele schöne Ergebnisse der Graphentheorie. Aber erwarten Sie keinen Krimi! Die Einkleidung in Kriminalfälle ist fadenscheinig bis nicht vorhanden, und der betuliche Schreibstil lässt Spannung gar nicht erst aufkommen. Ein Buch zum kultivierten Genießen im Lehnstuhl. CHRISTOPH PÖPPE



Steven Jay Schneider (Hg.)

**101 Science-Fiction-Filme – die Sie sehen sollten, bevor das Leben vorbei ist**

Aus dem Englischen von Stefanie Kuballa-Cottone. Olms, Zürich 2012. 416 S., € 9,99

Nach Action-, Kult-, Horror- und anderen Filmen ist das aktuelle Thema in der »101er Reihe« jetzt die Sciencefiction. 33 renommierte Filmkritiker haben in jeweils zwei (kleinformatigen) Seiten pro Film eine Inhaltsangabe, eine Einordnung in die Geschichte des Mediums, etliche Zusatzinformationen und ein charakteristisches Zitat untergebracht. Die interessanten und unterhaltsamen Texte beweisen, dass die Autoren ihr Handwerk verstehen. Hinzu kommen je ein ganzseitiges Filmplakat und Szenenfoto. Die Auswahl – von »Die Reise zum Mond« (1902) über »Lautlos im Weltraum« (1972) und »Blade Runner« (1982) bis zu »I, Robot« (2004) und »Children of Men« (2006) – ist durchaus überzeugend. Die Zeit nach 2006 ist in dem Buch nicht vertreten; aber davon abgesehen liefert es eine informative und kurzweilige Übersicht zu günstigem Preis. ELKE REINECKE

Philosophenfrage »Was soll ich tun?« auf die letzte Klärung der Frage »Was kann ich wissen?« verzichten. Immerhin gibt es kaum eine Beobachtung über Menschen, die besser belegt ist als diese.

Kanitscheider hat auch gegen die Vervollkommnung des menschlichen Verstands nichts einzuwenden, ganz im Gegenteil. Aber er stuft sie nicht als Ziel menschlichen Strebens ein, sondern als Mittel – für ein angenehmes Leben natürlich. Schon für dessen Finanzierung ist es hilfreich, wenn man seinen Verstand Gewinn bringend einsetzen kann; Bildung verhilft einem auch zu Freuden, die dem Hedonisten, der sich mit dem Vergnügen von Bier und Chips vorm Fernseher zufriedengibt, verschlossen bleiben; und vor allem bedarf die größte Quelle der Lust, die Sexualität, der bewussten Kontrolle. Insofern gesteht Kanitscheider dem Verstand durchaus eine bestimmende Rolle zu. Nur zu sorgfältig kontrollierten Gelegenheiten darf er sie vorübergehend

abgeben; denn der Hedonist möchte sich die Lusterlebnisse, bei denen es darauf ankommt, dass man den Verstand verliert, nicht prinzipiell versagen.

Auch gegen ein tugendhaftes Leben hat Kanitscheider keine grundsätzlichen Einwände. Er verwendet allerdings wesentliche Teile seines Buchs darauf, über die saueröpfischen, lustfeindlichen und pflichtbetonten Kollegen herzuziehen, die über die Jahrhunderte gesehen die erdrückende Mehrheit in seiner Zunft ausmachen. Zu allem Überfluss eigne sich Pflichtethik zur Begründung von Staatstreue und militärischem Gehorsam, während einem Genussmenschen die Begeisterung für kriegerische Abenteuer prinzipiell fremd sei.

Letzteres ist empirisch allerdings ausgesprochen schlecht begründet. Die Franzosen, kultivierte Genießer par excellence, und die Amerikaner, die den Hedonismus (»pursuit of happiness«) sogar an prominenter Stelle in ihre Un-

abhängigkeitserklärung geschrieben haben, waren nicht weniger kriegerisch als die pflichtgesteuerten Preußen.

Nicht neu, aber köstlich zu lesen ist Kanitscheiders Polemik gegen die Leute, die ihren Mitmenschen ausgerechnet das Vergnügen aufs Strengste reglementieren, über das sie selbst sich von Berufs wegen im Stand der Unkenntnis zu befinden haben: die Kleriker. Das waren noch Zeiten, als die Päpste sich die notwendige Sachkenntnis mit Hilfe ihrer Kurtisanen aneignen konnten! Welch Ironie der Geschichte, dass just Martin Luther, der Mensch, der für die »Freiheit eines Christenmenschen« kämpfte, sie nötigte, sich wieder streng an die lustfeindlichen Vorgaben der Kirchenväter zu halten.

Es ist allerdings nicht unproblematisch, dass Kanitscheider der Tugend eine untergeordnete Rolle zuweist. Der kluge Hedonist »strebt ... das Wohlwollen und die Freundschaft mit allen Mitmenschen an, aber nicht, weil es für

# 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 ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Einen Preisnachlass beim Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«



Produkt des Monats



diese Tugenden irgendeine metaphysische Begründung gäbe, sondern weil rein pragmatisch das Leben in einer wohlwollenden Umgebung am angenehmsten ist.« Nur seine unklugen Gesinnungsgenossen, die nicht begriffen haben, dass eine mit unlauteren Mitteln erlangte Annehmlichkeit auf die Dauer nicht so angenehm ist, muss man durch Vorschriften daran hindern, anderen Schaden zuzufügen.

Ganz so krass hält der Autor die Abwertung der Tugend zu einer abgeleiteten Größe dann doch nicht aufrecht. Der Hedonist, den er sich vorstellt, würde sich sein Vergnügen auch dann nicht auf unehrliche Weise verschaffen, wenn er sicher sein kann, nicht dabei erwischt zu werden. Aber richtig treffende Argumente gegen ein solches Verhalten führt Kanitscheider nicht an.

Selbst gegen die grausamen Mittel, mit denen die Romanfiguren des Marquis de Sade sich ihr Vergnügen verschaffen, hat er nur etwas sehr Abstraktes vorzubringen: De Sade verkennt, dass eine Einteilung der Menschen in Höher- und Minderwertige, sprich Quäler und Quälbare, nach allem, was die Wissenschaft dazu beizutragen hat, nicht begründbar ist. Demnach müsste jeder, der das Misshandeln befürwortet, damit rechnen, sich in der Rolle des Misshandelten oder gar Getöteten wiederzufinden, was hedonistischen Zielen zweifellos abträglich ist.

Aber der Irrglaube, es gebe höher- und minderwertige Menschen, ist weit verbreitet. Selbst der von Kanitscheider gepriesene Epikur hing ihm an, denn er hielt sich Sklaven, wie damals allgemein üblich. Ein Hedonist hätte gegenüber den zahlreichen Anhängern dieses Irrglaubens kein Argument gegen sadistische Praktiken – an Untermenschen, versteht sich – in der Hand.

Mehr noch: Tugendhaftes Verhalten ist zwar den Zielen des Hedonismus – meistens – zuträglich, aber der Hedonismus allein reicht nicht aus, das mit der erforderlichen Intensität und Glaubwürdigkeit zu begründen.

Nehmen wir eine ganz gewöhnliche Beziehungssituation. Sophie verhält sich gelegentlich so, dass es für Arne so

aussieht, als sei die zukünftige Lustbilanz eines gemeinsamen Lebens mit ihr negativ. Für Arne wäre es dann konsequent, ihr daraufhin den Laufpass zu geben. Für Sophies persönliche Lustbilanz dagegen ist es entscheidend, dass sie genau damit nicht rechnen muss – jedenfalls nicht jedes Mal, wenn sie ihm mit irgendeiner Zickigkeit auf den Geist geht. Nur unter dieser Voraussetzung ist sie zu gewissen Investitionen in die Beziehung bereit; durch diese und nur dadurch rutscht Arnes prognostizierte Lustbilanz ins Positive. Dasselbe gilt mit vertauschten Rollen, und so werden sie glücklich bis an ihr Lebensende.

Mit einer rein hedonistischen Begründung («Ich bleibe bei dir, weil es schön mit dir ist – und solange das der Fall ist.») kann das nicht funktionieren. Es funktioniert auch sonst in aller Regel nicht, sagt Kanitscheider und beruft sich dabei auf die empirisch zu beobachtende Natur des Menschen – was ich

in diesem Fall für ein schwaches Argument halte.

Es genügt auch nicht, wenn ich gegenüber dem Max argumentiere, dass sich wegen seiner Verhaltensweisen andere Leute von ihm abwenden und ihm deswegen sehr viele lustvolle Erlebnisse entgehen werden. Denn daraus folgt nur, dass er angenehme und unschädliche Tätigkeiten wie das Nasepopeln auf Gelegenheiten beschränken sollte, bei denen niemand zuschaut. Das schafft er nicht, so oft wie er, ohne es zu merken, den Finger in der Nase hat. Besser, er verinnerlicht den Grundsatz, dass so etwas eklig ist.

Eigentlich halte ich mich für einen lustbetonten Menschen. Erst die Lektüre dieses brillant geschriebenen Werks hat mir klargemacht, was für ein Tugendbold ich bin.

---

**Christoph Pöppe**

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Alastair Fothergill, Keith Scholey (Regie)

**Im Reich der Raubkatzen**

Walt Disney Studios Motion Pictures Germany, München.

Kinostart: 19. April 2012.

Freigegeben ohne Altersbeschränkung.

89 Minuten

KINOFILM

## Der König der echten Löwen

**Eine dramatische Geschichte vom Leben und Sterben in der Savanne – so wie das Leben sie erzählt.**

**A** star is born – im Wortsinn. Die überaus attraktive Hauptdarstellerin Mara ist ein neugeborenes Löwenmädchen, und der Film beginnt mit fröhlichen Bildern von Mutterliebe und sorglosem Herumspielen mit den anderen Angehörigen des Rudels – mitten in der beeindruckenden Weite der afrikanischen Savanne.

Disney setzt in diesem neuen Film wieder auf Tierdokumentationen – in schöner, alter Tradition von »Die Wüste

lebt«. Den Filmemachern geht es weniger darum, Wissen zu vermitteln, als vielmehr eine Geschichte zu erzählen. Mara wächst zu einer selbstständigen Junglöwin heran, der alte Rudelchef Fang muss seinem Herausforderer Kali und dessen Söhnen weichen, die Gepardenmutter Sita bringt drei ihrer fünf Kinder heil durch die Gefahren ihrer wilden Umwelt. Wie echte Schauspieler werden die Hauptfiguren auf der Website zum Film persönlich vorgestellt



Die Gepardin Sita mit ihren drei überlebenden Kindern schaut sich sichernd um (links). Das Löwenrudel im Anmarsch (oben) nimmt die kleine Mara (Porträtfoto rechts) schützend in die Mitte.



([www.disney.de/disneynature/filme/raubkatzen/#/charaktere](http://www.disney.de/disneynature/filme/raubkatzen/#/charaktere)).

Eine Stimme aus dem Off begleitet ihr Schicksal. Das bringt Informationen wie auch manche Emotion wesentlich besser zum Zuschauer als die Worte, die in »Die Reise der Pinguine« (Spektrum der Wissenschaft 10/2005, S. 98) den tierischen Darstellern in den Mund gelegt wurden. Dieses Stilmittel lief auf eine weit übertriebene Vermenschlichung hinaus und gab Anlass zu allerlei Diskussionen. Im »Reich der Raubkatzen« fühlt der Zuschauer auch ohne sprechende Tiere heftig mit, wenn sich die Löwin Layla zum Sterben zurückzieht, nachdem sie davon überzeugt ist, ihre Tochter Mara sicher im Schutz des Rudels zurücklassen zu können. Oder wenn die Gepardin Sita ihre Jungen gegen Hyänen verteidigt – und doch zwei von ihnen verliert. Stellenweise hätte auch der deutsche Sprecher Thomas Fritsch etwas weniger Theatralik in seine Stimme legen können.

Die Bilder sind fantastisch! Bewundernswert, wie die Kameralente es geschafft haben, die jagende Gepardin in freier Wildbahn in Zeitlupe so aufzu-

nehmen, dass man jede Bewegung der Muskeln sieht. Die Verantwortlichen haben gut daran getan, auf absolute Profis zurückzugreifen: Der Regisseur Alastair Fothergill war schon erfolgreich mit »Unser blauer Planet« und »Planet Erde«, zwei Dokumentarserien der BBC, die Maßstäbe setzten und aus deren Material die Kinofilme »Deep Blue« und »Unsere Erde« entstanden. Sein Kollege Keith Scholey, zuständig für Produktion, Drehbuch und Regie, ist promovierter Zoologe und hat als Chefredakteur der BBC-Naturkunderedaktion schon bei »Unser Blauer Planet« mit Fothergill zusammengearbeitet.

Eigentlich wirkt der Film, als hätte er ein Drehbuch gehabt – was natürlich nicht der Fall war. Die Filmcrew hat sich in den Nationalpark Masai Mara in Kenia begeben und dort nach besonderen Ereignissen gesucht – mit spektakulärem Erfolg. »Die Dreharbeiten haben zweieinhalb Jahre in Anspruch genommen, und in der ganzen Zeit gab es vielleicht 20 Tage, an denen etwas Außergewöhnliches passiert ist«, so Scholey.

»Im Reich der Raubkatzen« ist Familienunterhaltung im besten Sinn. Dem

»König der Löwen« aus derselben Filmfabrik, der eine ähnliche Geschichte im Zeichentrickformat erzählt, steht er in seiner Eignung für Kinder nicht nach. Und auch wenn der Film nicht zur Wissensvermittlung gedacht ist: Gelernt haben meine Kinder und ich trotzdem noch eine ganze Menge.

Kleiner Tipp: Bleiben Sie noch einen Moment sitzen, wenn der Film zu Ende ist. Die Aufzählung des Personals zum Film ist nicht so todlangweilig wie üblich. Man bedankt sich bei der Giraffe als »crane operator«, beim Warzenschwein für »hair and make-up«, beim afrikanischen Elefanten für »additional memory«, und die »security patrol unit« waren die Nashörner.

#### Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Online-redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

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

# Bücher und mehr



## Unser besonderer Tipp:



Mitarbeit: Stefan Heusler

### QUANTENDIMENSIONEN, DVD-ROM Doppelspalt – Verschränkung – Quantencomputer

2010, in DVD-Box, für PC und Mac, LEHR-Programm gem. § 14 JuSchG., Klett, Sciencemotion

Bestell-Nr. 3552 € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Diese ausgefuchste Lernsoftware bringt Licht in die mysteriöse Quantenwelt!

Mit den beiden Detektoren Alice und Bob begeben wir uns auf die faszinierende Reise in die Quantendimensionen von Licht. Wie lässt sich Licht beschreiben, woraus besteht es und wie verhält es sich? Auf der Suche nach Antworten nähern wir uns dem Licht auf zwei verschiedene Weisen – im Spielfilm »Schattenwelten« und anhand von 14 Lernstationen auf der U-Bahn-Linie 1, der Nonlocality Line. Diese Lernsoftware

zur Quantenphysik wurde von Physik-Didaktikern der Universität Münster entwickelt. Sie ist ein großer Spaß für alle Physikinteressierten und ideal auch für den Unterricht in der Oberstufe einsetzbar.



Brian Clegg

### WARUM TEE IM FLUGZEUG NICHT SCHMECKT UND WOLKEN NICHT VOM HIMMEL FALLEN

Eine Flugreise in die Welt des Wissens

2012, 238 S. m. zahlr. Abb., kart., Hanser

Bestell-Nr. 3518  
€ 14,90 (D), € 15,40 (A)

Nirgendwo sonst begeben wir uns so sehr in die Hand der Wissenschaft wie im Flugzeug. Brian Clegg erklärt, wieso wir ohne Relativitätstheorie ins Meer stürzen würden, weshalb Vielfliegen eine Verjüngungskur und eine wohlschmeckende Tasse Tee im Flugzeug ein Ding der Unmöglichkeit ist. Und er lehrt uns, wieder über die Welt zu staunen, die wir vom Flugzeugfenster aus wahrnehmen. Die perfekte Urlaubslektüre und der ultimative Flugbegleiter.



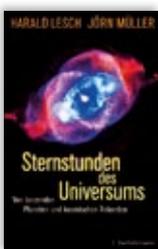
Brian Greene

### DIE VERBORGENE WIRKLICHKEIT Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos

2012, 500 S. m. Abb., geb., Siedler

Bestell-Nr. 3488  
€ 24,99 (D), € 25,70 (A)

In seinem neuen Buch macht sich Physiker und Bestseller-autor Brian Greene auf die Suche nach der »verborgenen Wirklichkeit« im Universum. Er zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir in den Weiten des Kosmos nicht allein sind, und er beschreibt, welchen Parallelwelten die Astrophysiker auf der Spur sind. Wie keinem Zweiten gelingt es ihm dabei, physikalische Spitzenforschung mit hohem Unterhaltungswert zu verbinden.



Harald Lesch, Jörn Müller

### STERNSTUNDEN DES UNIVERSUMS Von tanzenden Planeten und kosmischen Rekorde

2011, 267 S. m. 60 farb. Abb., geb., C. Bertelsmann

Bestell-Nr. 3471  
€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Die Astrophysiker Harald Lesch und Jörn Müller laden zu einem Spaziergang durchs Universum. Diesmal stellen sie wundersame Objekte und Ereignisse vor, die selbst Wissenschaftler immer wieder in Staunen versetzen. Man lernt Sterne kennen, die tausende Male leuchtkräftiger und heißer sind als unsere Sonne, begreift mit leichtem Gruseln, wie winzig die Zufallsspanne zwischen Sein und Nichtsein ist, liest die Wetterkarte anderer Planeten oder lässt sich verführen, den Urknall für einen Augenblick links liegen zu lassen.

Ebenfalls lieferbar als E-Book für € 15,99

[www.science-shop.de/artikel/1128395](http://www.science-shop.de/artikel/1128395)

Zum Downloaden folgen Sie diesem Symbol:



NEU

Gian Francesco Giudice

### ODYSSEE IM ZEPTORAUM Eine Reise in die Physik des LHC

2012, 372 S. 70 SW-Abb., geb., Springer

Bestell-Nr. 3551  
€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Seit Ende 2009 läuft das ambitionierteste wissenschaftliche Experiment aller Zeiten mit Rekordenergie – und doch sind seine Ziele der Allgemeinheit wenig verständlich. Dieses Buch versetzt jedermann in die Lage, die unmittelbar bevorstehenden Entdeckungen beim Teilchenbeschleunigerprojekt des Large Hadron Collider (LHC) am CERN zu verfolgen und nachzuvollziehen. Es lädt den Leser ein, die Theorie der Teilchenphysik mit den Augen eines Insiders zu betrachten. Im letzten Kapitel geht der Autor auf die Bedeutung der Forschungen am LHC für die Kosmologie ein.

Die großen Fragen behandeln grundlegende Probleme und Konzepte in Wissenschaft und Philosophie. Anspruch der ambitionierten Reihe ist es, die Antworten auf diese Fragen zu präsentieren und damit die wichtigsten Gedanken der Menschheit in einzigartigen Übersichten zu bündeln.



Tony Crilly

### DIE GROSSEN FRAGEN: MATHEMATIK

2012, 208 S. m. 70 Abb. u. 14 Tab., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3516  
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band Mathematik, der einen Bogen spannt vom Beginn des Zählens und den idealen platonischen Körpern bis zur Chaostheorie und dem Fermat'schen Theorem, setzt sich Tony Crilly mit jenen 20 Fragen auseinander, die das Herz der Mathematik und unseres Verständnisses der Welt bilden.



Stuart Clark

### DIE GROSSEN FRAGEN: UNIVERSUM

2012, 208 S. m. 15 Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3517  
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band Universum geht Stuart Clark den 20 entscheidenden Fragen der Astronomie, Kosmologie und letztlich unserer Existenz nach.

Weitere lieferbare Bände der Reihe:

Michael Brooks

### DIE GROSSEN FRAGEN: PHYSIK

Bestell-Nr. 3237 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Simon Blackburn

### DIE GROSSEN FRAGEN: PHILOSOPHIE

Bestell-Nr. 3239 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841  
Sie direkt: @ [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)



Klaus Schmeh

### NICHT ZU KNACKEN Von ungelösten Enigma-Codes zu den Briefen des Zodiac-Killers

2012, 224 S. m. Abb., geb., Hanser  
Wirtschaft Wissen Weltgeschehen

Bestell-Nr. 3519  
€ 18,90 (D), € 19,50 (A)

Die meisten Rätsel der Kryptologie sind heute gelöst – jedoch nicht alle. Der Kryptologie-Experte Klaus Schmeh hat die bedeutendsten ungeknackten Codes der Verschlüsselungsgeschichte zusammengetragen. In abenteuerlichen Geschichten schildert er die vergeblichen Bemühungen, die Botschaften zu dechiffrieren. Dabei begegnet er wagemutigen Charakteren mit genialen Ideen und präsentiert auch eigene Lösungsvorschläge.

Bequem bestellen:

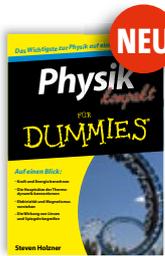
→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



**NEU** Steven Holzner

**PHYSIK KOMPAKT FÜR DUMMIES**

Ein Grundkurs

2012, 224 S., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3548

€ 10,- (D), € 10,30 (A)

Dieses Büchlein hilft Ihnen, wenn Sie sich einen schnellen Überblick über die Physik verschaffen wollen. Steven Holzner erklärt leicht verständlich, was Sie über Kräfte und Bewegungen, Energie, Wärme, Licht, elektrische Felder und Kernphysik unbedingt wissen sollten.



Immanuel Birmelin

**VON WEGEN SPATZENHIRN! Die erstaunlichen Fähigkeiten der Vögel**

2012, 204 S. m. 45 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3530

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Ihr Gehirn ist nicht größer als eine Nuss, und dennoch sind ihre geistigen Fähigkeiten mit denen von Schimpansen oder Walen vergleichbar. Krähen tricksen ihre Artgenossen bewusst aus, um sich den größten Futteranteil zu sichern. Und Kohlmeisen verstehen und lösen komplizierte Aufgaben schneller als Hund und Katze. Mit Respekt, Witz und Bewunderung berichtet der bekannte Verhaltensforscher von den geistigen Glanzleistungen der Vögel.



Robert Yarham

**LANDSCHAFTEN LESEN Die Formen der Erdoberfläche erkennen und verstehen**

2012, 256 S. m. zahlr. farb. Abb., geb., Haupt

Bestell-Nr. 3529

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Anhand sorgfältig ausgewählter Fotos und Illustrationen erklärt dieses reich illustrierte Buch die Entwicklung der Landschaften und die Entstehung ihrer Formen. Dieser nützliche Reisebegleiter unterstützt beim »Lesen« der Landschaft, zeigt, wie das, was wir in der Landschaft sehen, zu deuten ist und erklärt die wichtigsten Prozesse, die die Landschaftsformen vor unseren Augen geschaffen haben.



Werner Kinnebrock

**WAS MACHT DIE ZEIT, WENN SIE VERGEHT?**

Wie die Wissenschaft die Zeit erklärt

2012, 160 S. mit 4 Abb. u. 2 Tab., kart., Beck

Bestell-Nr. 3531

€ 12,95 (D), € 13,40 (A)

»Was macht die Zeit, wenn sie vergeht?« Diese Frage stellte der Physiker Albert Einstein dem Mathematiker Kurt Gödel. Für Werner Kinnebrock, selbst Mathematiker, war sie der Anlass, ein wunderbar verständliches Buch über dieses faszinierende Phänomen zu schreiben.



**NEU** Jesco von Puttkamer

**PROJEKT MARS**

Menschheitstraum und Zukunftsvision

2012, 270 S. m. zahlr. meist farb. Abb., geb., Herbig

Bestell-Nr. 3555

€ 24,99 (D), € 25,70 (A)

Der Mars lockt, denn unser äußerer Nachbar ist durchaus für uns erreichbar. Nach heutigem Wissensstand ist es sogar möglich, dass ihn Menschen in Zukunft bewohnen können. Doch welche Voraussetzungen sind notwendig, um erst einmal dorthin und wieder zurück zu gelangen, welche physischen und psychischen Strapazen werden die Astronauten auf dem Flug aushalten müssen, was erwartet sie in der unwirtlichen Landschaft des Planeten und wie können sie dort ihr Überleben organisieren? Der NASA-Raumfahrtexperte Puttkamer erklärt, wie es gehen kann.

**Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich**



Andreas Martius

**PAPIERFLIEGER DER EXTRA-KLASSE, MIT CD-ROM**

2012, 64 S. m. zahlr. farb. Abb., Beil.: Vorlagenbogen, geb., Christophorus

Bestell-Nr. 3539

€ 12,99 (D), € 13,40 (A)

Immer wieder ist es faszinierend, wie dieses gefaltete Stück Papier die Schwerkraft für eine Weile überwindet und sanft schwebt. Papierflieger sind aber nicht nur etwas zum Träumen, das Falten begeistert außerdem alle Konstrukteure. In dieser »Flugwerft für Profis« werden ganz besondere futuristische Modelle in einer speziellen Faltechnik gebaut, der Verhakung. So sind diese Flieger besonders stabil und flugsicher.



Andreas Jahn (Hg.)

**WIE DAS DENKEN ERWACHT**

Die Evolution des menschlichen Geistes

2011, 160 S., 26 Abb., kart., Schattauer

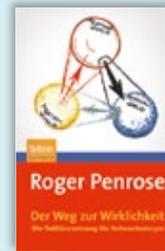
Bestell-Nr. 3470

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Wie entstanden unser Denken und unsere Sprache? Wie intelligent sind wir wirklich? Was empfinden wir als attraktiv?

Über alle Fachgebiete hinweg belegen renommierte Verhaltensforscher, Genetiker, Psychologen, Philosophen und Biologen, dass unser Denken und Verhalten auf unserem biologischen Erbe beruhen: Der Mensch ist ein Kind der Evolution. Erfahren Sie, wie und wieso wir wurden, was wir heute sind. Wie das Denken erwachte empfiehlt sich allen Leserinnen und Lesern, die mehr über Neurowissenschaften und Evolution erfahren möchten. Das Buch ist gleichzeitig eine Fundgrube für Psychologen und Naturwissenschaftler.

**Schnäppchen**



Roger Penrose

**DER WEG ZUR WIRKLICHKEIT Die Teilübersetzung für Seiteneinsteiger**

2010, XII, 244 S. m. 50 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3021 Früher € 24,95, jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Der Weg zur Wirklichkeit ist eine Kurzübersetzung des Penrose-Klassikers The Road to Reality, die aus dem Monumentalwerk für Physik- und Mathematikexperten die allgemeinverständlichen Kapitel für interessierte Laien lesbar macht. Wer ein Faible für die Grundfragen der Wissenschaft, einen Blick für Geometrie, einen Sinn für Zahlen und Neugier für kosmologische Theorien hat, findet in diesem klar und kompetent geschriebenen Buch überraschende und provozierende Ideen.



Helmut Genaut

**ETYMOLOGISCHES WÖRTERBUCH DER BOTANISCHEN PFLANZENNAMEN**

2012, 704 S., geb., Lizenz: Birkhäuser, geb., Nikol

Bestell-Nr. 3541 Früher € 148,-, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Das Buch vermittelt das Wissen über die Etymologie botanischer Pflanzennamen, also die Aufklärung über die Herkunft und Geschichte der wissenschaftlichen Gattungs- und Artnamen (einschließlich Bakterien, Algen, Pilzen, Moosen und Flechten) und gibt einen faszinierenden Einblick in die Geschichte der mannigfachen Beziehungen zwischen Pflanze und Mensch.



Brian Clegg

**VOR DEM URKNALL Eine Reise hinter den Anfang der Zeit**

2012, 352 S., geb., Rowohlt

Bestell-Nr. 3478

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Die Idee des Urknall hat mehr Fragen aufgeworfen als beantwortet. Auf der Suche nach dem Anfang von allem gibt Brian Clegg einen einzigartigen Überblick über die Modelle vom Ursprung des Universums. In verständlicher Weise berichtet er von frühen Schöpfungsmythen, darüber, dass unsere Milchstraße nur eine von vielen Galaxien ist, von Schwarzen Löchern, Dunkler Materie und manchem mehr. Es gelingt Clegg, den Leser unterhaltsam und fesselnd durch einen ganzen Parcours verblüffender kosmologischer Phänomene zu führen und den neuesten Stand des Forschungsgebiets zu präsentieren.

Besuchen Sie uns im Internet unter: **www.science-shop.de**

Bequem bestellen:

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

## Tödliche Arzneien

»Untersuchungen von W. Nyhan haben gezeigt, daß medikamentöse Gaben, die von einem älteren Säugling ohne Schaden vertragen werden, das Neugeborene schwer schädigen, ja sogar seinen Tod herbeiführen können. Das liegt vor allem daran, daß der Körper des Neugeborenen noch nicht die Fähigkeiten besitzt, die verabreichten Medikamente wieder auszuschcheiden, so daß er mehr Medikamente in sich aufspeichert als ihm zuträglich ist.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Mai 1962, S. 196

## NASA-Dependance in Australien

»In der Nähe von Canberra/Australien wird in Kürze das größte Radioteleskop der Welt entstehen. Ein Riesenkreuz, dessen Einzelarme je 1609 m lang und 12 m breit sein werden, bildet das Grundgerüst für ein parabolisch angeordnetes Netzwerk. Das Riesenkreuz soll 1965 fertig werden und einen Empfang aus 30 Milliarden Lichtjahren Entfernung ermöglichen.« *(Das Teleskop ist heute Teil des Deep Space Network der NASA und dient neben astronomischen Zwecken auch zur Kommunikation mit Raumsonden und Satelliten. Während des Apollo-Programms wurde von dort aus die Mondlandefähre überwacht. Die Red.)* *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Mai 1962, S. 201



Lange Schädel in der Eiszeit, kurze in der Jungsteinzeit



daß sich im Erscheinungsbild des Menschen ein fortgesetzter Wandel vollzogen hat. Die Ausgangsform des menschlichen Schädels war lang, wenn auch vor allem durch ihre Niedrigkeit und Schmalstirnigkeit von den heutigen Langköpfen verschieden. Brachykephale (*also eher Kurzköpfige. Die Red.*) gibt es erst in einem sehr späten Stadium der menschlichen Stammesgeschichte, zunächst in ganz geringer Zahl, in der Jungsteinzeit allmählich häufiger werdend.«

*Die Umschau in Wissenschaft und Technik* 9, 1962, S. 263–265

## Aufstieg der Kurzköpfe

»Der Vergleich von Funden aus aufeinanderfolgenden Zeitabschnitten sagt uns,



## Dunkle Sonne, laute Signale

»Die Gesellschaft für drahtlose Telegraphie m.b.H. hat während der Sonnenfinsternis am 17.4. Empfangsversuche in Berlin gemacht. Mit zunehmender Verfinsterung nahmen die Zeichen an Stär-

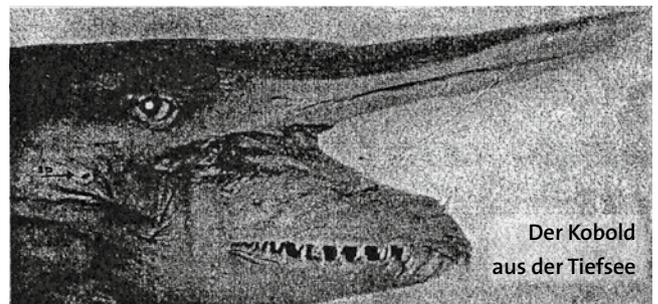
ke zu und erreichten ihr Maximum im Zeitpunkt der größten Sonnenbedeckung. Ganz ähnlich während der Wiederaufhellung der Sonne. Die ganze Beobachtung läßt den Schluß zu, daß die Intensität der Sonnenausstrahlung auf die Ausbreitung der Wellen von viel größerem Einfluß ist, als Temperatur- oder Feuchtigkeitsgrad der Atmosphäre.« *Elektrotechnische Zeitschrift*, Mai 1912, S. 488–489

## Hoch über dem Rummel

»Die höchste bisher gebaute Brücke dürfte die bei Constantine in Algier sein, deren Fahrbahn 174 m über dem Wasserspiegel des Flusses Rummel liegt. Da die Breite der Schlucht für eine gemauerte Brücke zu gross war, entschloss man sich zum Bau einer Hängebrücke nach dem System des französischen Ingenieurs Arnodin.« *(Seit 2009 ist die Siduhe-Brücke in China mit 472 Metern über dem Fluss die höchste Brücke der Welt. Die Red.)* *Prometheus* 1176, Mai 1912, S. 506–507

## Ein Hai mit dem gewissen Etwas

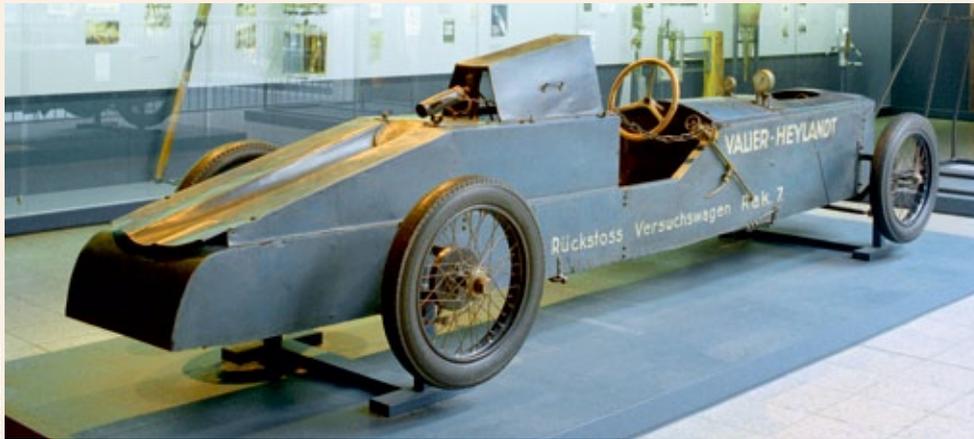
»Besonders ergiebig an Tiefseetieren haben sich der Indische Ozean und die japanischen Gewässer erwiesen. In diesen Gewässern fanden japanische Fischer einen riesigen Tiefseehai, dessen absonderliches Aussehen ihm in seiner Heimat den Namen »Tenguzame«, d. h. Koboldfisch, eintrug. Mitsukurina Owstoni Jordan wird bis zu 4 m lang; er hat die langgestreckte Form und die purpurbraune Farbe, die so viele Tiefseefische auszeichnen. Das Absonderlichste an ihm ist jedoch der Nasenfortsatz (Rostrum), der, von oben nach unten abgeflacht, am Vorderende des Schädels nach vorn ragt. Die stechenden Augen, die sonderbare Nase und das stark vorspringende Maul verleihen zusammen dem Hai ein gespensterhaft häßliches Aussehen.« *Kosmos*, Mai 1912, S. 156–157



Der Kobold aus der Tiefsee

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

## Der Flammenwagen



Der Raketenwagen RAK 7 von Max Valier ist in der Raumfahrt Ausstellung des Deutschen Museums in München zu sehen. Bei einer Testfahrt brauchte der Pilot gute Nerven, denn der mit Flüssigtreibstoff angetriebene Motor machte einen Höllenlärm.

### Von Jörg Wipplinger und Klaus-Dieter Linsmeier

Am 19. April 1930 verfolgten Journalisten auf dem Berliner Flugplatz Tempelhof die Vorführung des »Valier-Heylandt RAK 7«, eines Automobils, das sie in ihren Berichten passenderweise »Flammenwagen« nannten: Mit infernalischem Lärm fauchte eine fast zwei Meter lange Feuerzunge aus einem Rohr, und das Fahrzeug beschleunigte auf 80 Kilometer pro Stunde. Die Absicht des Erfinders Max Valier war es aber nicht gewesen, das schnellste Auto der Welt zu bauen, sondern einen weiteren Schritt auf dem Weg ins All zu wagen. Es war die erste öffentliche Vorführung eines mit flüssigem Treibstoff angetriebenen Raketenmotors in Deutschland (vier Jahre zuvor hatte Robert Goddard in den USA eine solche Rakete gestartet).

Valier hatte vor dem Ersten Weltkrieg ein naturwissenschaftliches Studium begonnen, doch seine Leidenschaft galt der Raumfahrt, die damals noch die Vision einiger Forscher und Tüftler war. Zu den Pionieren zählte der Physiker und Ingenieur Hermann Oberth, der in seiner Doktorarbeit unter dem Titel »Die Reise zu den Planetenräumen« 1922 alle Komponenten einer Flüssigkeitsrakete beschrieben hatte.

Das Buch inspirierte den 1895 in Bozen geborenen Valier, der sich als Journalist und Buchautor durchschlug, doch anders als Oberth glaubte er an eine Realisierung in kleinen Schritten: Die nötige Technik sollte mit Bodenfahrzeugen, später auch mit Flugzeugen erprobt werden. 1928 baute er den ersten Wagen RAK 1, der von Feststoffraketen angetrieben wurde. 1929 folgten die Raketenschlitten RAK BOB 1 und 2; auf dem zugefrorenen Starnberger See erreichte letzterer vermutlich 400 Kilometer pro Stunde.

Öffentliche Vorführungen seiner Prototypen machten Valier bekannt und halfen ihm bei der Suche nach Sponsoren und Experten mit dem nötigen Knowhow. Dazu gehörten 1927 der Rennfahrer Fritz von Opel sowie Wilhelm Sander, dessen Fabrik Signalaraketen herstellte. In dem Erfinder Paul

Heylandt und seiner Firma »Gesellschaft für Industriegasverwertung« schließlich fand Valier im Jahr 1929 Spezialisten für die Verflüssigung von Gasen.

Er kombinierte flüssigen Sauerstoff und verdünnten Spiritus: Organische Substanzen verbrennen in dem Oxidationsmittel explosionsartig, Flüssigsauerstoff wird daher noch heute für Hauptantriebsstufen verwendet. Die Brennkammer des hier abgebildeten RAK 7 bestand im Wesentlichen aus einem etwa 20 Zentimeter langen Stahlrohr, in dem die Treibstoffkomponenten vermischt und dann – angeblich durch ein Streichholz – angezündet wurden. Dieser Antrieb entwickelte eine Schubkraft von 200 bis 300 Newton.

Doch wenige Wochen nach der erfolgreichen Fahrt in Berlin explodierte die Brennkammer, Valier wurde von einem Splitter tödlich getroffen. Schon im Jahr darauf ließ Heylandt einen neuen Raketenwagen auf dem Flugplatz Tempelhof starten, und die internationale Presse berichtete darüber – ohne den Erfinder zu erwähnen. Wernher von Braun, ein Schüler Oberths, arbeitete seit 1933 an einer mit Flüssigsauerstoff und Alkohol betriebenen Rakete, und Valier drohte in Vergessenheit zu geraten. Um das Andenken ihres Mannes zu bewahren, überließ seine Witwe laut einem Schreiben der Reichskanzlei vom März 1934 den RAK 7 und den RAK BOB 2 Adolf Hitler. Dieser beauftragte Heylandt, die Objekte zu restaurieren, und schlug vor, sie anschließend dem Deutschen Museum zu überlassen.

Es sollte Wernher von Braun und seinem Team vorbehalten sein, erstmals Raketen mit Flüssigtreibstoff in den Weltraum zu schicken – die Vergeltungswaffe 2 beziehungsweise V2, die 1944 gegen England eingesetzt wurde. Seine und damit auch Valiers Erfahrungen brachte er nach dem Krieg in die amerikanischen Raumfahrtprogramme Mercury, Gemini und Apollo ein.

Jörg Wipplinger ist Wissenschaftsjournalist in Wien. Klaus-Dieter Linsmeier ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

## Die ferne Zukunft der Sterne

Manche meinen, die glorreichen Tage des Universums seien bereits vorüber – doch sie täuschen sich. In den kommenden Jahrtausenden wird Faszinierendes im All geschehen. Zu den Highlights zählen explodierende Heliumzwerge und unzählige Planeten, auf denen Leben möglich ist.



KENN BROWN, MONDOGRAPHIC STUDIOS

### Wer waren die ersten Amerikaner?

Jäger aus Asien folgten ihren Beutetieren über die heute versunkene Landbrücke Beringia und betraten Nordamerika vor etwa 13 000 Jahren. So weit das Schulwissen. Doch jüngste Forschungen zeigen, dass Menschen schon lange vorher in der Neuen Welt eintrafen!

### Lurche in Lebensgefahr

Weltweit sterben massenhaft Amphibien, dahingerafft von einem Pilz. Zahllose Arten sind bereits verschwunden, darunter viele, die noch nicht einmal systematisch beschrieben wurden. Die Weltnaturschutzunion IUCN versucht, wenigstens die letzten Überlebenden vor dem Aussterben zu bewahren.



FOTOLIA / JOHANNIS

### Schutz vor der Mutter

Eigentlich müsste das mütterliche Immunsystem jeden Fötus angreifen. Aber das werdende Leben verhindert dies mit speziellen Signalmolekülen: besonderen Antigenen, die eine Toleranz bewirken.



KING'S COLLEGE CAMBRIDGE UND THE ROYAL SOCIETY

### 100 Jahre Alan Turing

Der geniale Mathematiker war nicht nur an der Entschlüsselung deutscher Geheimcodes im Zweiten Weltkrieg beteiligt; wir verdanken ihm auch entscheidende Beiträge zur Theorie der Rechenmaschinen und zur biologischen Musterbildung.

### 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)

# DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!



- 1** 12 Ausgaben zum Preis von nur € 84,- inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90
- 2** **2 in 1:** Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!
- 3** Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln
- 4** Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet
- 5** Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im Mai



Leuchtlupe »powerlux«

- 6** Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Das DVD-Video dokumentiert die abenteuerliche Entstehung eines Menschen. In bis zu 2000-facher Vergrößerung wird einer der dramatischen Abschnitte unserer Entstehung bis hin zur Geburt eines Babys gezeigt. Ca. 45 Minuten Laufzeit



Diese schön gestaltete Tasse erfüllt beim Kaffee- oder Teegenuss einen doppelten Zweck: Sie genießen Ihr Lieblingsgetränk und erlernen gleichzeitig durch das Design der Tasse das Periodensystem der Elemente. Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml



Das Buch »Die großen Fragen – Physik« behandelt grundlegende Probleme und Konzepte in der Wissenschaft, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben.

Diese und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

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

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



online: [spektrum.de/abo](http://spektrum.de/abo)



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



Tel.: 06221 9126-743



Fax: 06221 9126-751



mit der Bestellkarte anbei

Mediz  
inJuraBiolo  
giePhysikChem  
ieMathematikIn  
formatikIngenie  
urwissenschaft  
enGeisteswi  
ssenscha  
ftenWirts  
chaftsinfo  
rmatikWir  
tschaftsma  
thematikW  
irtschaftsin  
genieurwiss  
enschaftenM  
aschinenbauB  
iochemieSozial  
wissenschaften

Grow Further.

## BCG OPEN 2012

**Der Strategieworkshop für alle. Außer Wirtschafts-  
wissenschaftlern. Vom 5. bis 7. Juli 2012 in München.**

„Green Energy at BCG“ – unter diesem Motto haben Sie und weitere Talente aus den verschiedensten Fachrichtungen die Gelegenheit, nachhaltige Strategien für die Stromversorgung der Zukunft zu entwickeln. Unterstützen Sie das Industriekonsortium DESERTEC Industrial Initiative (Dii) bei der Verwirklichung der Idee, das Potenzial an erneuerbaren Energien in Nordafrika und im Mittleren Osten zu realisieren. In drei intensiven Workshoptagen werden Sie nicht nur die Arbeit der weltweit führenden Strategieberatung kennen lernen, sondern auch neue Impulse für Ihren eigenen Karriereweg erhalten. Teilnehmen können herausragende Universitätsstudentinnen und -studenten, Doktoranden und Professionals aller Fachrichtungen – außer BWL und VWL. Bitte senden Sie Ihre vollständigen Bewerbungsunterlagen bis zum 18. Mai an Mirja Hentschel, E-Mail: [bcgopen@bcg.com](mailto:bcgopen@bcg.com). **Mehr Informationen unter [bcgopen.bcg.de](http://bcgopen.bcg.de)**

# BCG

THE BOSTON CONSULTING GROUP

