

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ETHIK
Streit um
Patente auf
Stammzellen

AUGUST 2012

ASTROPHYSIK

Supernovae
der Sonderklasse

FRACKING

Riskante Fördermethode
für Erdgas und Öl

MEDIZIN

Epigenetische Ursachen
psychiatrischer Störungen

Wunderstoff Graphen

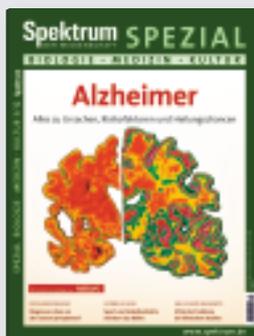
Chemiker designen Kohlenstoff-Folien
für die Elektronik der Zukunft

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



Unsere Neuerscheinungen

Spektrum Spezial – Biologie · Medizin · Kultur 3/2012



ALZHEIMER

Unsere Gesellschaft wird immer älter – und damit rücken neben den demografischen Auswirkungen auch häufiger die gesundheitlichen Folgen dieses Prozesses in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses. Eine Krankheit, die dabei ganz besonders im Vordergrund steht, ist die Alzheimerdemenz, bei der die Erkrankten einen Großteil ihres Erinnerungsvermögens verlieren. Das **Spektrum-Spezial** »Alzheimer« fasst den momentanen Wissensstand zu dieser heimtückischen Krankheit zusammen und geht der Frage nach, ob und welche Mittel es zur Prophylaxe gibt. Aus dem Inhalt:

- > Fortschritte bei der Früherkennung von Alzheimer
- > Risikofaktoren der Alzheimerforschung
- > Lassen sich verlorene Erinnerungen zurückholen?

Das Spezial *Biologie-Medizin-Kultur* 3/2012 »Alzheimer« kostet € 8,90, zzgl. Versand.

Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.



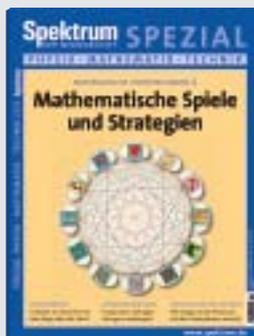
SdW-Highlights 2/2012

KOSMISCHE URSPRÜNGE

Innerhalb weniger Generationen gelang es Wissenschaftlern, eine Chronologie des Universums zu skizzieren, die 14 Milliarden Jahre umfasst. Tief reichende Himmelsdurchmusterungen wiederum offenbaren das weitere Schicksal von Sternen und Galaxien. Zu den größten Überraschungen gehört die Entdeckung der Dunklen Energie, die nicht nur die Expansion des Alls beschleunigt, sondern womöglich auf eine neue, bislang unbekannte Physik hindeutet.

Das neue *Highlights* (unveränderter Nachdruck) kostet € 8,90 zzgl. Versand.

Dieses und weitere Sonderhefte finden Abonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* zum Sonderpreis von € 7,40 (inkl. Inlandsversand) unter www.spektrum.de/aboplus



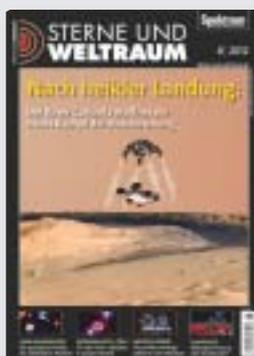
Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 2/2012

MATHEMATISCHE SPIELE UND STRATEGIEN

Wozu ist Mathematik eigentlich nütze? Auf diese beliebte Frage gibt das vorliegende Heft einige sehr konkrete Antworten. Die Zukunft hält häufig viele Ereignisse für einen bereit, über die man nur sehr magere Kenntnisse hat. Den todsicheren Tipp kann uns die Mathematik zwar nicht liefern, aber sie kann unsere Chancen optimieren, am Ende mit dem bestmöglichen Ergebnis dazustehen. Die hier versammelten Beiträge sind ursprünglich in der Rubrik »Mathematische Unterhaltungen« im Monatsheft von *Spektrum der Wissenschaft* erschienen.

Das Spezial »Mathematische Spiele und Strategien« kostet € 8,90 zzgl. Versand.

Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.



STERNE UND WELTRAUM 8/2012

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:

- >> Unser Sonnensystem: Die geologische Vielfalt der erdähnlichen Planeten
- >> Hightech-Träger: Die perfekte Montageplatte für zwei Teleskope
- >> Supernova 1987A, Teil 2: Ein alter Stern explodiert in jungem Gewand
- >> Planetarien: Bildungseinrichtung oder Showtheater?

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

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Zwischen Forschungsfreiheit und Verantwortung

Im Juni veröffentlichten die Fachzeitschriften »Nature« und »Science« zwei Artikel von Virologen aus Wisconsin beziehungsweise Rotterdam, welche die Fachwelt bereits zuvor über Monate in Atem gehalten hatten. Die Forscher hatten gentechnisch Varianten des Vogelgrippeerregers entwickelt, um zu überprüfen, ob H5N1 auch unter Säugetieren eine Pandemie auslösen könnte. Auf diese Weise wollten sie die entsprechenden Mechanismen besser verstehen. Wie die Experimente an Frettchen – den typischen Versuchstieren in der Grippeforschung – zeigten, ist das tatsächlich möglich. Nach Durchsickern der Nachricht versuchten Kritiker, die Publikation der Ergebnisse und Methoden zu verhindern. Diese könnten schließlich nicht nur Grundlagenforschern im Dienst der Grippebekämpfung, sondern auch etwaigen Bioterroristen nützen.

Natürlich wirkt die Vorstellung eines im Labor hergestellten, womöglich auch von Mensch zu Mensch übertragbaren, tödlichen H5N1-Erregers bedrohlich. Dennoch hatte die **Spektrum.de**-Redaktion bereits im Dezember 2011, kurz nach Bekanntwerden der Versuche von Yoshihiro Kawaoka und Ron Fouchier, kommentiert, dass ein Publikationsverbot nicht die erhoffte Wirkung erzielen würde, denn das neue Wissen ließe sich kaum dauerhaft in den Hochsicherheitstrakts der Virologen einsperren. Terroristen würden dadurch an nichts gehindert, »sehr wohl aber Wissenschaftler, die an Strategien gegen Krankheiten wie die Grippe arbeiten« – so das Argument von Lars Fischer (siehe spektrum.de/h5n1-kommentar). Nun wurden die Resultate also tatsächlich veröffentlicht. Die Debatte über den so genannten »Dual Use« von Studienergebnissen, nämlich zum Wohl oder Wehe, wird gleichwohl nicht abebben. Und das ist gut so! Wir müssen sie weiterführen, um Forscher an ihre Verantwortung zu erinnern. Diesen Standpunkt vertrat auch der Heidelberger Theologe und Bioethiker Klaus Tanner am 6. Juli auf einer Podiumsdiskussion der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina in Halle, die ich moderierte: »Auf Seiten der Wissenschaftler gibt es einen enormen Nachholbedarf im Hinblick auf die ethische Selbstreflexion«, so Tanner.

Keine Publikationsverbote also, sondern lediglich Sensibilisierung und Appelle? Wie steht es mit rechtlichen Regulierungen als Mittel, Fragen von Forschungsfreiheit und Verantwortung zu entscheiden – zumal wenn es um konkrete Anwendungen geht? Ebenfalls seit Herbst 2011 schwelt hier eine Debatte über ein Urteil des Europäischen Gerichtshofs. Die obersten Richter hatten am 18. Oktober Patente auf alle Verfahren mit embryonalen menschlichen Stammzellen verboten. Wir baten den Medizinethiker Ludwig Siep um eine Einordnung dieses grundlegenden Rechtsspruchs. Sie finden sie ab S. 28.

Eine gute Lektüre wünscht Ihr

Carl Müllen

AUTOREN IN DIESEM HEFT



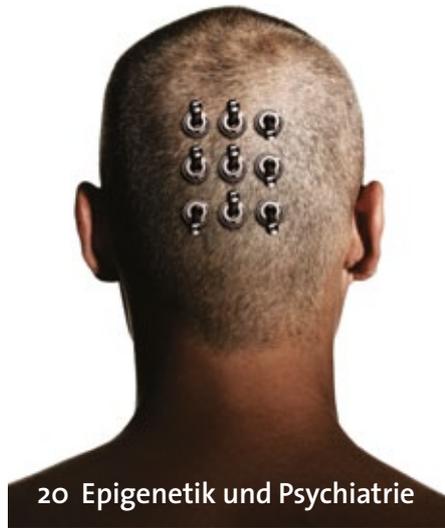
Der Wissenschaftsphilosoph **Ludwig Siep** von der Universität Münster erörtert das wegweisende Urteil des Europäischen Gerichtshofs zur Patentierung embryonaler Stammzellen (S. 28).



Der amerikanische Archäologe **James Cameron Monroe** liest aus Ruinen und den Überbleibseln von Luxusgütern, wie afrikanische Königreiche auf dem Gebiet des heutigen Benin ab dem 17. Jahrhundert durch Sklavenhandel aufblühten (S. 60).



Am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz entwickelt der Chemiker **Klaus Müllen** erste Methoden zur synthetischen Herstellung von Graphen – jenem »Wunderstoff«, der die gesamte Elektronik und Energietechnik revolutionieren könnte (S. 82).



20 Epigenetik und Psychiatrie



52 Geometrie



72 Heikle Erdgasförderung



42 Supernovae der Sonderklasse

BIOLOGIE & MEDIZIN

- ▶ **20 Verborgene Schalter im Gehirn**
Eric J. Nestler
Drogensucht und Depression gehen mit epigenetischen Veränderungen im Denkorgan einher.
- ▶ **28 Patente auf Leben**
Ludwig Siep
Der Europäische Gerichtshof verbot Patente auf Verfahren mit menschlichen embryonalen Stammzellen. Auf welchen Grundlagen basiert das Urteil – und welche Auswirkungen hat es?
- 34 Moskitos mit Selbstmordgen**
Bijal P. Trivedi
Im Kampf gegen das Denguefieber konstruieren Forscher unfruchtbare Stechmücken.

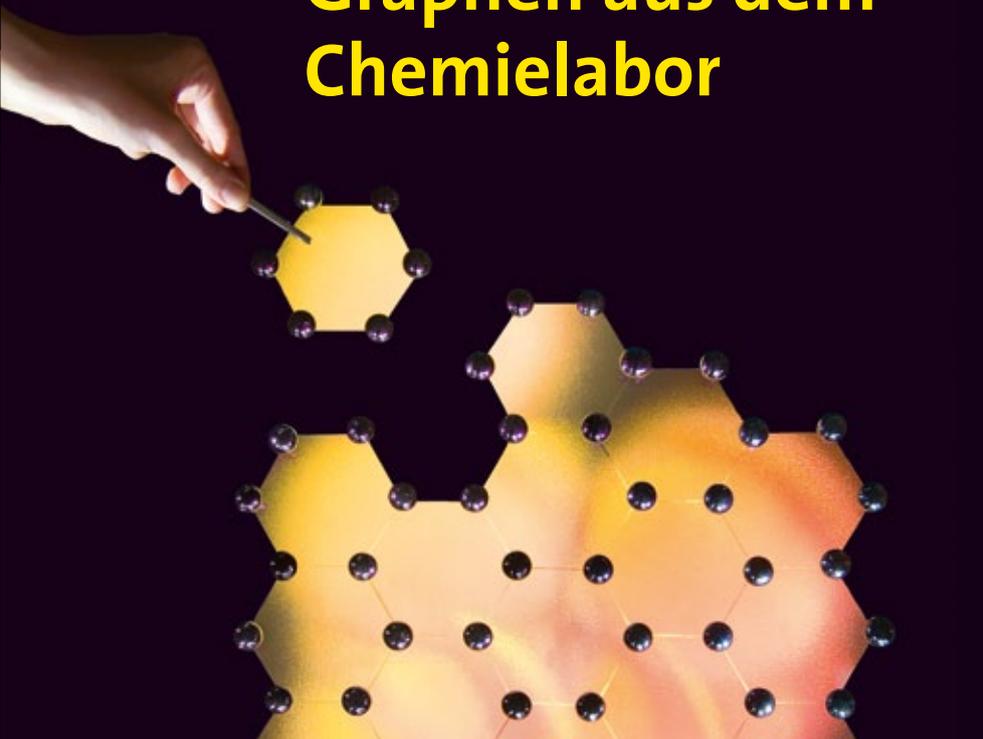
PHYSIK & ASTRONOMIE

- ▶ **42 Superhelle Supernovae**
Avishay Gal-Yam
Kürzlich entdeckte Sternexplosionen setzen ungeahnte Energien frei. Gigantische Himmelskörper enden nicht nur durch Kernfusion, sondern obendrein unter paarweiser Bildung von Teilchen und Antiteilchen.
- SCHLICHTING!**
- 49 Gleich und Gleich gesellt sich gern**
H. Joachim Schlichting
Objekte, die auf Wasseroberflächen schwimmen, verhalten sich unerwartet. Verantwortlich dafür sind die beteiligten Grenzflächenenergien.

MENSCH & KULTUR

- 52 Ein Abenteuer in n Dimensionen**
Brian Hayes
Im 100-dimensionalen Raum ist die größte Kugel, die gerade noch in eine Kiste passt, darin kaum zu finden.
- 60 Königreiche der Sklaverei**
James Cameron Monroe
Im 16. Jahrhundert ließ der Sklavenhandel an Westafrikas Küste kleine Königtümer zu mächtigen Reichen heranwachsen.
- MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN**
- 68 Magische Sechsecke**
Christoph Pöppe
Die Aufgabe, Zahlen so im Sechseck anzuordnen, dass alle Reihen die gleiche Summe haben, ergibt ein neues, sudokuähnliches Spiel.

Graphen aus dem Chemielabor



ERDE & UMWELT

► 72 Wie riskant ist das Fracking?

Chris Mooney

Zur Erschließung unkonventioneller Quellen von Erdgas werden Gesteinsformationen rund um das Bohrloch durch Einpressen einer Flüssigkeit aufgebrochen. Gefährdet dieses »Fracking« das Grundwasser?

*Titelmotiv:
Daniela Leitner*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

TECHNIK & COMPUTER

► TITELTHEMA

82 Graphen aus dem Chemielabor

Klaus Müllen

Eine nur eine Atomlage dicke Folie aus Kohlenstoff könnte die Elektronik revolutionieren. Allein – bislang fehlen geeignete Herstellungsverfahren. Doch Chemiker sind dabei, sie zu entwickeln.

90 Vom Graphen zum Silicen

Lars Fischer

Das Silizium-Gegenstück zum Graphen wäre für die Hochleistungselektronik vermutlich sogar noch geeigneter. Jetzt konnten Physiker den Stoff erstmals im Labor produzieren.

SPEKTROGRAMM

- 8** Arktis war einst wärmer • Frühe Landgänger liefen schlecht • Neues Teilchen entdeckt – das Higgs-Boson? • Alzheimerprionen • Kohärentes Röntgenlicht • Verbreitung von Wüstenpflanzen

BILD DES MONATS

11 Augensatz in Sicht

FORSCHUNG AKTUELL

12 Wie Nacktmulle das Schmerzempfinden ausschalten

Ein seltsames afrikanisches Nagetier gibt neue Impulse zur Schmerztherapie bei Menschen.

13 Europas lange Reise zum Jupiter

ESA wählt Jupitermonde als Ziel ihrer nächsten großen Mission.

16 Vererbte Mitte

Das Zentromer der Chromosomen wird epigenetisch festgelegt – und an die Tochterzellen weitergegeben.

SPRINGERS EINWÜRFE

18 Die Zukunft ist schon wieder überholt

Zum Tod des letzten klassischen Sciencefiction-Autors.

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbrief / Impressum

67 Wissenschaft im Rückblick
Vom Schleudersitz zum Mayagrab

93 Rezensionen
Laurence C. Smith:

Die Welt im Jahr 2050

Johannes Winterhagen: Abgeschaltet

Heinrich Päs: Die perfekte Welle

Jordi Quoidbach:

Glückliche Menschen leben länger

Harald Fritzschn: Mikrokosmos

Alexander Hesse (Hg.):

Deutschlands Supergrabungen

Alain de Botton:

Religion for Atheists

98 Vorschau



Rückkehr zur Mischkultur

Die Ernährungswissenschaftler Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro warnen vor Gefahren wie Klimawandel oder Pilz- und Virusinfektionen, die den empfindlichen Kakaobaum bedrohen. (»Die Zukunft der Schokolade«, Juli 2012, S. 78)

Agnes Pahler, Aichtal: Bei der Auflistung der Krankheiten, die den Kakaobaum befallen können, ist mir ein Fehler aufgefallen (S. 80 unten): Die Gattung *Phytophthora* gehört taxonomisch zu den Niederen Pilzen, ist aber eben doch ein Pilz, während im Englischen die Echten Pilze als »fungi« bezeichnet werden und somit *Phytophthora* als »fungi-like« charakterisiert wurde. Des Weiteren ist Matina 1-6 eine Sorte oder

Für Schokolade braucht man Kakaopflanzen. Doch die wenigen Sorten ähneln sich genetisch stark, was sie anfällig macht.

Kulturform (S. 83). Im Englischen bezeichnet »variety« eine Sorte, während die deutsche »Varietät« für eine natürlich vorkommende Abweichung steht.

Übrigens ist der Anbau von Kakao in Mischkulturen, wie ihn die Autoren auf S. 82 propagieren, keine neue Erfindung, sondern stellt die seit alters überlieferte Anbauweise dar. Inzwischen erkennt die Agrarindustrie lediglich, dass Mischkulturen den im 20. Jahrhundert eingeführten Monokulturen auf tropischen Böden überlegen sind.

Zwei Arten von Glauben

Ein friedliches Nebeneinander von rationalem Denken und Jenseitsglauben hält Michael Springer für einen frommen Wunsch. (»Denken heißt Zweifeln«, Juni 2012, S. 20)

Martin Piehlinger, Wien: Dass beides Glauben ist, kann man so sagen, aber Wissenschaft ist doch eine andere Qualität von Glauben. Mit Hilfe des Gesetzes der Schwerkraft kann ich verlässli-

che Voraussagen machen. Um seine Gültigkeit zumindest in meiner unmittelbaren Umgebung zu überprüfen, kann ich ein einfaches Experiment durchführen. An einem Experiment zur Überprüfung der Existenz Gottes haben sich Theologen und Kirchenlehrer jahrhundertlang die Zähne ausgebissen und es letztlich aufgegeben. Eine Voraussage, die ich auf der Existenz Gottes aufbaue, wird sich mein Leben lang nicht erfüllen; vielleicht nachher, aber das werde ich erst dann feststellen können – wenn überhaupt.

Ein wenig Statistik

Laut Douglas Fox können wir Menschen wegen physikalischer Gesetzmäßigkeiten nicht mehr viel intelligenter werden. (»Die Grenzen des Gehirns«, Mai 2012, S. 26)

Wolfgang Klein, Wehrheim: Ich sehe die Intention des Artikels darin, darzustellen, welche physiologischen Alternativen für eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns bestehen würden – unter der Voraussetzung, dass ein evolutiver Prozess existiert, der die entsprechenden Änderungen hervorruft. Das ist zwar

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, Antje Findekle (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistentin: Erika Eschwei
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Gabriele Franke, Dr. Susanne Lipps-Breda, Andreas Nestke, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice:

Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / Sfr. 14.–; im Abonnement € 84.– 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 Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 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.



hypothetisch, aber wissenschaftlich durchaus interessant, besonders im Vergleich mit Signalverarbeitung in der Elektronik und allgemeinen informationstheoretischen Erkenntnissen.

Reduzieren wir die herausragenden Fähigkeiten zwecks Vereinfachung auf den IQ, und nehmen wir an, dass (im Unterschied zur tatsächlichen Definition des IQ) der mittlere Intelligenzquotient nicht immer 100 ist, sondern fallen und steigen kann, so dass auch die Ab- und Zunahme der Hirnleistung der Grundgesamtheit aller lebenden Menschen im Zeitverlauf gemessen werden kann. Dann ist zu jedem Messzeitpunkt der IQ durch statistische Maße wie Mittelwert und Varianz (als Streumaß) charakterisiert.

Eine statistische Verbesserung der Hirnleistung im Mittel ohne Verbesserung der prinzipiell möglichen Hirnleistung ließe sich dadurch realisieren, dass der Mittelwert zu- (in Richtung Einstein) und die Streuung abnimmt. Allerdings schätze ich die evolutiven Chancen hierfür ebenfalls eher schlecht ein. Erforderlich wäre eine stärkere Reproduktionsrate der intelligenteren Menschen im Vergleich zu den weniger intelligenten. Das widerspricht aber der Erfahrung.

Infrarot- statt Röntgenstrahlung

Die Physiker Robert W. Boyd und Zhimin Shi stellten eine zeitlich wirk-same Tarnkappe vor. (»Ein Versteck im Fluss der Zeit«, Juli 2012, S. 18)

Jörg Michael, Hannover: Auf S. 19 steht oben in der dritten Spalte eine Wellenlänge »von exakt 1,539 milliardstel Metern«. Statt 1,539 muss es wohl 1539 heißen (Röntgenstrahlung versus Infrarot).

Antwort der Redaktion:

Sie haben Recht. Eine Wellenlänge von 1,539 milliardstel Metern wäre bereits der Röntgenstrahlung zuzurechnen. Im Artikel ist aber in der Tat Infrarotstrahlung gemeint. 1539 milliardstel Meter wäre korrekt gewesen; das entspricht einer Größenordnung von millionstel

Metern und damit dem infraroten Bereich. Hier ist wohl irrtümlich aus einem Tausendertrennpunkt ein Dezimalstellenkomma geworden – und damit aus Infrarot Röntgenstrahlung.

Otto Koehler beantwortete die Frage schon vor 75 Jahren

Laut einer aktuellen Studie verstehen Tauben so viel von Zahlen wie manche Affen. (»Können Tauben zählen?«, Juni 2012, S. 12)

Herbert Bibinger, Ehingen: Das Fragezeichen bei »Können Tauben zählen?« kann man seit 75 Jahren getrost weglassen. Otto Koehler hat sich in den 1930er Jahren vielfach mit dem unbenannten Zählen und Denken beschäftigt und seine Methoden und Ergebnisse auch in Filmen dokumentiert. Siehe zum Beispiel seine Arbeiten »Kann die Taube Anzahlen erfassen?« in: Verhandlungen der Deutschen Zoologischen Gesellschaft 1935, S. 39–54, und »Können Tauben zählen?« in: Zeitschrift für Tierpsychologie 1, 1937, sowie zahlreiche spätere Veröffentlichungen. Eine allgemeine Zusammenfassung findet sich in: Grzimeks Tierleben, Sonderband Verhalten, 1974, S. 320–336.

Antwort des Autors Stéphane Hess:

Vielen Dank für den Hinweis. Allem Anschein nach haben Koehler und seine Mitarbeiter in ihrer Publikation von 1937 tatsächlich einige Befunde von Damian Scarf und seinen Kollegen vorweggenommen. Koehler geht sogar noch einen Schritt weiter als Scarf: Seine Versuchstiere mussten nicht nur zwischen zwei visuellen Darstellungen mit geometrischen Formen verschiedene Anzahl unterscheiden, sondern auch die Anzahl mehrerer aufeinander folgender Ereignisse erkennen.

Während einer Lernphase wurde die Taube jedes Mal weggeschleucht, wenn sie ein Korn mehr als vorher festgelegt fressen wollte. Während der anschließenden Testphase wurde geprüft, ob sie gelernt hatte, sich auf diese Anzahl Körner zu beschränken. Das gelang für

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

bis zu sechs Körner. So hielt sie die Beschränkung auf fünf Körner in 65 Prozent aller Fälle ein und ließ in den übrigen Fällen immerhin Angst vor der zu erwartenden Bestrafung erkennen. Offensichtlich wusste die Taube, wie viele Körner sie bereits gefressen hatte.

Dieses Verhalten kommt einem Zählen näher als das von Scarf nachgewiesene Verhalten. In Koehlers Versuch war nicht eine ungefähre, sondern die genaue Anzahl von Ereignissen entscheidend. Nach wie vor bleibt die Frage bestehen, was im Kopf der Taube vorgeht und ob man das bereits als »Zählen« bezeichnen kann. Koehler formuliert denn auch sehr vorsichtig. Er behauptet nicht, Tauben könnten bis sechs zählen, sondern »auf sechs handeln«.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

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

KLIMAFORSCHUNG

Arktis war einst viel wärmer

In den zurückliegenden 2,8 Millionen Jahren gab es wiederholt Phasen, in denen die Arktis deutlich wärmer war als heute – etwa vor rund 0,4 und 1,1 Millionen Jahren. Das belegen Messungen an einem Sedimentbohrkern aus dem See Elgygytgyn. Der See liegt in einem 3,6 Millionen Jahre alten Meteo-

riteneinschlagkrater, etwa 100 Kilometer nördlich des Polarkreises auf dem sibirischen Festland.

Wissenschaftler um Martin Melles von der Universität zu Köln untersuchten die oberen 135 Meter des Bohrkerns. Sie stießen auf mehrere feinkörnige, rötlich braune Ablagerungen, in

denen die Verhältnisse verschiedener Isotope und der hohe Gehalt an organischem Kohlenstoff auf besonders warme Zeiten hindeuten. Damals blühte im Frühjahr und Sommer reiches Leben im See, während eine Eisdecke im Winter den Abbau der niedergesunkenen Biomasse bremste.

Melles und seine Kollegen berechneten, dass die Sommertemperaturen zu diesen Zeiten wohl um fünf bis sieben Grad Celsius höher lagen als heute. Zudem fielen jährlich etwa 350 Millimeter mehr Niederschlag. Zeitgleich zu solchen extrem warmen arktischen Perioden herrschte auch am Südpol Tauwetter, das den westantarktischen Eisschelf schrumpfen ließ und das Rossmeer teilweise vom Eis befreite. Offenbar sei das Klimageschehen in den beiden Polregionen eng miteinander verknüpft, schreiben die Forscher. Der genaue Mechanismus dahinter sei aber noch nicht geklärt.

Science 10.1126/science.1222135, 2012



PRIV. S. MINIK, NORTH-EAST INTERDISCIPLINARY SCIENCE RESEARCH INSTITUTE, RUSSLAND

Der zugefrorene See Elgygytgyn in der sibirischen Arktis: Tief unter diesem Eis liegen Sedimente, die sich als Klimaarchiv der vergangenen drei Millionen Jahre nutzen lassen.

PALÄONTOLOGIE

Frühes Landtier kam nur mühsam voran

Ichthyostega gilt als eines der ersten Wirbeltiere, die zeitweilig an Land leben konnten. Bisher nahmen viele Paläontologen an, dass diese amphibienartigen Wesen sich ähnlich wie heutige Salamander bewegten, indem sie auf vier stämmigen Beinen einherschritten. Stephanie Pierce von der University of Cambridge und ihre Kollegen bezweifeln das: Die urzeitlichen Tiere waren laut ihren Erkenntnissen gar nicht in der Lage zu laufen – sie stemmten sich vielmehr wie auf Krücken vorwärts.

Die Forscher hatten zahlreiche *Ichthyostega*-Fossilien mittels Computertomografie untersucht. Daraus erstellten sie ein dreidimensionales Computermodell des Skeletts der Tiere, an dem sie die Beweglichkeit einzelner

Gliedmaßen testeten. Zum Vergleich zogen sie entsprechende Daten von heutigen Tieren wie Salamandern, Krokodilen oder Robben heran.

Demnach besaß *Ichthyostega* sehr starre Hüft- und Schultergelenke, die ein »normales« Gehen verhinderten. So konnten die Tiere ihre Gliedmaßen zwar beugen und strecken, heranziehen und abspreizen, aber kaum um die Längsachse drehen. Zudem waren ihre Füße wie Paddel ausgerichtet, was es unmöglich machte, die Sohlen auf den Boden zu setzen (siehe Bild).

Wahrscheinlich bewegte sich *Ichthyostega* ähnlich wie heutige Schlammpringer. Diese amphibisch lebenden Fische besiedeln etwa Man-



Ichthyostega – hier eine Rekonstruktion – war nicht gerade ein flinker Läufer.

grovenwälder an Meeresküsten. Um an Land weiterzukommen, stemmen sie sich mit beiden Vorderflossen gleichzeitig hoch und machen einen kleinen Hüpf nach vorn – ungefähr wie ein Mensch, der auf Krücken humpelt. Auch *Ichthyostega* benutzte seine Vorderläufe wohl synchron, um sich ruckartig vorwärtszuhieven.

Nature 486, S. 523–526, 2012

Neues Teilchen entdeckt – ist es das Higgs-Boson?

Am 4. Juli haben zwei Teams am Teilchenbeschleuniger LHC des Forschungszentrums CERN bei Genf verkündet, ein neues Partikel entdeckt zu haben. Einen »Meilenstein in unserem Verständnis der Natur« nannte CERN-Generaldirektor Rolf Heuer den Fund. Es könnte sich um das Higgs-Boson handeln, das Forscher in Edinburgh, Brüssel und London schon 1964 postuliert hatten. Falls dem so ist, würde die Entdeckung das Standardmodell der Teilchenphysik komplettieren. Die Masse des neuen Teilchens beträgt zwischen 125 und 126 Gigaelektronvolt, liegt also in einem der von Theoretikern vorhergesagten Bereiche. Zum Redaktionsschluss galten die Ergebnisse noch als vorläufig, Ende Juli sollten sie publikationsreif sein.

Um zu bestätigen, dass sie tatsächlich auf das lang ersehnte Higgs gestoßen sind, benötigen die Forscher allerdings zusätzliche Daten. Denn viele Eigenschaften ihres Funds sind noch ungeklärt. Beträgt sein Spin 0, wie die Theorie sagt? Sind die CERN-Wissenschaftler gar einer noch größeren Sensation auf der Spur, vielleicht einem so genannten supersymmetrischen Boson? Dies würde auf eine neuartige Symmetrie in der Natur und auf viele bislang unbekannte Partikel hindeuten.

Der eigentliche Nachweis des neuen Teilchens, das beim Zusammenprall von energiereichen Protonen entsteht, erfolgte am LHC auf indirektem Weg. Denn das Higgs-Boson zerfällt bereits nach kürzester Zeit wieder, zum Beispiel in Paare von Photonen oder von Z- oder W-Bosonen. Nur diese können die Forscher tatsächlich erfassen. Genau hier ist in den nächsten Monaten weitere Arbeit zu leisten, denn bislang wurden nicht alle der vielen möglichen Zerfallswege experimentell hinreichend untersucht. Die fünf noch lebenden der sechs »Erfinder« des Higgs-Bosons, darunter der britische Physiker und Namensgeber des Teilchens, Peter Higgs, gelten aber schon jetzt als heiße Kandidaten für den Nobelpreis.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Weitere aktuelle Informationen zum
Higgs-Boson finden Sie unter

www.spektrum.de/teilchenphysik

Alzheimer ist möglicherweise eine Prionenkrankheit

An der Alzheimerkrankheit könnten infektiöse Partikel beteiligt sein, meinen Forscher um Jan Stöhr von der University of California in San Francisco. Ihren Erkenntnissen zufolge verhalten sich die Beta-Amyloid-Moleküle, die im Gehirn von Alzheimerpatienten verklumpen, wie Prionen. Bei diesen Proteinen kann sich die Aminosäurekette entweder zu einer normalen oder zu einer krank machenden Form falten. Letztere überträgt sich auf intakte Moleküle der gleichen Eiweißsorte, wodurch Krankheiten wie BSE entstehen.

Die Forscher spritzten Mäusen größere Mengen von fehlgefaltetem Beta-Amyloid, das sie aus den Hirnen

genetisch veränderter Mäuse gewonnen oder synthetisch hergestellt hatten. Mit einem speziellen bildgebenden Verfahren zeigten sie, dass die Behandlung zu einer deutlich stärkeren Ablagerung von Beta-Amyloid im Gehirn der Tiere führte. Obwohl die Injektion nur in eine Hirnhälfte erfolgt war, trat der Effekt in beiden Hälften auf. Das spricht nach Ansicht der Wissenschaftler für einen stetig fortschreitenden Prozess, wie er bei Prioneninfektionen – etwa der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit – abläuft. Einige Hinweise legen nahe, dass auch die Parkinsonkrankheit und die amyotrophe Lateralsklerose auf infektiöse Proteine zurückgehen.

Eine Ansteckung von Mensch zu Mensch durch Alzheimerprionen ist jedoch sehr unwahrscheinlich, betonen die Forscher: Die pathogenen Eiweißstoffe müssten dazu in großer Menge ins Gehirn gelangen. Allerdings warnen sie vor Impfversuchen mit (normalem) Beta-Amyloid. Solche Injektionen hatten früher bei Mäusen zu verminderter Plaquebildung im Gehirn und besseren kognitiven Leistungen geführt und waren auch an Patienten mit deren Einverständnis vorgenommen worden. Da bei einigen aber Nebenwirkungen auftraten, wurden die Versuche wieder abgebrochen.

PNAS 109, S. 11025–11030, 2012

LASERPHYSIK

Kohärente Röntgenblitze vom Labortisch

Forscher um Tenio Popmintchev von der University of Colorado in Boulder haben einen gepulsten Infrarot-Laserstrahl in kurzwellige Lichtblitze umgewandelt, deren Spektrum sich bis in den Röntgenbereich erstreckt. Sie bestehen aus Wellen unterschiedlicher Frequenzen, die aber jeweils im Gleichtakt schwingen, also kohärent sind. Damit eigneten sie sich hervorragend für spektroskopische Untersuchungen in der Materialforschung, schreiben die Autoren.

Das Team schickte infrarote Laserpulse in einen Hohlwellenleiter, der mit Helium gefüllt war. Dort ionisierte das elektrische Feld des Laserpulses die Gasatome und beschleunigte die freigesetzten Elektronen. Sobald das Feld sein Vorzeichen änderte, kehrten die Elektronen zu den Atomen zurück. Ihre kinetische Energie gaben sie dabei in Form von Photonen ab, deren Frequenzen um ein Vielfaches höher lagen als die des Infrarotlasers. Den Forschern gelang es, Photonen bis zu

MEHR WISSEN BEI 
Spektrum.de

Aktuelle Spektrogramme finden Sie täglich unter
www.spektrum.de/spektrogramm

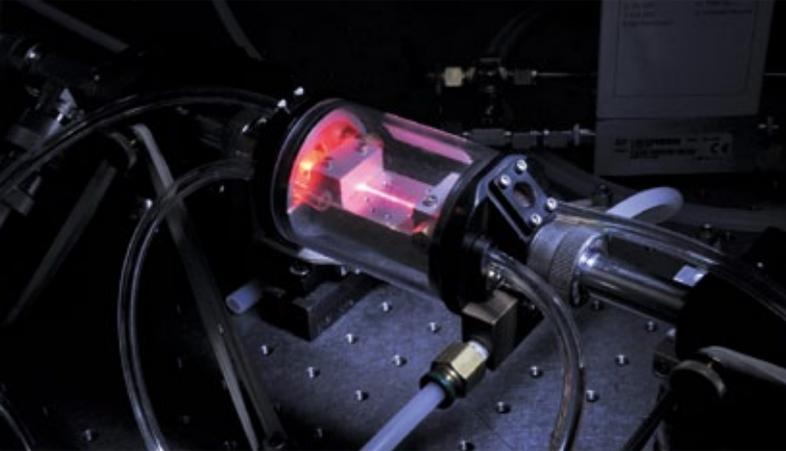
einer Energie von 1,6 Kiloelektronvolt zu produzieren, was weicher Röntgenstrahlung entspricht.

Bei geeigneten Randbedingungen – eingestrahlte Wellenlänge, Heliumdruck und Geometrie des Wellenleiters – sind die erzeugten Lichtwellen kohärent wie in einem Laserstrahl. Dennoch decken sie ein breites Spektrum vom UV- bis zum Röntgenbereich ab. Eine solche Summe aus kohärenten Wellen sehr unterschiedlicher Frequenzen nennt man ein Superkontinuum.

Die neue Lichtquelle passt auf einen großen Labortisch und ist damit wesentlich kleiner als Röntgenlaser auf der Basis von Teilchenbeschleunigern, wie sie weltweit im Einsatz sind. Allerdings erreicht sie nicht so hohe Photonenenergien wie diese. Als Nächstes wollen die Forscher um Popmintchev das Spektrum ihrer Lichtquelle bis in den harten Röntgenbereich ausdehnen.

Science 336, S. 1287–1291, 2012

TENIO POPMINTCHEV, JILA, UNIVERSITY OF COLORADO AT BOULDER



Aufbau des Experiments: Ein gepulster Infrarotlaser feuert Photonen in einen Hohlwellenleiter, der mit komprimiertem Heliumgas gefüllt ist. In dem Hohlwellenleiter wird ein Teil der Laserstrahlung in kohärente Röntgenblitze umgewandelt.

BIOLOGIE

Scharfe Verbreitungsstrategie

Viele Pflanzen verstecken ihre Samen in süß schmeckenden Früchten. Tiere verspeisen diese und scheiden das Saatgut andernorts wieder aus, wo es keimen kann. Die Wüstenpflanze *Ochradenus baccatus* verbreitet sich zwar ebenfalls mit Hilfe von Tieren, erspart ihren Samen dabei aber die potenziell gefährliche Passage durch den Verdauungstrakt: Eine chemische Reaktion sorgt dafür, dass Samen und Fruchtfleisch zusammen ungenießbar werden.

Michal Samuni-Blank vom Technion-Israel Institute of Technology und ihre Kollegen untersuchten mit Kameeras das Verhalten verschiedener Mäu-

searten, die sich in den Wüsten Israels von *Ochradenus-baccatus*-Früchten ernähren. Dabei beobachteten sie wiederholt, wie die Nager ihre Beute zu einem sicheren, oft schattigen Ort schleppten. Dort fraßen die Tiere das Fruchtfleisch, spuckten den Samen jedoch aus.

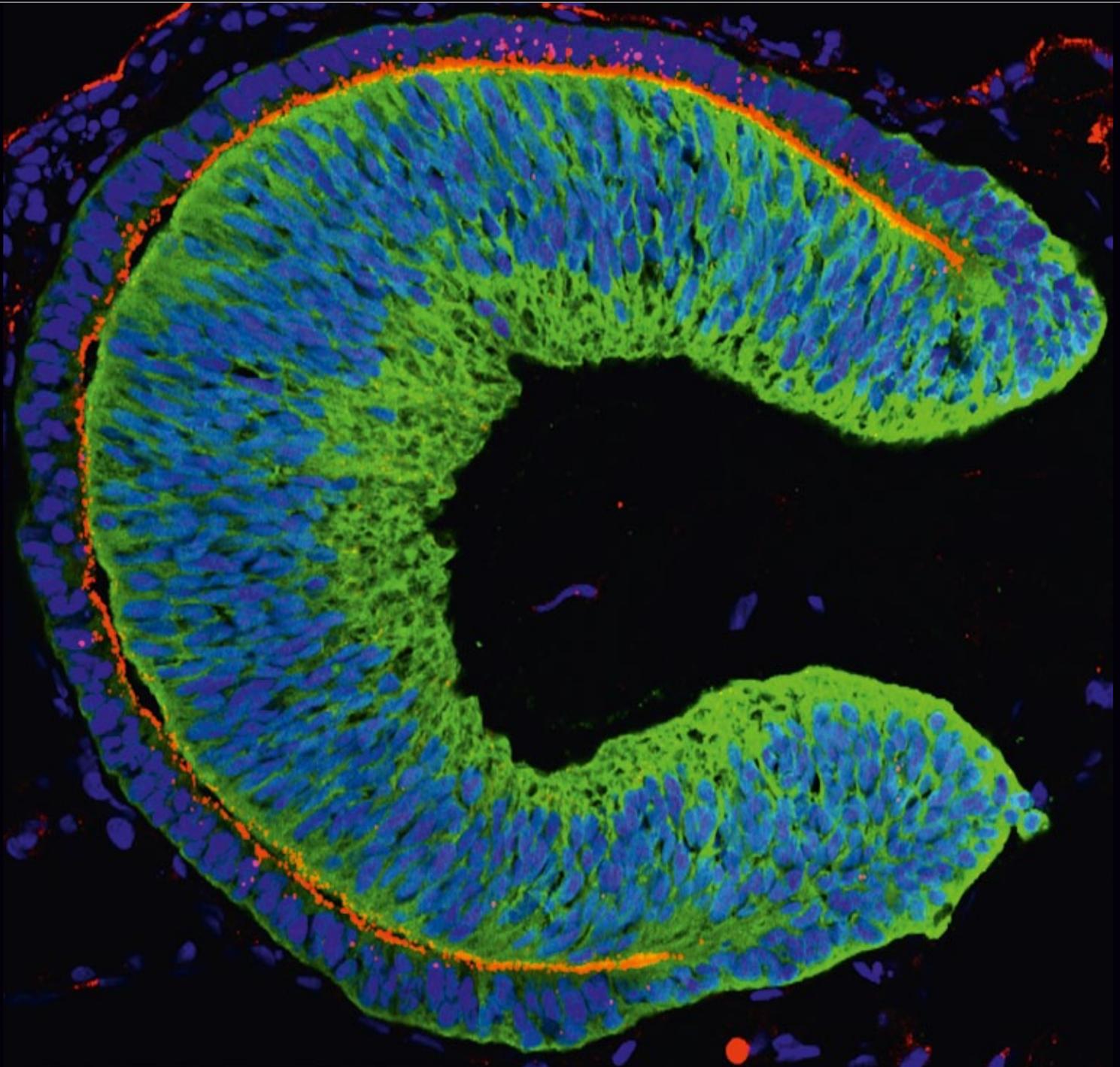
Der Grund dafür ist ein Zusammenspiel verschiedener Moleküle. Beim Anknabbern der Samen reagiert das darin enthaltene Enzym Myrosinase mit bestimmten Pflanzenstoffen, so genannten Glucosinolaten, aus dem Fruchtfleisch. Hierbei entstehen unangenehm scharf schmeckende Stoffe. Um das zu vermeiden, speien

MEHR WISSEN BEI 
Spektrum.de

Video zum Thema mit der leitenden Forscherin Michal Samuni-Blank
www.spektrum.de/verbreitungsstrategie

die Tiere das Saatgut aus, statt es anzunagen. An dem schattigen Platz kann es dann gut keimen.

Curr. Biol. 10.1016/j.cub.2012.04.051



NAKANO, T. ET AL.: SELF-FORMATION OF OPTIC CUPS AND STORABLE STRATIFIED NEURAL RETINA FROM HUMAN ESCS. IN: CELL STEM CELL 10, S. 771–785, 2012

AUGENERSATZ IN SICHT

Embryonale Stammzellen entwickeln sich in der Petrischale von allein zu einem Augenbecher inklusive Lichtsinneszellen. Vor einem Jahr hatten die Forscher diesen Erfolg bereits bei Mäusestammzellen erzielt (siehe SdW 7/2011, S. 16). Jetzt gelang ihnen das Kunststück auch bei menschlichen Zellen. Außerdem schafften sie es, das Gewebe einzufrieren, ohne dass es seine Funktion einbüßte (hellgrün: neurale Netzhaut; dunkelgrün: Pigmentepithel; blau: Zellkerne; rot: aktives Myosin).

Cell Stem Cell 10, S. 771–785, 2012

WAHRNEHMUNG

Wie Nacktmulle das Schmerzempfinden ausschalten

Ein seltsames afrikanisches Nagetier gibt neue Impulse für die Schmerztherapie bei Menschen.

VON RUSS HODGE

Der afrikanische Nacktmull (*Heterocephalus glaber*) ist ungewöhnlich – in mehrfacher Hinsicht: Er besitzt als einziges wechselwarmes Säugetier kein Haarkleid und wird mitunter weit über 20 Jahre alt, lebt also bis zu zehnmal so lang wie andere Nager. Zudem verbringen Nacktmulle die meiste Zeit zusammengedrängt in ausgedehnten unterirdischen Kolonien (SdW 10/1992, S. 90). In diesem System aus Gängen und kleinen Höhlen sind sie einer hohen Konzentration an Kohlendioxid ausgesetzt, was das Gewebe stark sauer macht. Für andere Tiere wäre das unerträglich schmerzhaft – der Nacktmull hingegen hat eine einzigartige Unempfindlichkeit dagegen entwickelt. Gary Lewin und seine Mitarbeiter am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) in Berlin untersuchen die rund 15 Zentimeter langen Nager schon

seit Jahren, um den zu Grunde liegenden Mechanismus zu entschlüsseln – und damit auch mehr über das menschliche Schmerzempfinden zu lernen.

Nun haben die Forscher kürzlich ein Molekül identifiziert, das eine zentrale Rolle bei dem Phänomen spielt (*Science* 334, S. 1557–1560, 2011). In ihren Untersuchungen hatten sie sich auf Ionenkanäle konzentriert: Proteine, die den Durchtritt von elektrisch geladenen Atomen durch Zellmembranen ermöglichen. Solch ein Ionenstrom kann unter anderem so genannte Aktionspotenziale auslösen, mit denen Nervenzellen Signale weiterleiten. Das geschieht auch bei der Schmerz Wahrnehmung. Dabei erzeugt die Stimulation eines Nozizeptors – eines Neurons, das auf Schmerzreize reagiert – einen elektrischen Impuls, der daraufhin über das Rückenmark ins Gehirn gelangt.



Hier spielt nun der Säuregehalt des Gewebes hinein, denn Säuren zeichnen sich durch eine hohe Konzentration von Protonen (Wasserstoffionen) aus. Diese öffnen oder schließen bestimmte Typen von Ionenkanälen. Bislang hielten Forscher das für den Auslöser von säurebedingtem Schmerz und vermuteten den Grund für die Unempfindlichkeit des Nacktmulls im Fehlen eines solchen Kanals. Die neue Studie zeigt aber, dass die Tiere doch Ionenkanäle besitzen, die bei Aktivierung durch Protonen Schmerzrezeptoren erregen. Allerdings haben sie daneben auch noch einen zweiten Kanaltyp, $Na_v1.7$ genannt, der ebenfalls ansprechen muss, damit die Zelle Schmerzinformationen weitergibt. Und der verhält sich bei Nacktmullen anders als bei anderen Tieren.

Damit ein Aktionspotenzial – und darüber Schmerzempfinden – entsteht, muss sich der $Na_v1.7$ -Kanal öffnen und Natriumionen durch die Membran hindurchlassen. Die in Säuren enthaltenen Protonen wirken dem jedoch entgegen: Der Kanal bleibt eher zu. Bei Menschen, Mäusen und anderen Tieren ist dieser schmerzdämpfende Effekt allerdings nur schwach und wird von der Wirkung anderer säureempfindlicher Ionenkanäle überdeckt. Bei Nacktmullen hingegen verschließen Protonen den $Na_v1.7$ -Kanal fest. Das hindert den Nozizeptor am »Feuern«, und selbst beachtliche Säuremengen lösen keine Schmerzempfindung aus.

Diese Entdeckung erklärt auch einige bislang rätselhafte Beobachtungen zur Schmerzempfindlichkeit bei Menschen. Die menschliche Version von $Na_v1.7$ nennt sich SCN9A. Über den ganzen Globus verstreut gibt es einzelne



Der Schmerzforscher Gary Lewin mit einem afrikanischen Nacktmull (*Heterocephalus glaber*) im Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin (MDC) Berlin-Buch.

Familien mit Mutationen des entsprechenden Gens. Handelt es sich bei dem Kanal um eine Version, die besonders leicht erregt wird, entwickeln die Betroffenen oft chronische Schmerzen.

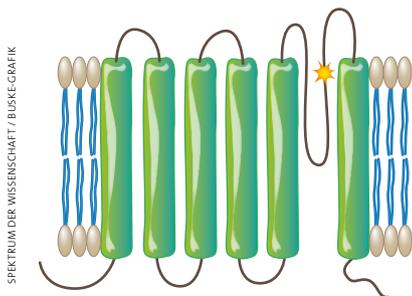
Andere Mutationen von SCN9A haben den gegenteiligen Effekt und führen zu einem ungewöhnlichen Syndrom namens »Channelopathy-associated Insensitivity to Pain« (CIP; zu Deutsch etwa: mit Kanalstörungen gekoppelte Schmerzunempfindlichkeit). Im Jahr 2010 haben Forschungsgruppen der University of Cambridge und der Ben Gurion University of the Negev

in Israel drei Beduinenmädchen mit solchen Mutationen untersucht. Alle hatten Narben von Verbrennungen, Spuren von Knochenbrüchen, oder ihnen fehlten Zehen, die während ihrer Kindheit abgetrennt worden waren. Selbst solche traumatischen Verletzungen hatten den Mädchen nicht wehgetan, und die Wunden waren infolgedessen oft unbehandelt geblieben. Auch muss man Kindern mit der Krankheit häufig erst beibringen, nicht die eigenen Finger- oder Zungenspitzen abzubeißen. Ein pakistanischer Mann, in dessen Familie CIP verbreitet ist, wurde

bekannt, weil er aus seiner Mutation Profit schlagen konnte: Als Straßenkünstler unterhielt er seine Zuschauer, indem er über heiße Kohlen lief oder sich selbst mit einer Klinge stach.

Lewins Erkenntnisse liefern Hinweise darauf, wie solche Mutationen die Schmerz Wahrnehmung verändern können. Offenbar spielt $\text{Na}_v1.7$ dabei eine zentrale Rolle, was neue Wege für die Schmerztherapie eröffnet. So erleben Patienten, die unter chronischen Schmerzen leiden, diese stärker, wenn ihr Gewebe säurehaltiger wird – zum Beispiel bei Arthritis. Ein Wirkstoff, der die menschliche Variante von $\text{Na}_v1.7$ so fest wie beim Nacktmull verschließt, könnte die Schmerz Wahrnehmung deutlich dämpfen. Eine solche Substanz wäre demnach ein hervorragender Ausgangspunkt für neue Medikamente.

Russ Hodge ist Wissenschaftsjournalist am Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin in Berlin-Buch.



In der schematischen Darstellung der vierten Domäne des Ionenkanalproteins $\text{Na}_v1.7$ markiert der gelbe Stern jene Stelle in der Aminosäurekette, an der negative Ladungen dafür sorgen, dass (positive) Protonen den Kanal fest verschließen können.

WELTRAUMMISSIONEN

Europas lange Reise zum Jupiter

Ihre nächste große Weltraummission widmet die ESA den Jupitermonden, allen voran dem geologisch interessanten Ganymed. Zwei weitere Projektvorschläge gingen hingegen leer aus. »Spektrum« erläutert die Hintergründe der umstrittenen Entscheidung.

THORSTEN DAMBECK

Im Fokus der nächsten großen europäischen Wissenschaftsmission steht das Jupitersystem, so gab die europäische Weltraumbehörde ESA Anfang Mai bekannt. Damit erhielt die Planetenmission »Jupiter Icy Moons Explorer« (Juice) den Vorzug vor zwei anderen Projektvorschlägen, nämlich dem Weltraumobservatorium für Gravitationswellen NGO (»New Gravitational wave Observatory«) und dem satellitenbasierten Teleskop für Hochenergie-Astrophysik Athena (»Advanced Telescope for High-Energy Astrophysics«).

2004 hatte die ESA Weltraumwissenschaftler aufgerufen, Projekte vor-

zuschlagen. Drei Jahre später wurden Juice, NGO und Athena vorausgewählt. Allerdings kann die Behörde aus Budgetgründen nur eine einzige Mission in Angriff nehmen.

Geht alles nach Plan, wird die Juice-Sonde 2022 vom Raketenbahnhof Kourou in Französisch-Guayana starten und 2030 den Jupiter erreichen. Ihre lange Reisezeit erklärt sich unter anderem dadurch, dass die Startrakete Ariane-5 eher für Transfers in Erdorbits geeignet ist. Einmal angekommen, soll sie den Gasriesen und seine Trabanten, die selbst schon so groß sind wie kleine Gesteinsplaneten, mindestens drei

Jahre lang detailliert beobachten. 2032 schwenkt sie schließlich in eine Umlaufbahn um den Mond Ganymed ein, das wichtigste Ziel der Reise.

Juice ist die erste große Wissenschaftsmission im Rahmen des »Cosmic Vision«-Programms, in dem die ESA ihre Pläne bis zum Jahr 2025 festgeschrieben hat. Neben kleineren und mittleren sieht sie darin auch »L-Missionen« vor. Für diese schwergewichtigen Vorhaben – L steht für »large« – veranschlagt die ESA jeweils rund 870 Millionen Euro aus ihrem eigenen Etat, hinzu kommen zusätzliche 240 bis 270 Millionen Euro von ihren Mitglied-



NASA / ESA / UNIVERSITY OF ARIZONA, ERICH KAROSCHKA

Im Verlauf der nun beschlossenen ESA-Mission Juice soll eine Raumsonde 2030 den Jupiter erreichen und 2032 in eine Umlaufbahn um Ganymed (rechts unten) einschwenken, den mit rund 5300 Kilometer Durchmesser größten Mond des Sonnensystems.

staaten. So viel Geld nur für eine Reise zu einem Gasplaneten?

»Jupiter ist der Archetyp der Riesenplaneten unseres Sonnensystems und vieler Riesenplaneten anderer Sterne«, kommentiert der ESA-Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration Alvaro Giménez Cañete die Entscheidung. Die nach ihrem Entdecker benannten Galileischen Monde des Jupiters – Io, Europa, Ganymed und Kallisto – bilden eine Art Sonnensystem en miniature, da sie aus einer Staubscheibe um ihren Planeten entstanden sind. Wissenschaftler versprechen sich von ihrer Erkundung deshalb Aufschluss über die ähnlich ablaufenden Bildungsprozesse von Planeten um ihre Sonnen.

Auch astrobiologisch sind die Trabanten interessant, denn Europa, Ganymed und Kallisto dürften große Wasservorkommen unter ihren vereisten Oberflächen beherbergen. Juice-Forscher hoffen erstmals zu messen, wie tief Europas vermuteter Ozean unterhalb der rissigen Kruste liegt. Zudem suchen sie nach möglichen Landeplätzen, von denen aus künftige Robotermissionen die Oberfläche Europas erkunden sollen. Der Nachbarmond Ganymed – der einzige im Sonnensystem,

der nachgewiesenermaßen ein eigenes globales Magnetfeld besitzt – hat vor allem Geologen viel zu bieten. Seine Oberfläche ist teils sehr alt, teils jung; Letzteres spricht für großflächige geologische Transformationsprozesse. Kallisto schließlich, den Juice mindestens einmal anfliegen soll, gehört zu den kraterreichsten Objekten im Sonnensystem, besitzt also die ursprünglichste Oberfläche.

»Jupiter ist der Archetyp der Riesenplaneten unseres Sonnensystems und vieler Riesenplaneten anderer Sterne«

Die Entscheidung für Juice sei »angeichts der hervorragenden Qualität der drei Missionen« nicht leichtgefallen, erklärt Richard Bonneville, der Vorsitzende des mächtigen Science Programme Committee (SPC), das in letzter Instanz die wissenschaftlichen Programme der ESA auswählt. Zudem verkomplizierte auch die NASA die Entscheidungsfindung. Ursprünglich saßen die Amerikaner in allen drei L-Klasse-Projekten als Partner mit im Boot. Im März 2011 zogen sie sich aus finanziellen Gründen

jedoch plötzlich zurück, womit eine wichtige Säule der Finanzierung wegbrach. Die ESA räumte den Projektteams daraufhin ein Jahr Fristverlängerung ein – zur Überarbeitung, sprich Verkleinerung, der Vorhaben.

»Durch den Ausstieg der Amerikaner wurden die stärker verflochtenen Missionsvorschläge wohl härter getroffen«, vermutet Tilman Spohn, Direktor des Instituts für Planetenforschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Das Jupiterprojekt war hingegen von Anfang an ein zweigeteiltes Vorhaben. Ein Teil – die US-geführte Sonde, die den Mond Europa umkreisen sollte – ließ sich ohne große Umstände streichen. Ersatzweise wird Juice nun um zwei Europa-Vorbeiflüge ergänzt. Zudem scheint es Chancen für eine Beteiligung Russlands zu geben. Schon seit einigen Jahren wird dort eine Landemission im Jupitersystem vorbereitet; nun fassen die Forscher Ganymed ins Auge.

Das an astronomischen Fragen ausgerichtete Röntgenprojekt Athena und das auf fundamentalphysikalische Fragen zielende Gravitationswellen-Observatorium NGO hatten größere Probleme, sich der neuen Situation anzupassen. Der Bericht des Space Science Advisory Committee (SSAC), das die ESA berät und dem einige Dutzend hochkarätiger Wissenschaftler angehören,

listet zudem erhebliche technische Risiken beider Projekte auf. Außerdem werde es bei den anvisierten Startterminen absehbar zu Verschiebungen kommen.

Athena hätte mit Hilfe zweier neuartiger Röntgenteleskope Orte besonders energiereicher Strahlung aufspüren sollen. Auf diese Weise lassen sich unter anderem die extremen Bedingungen rund um supermassereiche Schwarze Löcher untersuchen. Auch die Entwicklungsphasen von Superno-

vae und Neutronensternen wollten die Forscher während der Mission in den Blick nehmen. Zudem hätten sie Ansammlungen heißen Gases kartiert. So ließe sich Aufschluss darüber gewinnen, wie sich großräumige Strukturen im Universum bilden. NGO wiederum hätte sich auf die Spur einer Art kosmischen Hintergrundrauschens gemacht. Es erreicht uns, so sagen es Theoretiker voraus, in Form von Gravitationswellen, die unter anderem von verschmelzenden Schwarzen Löchern aus fast allen kosmischen Epochen ausgehen.

Ein verzweifelter Versuch, das Ruder noch herumzureißen

Nun also hatte das Jupiterprojekt das Rennen gemacht. Das Votum des SSAC blieb allerdings erst einmal geheim. Als das Gremium Anfang April mit knapper Mehrheit Juice empfohlen hatte, veröffentlichte die ESA weder das Resultat noch die entscheidenden Gründe. Für Transparenz sorgte erst der Wissenschaftsblogger Steinn Sigurðsson. Als die britische BBC dessen Informationen aufgriff, verschaffte sie nicht nur dem Spruch des SSAC eine breite Öffentlichkeit, sondern auch einigen Details aus dem internen Bericht. Das Athena-Team mit seinem Sprecher Kirpal Nandra vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching erfuhr davon und versuchte, das Ruder herumzureißen; schließlich stand die endgültige Entscheidung durch das SPC zu diesem Zeitpunkt noch aus.

Für ihre Petition sammelten die Röntgenastronomen im Internet über 1500 Unterstützer aus der Fachwelt, darunter rund 250 Wissenschaftler allein aus Deutschland. Ein beeindruckender Beleg für den wissenschaftlichen Stellenwert des Projekts, meint Astrophysiker Nandra. In ihrem Brandbrief befürchteten die Unterzeichner, dass der Röntgenastronomie eine folgenreiche Zäsur drohe, falls altgediente Satelliten wie XMM Newton und Chandra den Betrieb einstellen müssten, ohne dass Ersatz geschaffen sei. Ein Argument mit Schwächen, denn zumindest der dauerhafte Weiterbetrieb des europäischen

XMM-Teleskops sei technisch durchaus vorstellbar, sagen Experten – möglicherweise bis weit in die 2020er Jahre hinein.

Überrascht, aber naturgemäß zufrieden zeigte man sich im Camp der Planetologen. Die Entscheidung sei »ein Glücksfall und eine wichtige Unterstützung für unsere Forschung«, so Tilman Spohn. Der Berliner Planetengeologe, der dem SSAC-Gremium bis 2010 selbst sechs Jahre lang angehört hatte, räumt aber ein, dass die unterlegenen wissenschaftlichen Communitys nun ein Problem hätten. »Der ESA ist das bewusst, und sie ist um Balance bemüht«, sagt Spohn. So wäre bei künftigen Auswahlen ein Ausgleich für die diesmal nicht zum Zuge gekommenen Disziplinen denkbar.

Die Gravitationsforscher hoffen unterdessen auf Schadensbegrenzung. Wir müssen »die hochmotivierte Wissenschafts-Community zusammenhalten«, so Karsten Danzmann vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Hannover. Schließlich sieht man sich kurz vor dem Ziel. Bereits seit 20 Jahren versuchen Forscher, Gravitationswellen vom Weltraum oder vom Boden aus nachzuweisen. Trotz großer Steigerungen der Messempfindlichkeit blieb der Erfolg zwar bisher aus. Mit einer neuen Detektorgeneration auf der Erde soll sich das ab 2015 aber schlagartig ändern (siehe »Mit Pulsaren auf der Jagd nach Gravitationswellen«, SdW 7/2011, S. 48).

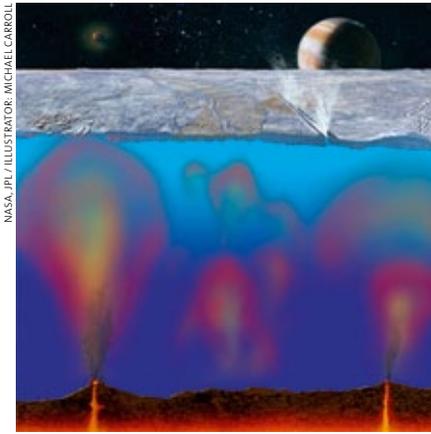
Das NGO brächte den endgültigen Durchbruch. Es ginge dabei nämlich um viel mehr als einen weiteren Test der allgemeinen Relativitätstheorie, auch wenn es Albert Einstein war, der die Gravitationswellen vor knapp einem Jahrhundert postuliert hatte. Tatsächlich sollen die drei Satelliten, die zusammen ein Laser-Interferometer mit einer Armlänge von einer Million Kilometer bilden, ein bislang verschlossenes Fenster zum Kosmos aufstoßen: Im »Licht« von Gravitationswellen lassen sich kollidierende Schwarze Löcher, die Abläufe im Innern von Supernovae oder der innere Aufbau von Neutronensternen untersuchen.



Ganymed zeichnet sich durch aktive Tektonik aus. Die Einzelaufnahmen des Mosaiks, aufgenommen 1999 von der NASA-Sonde Galileo, sind kontrastverstärkt.



Die detaillierteste Aufnahme des Monds Europa, hier ein Ausschnitt mit 1,8 Kilometer Breite, gelang der Raumsonde Galileo 1997 aus 560 Kilometer Entfernung. Die Oberfläche der kilometerdicken Kruste aus Wassereis ist durch helle Berggrücken und dunkle Täler strukturiert. Darunter verbirgt sich ein tiefer Wasserozean.



NASA, JPL / ILLUSTRATOR: MICHAEL CARROLL

Wie sieht es in Europas Innerem aus? Ein gängiges Szenario lautet: Hitze, möglicherweise vulkanischen Ursprungs, steigt aus dem Gesteinsmantel empor und wird durch Wasserströmungen nach oben transportiert. Dort sorgt sie in der extrem kalten Eiskruste für Verwerfungen, die sogar aus dem All sichtbar sind.

Doch NGO und Athena sind nur aufgeschoben. »In den kommenden Jahren«, sagt Danzmann, »werden wir die technischen Lücken schließen und uns auf den Start von Lisa Pathfinder konzentrieren.« Diese ESA-Sonde soll

wichtige Techniken für das NGO erproben und nachweisen, dass sich die angestrebte Messgenauigkeit erreichen lässt. Zwei Testkörper sollen innerhalb der Sonde frei schweben, ihre Position muss dabei bis auf einige Pikometer,

also billionstel Meter, genau gemessen werden. Die Mission ist bereits beschlossen, das zuletzt verlaublichste Budget beläuft sich auf 305 Millionen Euro. Wegen technischer Probleme wurde sie jedoch schon mehrfach verschoben, aktueller Starttermin ist 2014. Trotz des Dämpfers für das Vorhaben bleibt Danzmann auch weiterhin optimistisch: Denn wenn Lisa Pathfinder ein Erfolg werde, seien alle Risikoargumente vom Tisch. Und schon ab 2015 befindet die ESA über die nächste L-Mission, deren Start 2028 stattfinden könnte. Dann allerdings befindet sich Juice schon im Anflug auf Jupiter.

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

EPIGENETIK

Vererbte Mitte

Ein einziges Protein bestimmt bei Taufliegen über die exakte Position des so genannten Zentromers: des für die Zellteilung entscheidenden Mittelteils von Chromosomen. Nicht nur das – es gibt diese Information auch an die Tochterzellen weiter.

VON EMMANUELLE VANIET

Unmittelbar vor der Zellteilung liegt die Erbinformation in Form dicht gepackter, X-förmiger Bündel aus DNA und Proteinen vor: den »kondensierten« Chromosomen. Deren taillenartige Einschnürung nennt sich Zentromer – der Begriff stammt aus dem Griechischen und bedeutet Mittelteil. An diesem Ort spaltet sich das Chromosom in zwei Chromatiden, die jeweils die vollständige Erbinformation enthalten. Diese werden dann auf die beiden neu gebildeten Zellen verteilt.

Das Zentromer allein reicht dafür allerdings nicht aus: Es stellt lediglich die Andockstelle des so genannten Kinetochors dar – eines riesigen Proteinkomplexes. An ihn heftet sich das Zellskelett beidseitig des Chromosoms an und zieht die zwei Chromatiden auseinander. Fehlt jedoch das Zentromer

oder erfüllt es seine Rolle nicht ordnungsgemäß, entstehen Zellen, bei denen ganze Chromosomen fehlen oder aber doppelt vorkommen. In Keimzellen kann das zu genetischen Defekten des Nachwuchses führen, in den anderen Körperzellen zu Krebs.

Bis jetzt war rätselhaft, was die Position des Zentromers auf den Chromosomen festlegt. Zwar gibt es im Erbgut der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*, eines beliebten Untersuchungsobjekts der Genetiker, einen 125 Basen langen DNA-Abschnitt, der den Trennungspunkt markiert. Doch bei anderen Organismen – inklusive dem Menschen – fand sich keine solche eindeutige Sequenz. Die Abfolge der Erbgutbausteine sagt also nicht voraus, wo das Zentromer sein wird, und gibt diese Information damit auch nicht an die Tochter-

zellen weiter. Forscher um Patrick Heun vom Max-Planck-Institut für Immunbiologie und Epigenetik in Freiburg haben nun den entscheidenden Mechanismus entdeckt: Offensichtlich ist ein Protein namens CENH3 ganz allein in der Lage, die Position des Zentromers zu markieren. Darüber hinaus sorgt es auch dafür, dass diese Stelle nach einer Zellteilung beibehalten wird. Es handelt sich dabei um einen so genannten epigenetischen Prozess.

Dass nicht nur die Gene allein, sondern auch andere Faktoren das Schicksal einer Zelle bestimmen, ist nicht neu. Obwohl alle Zellen eines Embryos das selbe Erbgut enthalten, differenzieren sie sich im Lauf der Entwicklung des Organismus in höchst unterschiedliche Typen aus. Zu Grunde liegen epigenetische Mechanismen, bei denen nicht die

genetische Information an sich – also die DNA-Sequenz – entscheidet, sondern das Maß, wie dicht der Erbgutfaden im Zellkern verpackt ist. Das kann die Aktivität der Gene und somit das Verhalten der Zelle auf dramatische Weise beeinflussen (siehe SdW 7/2011, S. 28 und den Artikel ab S. 20 im vorliegenden Heft).

Unter anderem regulieren die so genannten Histone die Packungsdichte: Diese Proteine bilden Komplexe, um die sich die DNA wie um eine Spule wickelt. Im Bereich des Zentromers findet man eine Histonvariante, die sonst nirgends vorkommt: CENH3 ersetzt dort den sonst üblichen Typ H3. Könnte also CENH3 die Position des Zentromers festlegen?

Patrick Heun und seine Mitarbeiter schleusten das Histon in Zellen der Taufliege *Drosophila melanogaster* ein und lenkten es gezielt an einen Ort des Chromosoms 3, der ein Stück entfernt von dem des natürlichen Zentromers

liegt (*Science* 334, S. 686–690, 2011). Hierfür nutzten sie Elemente des so genannten lac-Operon-Systems aus dem Bakterium *Escherichia coli* (*E. coli*): Ein Repressorprotein verhindert dort das Ablesen von Genen, indem es sich an eine bestimmte Stelle der DNA vor diesen – genannt lacO – bindet.

Bauanleitung für ein Zentromer

Heun und seine Kollegen verknüpften den Lac-Repressor von *E. coli* mit CENH3 und verfrachteten das Ganze in die *Drosophila*-Zellen. In deren Chromosom 3 hatten sie zuvor lacO-Sequenzen abseits des natürlichen Zentromers eingebaut. Dank des angehängten Repressors sammelte sich das modifizierte CENH3 an dieser Stelle an. Und siehe da: Einen Tag später erschien dort der Kinetochor-Komplex, das Zellskelettdockte an – ein neues funktionstüchtiges Zentromer war entstanden.

Darüber hinaus war CENH3 offensichtlich nicht nur in der Lage, den zel-

lulären Trennungsapparat herbeizuholen, sondern zusätzlich noch weitere, zelleigene CENH3-Moleküle, die dann dort an die DNA binden und in das Chromosom integriert werden. Laut Heun zeigt dies, dass das Histonmolekül nicht nur das Zentromer markiert, sondern auch dessen Position vererben kann. So wird der Ort des Zentromers von Generation zu Generation epigenetisch weitergegeben.

Doch fiel es den Forschern bislang schwer, die *Drosophila*-Zellen mit dem neuen Zentromer über längere Zeit zu beobachten und damit diese Art der Vererbung des Mittelstücks zweifelsfrei zu beweisen. Denn sobald sich zwei Zentromere auf einem Chromosom befinden, zerrt das Zellskelett bei der Teilung nicht mehr nur an einer Stelle, sondern an zwei. Dadurch zerbricht das Chromosom, was ein »Selbstmordprogramm« der Zelle auslöst – ein eingebauter Schutzmechanismus vor späteren Folgeschäden wie die erwähnten Tumoren.

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



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

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Ein Preisnachlass beim Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«



Produkt des Monats

Die Zukunft ist schon wieder überholt

Zum Tod des letzten klassischen Sciencefiction-Autors

Bis in die 1950er Jahre war Sciencefiction Schund. Auf dem typischen Groschenheft prangte ein Rieseninsekt, das eine spärlich bekleidete Blondine in den Fängen hielt. Erst mit Isaac Asimov (»Ich, der Robot«) und Arthur C. Clarke (»2001«) kamen Geschichten auf, die man nicht mehr unter der Schulbank verstecken musste. Ray Bradbury, der nun hochbetagt gestorben ist, erklimm mit »Fahrenheit 451« sogar die Höhen der schönen Literatur, wie der Astronom und Sciencefiction-Autor David Brin in einem Nachruf auf den Vorläufer neidlos anerkennt (*Nature* 486, S. 471, 2012).

Wer François Truffauts Verfilmung von 1966 gesehen hat, wird die Schlusszene nicht vergessen: Menschen spazieren im Schnee als lebende Hörbücher; sie memorieren die Romane der Weltliteratur, weil Bücher verboten sind. Denn wer liest, kommt auf eigene Gedanken, und das ist in dieser Zukunftswelt so unerwünscht, dass die Feuerwehr die Aufgabe hat, Bücher zu verbrennen.

Bradbury erfand unheimlich einprägsame Bilder. Die Kurzgeschichte »Der lange Regen« fällt mir immer ein, wenn mich ein heftiger Schauer überrascht. Nie habe ich das Gefühl, der Nässe ausgeliefert zu sein, plastischer beschrieben gefunden als in der Schilderung jener Raumfahrer, die auf der Venus durch permanenten Regen irren und sterben müssen, wenn sie nicht bald die rettende Kuppel erreichen.

Noch ein unvergessliches Bild: Ein vollautomatisches Haus erwacht und beginnt sein Tagewerk. Erst mit der Zeit dämmert dem Leser, dass die Erde menschenleer und von den Bewohnern nur ein Schatten an der Hausmauer übrig ist – Zitat eines realen Pressefotos aus Hiroshima nach dem Bombenabwurf.

Diese Zukunftsgeschichte (»Sanfte Regen werden kommen«) stammt wie die vorige von 1950; beide wurzeln in einer längst vergangenen Vorstellungswelt. Die klassische Sciencefiction entwarf das Schreckensbild der Erde nach einem Atomkrieg, und unsere Nachbarplaneten ähnelten unserem eigenen. Die Venus war eine jüngere Erde, tropisch und urtümlich. Auf dem Mars ging dagegen gerade eine uralte Zivilisation zu Grunde, die den Roten Planeten mit einem Netz von Kanälen überzogen hatte.

Seit die sowjetischen Venera-Raketen die Venus erkundet haben, wissen wir, dass es dort schon deshalb niemals regnen kann, weil es mit über 450 Grad Celsius dafür viel zu heiß ist. Und auf dem Mars haben – je nach Verlauf der ausgemalten Begegnung leider oder zum Glück – nie intelligente Wesen existiert; die Kanäle waren optische Täuschungen. Falls es im Sonnensystem außerirdische Spuren von Leben gibt, dann am ehesten auf dem Jupitermond Europa, dessen innerer Ozean nicht komplett gefroren ist (siehe S. 13). An seinem Grund gibt es womöglich heiße Quellen, in deren Nähe exotische Mikroorganismen hausen könnten, die ohne Sonnenlicht auskommen – ähnlich wie bei den hydrothermalen Schloten in der irdischen Tiefsee.

Auch im Innern des Saturnmonds Titan verbirgt sich ein hunderte Kilometer tiefes Wassermeer, was Messungen mit der Raumsonde Cassini gerade erst wieder bestätigt haben (*Science* 336, S. 1629, 2012). Allerdings dürfte es eiskalt und wenig lebensfreundlich sein. Dennoch ist Titan aus einem anderen Grund schon länger ein Spielplatz für Spekulationen um extraterrestrisches Leben: Aus seiner methanreichen Stickstoffatmosphäre fällt ein dichter Regen organischer Moleküle.

So darf man sich auf einem dieser sonnenfernen Monde mit viel Fantasie Biomoleküle, exotische Einzeller, vielleicht sogar hier und da dünnen Schimmelbelag ausmalen. Das ist verglichen mit Ray Bradburys Venus-Tropen und Mars-Altärtümern freilich ein recht kümmerliches Bild. Aber so geht's: Je mehr Science, desto weniger Fiktion.



Michael Springer

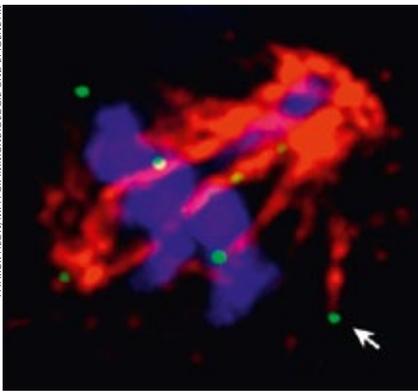
Der Durchbruch erfolgte im Rahmen einer Zusammenarbeit mit dem Helmholtz Zentrum in München: Die Forscher produzierten nun das neue Zentromer nicht mehr auf einem Chromosom der Fliege, sondern auf einem künstlichen Minichromosom, das sie vorher in die Zellen eingebracht hatten.

Solche künstlichen Chromosomen sind nicht nur Experimentierwerkzeuge, sie werden auch als zukünftige Gentransporter für die Gentherapie angesehen. Bis jetzt verwenden Wissenschaftler meist veränderte Viren, um Gene in kranke Zellen einzuführen. Künstliche Chromosomen dagegen ermöglichen es, größere Mengen genetischen Materials einzuschleusen. Im Gegensatz zu vielen Viren integrieren sie sich auch nicht ins Genom der behandelten Zellen – was potenzielle Probleme vermeidet.

Verlängerte Lebensdauer für Minichromosomen

Lange erwies es sich allerdings als schwierig, künstliche Chromosomen mit einem Zentromer zu versehen. Die DNA-Moleküle wurden im Zuge der Zellteilung zwar kopiert, jedoch nicht gleichmäßig auf die Nachkommenzellen verteilt. Folglich verschwanden sie im Lauf der Zeit allmählich. So erging es auch Minichromosomen von Heun, die kein Zentromer trugen: Nach drei Wochen ließen sie sich in den *Drosophila*-Zellen nicht mehr nachweisen. Waren sie jedoch mit lacO-Sequenzen ausgestattet, hielten sie sich immerhin doppelt so lange. Sie hatten CENH3 gebunden und funktionsfähige Zentromere gebildet (siehe Bild oben rechts).

Doch so stabil wie natürliche Chromosomen sind die künstlichen Minichromosomen mit Zentromer noch lange nicht. Nach einer gewissen Zeit verschwinden auch sie wieder – warum, das versuchen die Forscher nun herauszufinden. Zudem ist es alles andere als gewiss, ob sich die Ergebnisse in menschlichen Zellen reproduzieren lassen. Bei diesen sind die Mechanismen grundsätzlich viel komplexer: »Während der innere Teil des Kine-



Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme einer Tauflienzelle. Die Forscher stateten künstliche Minichromosomen (grün) mit lacO-Ködersequenzen für das CENH3-Histon aus und brachten sie in die Fliegenzellen ein. Daraufhin bildeten sich auf den Minichromosomen offensichtlich funktionstüchtige Zentromere, an die das Zellskelett während der Zellteilung ebenso anhaften kann (Pfeil) wie an die natürlichen Zentromere (blau).

tochors bei *Drosophila* aus zwei Proteinen besteht, sind es beim Menschen gleich 15.« Ob auch dort CENH3 allein im Stande ist, ein Zentromer zu bilden, bleibt zu klären. Dazu kommt, dass es in der Zelle effiziente Mechanismen gibt, die verlagertes CENH3 entfernen können. Laut Heun sollen sie gerade vor der Bildung riskanter »multizentrischer« Chromosomen und den damit verbundenen Chromosomenbrüchen schützen.

Allerdings: Zusätzliche Zentromere bringen nicht immer Nachteile mit sich. Sie seien sogar während der Evolution am Auftreten neuer Spezies beteiligt gewesen, meinen die Forscher. So entstand mit der Abspaltung der Menschenaffen (genauer: Menschenartigen) von der Stammeslinie der Meerkatzenverwandten vor einigen Millionen Jahren bei Letzteren ein neues Zentromer (9q33.1). Umgekehrt können Zentromere auch verschwinden: Durch Fusion

zweier Chromosomen des heutigen Schimpansen entstand das menschliche Chromosom 2 – dabei ging ein Zentromer verloren.

Solche dynamischen Entwicklungen sind nur mittels epigenetischer Markierung möglich, so Heun: »Es ist einfacher, eine epigenetische Markierung zu entfernen, als eine lange DNA-Sequenz durch Mutationen zu verändern.« Wo ein genetisch fixierter Ort des Zentromers chromosomale Veränderungen nicht zugelassen hätte, erlaubten die flexibleren epigenetischen Mechanismen eine schnelle Anpassung – zum Beispiel die Entfernung des überzähligen Zentromers aus der Schimpansenlinie – und dadurch den Erhalt der betroffenen Zellen. Laut Heun könnte also die epigenetische Markierung des Zentromers durchaus als Antriebskraft bei der Evolution gewirkt haben.

Emmanuelle Vaniet ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

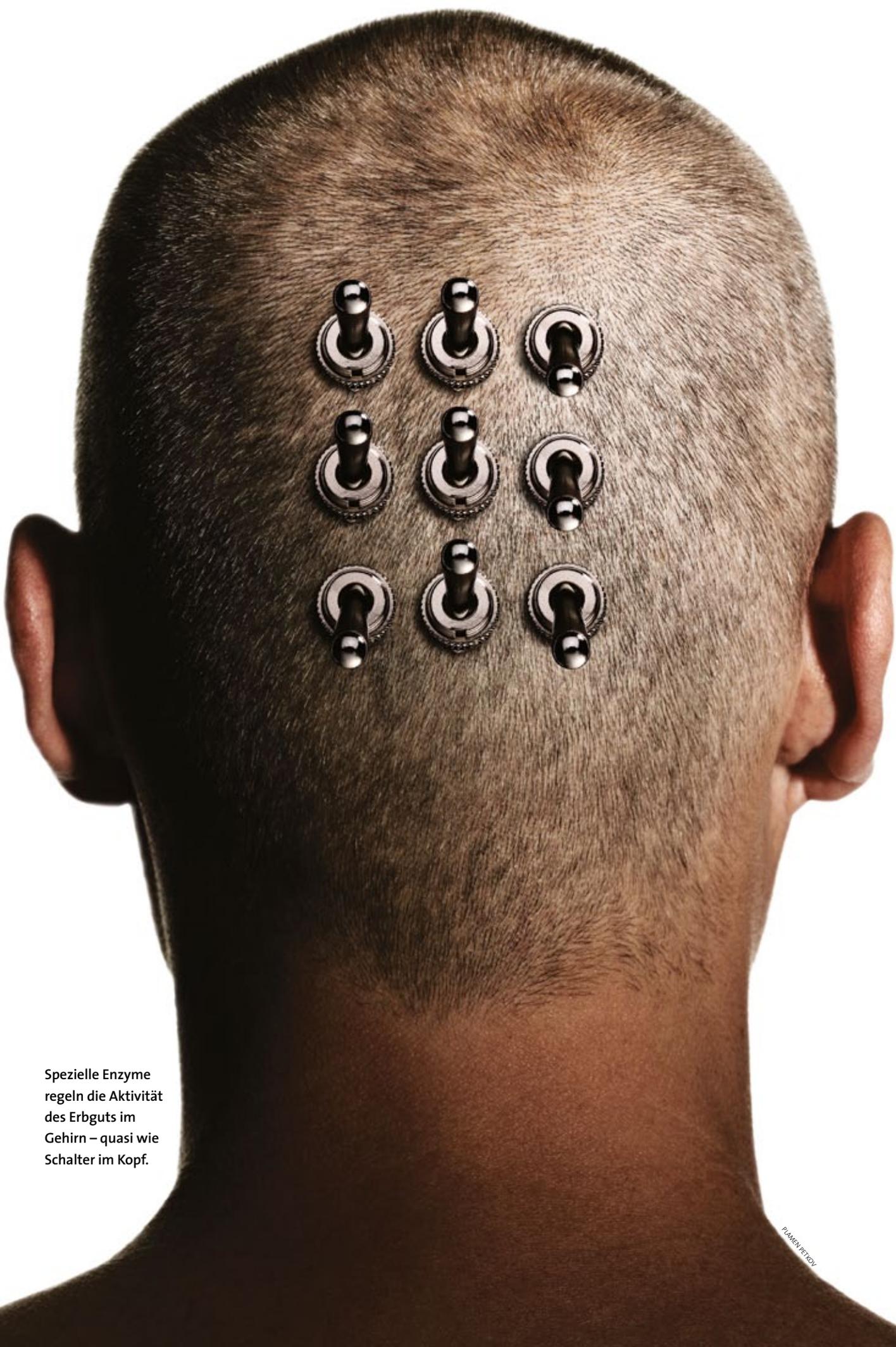
WISSEN, WAS WICHTIG IST – IMMER UND ÜBERALL!

Mit dem Digitalabo von **Spektrum der Wissenschaft**



Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch noch vollen Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

www.spektrum.de/digitalabo



Spezielle Enzyme
regeln die Aktivität
des Erbguts im
Gehirn – quasi wie
Schalter im Kopf.

Verborgene Schalter im Gehirn

Erlebnisse und Erfahrungen lösen epigenetische Veränderungen im Gehirn aus und beeinflussen dadurch die Aktivität von Genen. Das kann Verhaltensänderungen bis hin zu psychiatrischen Störungen hervorrufen.

Von Eric J. Nestler

Matt und Greg sind Zwillingbrüder. Sie wuchsen in der Nähe von Boston auf und waren beide gute Schüler. In ihrem sozialen Umfeld kamen sie stets gut zurecht. Als Jugendliche tranken sie ab und zu ein Bier, rauchten hin und wieder eine Zigarette und experimentierten gelegentlich mit Marihuana, wie das viele junge Leute tun. Auf der Universität jedoch probierten sie Kokain, und diese Erfahrung prägte beide auf ganz unterschiedliche Weise. Während Matt es beim Versuch beließ – er arbeitet heute als Geschichtslehrer –, wurde sein Bruder von der Droge abhängig und völlig aus der Bahn geworfen.

Zunächst führte Greg sein Leben noch relativ normal weiter, studierte und hielt den Kontakt zu Freunden. Doch dann verfiel er dem Kokain immer mehr. Er verließ die Universität und nahm diverse Aushilfsjobs an, etwa im Einzelhandel oder in Schnellrestaurants. Keinen Arbeitsplatz behielt er länger als ein oder zwei Monate. Meist wurde er entlassen, weil er zu häufig fehlte oder mit Kunden oder Kollegen in Streit geriet. Greg verhielt sich mit der Zeit immer unberechenbarer und neigte zunehmend zu Gewaltausbrüchen. Wiederholt wurde er inhaftiert, weil er stahl, um seinen Drogenkonsum zu finanzieren. Mehrere Entzugstherapien scheiterten, und als ein Gericht ihn mit 33 Jahren zur Unter-

suchung in eine psychiatrische Klinik einwies, war er bettelarm und obdachlos, von der Familie verstoßen und ein Gefangener seiner Sucht.

Wieso war Greg so empfänglich für das Kokain, dass es sein Leben zerstören konnte? Weshalb entging sein Zwillingbruder, der exakt die gleichen Gene besitzt, einem ähnlichen Schicksal? Warum führt die Einnahme von Drogen bei manchen Menschen zu lebenslanger Sucht, während andere ihre Jugendsünden hinter sich lassen?

Diese Fragen sind nicht neu, doch erst jetzt scheinen Neurowissenschaftler den Antworten auf die Spur zu kommen. In den zurückliegenden Jahren haben Biologen zahlreiche molekulare Mechanismen entdeckt, die zu einem stärkeren oder schwächeren Ablesen von Genen führen, ohne dass die dort gespeicherte Information verändert wird. Dabei markieren Enzyme bestimmte Abschnitte der DNA und beeinflussen so deren Aktivität, manchmal sogar lebenslang. Weil dieser Eingriff nicht die Nukleotidsequenz des DNA-Strangs betrifft, sondern sich »oberhalb« von ihr abspielt, spricht man von epigenetischen Modifikationen (von griechisch: epi = über).

Viele Wissenschaftler, darunter meine Arbeitsgruppe, haben Hinweise darauf gefunden, dass epigenetische Modifikationen eine wichtige Rolle bei Drogensucht, Depression und anderen psychiatrischen Erkrankungen spielen. Sie beeinflussen, wie das individuelle Gehirn auf Drogen oder chronischen Stress reagiert, und machen manche Menschen besonders anfällig gegenüber solchen Einflüssen. Zwar stehen wir in der Erforschung des folgenreichen Wechselspiels von Genen und Umwelt noch ganz am Anfang, doch hoffen wir, dass unsere Erkenntnisse zu besseren Therapien gegen psychiatrische Erkrankungen beitragen werden. Vielleicht hilft uns die Epigenetik sogar zu verstehen, wie solche Störungen von einer Generation an die nächste weitergegeben werden.

Obwohl Wissenschaftler die genetischen Ursachen von Sucht, Depression, Autismus, Schizophrenie und anderen psychiatrischen Erkrankungen seit Jahrzehnten erforschen, bestehen hier immer noch große Wissenslücken. Sicher

AUF EINEN BLICK

WEICHENSTELLUNG IN DER ZELLE

1 Erlebnisse und Erfahrungen können zu psychiatrischen Erkrankungen beitragen, indem sie das **Erbgut von Hirnzellen** epigenetisch verändern. Das beeinflusst die Aktivität bestimmter Gene. Deren **Nukleotidsequenz** bleibt allerdings unverändert.

2 Tierstudien zeigen, dass Suchterkrankungen, Depressionen sowie bestimmte **Verhaltensmuster** mit **epigenetischen Modifikationen von Hirnzellen** einhergehen. Noch ist nicht abschließend geklärt, ob diese Veränderungen erblich sein können.

3 Wissenschaftler hoffen, dass die Epigenetik den Weg zu besseren Therapien von **psychiatrischen Erkrankungen** weist.

scheint, dass diese neurologischen Störungen eine starke erbliche Komponente haben: Etwa die Hälfte des Risikos, dass sich eine Sucht oder Depression manifestiert, ist genetisch bedingt – das ist höher als der erbliche Anteil von Bluthochdruck und den meisten Krebsarten. Doch die Gene entscheiden nicht allein. Wie das Beispiel der Zwillinge Greg und Matt zeigt, garantiert eine identische Genausstattung nicht, dass sich bei zwei Personen die gleiche Krankheit ausprägt. Stattdessen werden psychiatrische Erkrankungen bei genetisch vorbelasteten Individuen durch Umwelteinflüsse ausgelöst – etwa Drogenkonsum oder Stress – oder manchmal sogar durch zufällig stattfindende molekulare Vorgänge während der Individualentwicklung. Und nie wachsen zwei Menschen unter exakt identischen Bedingungen auf oder machen dieselben Erfahrungen.

Rauschwirkung des Kokains beruht auf verändertem »Spielplan« in Hirnzellen

Die Frage lautet also, über welche Mechanismen diese äußeren Einflüsse zu psychiatrischen Erkrankungen führen. In einer Hinsicht ist die Antwort klar: Die entscheidende Schaltstelle sitzt im Gehirn. Seine Neurone verarbeiten alles, was wir erleben, etwa einen Kinobesuch, eine Umarmung, das Schnupfen von Kokain oder ein gutes Abendessen. Sie geben die gewonnenen Informationen untereinander weiter, indem sie biochemische Botenstoffe austauschen. Diese Neurotransmitter aktivieren oder hemmen einzelne Nervenzellen und schalten bestimmte Gene an oder aus. Das Spektrum von Erbfaktoren, das ein bestimmter Neurotransmitter beeinflusst, entscheidet mit darüber, wie die betroffenen Neurone auf einen äußeren Stimulus reagieren und wie sich der jeweilige Mensch letztlich verhält.

Viele dieser Effekte halten nur kurze Zeit an. So aktiviert die Einnahme von Kokain das Belohnungszentrum im Gehirn und erzeugt ein vorübergehendes Gefühl der Euphorie. Es verblasst jedoch rasch, worauf das System in den Ausgangszustand zurückkehrt. Weit gehend ungeklärt ist, wie Drogen, Stress oder andere Erfahrungen anhaltende Langzeiteffekte hervorrufen können, so dass ein Mensch eine Depression entwickelt oder drogensüchtig wird. Viele Neurowissenschaftler sind der Auffassung, dass hier die Epigenetik ins Spiel kommt.

Vereinfacht ausgedrückt ist ein Gen ein Stück DNA, das typischerweise die Bauanleitung für ein Protein enthält. Proteine führen die meisten Funktionen der Zelle aus und bestimmen daher ihr Verhalten. Die DNA befindet sich im Zellkern, wo sie wie ein langer Faden aufgewickelt ist – auf Klumpen aus so genannten Histonproteinen. Dabei windet sich der DNA-Strang um einen Komplex aus acht Histonen, läuft weiter zum nächsten Histonkomplex, windet sich auch um diesen und so fort (siehe Kasten rechts). So entsteht eine perlschnurähnliche Struktur aus DNA und Proteinen, die sich ihrerseits – unter Anlagerung weiterer Proteine – zu einem dichten Knäuel zusammenfaltet, dem Chromatin. Es ist das Material, aus dem die Chromosomen bestehen.

Diese komplizierte Faltung dient einerseits dazu, das riesige DNA-Molekül – beim Menschen ist es insgesamt etwa zwei Meter lang – in den winzigen Zellkern zu packen. Sie trägt aber auch dazu bei, die Aktivität der Gene zu regulieren. In den dichter gepackten Bereichen des Chromatins sind die Gene eher inaktiv, da die molekulare Maschinerie, die die Gene abliest, hier einen erschwerten Zugang hat (siehe SdW 7/2011, S. 28). Falls die Zelle auf ein Gen zugreifen muss, lockert sich das Chromatin dort auf, wodurch die molekulare Maschinerie die entsprechende DNA-Sequenz ablesen und in RNA umschreiben kann. In den meisten Fällen dient der so erstellte RNA-Strang als Bauanleitung für ein Protein. Über diesen Mechanismus liest etwa eine angeregte Nervenzelle verstärkt Gene ab, die für Neurotransmitter kodieren, und stellt mehr von den Botenstoffen her.

Ob nun ein bestimmter Bereich des Chromatins aufgelockert vorliegt (also in aktiver Form) oder dicht zusammengefaltet ist (inaktiv), wird von epigenetischen Markierungen beeinflusst. Dabei handelt es sich um Atomgruppen, die an Histonproteine des jeweiligen Chromatinabschnitts oder an die DNA selbst geheftet werden. Es gibt verschiedene Arten solcher Markierungen, und gemeinsam bestimmen sie darüber, wie dicht sich das Chromatin zusammenfaltet und wie intensiv die dort befindlichen Gene transkribiert, also in RNA umgeschrieben werden (siehe Kasten S. 24).

Epigenetische Modifikationen werden von diversen Enzymen vorgenommen. Einige von ihnen bringen die chemischen Markierungen an, andere entfernen sie wieder. C. David Allis von der Rockefeller University (USA), ein führender Forscher auf dem Gebiet, hat für diese Enzyme die Begriffe »Schreiber« und »Radierer« geprägt. So ist das Enzym Histonazetyltransferase, das Essigsäurereste an Histonproteine anheftet, ein Schreiber, und die Histondeazetylase, die solche Azetylgruppen wieder entfernt, ein Radierer. Die epigenetischen Markierungen ziehen weitere Proteine an, die dann als »Leser« fungieren: Sie lockern oder verdichten das umgebende Chromatin, indem sie zusätzliche regulatorische Proteine auf den Plan rufen, welche die Transkription der dort liegenden Gene fördern oder hemmen. Stark azetylierte Histonproteine ziehen »Leser« an, die das Chromatin lockern, und fördern zusätzlich das Erscheinen weiterer Proteine, die Gene aktivieren helfen. Stark methylierte Histonproteine hingegen können »Leser« anlocken, die die Transkription unterdrücken und die Gene somit inaktivieren.

Umwelteinflüsse steuern die Aktivität von Genen, indem sie das Verhalten der Schreiber und Radierer abwandeln, was zu einem veränderten Markierungsmuster des Chromatins führt. Manchmal sind die epigenetischen Modifikationen kurzlebig, etwa um Nervenzellen zu erlauben, auf eine intensive Stimulation rasch mit dem Freisetzen von Neurotransmittern zu antworten. Häufiger jedoch bleiben die Markierungen monate- oder jahrelang an Ort und Stelle, manchmal sogar lebenslang. Ein Beispiel hierfür ist das Verstärken oder Abschwächen neuronaler Verknüpfungen, um Gedächtnisinhalte zu speichern.

Azetyl- und Methylgruppen hinzuzufügen oder zu entfernen, trägt also – neben vielen anderen Formen der Markierung – dazu bei, dass das Gehirn sich an eine veränderte Umgebung anpassen und auf Erfahrungen reagieren kann. Epigenetische Prozesse können sich aber auch verhängnisvoll auswirken, etwa bei Drogensucht oder Depression. In Tierversuchen lösen veränderte Markierungsmuster an der DNA mitunter das Verlangen nach einer Droge aus, rufen Symptome einer Depression hervor oder prädisponieren auf andere Weise zu lebenslänglich fehlangepasstem Verhalten. Untersuchungen an menschlichem Hirngewebe, das nach dem Tod entnommen wurde, legen nahe, das Ähnliches auch beim Menschen zutrifft.

Unser Wissen darüber, wie Drogensucht entsteht, basiert auf der alten Erkenntnis, dass Rauschmittel das Belohnungszentrum im Gehirn sehr stark manipulieren können. So ergaben viele Studien, dass Kokain, Opiate und andere Suchtmittel bestimmte Gene in dieser Hirnregion aktivieren. Einige jener Effekte waren noch nach monatelangem Entzug nachweisbar, wobei es den Forschern schwerfiel, zu erklären, wie es zu den anhaltenden Veränderungen gekommen war. Meine Kollegen und ich begannen daher vor etwa zehn Jahren zu untersuchen, ob Kokain die Genaktivität in den Neuronen des Belohnungszentrums über epigenetische Modifikationen beeinflusst. Kokain ist eine starke Droge, die Tiere ebenso süchtig macht wie Menschen. Daher lassen sich die langfristigen Folgen des Kokainkonsums auch in Tierversuchen erforschen.

Droge schaltet Gene scharf

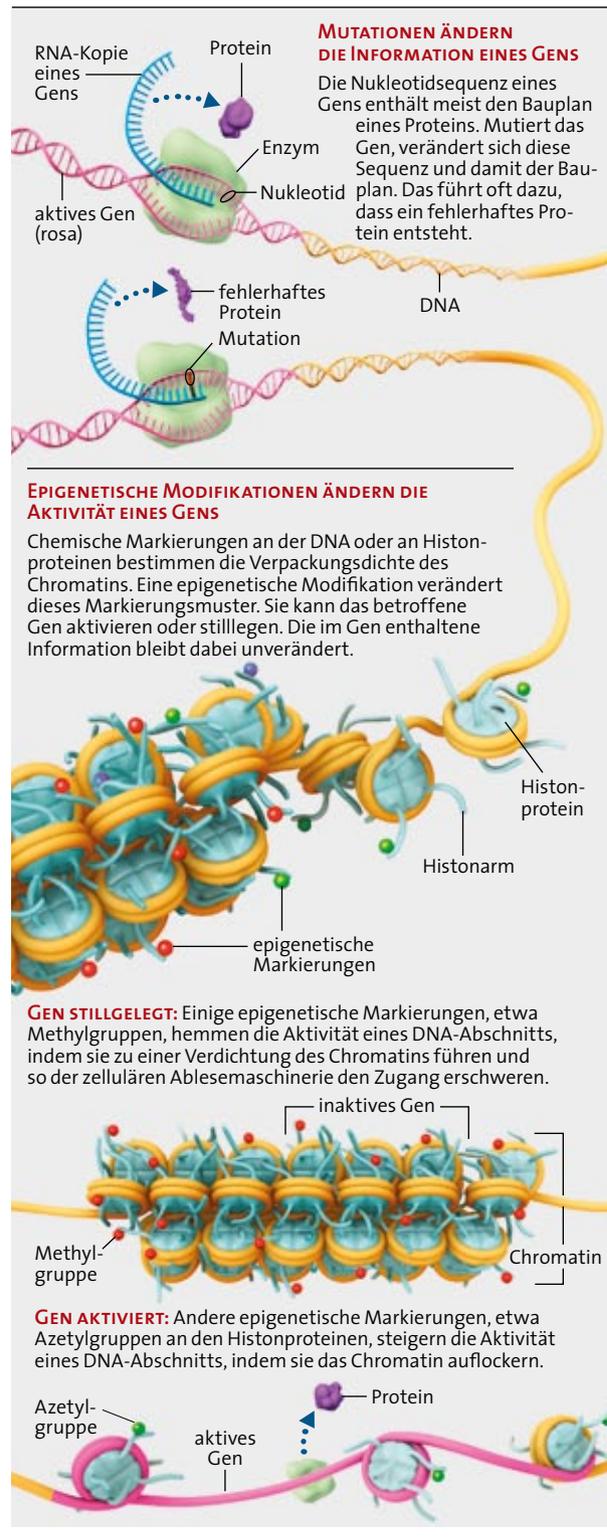
Eine einzelne Dosis Kokain ruft ausgeprägte und umfassende Veränderungen der Genexpression hervor, gemessen an der Konzentration der messenger-RNA – einem direkten Indikator für die Aktivität von Genen. Eine Stunde nachdem Mäuse ihre erste Kokaininjektion erhalten haben, sind in den Belohnungszentren ihrer Gehirne fast 100 Gene neu angeschaltet.

Noch interessanter ist, was mit Tieren geschieht, die über längere Zeit hinweg regelmäßig Kokain erhalten. Eine Hand voll der Gene, die bei der ersten Dosis in Aktion treten, verstummen, wenn die Droge jeden Tag verabreicht wird – sie werden »unempfindlich« gegenüber der Substanz. Bei einer viel größeren Anzahl von Erbfaktoren geschieht jedoch das Gegenteil: Sie erweisen sich bereits nach der ersten Kokaingabe als aktiver, doch die chronische Exposition steigert ihre Aktivität auf ein noch weit höheres Niveau, das selbst bei Entzug wochenlang anhält. Zudem reagieren diese Gene höchst empfindlich auf weitere Kokaingaben, auch wenn das Tier eine Zeit lang keine Droge erhält. Der chronische Konsum macht sie also »scharf« für eine künftige Aktivierung, er erlaubt ihnen gewissermaßen, sich an die Wirkung der Droge zu erinnern. Diese Sensibilisierung erhöht die Gefahr eines Rückfalls und bahnt den Weg zur Sucht.

Mit Labortechniken, die epigenetische Veränderungen im gesamten Mausgenom erfassen, konnten wir nachweisen,

Genetik und Epigenetik

Psychiatrische Erkrankungen sind offenbar häufig begleitet von epigenetischen Modifikationen im Erbgut von Hirnzellen. Dabei bleibt zwar die DNA-Sequenz gleich, es ändert sich aber die Aktivität von Genen. Als Folge davon können die Funktionen des Gehirns und anderer Organe beeinträchtigt werden.



dass chronischer Kokaingebrauch die Methyl- und Azetylmarkierungsmuster hunderter Gene im Belohnungszentrum des Gehirns spezifisch umgestaltet. Meist führen diese Veränderungen zu einem Auflockern der Chromatinstruktur, so dass die Gene bei erneuter Drogengabe leichter aktivierbar sind. Auch hier halten viele Veränderungen nur vorübergehend an. Andere jedoch bleiben länger bestehen: Manche lassen sich noch einen Monat nach der letzten Kokainexposition nachweisen – beachtlich lange, wenn man berücksichtigt, dass die Lebenserwartung von Mäusen nur wenige Jahre beträgt.

Allmählich kristallisieren sich die Mechanismen dieser dauerhaften Veränderungen heraus. Wie meine Mitarbeiter und ich entdeckt haben, dämpft Kokain die Aktivität be-

stimmter »Radierer«, die Azetylgruppen entfernen, sowie spezieller »Schreiber«, die hemmende Methylgruppen hinzufügen. Stärker azetyliertes und/oder schwächer methyliertes Chromatin liegt aufgelockert vor, so dass die Gene dort leichter abgelesen werden können. Darüber hinaus beeinflusst chronischer Kokainkonsum die Aktivität weiterer Enzyme im Belohnungszentrum des Gehirns und hinterlässt diverse epigenetische Markierungen, die zum Anschalten von Genen führen.

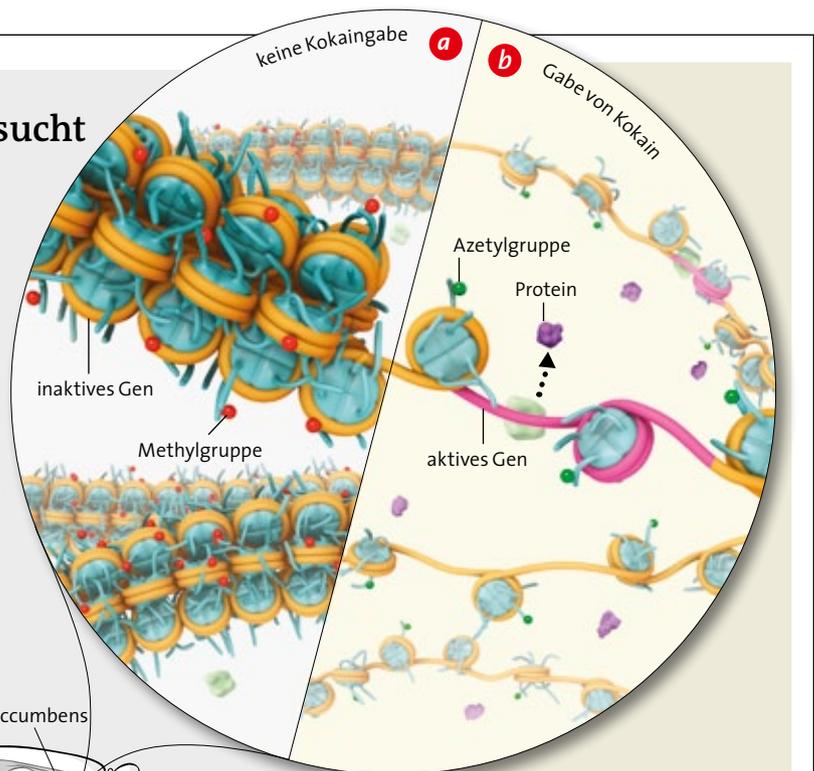
Die veränderte Funktion der »Schreiber« und »Radierer« bei anhaltender Kokainexposition hält langfristig an, was der Grund für die dauerhaft veränderten Aktivitäten der betroffenen Gene sein könnte – und für die Art und Weise, in der das Tier auf künftige Gaben der Droge reagiert. Da das Beloh-

Die Epigenetik der Drogensucht

Studien an Mäusen zeigen, dass regelmäßige Kokaingaben zu einem veränderten Muster epigenetischer Markierungen im Belohnungszentrum des Gehirns führen. Dies erhöht die Empfindlichkeit für die Drogenwirkung und steigert die Suchtgefahr.

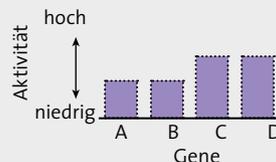
SCHON EINE EINZIGE DOSIS KOKAIN ...

... kann bei den Tieren das Muster epigenetischer Markierungen im Nucleus accumbens (einem Teil des Belohnungszentrums) verändern. In Abwesenheit der Droge dominieren Methylgruppen (a), wodurch das Chromatin dicht gepackt vorliegt und viele Gene stillgelegt sind. Unter dem Einfluss von Kokain werden vermehrt Azetylgruppen an die Histone geheftet, was das Chromatin auflockert (b). Dies aktiviert viele Gene, deren Proteine an der Reaktion des Organismus auf die Droge beteiligt sind.

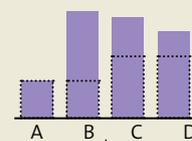


Nucleus accumbens

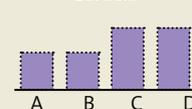
kein Kokain



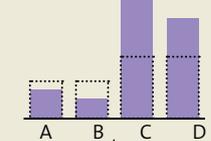
erstmalige Kokaingabe



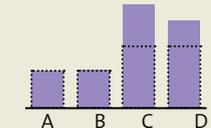
Nach einer Woche ohne Drogenkonsum kehrt Genaktivität auf Normalniveau zurück.



chronische Kokaingabe



Nach einer Woche ohne Drogenkonsum sind einige Gene immer noch überaktiv.



ANHALTENDE EFFEKTE

Die erste Kokaindosis erhöht vorübergehend die Aktivität vieler Gene (B, C, D im Schema rechts), allerdings geht diese rasch wieder auf das normale Maß zurück, wenn keine weitere Drogengabe erfolgt. Chronischer Kokainkonsum wirkt sich hingegen ganz anders aus: Einige Gene drosseln ihre Aktivität in Reaktion auf die Drogengabe, werden sozusagen unempfindlich (A und B, ganz rechts), während andere ihre Aktivität weiter steigern (C und D) und auch nach längerem Entzug überaktiv bleiben.

AXS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO

nungszentrum des Gehirns auf ein breites Spektrum von Reizen antwortet, einschließlich Essen und Sex, können Funktionsstörungen in diesem Hirnareal das Verhalten eines Tiers fundamental verändern.

Neuronale Anpassungen, die das Verhalten langfristig beeinflussen, liegen auch der Depression zu Grunde, einer der häufigsten und folgenreichsten psychiatrischen Erkrankungen. Wie bei Sucht lassen sich viele Aspekte der Depression in Tiermodellen untersuchen. In unserem Labor arbeiten wir mit Mäusen, die anhaltendem sozialem Stress ausgesetzt gewesen sind, etwa indem zahme Männchen zehn Tage lang mit aggressiven zusammengespart wurden. Die unterlegenen Männchen zeigen hinterher oft Symptome, die denen bei depressiven Menschen ähneln: Sie verlieren das Interesse für attraktive Weibchen und Süßigkeiten, sind ängstlich, teilnahmslos und wenig unternehmungslustig. Manche fressen auch übermäßig viel, so dass sie stark zunehmen. Einige dieser Veränderungen halten monatelang an.

In der DNA von Neuronen aus den Belohnungszentren dieser Mäuse fanden wir etwa 2000 Gene epigenetisch modifiziert. 1200 davon waren übermäßig methyliert und somit in ihrer Aktivität unterdrückt. Anscheinend werden bei einer Depression also zahlreiche Gene im Belohnungszentrum des Gehirns herunterreguliert, was das Wohlbefinden mindert und eine Art molekulare Narbe erzeugt. Viele der Veränderungen ließen sich rückgängig machen, indem wir die Tiere einen Monat lang mit Imipramin behandelten, einem häufig verschriebenen Antidepressivum. Ähnliche epigenetische Modifikationen wie bei unseren depressiven Mäusen finden sich auch im Hirngewebe von Menschen, die zum Zeitpunkt ihres Todes an einer Depression gelitten hatten.

Die Depression ist eine häufige Erkrankung, doch nicht alle Menschen sind gleichermaßen gefährdet. Offenbar gilt das auch für Mäuse. Etwa ein Drittel der Männchen, die täglich mit einem aggressiven Artgenossen zusammengespart wurden, erwies sich als depressionsresistent und zeigte weder Anzeichen von Antriebslosigkeit noch von Zurückgezogenheit. Diese psychische Belastbarkeit spiegelt sich auch im Genom wieder. Viele stressbedingte epigenetische Modifikationen, die bei depressiven Tieren auftraten, fanden sich bei den resistenten Mäusen nicht. Dafür jedoch wiesen Letztere epigenetische Abwandlungen in einem Satz von Genen auf, der bei depressiven Tieren nicht verändert war. Die außerordentliche psychische Belastbarkeit mancher Mäuse könnte demnach auf einem aktiven epigenetischen Programm beruhen, das die Wirkungen von chronischem Stress bekämpft.

Wir fanden außerdem heraus, dass diese »schützenden« DNA-Abschnitte auch solche Gene einschließen, deren Aktivität sich bei depressiven Mäusen während der Behandlung mit Imipramin normalisiert. Einige der Gene steigern die Aktivität des Belohnungszentrums im Gehirn und dürften dazu beitragen, Depressionen abzuwehren. Möglicherweise entfalten also Antidepressiva ihre Wirkung zum Teil dadurch, dass sie epigenetische Programme in Gang setzen, die sonst eher bei depressionsresistenten Individuen aktiv sind.

Falls das zutrifft, sollten sich Medikamente entwickeln lassen, die die psychische Widerstandskraft steigern – zusätzlich zu Arzneien, die die schädlichen Auswirkungen von chronischem Stress verhindern.

Die bisher beschriebenen Effekte halten bei Mäusen bis zu einem Monat an; längere Zeiträume haben wir noch nicht untersucht. Doch epigenetische Modifikationen können auch lebenslange Verhaltensänderungen bewirken, wie Michael Meaney und seine Kollegen von der McGill University (Kanada) berichteten. Meaney interessierte sich für den Einfluss mütterlicher Fürsorge auf epigenetische Muster und Verhaltensweisen bei Ratten.

Manche Rattenweibchen pflegen und umsorgen ihre Jungen besonders hingebungsvoll. Andere legen bei der Brutpflege wenig Eifer an den Tag. Die Wissenschaftler beobachteten, dass die Nachkommen der liebevollen Müttern in belastenden Situationen weniger ängstlich sind und weniger Stresshormone ausschütten als Jungtiere von eher passiven Rattenmüttern. Zudem kümmerten sich die fürsorglich aufgezogenen Töchter später selbst vorbildlich um ihren Nachwuchs.

Schlechtes Elternhaus belastet die Nachkommen ein Leben lang

Meaney's Gruppe belegte, dass diese Effekte zumindest teilweise über epigenetische Mechanismen vermittelt werden. Bei Jungtieren von passiven, wenig fürsorglichen Müttern waren die regulatorischen Sequenzen des Gens für den Glukokortikoidrezeptor verstärkt methyliert. Der Rezeptor kommt in den meisten Körperzellen vor und vermittelt die Reaktion auf das Stresshormon Cortisol. Die vermehrte Methylierung war unter anderem im Hippocampus nachweisbar, einer Hirnregion, die für Lernprozesse und Gedächtnisleistungen wichtig ist. Die betroffenen Nervenzellen dort produzierten weniger Rezeptormoleküle. Dies verstärkt die Stressreaktionen der Tiere, da aktivierte Glukokortikoidrezeptoren im Hippocampus die Cortisolproduktion im Körper drosseln. Die betroffenen Mäuse sind ängstlicher und leichter zu verunsichern – und bleiben es ein Leben lang.

Neben den Effekten auf den Glukokortikoidrezeptor gibt es offenbar noch andere Wirkungen. Frances Champagne und ihre Kollegen von der Columbia University (USA) fanden epigenetische Unterschiede zwischen Jungtieren von aktiven und passiven Rattenmüttern auch an einem Gen, das für den Östrogenrezeptor kodiert. Es ist daher wahrscheinlich, dass veränderte Markierungsmuster noch vieler weiterer Gene die Reaktionen auf mütterliches Verhalten beeinflussen.

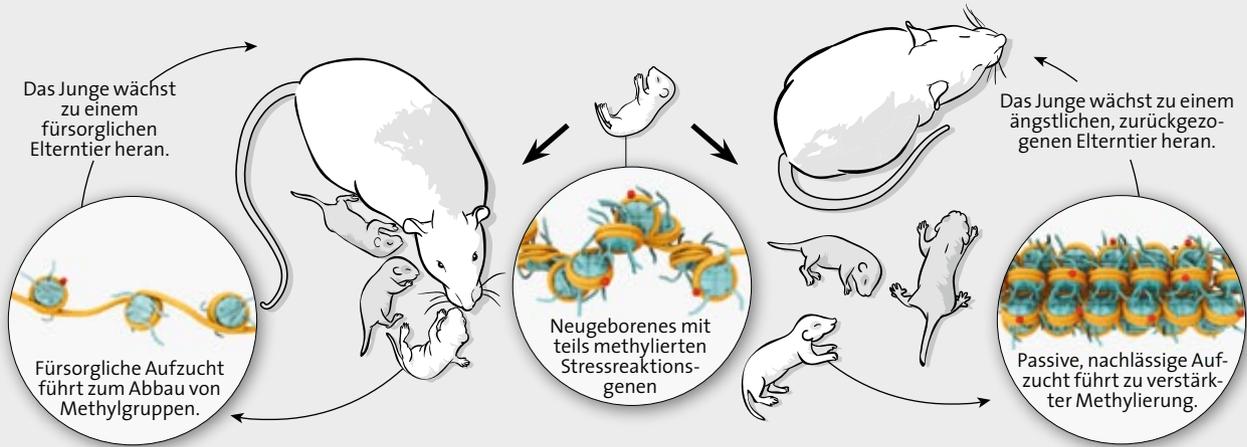
Zusammengenommen sprechen die Ergebnisse sogar dafür, dass epigenetische Modifikationen an die folgende Generation weitergegeben werden können, obwohl sie nicht in den Keimzellen auftauchen. Das Verhalten des Muttertiers verändert epigenetische Muster im Gehirn ihrer Jungen, worauf diese später das gleiche Verhalten an den Tag legen und somit ihre Nachkommen entsprechend prägen und so fort.

Eine der großen Aufgaben für die kommenden Jahrzehnte wird es sein, die Zusammenhänge zwischen epigenetischen

Vererbung jenseits des Erbguts

Epigenetische Modifikationen beeinflussen das Verhalten von Ratten. Wie Versuche gezeigt haben, können die dabei erworbenen Muster sogar über Generationen weitergegeben werden, ohne dass sie in den Keimzellen auftreten. Nach der Geburt eines Jungtiers werden einige seiner Gene, die an der Regulation von Stressreaktionen beteiligt sind, mit hemmenden Methylgruppen versehen, was die Stressempfindlichkeit steigert. Wachsen die Jungtiere unter der Obhut einer fürsorg-

lichen Mutter auf (links), dann werden viele dieser Methylgruppen wieder entfernt, was die Tiere furchtloser und belastbarer macht. Im Erwachsenenalter erweisen sie sich dann ihrerseits als ruhige und fürsorgliche Eltern. Verhält sich die Mutter der Jungtiere hingegen ängstlich und teilnahmslos, so nimmt bei den Jungen die Zahl der Methylgruppen auf den entsprechenden Genen zu. Später geben sich diese Tiere dann ebenfalls ängstlich und passiv.



Modifikationen und individuellem Verhalten für bessere Therapien gegen psychiatrische Erkrankungen zu nutzen. Arzneistoffe, die die Azetylierung des Chromatins fördern – indem sie Enzyme hemmen, die diese Gruppen von den Histoneproteinen entfernen –, wirken stark antidepressiv. Meaney beobachtete zudem, dass die gleichen Substanzen auch fürsorgliches Brutpflegeverhalten begünstigen. Wahrscheinlich kann die ausgeprägte Methylierung einiger Chromatinbereiche, die bei Jungtieren von nachlässigen Rattenmüttern zu beobachten ist, von einer verstärkten Azetylierung kompensiert werden.

Diese Ergebnisse machen Hoffnung. Es sind auch bereits Hemmstoffe von Histondeazetylasen (also Stoffe, die das Entfernen von Azetylgruppen unterbinden) als Medikamente zugelassen. Allerdings dürften sie kaum geeignet sein, um psychiatrische Erkrankungen zu behandeln. Denn Histondeazetylasen beteiligen sich an der epigenetischen Regulation im gesamten Gehirn und überall sonst im Körper, so dass ihre wahllose Hemmung schwere Nebenwirkungen verursachen kann. Ein Ausweg wären Wirkstoffe, die Histondeazetylasen selektiv hemmen – und zwar gezielt in den Hirnregionen, die von der jeweiligen Erkrankung am stärksten betroffen sind, etwa im Belohnungszentrum.

Eine andere Alternative bestünde darin, neue Proteine zu finden, die an epigenetischen Modifikationen im Gehirn mitwirken, und diese dann gezielt zu beeinflussen. Der ver-

mutlich fruchtbarste Ansatz besteht jedoch darin, jene Gene zu identifizieren, die bei Depression oder Sucht veränderten Markierungsmustern unterworfen sind: zum Beispiel DNA-Abschnitte, die für bestimmte Neurotransmitterrezeptoren oder für Signalproteine kodieren. Anschließend könnten wir versuchen, Medikamente zu entwickeln, die selektiv die Aktivität dieser Gene oder ihrer Proteine beeinflussen.

Höchst spannend und noch unbeantwortet ist die Frage, in welchem Umfang epigenetische Modifikationen vererbt werden, die bei neuropsychiatrischen Erkrankungen auftreten. In Meaney's Studien an Ratten »erben« weibliche Jungtiere bestimmte Verhaltensmuster – und das entsprechende epigenetische Profil – von ihren Müttern. Doch diese Veränderungen betreffen das Chromatin von Hirnzellen. Sie treten nicht in den Keimzellen auf, aus denen der Embryo entsteht. Aber können individuelle Erfahrungen vielleicht auch epigenetische Muster in Spermien und Eizellen verändern, auf dass diese dann direkt an die Nachkommen weitergegeben werden?

Die Annahme, dauerhafter Drogenkonsum oder chronischer Stress könne die Genaktivität in Keimbahnzellen beeinflussen, ist sicher nicht zu weit hergeholt. Schließlich verteilen sich Stresshormone und Wirkstoffe von Rauschmitteln mit dem Blutstrom über den ganzen Organismus, einschließlich der Hoden und Ovarien. Es ist jedoch nicht ohne Weiteres zu erklären, wie epigenetische Modifikationen

in Keimbahnzellen auf die Nachkommen übergehen sollten. Denn die erworbenen Markierungsmuster werden während der Zellteilungen, die Spermien und Eizellen hervorbringen, gelöscht. Und selbst wenn sie an den Embryo weitergegeben würden: Wie sollten sie dann Genaktivitäten gezielt in spezifischen Hirnregionen oder endokrinen Organen des Erwachsenen steuern?

In den Fußstapfen des Vaters

Solche Einwände wiegen schwer. Nichtsdestoweniger gibt es experimentelle Befunde, die darauf hindeuten, dass manche epigenetische Muster doch erblich sein könnten. Verschiedene Arbeitsgruppen berichten, dass Nagetiere, die chronischem Stress ausgesetzt sind, Jungtiere gebären, die besonders empfindlich auf Stressbelastungen reagieren. Isabelle Mansuy und ihre Kollegen von der Universität Zürich etwa trennten neugeborene, männliche Mäuse in den ersten beiden Lebenswochen von ihren Müttern. Als die Tiere herangewachsen waren, wiesen sie Anzeichen depressiven Verhaltens auf. Wenn diese Männchen nun normale Weibchen begatteten, dann zeigten die daraus hervorgehenden Nachkommen ein ganz ähnliches depressives Verhalten im Erwachsenenalter – obwohl sie selbst behütet aufgewachsen waren. Diese vererbte Anfälligkeit ging einher mit veränderten Methylierungsmustern an bestimmten Genen in der DNA von Spermien und Hirnzellen.

Meine Mitarbeiter und ich haben ähnliche Experimente durchgeführt. Wieder setzten wir männliche Mäuse unter Stress, indem wir sie dauerhaft mit aggressiven Artgenossen zusammenbrachten. Dann warteten wir einen Monat, ließen die gestressten Männchen sich mit normalen Weibchen paaren und stellten fest, dass die Nachkommen stark dazu neigten, die Symptome einer Depression auszubilden. Dann gingen wir noch einen Schritt weiter. Wenn die epigenetischen Modifikationen, die das Depressionsrisiko erhöhen, tatsächlich im engeren Sinn erblich wären, müssten sie die Keimzellen betreffen. Also entnahmen wir den gestressten Männchen Spermien und befruchteten damit Eizellen von normalen Weibchen. Die Nachkommen, die aus dieser künstlichen Befruchtung hervorgingen, verhielten sich aber fast normal. Sie zeigten nur sehr gering ausgeprägte Symptome von Ängstlichkeit und Teilnahmslosigkeit.

Das beantwortet die Frage nach der direkten Vererbbarkeit epigenetischer Markierungsmuster zwar nicht endgültig, denn diese könnten irgendwie im Zuge der künstlichen Befruchtung verloren gegangen sein. Die Ergebnisse lassen jedoch vermuten, dass Weibchen, die sich mit verängstigten Männchen paaren, ihre Jungen anders behandeln als Mäusemütter, die ihre Kinder von einem »normalen« Männchen haben oder die den Vater ihrer Jungtiere nie zu Gesicht bekommen. Die Neigung zur Depression, die wir in unseren Versuchen bei den Jungtieren beobachtet haben, wäre dann eher auf frühkindliche Erfahrungen zurückzuführen als auf die direkte Vererbung epigenetischer Muster über die Keimzellen.

Das muss nicht bedeuten, dass eine solche Vererbung unmöglich ist. Bislang haben wir aber keinen überzeugenden Beleg dafür, dass sie stattfindet. Um ihn zu liefern, müssten wir experimentelle Methoden entwickeln, mit denen sich die epigenetischen Veränderungen in Keimzellen nachweisen lassen, und wir müssten beweisen, dass diese Veränderungen sowohl notwendig als auch hinreichend sind, um die Vererbung der beobachteten Merkmale zu erklären.

Der Biologe Jean-Baptiste Lamarck, der im 18. Jahrhundert lebte, ist bekannt geworden durch seine Theorie, dass erworbene Merkmale vererbt werden können. Seiner Vorstellung zufolge können Eigenschaften, die ein Individuum im Lauf des Lebens ausprägt, etwa eine gut entwickelte Muskulatur, auf die Nachkommen übergehen. Mittlerweile wissen wir, dass vor allem die Gene die Merkmale und Funktionen eines Organismus bestimmen. Forscher finden jedoch immer deutlichere Hinweise darauf, dass Umwelteinflüsse und individuelle Erfahrungen das ganze Leben lang die Aktivität von Genen verändern. Somit beeinflussen sie auch, wie sich die genetisch vorbestimmten Merkmale manifestieren – über epigenetische Mechanismen. Es bleibt aber noch viel zu tun, wenn wir verstehen wollen, wie solche Modifikationen unser Verhalten beeinflussen, in welchem Ausmaß sie uns für psychiatrische Erkrankungen anfällig machen und ob sie an nachfolgende Generationen weitergegeben werden können. Lamarck hätte sich sicher mit Eifer an der Debatte beteiligt. ~

DER AUTOR



Eric J. Nestler ist Direktor am Friedman Brain Institute des Mount Sinai Medical Center in New York. Er forscht über molekulare Mechanismen, die Drogensucht und Depression verursachen.

QUELLEN

- Cameron, N. M. et al.:** Epigenetic Programming of Phenotypic Variations in Reproductive Strategies in the Rat through Maternal Care. In: *Journal of Neuroendocrinology* 20, S. 795–801, 2008
- Franklin, T. B. et al.:** Epigenetic Transmission of the Impact of Early Stress across Generations. In: *Biological Psychiatry* 68, S. 408–415, 2010
- Maze, I., Nestler, E. J.:** The Epigenetic Landscape of Addiction. In: *Annals of the New York Academy of Sciences* 1216, S. 99–113, 2011
- Roth, T. L. et al.:** Epigenetic Regulation of Genes in Learning and Memory. In: *Essays in Biochemistry* 48, S. 263–274, 2010
- Tsankova, N. et al.:** Epigenetic Regulation in Psychiatric Disorders. In: *Nature Reviews Neuroscience* 8, S. 355–367, 2007

WEBLINKS

www.epigenome.org
Website des Human Epigenome Project, das zum Ziel hat, DNA-Methylierungsmuster in menschlichen Geweben zu identifizieren

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155288

Patente auf Leben – ein umstrittenes Thema

Welche Auswirkungen das Verbot von Patenten auf embryonale Stammzellen durch den Europäischen Gerichtshof (EuGH) vom Oktober 2011 hat, ist noch immer unklar. Der Wissenschaftsphilosoph und Ethiker Ludwig Siep beleuchtet einige grundlegende Aspekte der weit reichenden Entscheidung. Seine These: Gründe für ein prinzipielles Verbot von Patenten auf Verfahren mit menschlichen Zellen sind kaum erkennbar.

Von Ludwig Siep

Die Entscheidung des Europäischen Gerichtshofs (EuGH) gegen die Patentierbarkeit der Differenzierung embryonaler Stammzellen in neurale Vorläuferzellen hat die Debatte um die Forschung an menschlichen embryonalen Stammzellen wieder angefacht. Zwar unterscheidet das Urteil strikt zwischen Forschung einerseits und Patentierung andererseits, es ist kein Forschungsverbot; auch beschränkt es seine Reichweite ausdrücklich auf die Auslegung der europäischen Patentrichtlinie. Aber in der Begründung des Urteils bezeichnet der EuGH die Zerstörung von Blastozysten (siehe Grafik S. 31) zur Entnahme von embryonalen Stammzellen mit dem Zweck der späteren kommerziellen Verwertung als Verstoß gegen die Menschenwürde. Diese darf selbst die Grundlagenforschung nicht verletzen.

Das Urteil berührt auch eine Reihe von philosophisch wichtigen Fragen. Ist Patentierung von Verfahren mit mensch-

lichem Zellmaterial grundsätzlich verboten? Das möchte ich bezweifeln. Ist sie dann verboten, wenn dafür Embryonen zerstört werden? Auch das bejaht das Gericht nicht. Denn es verbietet Patentierung zu Zwecken der Forschung an embryonalen Zellen nicht – zu Recht, wie ich glaube. Eindeutig verurteilt es jedoch die Patentierung zu kommerziellen Zwecken. Dafür gibt es aus philosophischer Sicht keine hinreichenden Gründe. Eine Patentierung von Verfahren mit embryonalen Stammzellen, die zu vermarktbareren Arzneimitteln führt, ist ethisch nicht grundsätzlich verboten.

Eine Unterscheidung zwischen Forschung und Patentierung kann im Hinblick auf eine spätere gewerbliche Verwendung nur auf einer von zwei Voraussetzungen beruhen:

► Entweder wird vermutet, dass die Forschung mit den bereits existierenden Zelllinien auskommt, jede mögliche gewerbliche Verwendung dagegen auf neue angewiesen ist. Das erscheint wenig plausibel, da schon mehr als 1000 registrierte embryonale Stammzelllinien weltweit existieren – mit zunehmender Tendenz – und überdies jährlich hunderttausende befruchtete Eizellen in Reproduktionskliniken verworfen werden.

► Oder es wird angenommen, die Zerstörung von Embryonen verstoße im Hinblick auf spätere kommerzielle Verwertung grundsätzlich gegen die Menschenwürde, während das bei der Forschung nicht der Fall sei. Da die Gerichtsentscheidung von »Ausgangsmaterial« für »kommerzielle«, also mit Verkauf und privatem Gewinn verbundene Verwertung spricht, liegt eine solche Annahme nahe.

Auch Artikel 6, II der EU-Biopatentrichtlinie sowie Paragraph 2, Absatz 3 des deutschen Patentgesetzes besagen, dass »insbesondere ... für die Verwendung von menschlichen Embryonen zu industriellen oder kommerziellen Zwecken« Patente nicht erteilt werden können. Noch weiter gehen viele

AUF EINEN BLICK

GRENZEN DER MENSCHENWÜRDE?

1 Im Oktober letzten Jahres erließ der Europäische Gerichtshof ein **Patentverbot auf Verfahren mit embryonalen Humanstammzellen**. Dieses Urteil dürfte weit reichende Konsequenzen für die biomedizinische Forschung und Entwicklung haben.

2 Grundsätzlich sind Patente auch auf Verfahren mit menschlichen Zellen möglich. Die Grenzen liegen jedoch in den Rechten, die den Embryonen zugemessen werden, aus denen embryonale Stammzellen stammen; das ist eine **normative Entscheidung**.

3 Um sie zu treffen, muss man zwischen einem absoluten und einem gradualistischen Standpunkt abwägen. Die Frage lautet, ob die **volle Menschenwürde** bereits der befruchteten Eizelle oder erst dem Embryo schrittweise im Lauf seiner Entwicklung zugebilligt wird.

Kampagnen gegen Patente oder umfassender gegen jedes »Eigentum« an Leben.

Es lohnt sich, diese Prämisse einmal aus Sicht der praktischen Philosophie zu untersuchen, in der es um die Begründung von Normen für konkretes menschliches Handeln geht. Patentierung ist eine Form des Schutzes geistigen Eigentums. Sie verleiht jedoch keine unbegrenzte private Verfügungsgewalt, sondern lediglich das Recht, andere für einen gewissen Zeitraum von der gewerblichen Nutzung einer Erfindung oder »technischen Lehre« auszuschließen – gegenwärtig in der Regel für 20 Jahre.

Anreize für das Gemeinwohl

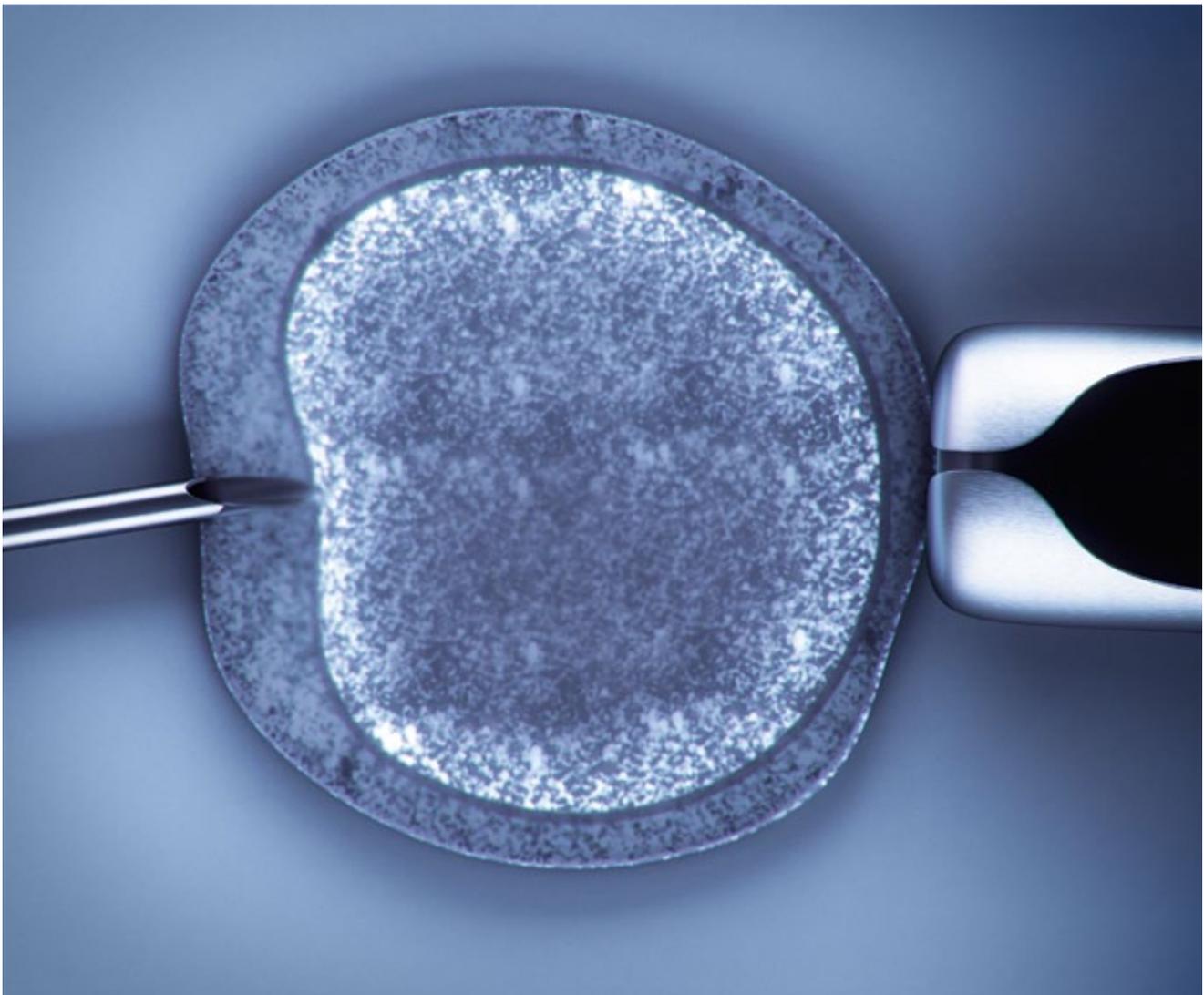
Die Begründung dafür ist, wie beim Eigentum insgesamt, sowohl individualrechtlich als auch gemeinwohlorientiert. In Bezug auf die Rechte des *Individuums* soll ein Schutz der Originalität seiner geistigen Schöpfung gesichert werden. Anders als bei materiellem Eigentum können geistige Produkte ja mit ihrer Veröffentlichung von jedem benutzt werden, wenn sie nicht besonders rechtlich geschützt sind. Hierfür

existieren verschiedene Formen, vom Urheberrecht über das Plagiatsverbot bis zum Patentrecht.

Die *gemeinwohlorientierte* Begründung lautet, dass materielle Anreize die Anstrengungen für Erfindungen, die für alle nützlich sind, steigern – insbesondere durch Versuche, sie zu übertreffen oder das Ziel auf anderen Wegen zu erreichen. Ob dies wirklich zutrifft, ist im Grunde eine empirische Frage. Aber die Entwicklung der Technik in den letzten zwei Jahrhunderten, die ohne Patente kaum vorstellbar ist, scheint diese Erfahrung reichlich zu belegen.

Natürlich gehen mit Urheberrechten eine Reihe von Problemen einher, vor allem in Zeiten der elektronischen Datenverarbeitung. Das betrifft etwa die Lizenzgebühren für patentierte Verfahren – man denke an Arzneimittelkosten in armen Ländern – oder das Herunterladen von Dateien aus

Patente auf Verfahren mit embryonalen Stammzellen schwören Konflikte herauf zwischen Kommerz, Forschungsfreiheit und Menschenwürde. Im Bild: eine Eizelle bei künstlicher Befruchtung.



Glossar

ALLMENDE (»GEMEINE MARK«): Das sind in der Regel landwirtschaftliche Flächen, die der Gemeinde gehören und gemeinschaftlich genutzt werden.

EUGH: Der in Luxemburg beheimatete Gerichtshof der Europäischen Union sorgt für eine einheitliche Auslegung des EU-Rechts. Damit garantiert er, dass es »in allen EU-Mitgliedstaaten auf die gleiche Weise angewendet wird«. Der EuGH kann auch juristische Auseinandersetzungen klären, die zwischen Regierungen der EU-Mitgliedstaaten und den EU-Organen auftreten.

STAMMZELLEN: Das sind Körperzellen, die sich in verschiedene Zelltypen oder Gewebe weiterentwickeln können. Während embryonale Stammzellen nur im frühen Embryo auftreten, sind **adulte** Stammzellen auch nach der Geburt noch im Organismus vorhanden. Können Stammzellen sich in mehr als eine Zell- oder Gewebeart entwickeln, sind sie **multipotent** oder **pluripotent**. Das heißt, sie sind dann in viele oder alle Zellarten außer das Nährgewebe, den Trophoblasten,entwicklungsfähig. Zu **induzierten pluripotenten** Stammzellen (iPS) werden nichtpluripotente Stammzellen durch künstliche Reprogrammierung.

TOTIPOLENZ: Die Fähigkeit einer Zelle, sich zu einem vollständigen Individuum zu entwickeln.

TETRAPOIDE KOMPLEMENTIERUNG: Bei dieser werden aus embryonalen Stammzellen lebens- und fortpflanzungsfähige Individuen erzeugt. Benötigt werden dazu Hilfszellen, die man durch Zellfusion tetraploid gemacht hat; diese Hilfszellen stellen sicher, dass das Cluster aus embryonalen Stammzellen sich im Uterus implantieren und eine geordnete Morphogenese vollziehen kann.

dem Internet. Die Frage ist aber, ob solche Probleme ihre Ursache im Eigentums- oder Patentrecht selbst haben oder eher im wirtschaftsethischen und -politischen Umgang mit Patenten. Beispielsweise ist es sicher problematisch, wenn Großunternehmen in der Agrar- oder Pharmaindustrie auf bestimmten Gebieten das Monopol an einer Vielzahl von Patenten besitzen.

Eigentum jeder Art ist bekanntlich sozialpflichtig, und der Staat oder überstaatliche Rechtsorgane müssen dafür sorgen, dass sich niemand Monopole an lebenswichtigen Gütern aneignet. Dazu gehört auch, die Verwertung schon erreichten menschlichen Wissens über Jahrzehnte anderen vorzuenthalten, es selbst aber nicht voranzutreiben. Das gilt besonders für den medizinischen Bereich. Immerhin gibt es hier bereits eine Reihe von Patentausschlüssen, etwa bei ärztlichen Diagnosen und Therapien.

Gegen Patentierung von Verfahren mit lebendigem Material, vor allem menschlichen Körperteilen, werden gerne grundsätzlichere Argumente geltend gemacht, die sich philosophisch prüfen lassen. Eine zwingende Entscheidung darf

man dabei nicht erwarten, aber doch die Klärung einiger Argumente. Dass Lebendiges prinzipiell Eigentum sein darf, ist jedenfalls in modernen Kulturen, in denen Pflanzen und Tiere nicht mehr als Träger höherer Geister gelten, im Wesentlichen unbestritten. Eigentum an Tieren ist selbst in Kulturen gebräuchlich, in denen Vorstellungen der Seelenwanderung vorherrschen. An seine Grenzen kann das Eigentum an Leben aber bezüglich der moralischen Überzeugungen einer Rechtsgemeinschaft gelangen. So kann eine Baumschutzordnung das Fällen alter Bäume auf Privatgrundstücken einschränken oder ein Tierschutzrecht nicht nur unnötigen Schmerz verbieten, sondern auch tier- oder artgerechte Behandlung vorschreiben.

Die Frage nach Patenten an Lebendigem wurde aber erst im Zeitalter der Biotechnologie besonders virulent. Denn Patente sind technische Lehren (also Erfindungen, die zum technischen Handeln befähigen), die berechenbare Gesetze und standardisierbare Verfahren voraussetzen. Diese »Technisierbarkeit« der lebendigen Natur erweckt heute offenbar Befürchtungen. Denn zum einen verstehen wir inzwischen neben der Technik auch die Biologie besser: Verhaltens- und Systembiologie haben uns die Welt der Lebewesen und ihre Vernetzungen erschlossen. Zu diesem Wissen kommt bei vielen die schmerzliche Erfahrung, dass natürliche Arten und Lebensräume verloren gehen, wenn sich mit der industriellen Zivilisation Fabriken, Megastädte und landschaftszerstörende Verkehrswege ausbreiten. Die Wertschätzung der natürlichen Mannigfaltigkeit und spontaner natürlicher Prozesse hat zu weltweiten Rechtskonventionen oder nationalen Gesetzgebungen geführt, die etwa Biodiversität und Arten schützen sollen.

Mit wachsender Weltbevölkerung und zunehmenden Erwartungen bezüglich Lebensniveau und -dauer wird es aber immer unwahrscheinlicher, dass auf Biotechnologie völlig verzichtet werden kann. Schon jetzt sind Medizin und Arzneimittelentwicklung ohne sie undenkbar. Ob Ernährung und Umweltschutz heute oder in Zukunft ohne diese Techniken auskommen können, ist zumindest offen. Wie man vernünftig mit der Biotechnologie umgeht, ist eine Frage von Politik, Recht und guten Sitten. Das gilt selbstverständlich ebenso für den Umgang mit dem Eigentums- und Patentrecht. Bei Ersterem ist bekannt, dass es sehr verschiedene Formen annehmen kann. Auch Allmendewirtschaft (siehe Glossar links) oder Kooperativen lassen schließlich privates Eigentum zu – etwa an Weidetieren oder Fangnetzen – oder verlangen es sogar. Ansprüche auf staatliche Leistungen, zum Beispiel auf Renten, können dem Status von Eigentumsrechten zumindest sehr nahekommen. Die Institution des Eigentums war historisch schon immer großen Veränderungen unterworfen.

Es fragt sich, ob das beim Patentrecht anders ist oder ob hier nicht vielmehr etwas Falsches zum Sündenbock gemacht wird. Patentrichtlinien, Gesetze, Patentgerichte und Beschwerdekammern müssen sicherstellen, dass es sich bei Patenten um wirkliche Erfindungen handelt und dass ihre mögliche Verwertung nicht gegen die guten Sitten verstößt.

Außerdem

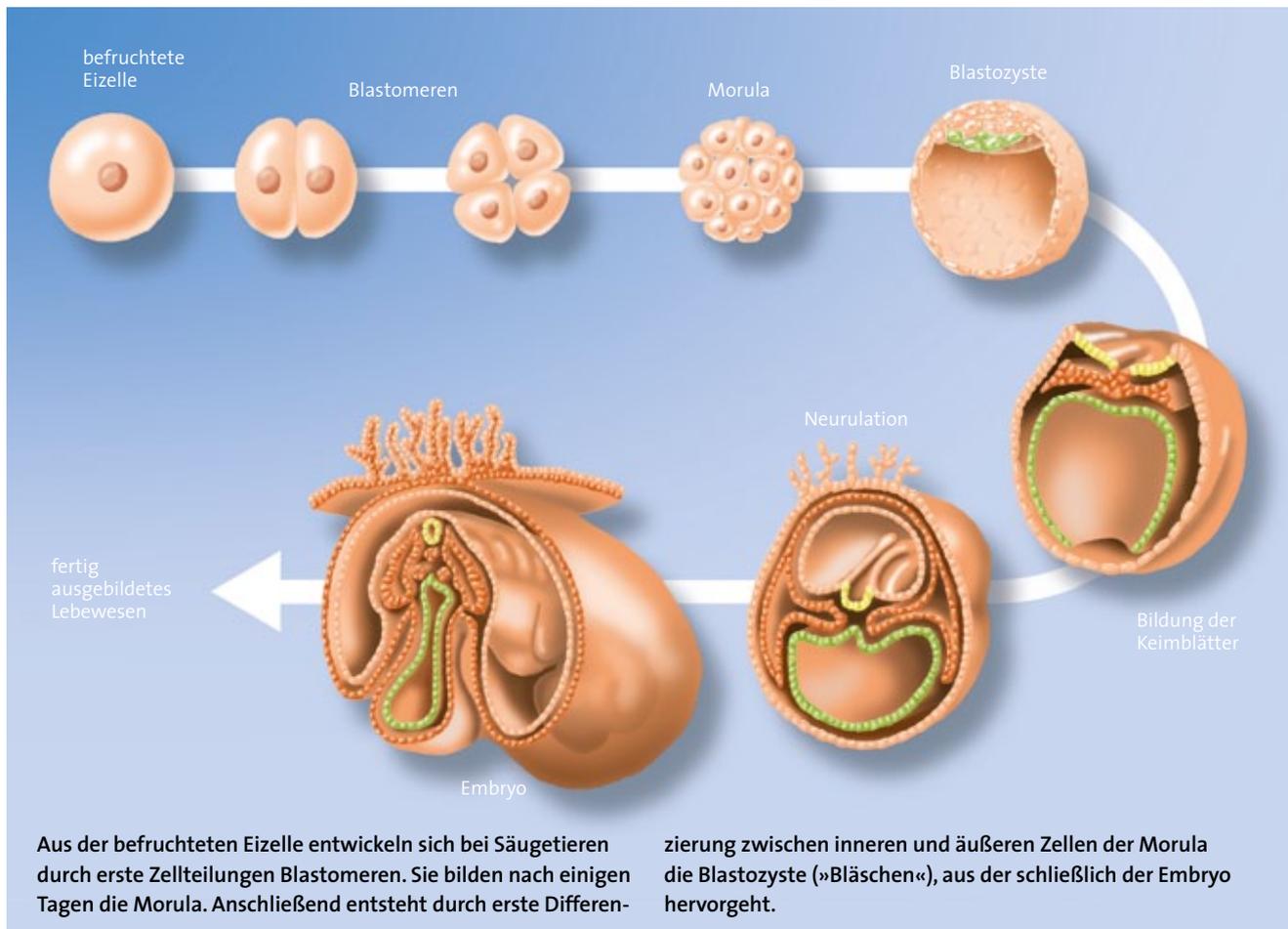
- muss es sich um Verfahren handeln, die so in der Natur nicht vorkommen;
- dürfen sie nicht Teile der allen zugänglichen Natur, zum Beispiel Arten oder Genome, dem Gebrauch aller entziehen;
- dürfen die Verfahren selbst und ihre kommerzielle Verwertung nicht gegen Rechte der Menschen oder rechtlich geschützte Ansprüche anderer Lebewesen verstoßen.

Kein Handel mit Körpermateriale

Zu all diesen Fragen gibt es eine Fülle von Einspruchs- und richterlichen Prüfungsmöglichkeiten. Lebendiges wird aber nicht allein dadurch zum »Material« oder zur »Sache« – im Sinne eines »toten« Objekts –, indem es zum Gegenstand von Eigentums- oder Patentansprüchen wird. »Ausgangsmaterial« oder »Sache« ist hier keine Kategorie von Gegenständen, sondern betrifft nur Verfügungsrechte. Der Eigentümer eines Tiers darf andere von bestimmten Arten des Umgangs damit ausschließen, er behandelt es aber nicht per se als »toten Gegenstand«. Die Verwendung einer Sache als »Material eines Verwertungsprozesses« wäre nur dann ethisch oder rechtlich anstößig, wenn ihr Verändern und Verkaufen gegen Gewinn an sich schon anstößig wäre. Eine prinzipielle Verurteilung von »Kommerz« ist jedoch weder mit individuellen Freiheitsrechten noch mit sozialem Nutzen vereinbar.

Wie steht es nun mit der Patentierbarkeit von Verfahren mit menschlichem Körpermaterial? Auch hier ist aus der Sicht der heutigen Philosophie klar, dass die Rechte der Menschen auf körperliche Integrität und Freiheit von Zwang, der von Privatpersonen ausgeht, nicht verletzt werden dürfen. Der legitime Anspruch auf Durchsetzung von Gesetzen hat grund- und menschenrechtliche Grenzen, etwa im Folterverbot. Zum moralischen Konsens der meisten gegenwärtigen Gesellschaften gehört auch, dass es keinen Handel mit Körperteilen geben darf. Selbst wenn deren Veräußerung freiwillig sein kann, geht ihr in aller Regel doch eine unverschuldete Zwangssituation voraus. Eine Selbstverstümmelung aus reinem Gewinninteresse kann nicht nur zu Missbrauch führen. Die Integrität des menschlichen Körpers ist auch für sich genommen ein hohes Gut.

Wie sieht es dann mit menschlichen Stammzellen aus? Es gibt bekanntlich verschiedene Arten, je nach Herkunft und Erzeugung. Ethisch und rechtlich relevant ist vor allem der Unterschied zwischen solchen, die auf freiwillig und ohne erhebliche Schädigung des Körpers gespendete Zellen zurückgehen, und solchen, die der Zerstörung eines frühen Embryos im Stadium vor der Einnistung in den mütterlichen Körper entstammen. Zu Ersteren gehören die so genannten adulten Stammzellen und die reprogrammierten oder induzierten pluripotenten Stammzellen (iPS-Zellen,



siehe Glossar S. 30), zu Letzteren vor allem die embryonalen Stammzellen.

Während adulte Stammzellen allenfalls multipotent sind (sich in mehrere Zellarten differenzieren können), sind embryonale Stammzellen pluripotent, das heißt, sie können sich in alle Gewebearten außer dem Nahrungsgewebe entwickeln, daher auch nicht in ein ganzes menschliches Individuum (Totipotenz). Im natürlichen Verlauf verlieren die embryonalen Zellen unwiederbringlich ihre Pluripotenz. Durch technische Maßnahmen kann diese Entwicklung umgekehrt werden und bereits spezialisierten Zellen ihr ursprüngliches Potenzial wiedergegeben werden. Dann handelt es sich um induzierte pluripotente Zellen. Totipotent sind solche Zellen aber ebenfalls nicht, wie Versuche bei Mäusen zeigten.

Die Zellen, die in der Forschung an embryonalen Stammzellen benutzt werden, sind pluripotent, also selbst keine Embryonen – Embryo im Sinne des deutschen Embryonenschutzgesetzes, auf das sich auch der EuGH beruft, ist »jede totipotente Zelle«. Strittig ist die Herkunft dieser Zellen aus

Der Europäische Gerichtshof in Luxemburg ist das oberste Rechtsprechungsorgan der EU. Letztes Jahr erregte er Aufsehen mit seinem Verbot der Patentierung von Verfahren mit embryonalen Stammzellen.

Embryonen, die im Zusammenhang mit künstlicher Befruchtung entstanden, aber endgültig nicht mehr einer Frau eingepflanzt werden. In etlichen, auch europäischen Ländern dürfen solche Embryonen vor ihrer Zerstörung (beziehungsweise »Entsorgung«) zur Gewinnung von embryonalen Stammzellen verwendet werden.

Menschenwürde ab der Befruchtung?

In dieser Frage herrscht keine Einigkeit, weder unter Gesetzgebern noch unter Ethikern, nicht einmal unter Theologen. Es gibt zwei dominierende Positionen. Die eine kann man eine *absolute* nennen, nach der mit der Befruchtung einer Eizelle oder der Herstellung einer totipotenten Zelle auf anderem Weg – zum Beispiel Transfer eines Zellkerns in eine entkernte Eizelle – der Status einer menschlichen Person mit voller Menschenwürde und Lebensschutzrechten beginnt. Die andere ist eine graduelle Position, der zufolge den Stadien der Embryonalentwicklung unterschiedliche Rechte zustehen, die jedoch – einmal gewährt – nicht mehr reversibel sind.

Die Fülle der subtilen Argumente, die für beide Seiten ins Feld geführt werden, lassen sich hier nicht wiedergeben. Klar ist aber, dass die Debatte nicht naturwissenschaftlich entschieden werden kann. Denn das biologische Entwicklungspotenzial selbst ist ein natürliches Faktum – weder Wert noch Norm. Normen können jedoch aus Fakten nicht logisch





gefolgert werden. Irgendwo in der Argumentation muss eine bewusste Wertung ausgesprochen werden, die sich zwar den Fakten plausibel zuordnen lässt, wie es etwa bei den Rechten zum Wählen oder zum Führen eines Fahrzeugs geschieht, aber eben nicht rein naturwissenschaftlich oder logisch begründet ist. Wenn in einem biologischen Potenzial jedoch keine normative Bestimmung dazu vorliegt, was aus einer Zelle werden soll, dann kann man verschiedenen Entwicklungsstadien auch unterschiedliche Rechte zuschreiben – wie das ja auch in den meisten Ländern etwa in der Gesetzgebung zum Schwangerschaftsabbruch geschehen ist.

Der biologische Begriff, dem der Europäische Gerichtshof die entscheidenden rechtlichen Konsequenzen zuordnet, ist die erwähnte Totipotenz. Eine Zelle oder ein Zellverband, der sich unter »geeigneten Bedingungen« zu einem ganzen Menschen entwickeln kann, soll Menschenwürde und Lebensschutz genießen. Was unter heutigen technischen Voraussetzungen »geeignete Bedingungen« darstellt, ist allerdings alles andere als klar. Mit der Technik der Reprogrammierung und anderen Verfahren (wie die so genannte tetraploide Komplementierung, siehe Glossar S. 30) ist es sogar prinzipiell möglich, aus jeder menschlichen Zelle ein ganzes Individuum zu entwickeln.

Andererseits liegt die Chance natürlicher befruchteter Eizellen, sich ohne technische Hilfe im weiblichen Uterus einzunisten, unter 50 Prozent. Mit anderen Worten: Das Potenzial einer Zelle oder eines Zellverbands, sich zu einem ganzen Individuum zu entwickeln, hängt heute entscheidend von menschlichen Handlungen und ihren Zwecken ab. Nach einer Implantation darf es zweifellos nur noch um die Mutter und das zukünftige Kind gehen. Das Gleiche muss aber nicht für das Stadium davor gelten. Wenn es rechtlich nicht mehr möglich ist, einen Embryo in einen Uterus einzupflanzen, kann ihm auch kein Lebensrecht garantiert werden. Selbst ein Austragen der überzähligen befruchteten Eizellen durch Leihmütter lässt sich dann nicht erzwingen.

Das viel beschworene Potenzialitätsargument kann sicher verschieden verstanden werden. Ob es angesichts der Ent-

wicklung der Technik auf die Dauer die normative Last tragen kann, die ihm viele Gesetzgeber und Richter aufbürden, kann man bezweifeln. Graduelle Konzeptionen, die einem eingepflanzten Embryo höhere Rechte zuschreiben als einer totipotenten Zelle in der Petrischale, sind meines Erachtens daher alles andere als abwegig. Auch braucht niemand zu befürchten, dass sie das Schutzniveau für geborene, behinderte oder sterbende Menschen unterhöhlten: Wie gesagt sind die Schutzrechte, die man jeder Entwicklungsstufe zuschreibt, irreversibel (was natürlich für aktive Rechte, die aus der Mündigkeit folgen, nicht gilt).

Die Debatte um die Würde und die Rechte frühen menschlichen Lebens wird also weitergehen. Sie lässt sich nicht durch ein Gerichtsurteil beenden, auch nicht durch eines des höchsten europäischen Gerichts. Die Stammzellforschung wird wohl zunächst ihre größten Möglichkeiten in der Krankheitsursachen- und Arzneimittelforschung haben – dabei wird man in einer zumindest teilweise marktwirtschaftlichen Medizin nicht ohne Patente auskommen. Gründe für ein prinzipielles Verbot von Patenten auf Verfahren mit menschlichen Zellen sind kaum erkennbar.

Wenn man allerdings für jedes mit patentierten Verfahren herstellbare Produkt menschliche Embryonen erzeugen und zerstören müsste, wären wohl die guten Sitten selbst in den Augen von Gradualisten (für mich die plausiblere Position) verletzt. Bei dem Gebrauch von Zellen aus Zelllinien, die vor langer Zeit aus Frühembryonen ohne Lebenschancen abgeleitet wurden, muss das jedoch nicht gelten. Stammzellforschung soll zu medizinischen Anwendungen führen, die wahrscheinlich nicht gänzlich ohne Patente zu haben sind. »Causa finita« wird man nach dem Urteil also noch lange nicht sagen können. ~

DER AUTOR



Ludwig Siep ist Professor für Philosophie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Seine Forschungsschwerpunkte sind Bioethik, Medizinethik, praktische Philosophie sowie die Geschichte des Deutschen Idealismus.

QUELLEN

- Europäische Gruppe für Ethik der Naturwissenschaften und der Neuen Technologien:** Ethische Aspekte der Forschung und Verwendung menschlicher Stammzellen: Der Text von der Stellungnahme. Dictus Publishing, 248 S., Europäische Kommission 2011
- Kempermann, G.:** Neue Zellen braucht der Mensch: Die Stammzellforschung und die Revolution der Medizin. Piper, München 2008
- Plomer, A., Torremans, P.:** Embryonic Stem Cell Patents: European Patent Law and Ethics. Oxford University Press, Oxford 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155289

Moskito mit Selbstmordgen



DAVID LUTTSCHWAGER

Stechmücken mit fremden Genen sollen ganze Populationen ihrer Art vernichten und so eine der verheerendsten Krankheiten unserer Zeit eindämmen: das rasant um sich greifende Denguefieber. In Käfigen funktioniert die Strategie bereits. Dass aber vereinzelt schon transgene Moskitos ausgesetzt wurden, halten selbst viele Forscher für vorschnell.

Von Bijal P. Trivedi

Hinter dem kleinen Ort Rio Florido wird die Straße, die durch Soja-, Kakao-, Bananen- und Mangopflanzungen führt, zu einem kurvenreichen, holprigen Schlammweg und endet schließlich vor einer bewachten Sperre. Wir befinden uns ganz im Südosten Mexikos nahe der Grenze zu Guatemala bei der Stadt Tapachula. Die Anlage ist mit Stacheldraht umzäunt. Auf einem Warnschild sind ein Mann und eine Frau abgebildet, zwischen ihnen eine Stechmücke. Auf Spanisch steht darauf, dass hier genetisch modifizierte Moskitos gehalten werden, deren Handhabung spezielle Vorsichtsmaßnahmen erfordert. Der Posten lässt uns durch das Tor.

Drinnen beschatten Cashewbäume eine Plattform voller großer Käfige, die mit Gaze verhüllt sind (siehe Bild S. 37).

AUF EINEN BLICK

GENETISCHER ANGRIFF AUF DENGUEFIEBERMÜCKEN

1 Wissenschaftler haben den Hauptüberträger des **Denguefiebers**, die **Stechmücke *Aedes aegypti***, derart genetisch verändert, dass sich die Weibchen der Folgegenerationen nicht mehr fortpflanzen, wohl aber die transgenen Männchen. Eine so unterwanderte Insektenpopulation sollte untergehen.

2 Einige Forscher erproben das Verfahren jetzt in streng abgeschlossenen Behältnissen in Denguefiebergebieten an Wildpopulationen. Andere wagten bereits die Freisetzung solcher **transgenen Moskitos**.

3 Das nicht angekündigte Vorpreschen mancher Kollegen ist unter Wissenschaftlern, **Seuchenbekämpfern und Ökologen** umstritten.

In ihnen tummeln sich Unmengen Gelbfiebermücken, auch Ägyptische Tigermücken genannt. Wissenschaftlich heißt diese Mosquitoart heute meist *Stegomyia aegypti*, aber viele sprechen noch wie früher von *Aedes aegypti*. Diese kleinen, kaum hörbaren Mücken sind besonders in den Tropen und Subtropen weit verbreitet und gelten als Hauptüberträger des Denguevirus.

Hier in Südmexiko gehört die Spezies zu den vorherrschenden Stechmücken. In der Versuchsanlage werden genetisch veränderte (»transgene«) Männchen darauf angesetzt, sich mit normalen Weibchen der lokalen Population zu paaren. Die neuen Gene sollen die weibliche Nachkommenschaft außer Gefecht setzen – ein Trick, mit dem sich womöglich das Denguefieber ausrotten ließe und damit eine der problematischsten und schwersten Infektionskrankheiten, deren Häufigkeit derzeit sehr schnell zunimmt. Gelbfiebermücken sind zwar nicht die einzigen, aber die Hauptüberträger dieser bedrohlichen Seuche.

Weltweit infizieren sich inzwischen pro Jahr schätzungsweise rund 100 Millionen Menschen mit Dengueviren, genauer gesagt mit einem von vier eng verwandten Serotypen. In manchem ähneln die Symptome denen einer Virusgrippe. Typisch sind aber neben hohem Fieber, Kopfschmerzen und Übelkeit unter anderem auch Hautausschläge sowie sehr starke Gelenk- und Muskelschmerzen bis hin zu Krämpfen und Bewegungsstörungen. Lebensbedrohlich wird es, wenn innere Blutungen und Hautblutungen oder ein Kreislaufschock auftreten, was besonders bei einer Zweitinfektion mit einem anderen Serotyp vorkommt.

Noch gibt es gegen Dengueviren keine Impfung und keine spezifischen Medikamente. Gegenmaßnahmen beschränken

sich auf die Eindämmung der Mückenbestände etwa mit Insektiziden sowie die übliche Vorbeugung gegen Moskitostiche, zum Beispiel mit Repellents oder schützender, teilweise auch imprägnierter Kleidung und speziell besprühten dichten Netzen. Vorwiegend stechen die winzigen Biester tagsüber und in der Dämmerung. Ihre Larven gedeihen in jeder kleinsten Wasserpflanze, ob in alten Autoreifen, an Pflanzen oder in Vasen, in Dachrinnen oder zwischen Müll. Dort überstehen die Insekten Eier sogar lange Trockenphasen. Deswegen gehört zu den vordringlichen Maßnahmen, alle Gefäße dicht abzudecken und jegliches offene Wasser zu vermeiden.

Eine offensivere Strategie verfolgt der Molekularbiologe Anthony A. James von der University of California in Irvine, dessen streng abgeschirmte Feldstation wir hier in Süd Mexiko besuchen. Er und seine Kollegen haben Gelbfiebermücken Gene verpasst, mit denen neue Mückenweibchen keine funktionsfähige Flugmuskulatur mehr entwickeln und bald nach dem Schlüpfen eingehen, während die männlichen Nachkommen unbeeinträchtigt bleiben. Nur die Weibchen saugen Blut, können sich aber nun nicht mehr paaren und nicht stechen, während sich die Männchen der nächsten Genera-

tionen fleißig sexuell betätigen und dabei die tödliche Genfracht verbreiten. Damit sollte die betreffende Population bald zusammenbrechen. Dass dies funktionieren kann, haben bereits Laborversuche an der Colorado State University in Fort Collins erwiesen, die Megan Wise de Valdez durchführte, eine Mitarbeiterin von James. Als man zu normalen Gelbfiebermücken transgene Männchen setzte, gingen die Bestände in den Käfigen binnen fünf Monaten zu Grunde. Nun soll sich das Verfahren in Süd Mexiko im Freien zunächst in großen verschlossenen Behältnissen gegen die dortigen Mücken bewähren.

Wenn die Studie erfolgreich verläuft, könnte man solcherart veränderte Moskitos massenweise in Dengue-Endemiegebieten freisetzen und mit ihrer Hilfe die Plagegeister dezimieren. Noch warnen manche Experten allerdings vor unabherrschbaren Folgen für die Natur. Die Forscher sind sich bisher

Wichtigste Überträgerin des Denguefiebers ist die inzwischen weit verbreitete Ägyptische Tigermücke *Aedes aegypti* (oder *Stegomyia aegypti*), die auch Gelbfiebermücke heißt.



nicht einig, welche Maßstäbe und Kriterien sie dazu ansetzen sollten. Denn für Tests an und den Umgang mit transgenen Organismen existieren auf internationaler Ebene noch keine übergreifend verantwortlichen Organisationen oder allgemein verbindlichen Gesetze. Im Grund können Wissenschaftler und Unternehmen auf dem Gebiet tun, was sie für richtig und zweckmäßig halten. Sogar eine unkontrollierte Freisetzung transgener Insekten zu Testzwecken ist in manchen Drittweltländern möglich, und das, ohne die Menschen vor Ort davon in Kenntnis zu setzen, geschweige denn ihr Einverständnis einzuholen.

James bemüht sich bei seinem Projekt um möglichst viel Öffentlichkeitsarbeit. Dafür scheuen er und seine Mitarbeiter seit Jahren weder Zeit noch Aufwand. Beispielsweise erwarben sie das Stück Land für die abgeschottete Versuchsstation nach Verhandlungen mit den kommunalen Verantwortlichen von Tapachula über das dortige traditionelle Verteilungssystem. Über die laufenden Studien und zukünftigen Vorhaben informieren sie die Bevölkerung in Veranstaltungen und Diskussionen. Dieser Wissenschaftlergruppe ist es besonders wichtig, die transgenen Insekten zunächst zwar unter freilandnahen Bedingungen, aber hermetisch abgeschirmt zu prüfen.

Sein früherer Forschungskollege Luke Alphey, Gründer des in Großbritannien ansässigen Biotechnologieunternehmens Oxitec, schuf dagegen zum Schrecken der Fachwelt gleich vollendete Tatsachen: In den Jahren 2009 und 2010 ließ seine Firma auf der nordwestlich von Jamaika gelegenen Karibikinsel Grand Cayman Millionen von gentechnisch veränderten Gelbfiebermücken frei. Davon erfuhren James und viele andere Experten erst 2010 auf einem Fachkongress in Atlanta – als die Studie auf den Kaimaninseln schon 14 Monate lief und Alphey sie vorstellte. Seitdem führte Oxitec Freisetzungen auch in Malaysia und in Brasilien durch.

Fachleute fürchten, das forsche Vorpreschen könnte der gesamten Arbeit mit transgenen Insekten schaden und man

würde Ähnliches erleben wie mit gentechnisch modifizierten Nutzpflanzen in Europa. Schlimmstenfalls würde die neue Technologie ausgebootet, bevor ihr Potenzial und mögliche Auswirkungen auf die Natur überhaupt ausgelotet sind. Denn obwohl der Ansatz bisher Erfolg versprechend aussieht und die Labortests günstig verliefen, erscheint es vielen Experten unbedingt geboten, das Verfahren zuerst unter freilandnahen, aber sicheren Bedingungen in den Tropen und Subtropen akribisch zu prüfen. Schließlich würden die trans-

genen Moskitos später einmal den Dschungel erobern.

James zählt zu den Pionieren für Molekulargenetik von Stechmücken. Als einer der Ersten hatte er ein Moskitogen kloniert, also außerhalb des Insekts vervielfäl-

tigt, und Stechmücken gentechnisch manipuliert. Im Jahr 2001 beschloss er, dieses Spezialwissen zur Bekämpfung von durch Insekten übertragene Tropenkrankheiten einzusetzen. Er wollte versuchen, für Pflanzenschädlinge entwickelte Methoden bei Mücken zu verwenden, die für Menschen gefährlich sind.

Damals hatte Alphey, noch an der University of Oxford, bei *Drosophila*-Taufliegen ein Verfahren zur Erzeugung von transgenen Fliegen entwickelt, bei dem die Weibchen selektiv früh verenden. Letztlich handelt es sich dabei um eine moderne – gentechnologische – Version der jahrzehntealten, durchaus erfolgreichen Methode, Schadinsekten von Nutzpflanzen durch Aussetzen steriler Männchen zu dezimieren. Früher hat man Unmengen dieser Tiere im Labor herangezogen, die Männchen aussortiert und durch Bestrahlen unfruchtbar gemacht. Ließ man sie anschließend draußen in Überzahl auf die Weibchen los, verdrängten sie die fruchtbaren Männchen bei der Begattung. Oft brach der Bestand mangels Nachkommen schon nach wenigen Freisetzungen zusammen – was sich unter anderem 1977 in Tapachula gegen die Mittelmeerfruchtfliege (*Ceratitis capitata*) bewährte, einen bedeutenden Pflanzenschädling.

Für Stechmücken eignet sich solches Bestrahlen allerdings schlecht. Es schwächt die Männchen so sehr, dass sie schon beim Aussortieren oder spätestens auf dem Transport sterben. Doch Alpheys neue Methode ließ sich auf Moskitos übertragen. Hierbei wird eine Genomregion genutzt, die nur die Weibchen benötigen. Außerdem identifizierten James und Alphey 2002 einen genetischen Schalter für die Flugmuskulaturentwicklung. Sie zeigten, dass Weibchen, bei denen er abgestellt wird und die deswegen keine Flugmuskeln entwickeln, keine Männchen anlocken. Folglich sollten entsprechend ausgestattete Moskitoweibchen harmlos sein.

Um das Verfahren sowie weitere ähnlich aufgebaute Eingriffe kommerziell zu verwerten, gründete Alphey 2002 die Firma Oxitec. Als James 2005 von der Stiftung der amerikanischen National Institutes of Health – die weitgehend von der Bill & Melinda Gates Foundation getragen wird – für

»Viele Fachkollegen erfuhren von der Freisetzung auf den Kaimaninseln erst, als die Studie schon 14 Monate lief«





MIT FELD GEN VON BIAL P. TRIVEDY

Feldstation in Mexiko: Hier werden gentechnisch veränderte Moskitomännchen streng abgeschirmt auf normale Mückenschwärme aus der Region losgelassen – genau gesagt auf die Weibchen. Durch Begattung sollen die Käfigpopulationen nach einiger Zeit kollabieren, was sich die Forscher später ebenfalls für die Bestände in der Natur erhoffen.

Tests gentechnischer Strategien zur Bekämpfung des Denguefiebers 20 Millionen US-Dollar bekam, reichte er 5 Millionen an Oxitec weiter, damit die Firma solche transgenen Moskitos konstruierte.

Angriff auf die Flugmuskeln mit einer Kaskade genetischer Schalter

Mitarbeiter entwarfen nun eine DNA-Kassette mit fünf Genen und zugehörigen regulatorischen Elementen, damit die neuen Gene jeweils zum gewünschten Zeitpunkt an- und abgeschaltet werden. Das System funktioniert als Kaskade: Während der Metamorphose von der Larve zur Mücke, also in der Puppe, aktiviert der geschlechtsspezifische Schalter bei den Weibchen das erste Gen. Daraufhin entsteht ein Protein, welches den Schalter für ein zweites Gen anwirft. Und dieses kodiert für ein Toxin, das die Flugmuskulatur zerstört. Damit die Forscher den Überblick behalten, ob die Tiere diese Gene aufweisen, fügten sie außerdem DNA-Sequenzen für rot und grün fluoreszierende Proteine hinzu.

Allerdings dürfen die transgenen Moskitoweibchen zunächst nicht gleich sterben, sondern müssen erst einmal Unmengen von Eiern legen, weil man viele transgene Männchen braucht. Der Trick ist, die Genkaskade über einen weiteren Schalter mittels eines »Gegengifts«, in diesem Fall des Antibiotikums Tetracyclin, zu blockieren, das man dem Was-

ser zusetzt, in dem die Larven leben. Nun kann das Toxin nicht gebildet werden. Dies ist zudem eine Sicherheitsmaßnahme, damit womöglich doch freikommende transgene Moskitoweibchen keine reproduktionsfähigen weiblichen Nachkommen produzieren – unter natürlichen Bedingungen leben die Larven nicht in antibiotikahaltigem Wasser.

In weiten Teilen Mexikos, auch in Tapachula, gehört das Denguefieber seit Langem zu den gewichtigsten Gesundheitsgefahren. Fatal sind die geradezu explosionsartigen Ausbrüche, die sich in dicht besiedelten Gebieten besonders verheerend auswirken. 2009 und 2010 war zum Beispiel Tapachulas Vorort Pobres Unidos (»Vereinigte Arme«) sehr stark heimgesucht. Der Epidemiologe Rogelio Danis-Lozano und die Parasitologin Janine Ramsey, die auf James' Station die tägliche Arbeit leitet, zeigen mir das Armutsviertel.

Fast alle Häuser haben keine Vorderwand, so dass Moskitos frei hineinfliegen können. Der nasse Erdboden und die feuchte Luft im Innern ziehen die Insekten geradezu an. Überall gibt es Müllberge und vielerlei Behältnisse, wo sich Regenwasser sammelt – ideale Mückenbrutstätten. Danis-Lozano macht uns auf eine randvolle, große, gelbe Wanne aufmerksam. Darin schwimmen Unmassen dünner, schwarzer Würmchen zuckend umher. Die Besitzerin ahnt nicht, dass in ihrem Waschzuber Moskitolarven heranwachsen, obwohl sie das Denguefieber natürlich kennt.

Solche Verhältnisse sind typisch für viele Denguefiebergebiete der Welt. In über 100 tropischen und subtropischen Ländern Amerikas, Asiens und Afrikas ist die Krankheit verbreitet, und sie greift immer weiter um sich. Seit den 1970er Jahren hat sich die Zahl der Fälle alle zehn Jahre verdoppelt. Zum einen durch den wachsenden internationalen Reise- und Warenverkehr, zum anderen, weil Menschen zunehmend in Ballungsgebiete ziehen, werden die Ausbrüche immer häufiger und heftiger. Das Denguefieber sei eine der aggressivsten wiederkehrenden Infektionskrankheiten, schrieben 2008 die amerikanischen Epidemiologen David M. Morens und Anthony S. Fauci vom National Institute of Allergy and Infectious Diseases in Bethesda (Maryland). Bei der hämorrhagischen Verlaufsform stirbt unbehandelt bis zu jeder Fünfte. Intensivmedizinische Maßnahmen können

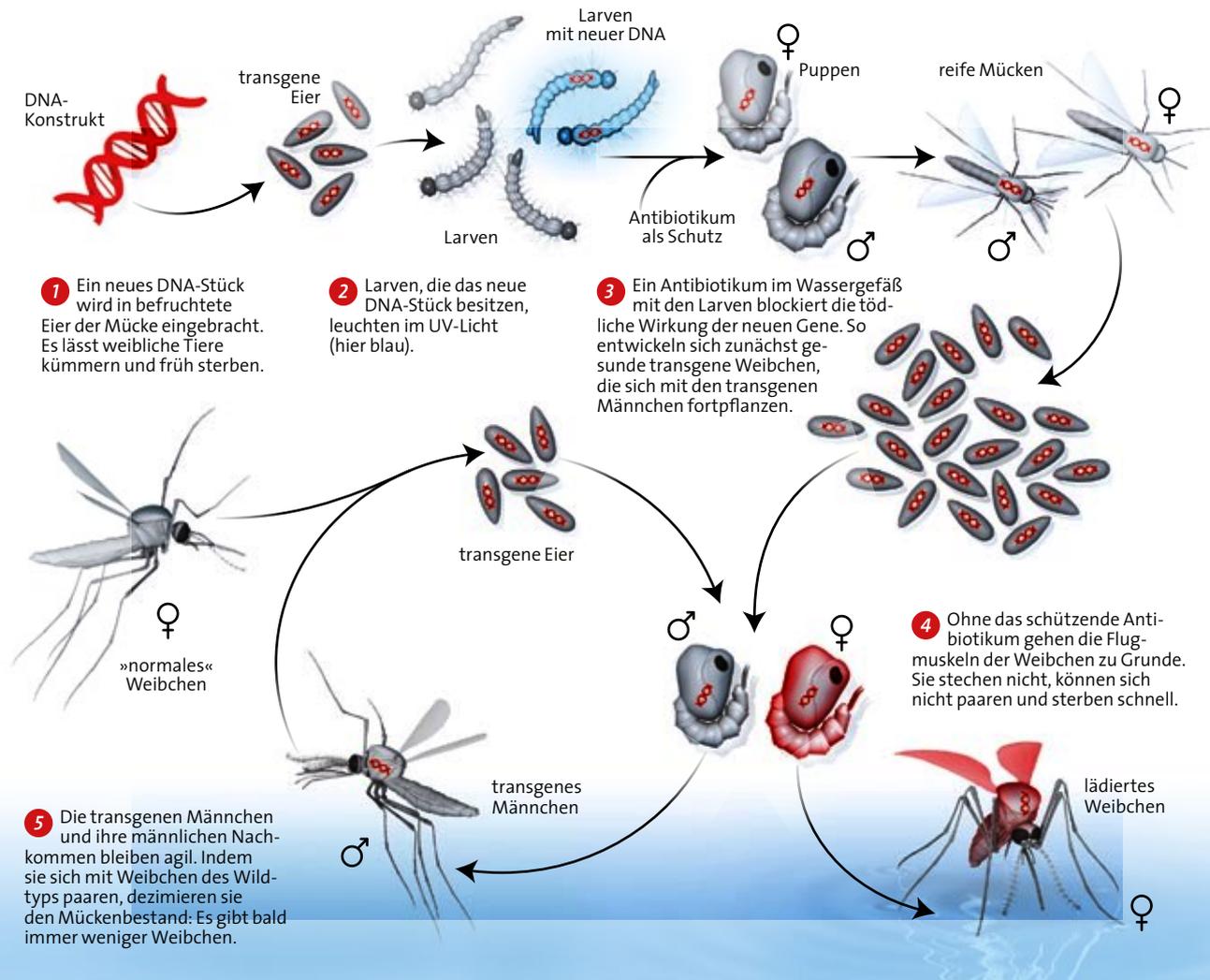
die Sterberate zwar auf ein Prozent senken, aber dieses Virus fordert dennoch weltweit mehr Todesopfer als die übrigen hämorrhagischen Viruserkrankungen zusammen, eingeschlossen das Ebola- und Marburgfieber.

Einer der Gründe, weswegen sich James dem Denguefieber zuwandte und nicht beispielsweise der Malaria, ist die Beteiligung nur sehr weniger Mosquitoarten – während ungefähr drei Dutzend Mückenspezies den Malariaerreger weitergeben können. Die Gelbfiebersmücke und Hauptüberträgerin stammt ursprünglich aus Afrika und war dort anscheinend früher ein Insekt in den Wäldern, das irgendwann den Menschen zu seinem Hauptwirt auserkor. Mit Sklavenschiffen gelangte das Tier schon vor rund 400 Jahren nach Amerika und breitete sich dort rasch aus. Heute vermehren sich diese Stechmücken als Kulturfolger in jeder kleinen Kuhle mit ein

Todesschalter für Weibchen

Ein transgener Stamm der Gelbfiebersmücke bringt stark behinderte Weibchen hervor, die nicht fliegen können, sich nicht paa-

ren und nicht stechen. Die Männchen – die kein Blut saugen – verbreiten diese genetische Ausstattung.



EMILY COOPER

paar Schluck Wasser. Erwachsene Weibchen leben ungefähr einen Monat. Weil sie fast ausschließlich Menschen stechen, bleibt ihnen somit viel Zeit und Gelegenheit, das Virus mit einer Blutmahlzeit aufzunehmen und weiterzugeben.

Diese tagaktiven Moskitos fliegen so leise, dass ich von dem Schwarm in dem kleinen Anzuchtkäfig fast nichts höre, den mir die Entomologin Laura Valerio von der University of California in Davis zeigt. Wir sind in Tapachula im abgesicherten Insektarium des Gesundheitsforschungszentrums.

Die Forscherin zieht einen Handschuh an, um in den Käfig hineinzulangen und auf eines der transgenen Weibchen zu deuten. Während die Männchen aufgescheucht umherschwirren, bleiben die Weibchen sitzen oder hüpfen höchstens träge ein kleines Stück weg – Resultat der zerstörten Flugmuskeln.

Von hier werden transgene Moskitolarven zur Feldversuchsstation gebracht. Dort gibt es fünf Käfigpaare: jeweils einen zur Kontrolle mit normalen Mücken der Region und einen, in dem sich normale und transgene Mücken begegnen. Um an die Gehege heranzukommen, müssen sich die Leute durch eine Anzahl dichter Netze vorarbeiten. Man möchte in jeder Hinsicht Fehler der Vergangenheit vermeiden.

Einst war es für Industrienationen vor allem bequem, ihre Studien mit gentechnisch veränderten Organismen in Entwicklungsländern durchzuführen. Mit der Zeit provozierte die nonchalante Haltung gegenüber der dortigen Umwelt allerdings Widerstand in der Bevölkerung, der ganze Forschungsprogramme scheitern ließ. Vielleicht erfährt kein Wissenschaftszweig mehr eingebildeten oder wirklichen Missbrauch als das Gebiet der transgenen Organismen.

Indien liefert dafür ein Beispiel. 1969 beschlossen die Weltgesundheitsorganisation WHO und die indische Regierung, gemeinsam Strategien zu erforschen, um drei wichtige Moskitosarten mit Hilfe von gentechnischer Manipulation zu kontrollieren. Ins Programm kamen eine Malariamücke, eine *Culex*-Mücke, die durch Fadenwürmer Lymphschwellungen – Elephantiasis – hervorruft und die Gelbfiebermücke. Zu den Geldgebern gehörte auch die US-Regierung.

1972 schrieb jemand anonym in der indischen Zeitung »National Herald«, Forscher hätten in dörflichen Brunnen Mückenlarven ausgesetzt, die mit einem gebräuchlichen Krebsmittel behandelt worden waren, das bei Tieren Geburtsschäden und Krebs hervorruft. Die verantwortlichen Wissenschaftler verfassten eine Gegendarstellung, wollten allerdings keine Interviews geben. Zwei Jahre später brachte die indische Nachrichtenagentur Press Trust eine Meldung mit dem Titel »WHO betreibt in Indien Geheimforschung für die USA«. Darin hieß es, in dem Moskitoprojekt würde die Eignung von Gelbfiebermücken zur biologischen Kriegsführung geprüft. Man teste Chemikalien und Methoden, die in den Geldgeberländern nicht erlaubt sind. Die Eier von *Aedes*

aegypti könne man – im Gegensatz zu denen anderer Arten – getrocknet in einem Briefumschlag verschicken. Zwar wiesen die Forscher diese Anschuldigungen entschieden zurück. Doch das mediale Spektakel war so groß, dass die WHO das Programm schließlich aufgab.

Seitdem graut es vielen Wissenschaftlern vor Feldstudien mit gentechnisch veränderten Organismen, erklärt Stephanie James, Leiterin der Initiative Grand Challenges in Global Health von der Stiftung der National Institutes of Health –

nicht verwandt mit Anthony James. »Die psychische Hürde war enorm. Man wusste, man durfte sich keinen Fehler leisten.«

Auch Anthony James erzählt: »Alle meinten immer nur, es würde mir nie gelin-

gen, eine Bevölkerung für mein Vorhaben zu gewinnen.« Er suchte Rat bei einem Experten für Öffentlichkeitsarbeit: Jim Lavery, der am Center for Global Health Research am St. Michael's Hospital in Toronto untersucht, wie man die Menschen bei Forschungsprojekten einbeziehen kann.

Laverys Empfehlung: eine Region wählen, die stark unter Denguefieber leidet und wo man das Problem trotz aller Anstrengungen bisher nicht in den Griff bekommt. Es sollte außerdem ein Land mit hoch entwickelten Strukturen und stringenten Vorschriften sein, dessen Behörden die Risiken und Vorteile solch eines Projekts abschätzen können. So müssten die Menschen nicht befürchten, dass man sie überverteilt oder gefährdet. Mit Hilfe von Lavery und dem langjährigen Experten für Moskitofeldforschung Thomas Scott von der University of California in Davis brachte James nun ein international zusammengewürfeltes Team von Moskitoökologen, Anthropologen und Ethikern zusammen.

Erfolg mit Öffentlichkeitsarbeit

2006 erkoren die Forscher Tapachula zum Favoriten für eine Versuchsstation. Mexiko besaß Gesetze zu genetisch veränderten Organismen. Das Land hatte auch das Cartagena-Protokoll zur biologischen Sicherheit unterzeichnet – das seit 2003 gültige internationale Abkommen zum Umgang mit transgenen Organismen und auch deren Import. Und wegen der guten Erfahrungen in Tapachula mit der Ausrottung der Mittelmeerfruchtfliege würde die Bevölkerung beim Gedanken an ein gentechnisch manipuliertes Insekt nicht gleich in Panik geraten.

»Zuerst kam uns das komisch vor, dass diese Forscher Land haben wollten«, erinnert sich Martimiano Barrios Matute, Vorsteher der betroffenen Gemeinde. Wieso wollte jemand große Käfige bauen, nur um eine Menge veränderte Mücken hineinzutun? Und was würde passieren, wenn einige davon freikämen? Könnten sie den Menschen oder ihren Feldern schaden? Oder würden dann auch andere Insekten steril?

James und seine Mitarbeiter redeten mit den Leuten, gingen auf die verschiedenen Bedenken ein und erklärten ihr

»Vielleicht erfährt kein Forschungszweig mehr eingebildeten oder wirklichen Missbrauch als das Gebiet der transgenen Organismen«

Denguefieber: Die Hauptverbreitungsgebiete

Von den durch Moskitos übertragenen Viruskrankheiten nimmt das Denguefieber bei Weitem am schnellsten zu. Rund zweieinhalb Milliarden Menschen leben in den tropischen und subtropischen Hauptrisikogebieten. In den letzten Jahrzehnten verzeichnete die Weltgesundheitsorganisation alle zehn Jahre eine Verdopplung der Erkrankungen. Nach Angaben von For-

schern konnten freigesetzte transgene Mücken lokale Mückenpopulationen drastisch vermindern.

Gelegentlich übertragen Moskitos das Denguevirus auch in Südeuropa. In Deutschland stieg zwar die Anzahl der Erkrankungen auf mehrere hundert pro Jahr – allerdings haben sich die Betroffenen bisher alle in anderen Ländern angesteckt.



GEORGE RETSECK, DENGUEFIEBER-RISIKOGEBIETE NACH: CDC HEALTH INFORMATION FOR INTERNATIONAL TRAVEL 2012, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2012

Vorhaben so genau wie möglich. Informationsveranstaltungen finden weiterhin regelmäßig statt. Zu der wöchentlichen Versammlung im Kulturhaus von Tapachula, die ich besuche, haben sich etwa 30 Männer und 5 Frauen eingefunden, alle in verantwortlichen Positionen. Zunächst berichtet die Leiterin der Forschungsstation Janine Ramsey vom Stand der Versuche. Mit ihrer lebhaften, auch humorvollen Art, die so gar nicht mehr nordamerikanisch wirkt, scheint sie ihr Publikum zu fesseln. Später stellen die Leute zögernd Fragen. Ein Mann erkundigt sich, ob er die Käfige besichtigen darf. Ein anderer möchte wissen, was passieren würde, wenn Moskitos entweichen. Eine junge Frau fragt, wieso Menschen etwas gegen transgene Organismen haben. Einem älteren Mann aus einem Bergdorf ist der Unterschied zwischen Denguefieber und Malaria nicht klar. Ramsey antwortet jedem und gibt zum Abschied allen die Hand. »Wir verstehen das Projekt nun, und es gefällt uns«, erklärt der Sojabauer Barrios Matute. »Das wird nicht nur Rio Florido nützen. Es kann für die ganze Gegend hier gut sein und für ganz Mexiko, überhaupt für viele Orte der Welt.«

Völlig anders war Oxitec in der Karibik vorgegangen. Wie Luke Alphey auf der Jahrestagung der American Society of Tropical Medicine and Hygiene in Atlanta Ende 2010 dem überraschten Auditorium erzählte, hatten sie auf Grand Cayman die ersten genmanipulierten männlichen Gelbfiebertmücken im September 2009 ausgesetzt und dann während des Sommerhalbjahrs 2010 nochmals über drei Millionen

Männchen freigelassen. Laut Alphey schrumpfte die lokale Population daraufhin um 80 Prozent. Der verwendete Zuchtstamm funktioniert genetisch etwas anders als der in der Tapachula-Studie: Die im Freiland erzeugten Nachkommen sterben in beiden Geschlechtern schon als Larven und verbreiten sich deshalb nicht weiter.

Alphey verteidigt sich gegen Vorwürfe: Die Öffentlichkeitsarbeit möchte Oxitec bei seinen Projekten weitgehend den Regierungen überlassen. Die verstehen die kulturellen Empfindlichkeiten am besten. Auf Grand Cayman brachten lediglich die Abendnachrichten einen Fünfminutenbeitrag. Und es gab eine Broschüre, in der stand, die freigelassenen Moskitos seien steril – allerdings war darin keine Rede von genetischer Manipulation. Weder fanden öffentliche Informationsveranstaltungen statt noch bot man der Bevölkerung Gelegenheit, Bedenken zu äußern. Der Firmenchef sagte auf dem Kongress in Atlanta, man habe die Aktion zunächst nur auf den Kaimaninseln publik gemacht, denn nur deren Bewohner mussten davon wissen.

Einen Fürsprecher findet Alphey in dem Molekularbiologen Mark Q. Benedict von der Università degli Studi di Perugia (Italien), der selbst über sterile Insekten forscht und Berater der Bill & Melinda Gates Foundation ist. Oxitec habe keine Gesetze gebrochen. Die Kaimanstudie sei mutig gewesen, habe man doch eine Technologie geprüft, die im Guten wie im Schlechten Aufmerksamkeit erregen muss. Durch verwirrende und widersprüchliche Meldungen in den Medien sei

der Eindruck entstanden, dass da ein einzelner Forscher un-
bekümmert einfach eimerweise Moskitos in die Gegend ge-
kippt habe. So sei das aber nicht gewesen. Oxitec arbeite bei
seinen Projekten mit den örtlichen und staatlichen Stellen
zusammen und hole dort im Voraus für seine Versuche Ge-
nehmigungen ein.

Trotzdem löste Alpheys Vorstoß in der Öffentlichkeit, bei
Umweltgruppen und bei vielen Kollegen Kritik, Argwohn
und Enttäuschung aus. Bart Knols, Medizinentomologe an
der Universität Amsterdam und geschäftsführender Direk-
tor des Netzwerks MalariaWorld, bringt es auf den Punkt: Alle
Welt frage sich, ob die Heimlichtuerei nötig war. Natürlich
wecke das Misstrauen. Die Technologie selbst hält auch Knols
für viel versprechend. Nur – wenn einer Mist baue und die
Öffentlichkeit nicht richtig informiere, könne das auf andere
Projekte mit transgenen Organismen zurückschlagen. »We-
gen Oxitec bekommen wir jetzt womöglich die gleichen Pro-
bleme wie die WHO 1976 in Indien.« Außerdem argwöhnen
manche Experten, dass sich Oxitec absichtlich Länder mit la-
xen Gesetzen aussucht. Laut Stephanie James war auf den
Kaimaninseln ein Gesetzesentwurf zur biologischen Sicher-
heit gerade verabschiedet, das Gesetz aber noch nicht gültig.

Das Für und Wider der Freisetzung

Ebenfalls umstritten ist die Situation in Malaysia, wo Oxitec
Ende 2010 in einer unbewohnten Gegend eine Feldstudie be-
gann – unter dem Protest verschiedener Organisationen. Das
Land verfügt zwar über einen Rat für biologische Sicherheit
und seit Kurzem auch über Gesetze dazu. Doch es herrscht
Skepsis, ob die nötige Expertise vorhanden ist, solche Ver-
suche zu bewerten und zu überwachen. Auch im nordost-
brasilianischen Bundesstaat Bahia, in einem armen Vorort
von Juazeiro, nahm Oxitec 2011 einen halbjährigen Freiset-
zungsversuch in Angriff. Die Menschen dort sind das ganze
Jahr über von Moskitos und Denguefieber geplagt. Auf Grand
Cayman soll überdies das Potenzial der beiden hier beschrie-
benen transgenen Tigermückenstämme im Vergleich getes-
tet werden – also mit dem schon auf der Insel erprobten und
dem in Tapachula untersuchten –, um herauszufinden, wel-
cher die günstigeren Eigenschaften hat. Interesse an der Me-
thode meldeten mittlerweile Behördenvertreter von Pana-
ma und den Philippinen an sowie Verantwortliche von Flo-
rida, wo nach Jahrzehnten Denguefieber inzwischen wieder
vorkommt.

Andererseits lehnen manche Interessengruppen das Frei-
setzen genmanipulierter Organismen grundsätzlich ab,
selbst wenn die Forscher offen damit umgehen und alle Um-
sicht walten lassen. Die Wissenschaftlerin Janet Cotter von
den Greenpeace-Forschungslaboren in Exeter (England) hält
die Versuche von Oxitec für hochriskant. Denn es gäbe ein-
fach keine 100-prozentige Sterilität. Allzu leicht würden un-
absichtlich auch ein paar transgene reproduktionsfähige
Weibchen mit frei gelassen – mit unabsehbaren Folgen.

Manche fragen sich sogar, ob es ethisch und ökologisch
vertretbar ist, einen Organismus gezielt auszulöschen, und

sei es nur in einem kleinen Gebiet. Die Befürworter des Vor-
habens argumentieren, die Gelbfiebermücke im Umfeld
menschlicher Besiedlung sei eine invasive Form mit Spe-
zialisierung auf diese Nische und den Menschen. Laut Phil
Lounibos, Moskitoökologe am Florida Medical Entomology
Laboratory, gehört die urbane Form zu keiner wichtigen
natürlichen Nahrungskette. Trotzdem kann er sich nicht vor-
stellen, dass man das Denguefieber mit solchen Vernich-
tungsaktionen endgültig ausrotten wird. Einerseits gab es
auf dem amerikanischen Kontinent in den 1950er und
1960er Jahren schon einmal eine derartige Kampagne, da-
mals gegen urbanes Gelbfieber, und die scheiterte kläglich.
Außerdem dringt die verwandte Asiatische Tigermücke (*Ste-
gomyia albopicta* oder *Aedes albopictus*) bereitwillig in die
frei werdenden Nischen vor – auch sie eine häufige Überträ-
gerin von Dengueviren. Aber vor allem halten sich die trans-
genen Mücken nicht ewig. Dann könnten sich von Randge-
bieten her erneut Moskitos ausbreiten. Man müsste also im-
mer wieder veränderte Mückenmännchen freisetzen.

Deswegen beschäftigen sich James und viele seiner Kolle-
gen auch damit, den Moskitopopulationen dauerhaft Resis-
tenzgene gegen den Krankheitserreger aufzuzwingen. Derart
manipulierte Mücken würden das Denguevirus nicht mehr
übertragen. Zu diesem Zweck möchten Forscher verschiede-
ne natürliche Genverbreitungsmechanismen nutzen. Damit
ausgestattete Moskitos würden die neue Eigenschaft in die
Population einbringen, wo sie mit der Zeit zunehmend um
sich griffe. Bis zu ersten Feldversuchen gegen einen der Se-
rotypen des Denguevirus dürften aber mindestens noch einige
Jahre verstreichen. ~

DIE AUTORIN



Bijal P. Trivedi studierte in den USA Molekular-
biologie und Biochemie. Sie schreibt als
Wissenschaftsjournalistin über biologische,
Umwelt- und Medizinthemen und lebt in
Washington.

QUELLEN

Thomas, D.D. et al.: Insect Population Control Using a Dominant, Re-
pressible, Lethal Genetic System. In: Science 287, S. 2474–2476, 2000
Wise de Valdez, M.R. et al.: Genetic Elimination of Dengue Vector
Mosquitos. In: Proceedings of the National Academy of Sciences
USA 108, S. 4772–4774, 2011

LITERATURTIPP

O'Brochta, D.A., Atkinson, P.W.: Moskitos und Milben nach Maß. In:
Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 36–41
Artikel zur Gentechnik an Schadinsekten und Krankheitsüberträgern
und zu anderen Methoden der Bekämpfung

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im
Internet: www.spektrum.de/artikel/1155290



Aus der Nähe betrachtet wäre eine Supernova ein atemberaubender Anblick. Allerdings würde dabei auf einem Planeten, der den explodierenden Stern umkreist, höchstwahrscheinlich jede Spur von Leben vernichtet.

ASTROPHYSIK

Superhelle Supernovae

Kürzlich entdeckten Astronomen explodierende Sterne, die ungeahnte Energiemengen freisetzen. Ein Spektakel, das es in sich hat – denn offenbar entstehen aus Photonen enorme Mengen von Materie und Antimaterie.

Von Avishay Gal-Yam



RON MILLER

Mit über 4000 Metern ist der Mauna Kea der höchste Berggipfel auf Hawaii. Auf ihm befinden sich mehrere internationale Observatorien – zusammengenommen die größte Sternwarte der Welt. Zu ihnen gehört das Keck-Observatorium mit seinen zwei riesigen Zehn-Meter-Spiegelteleskopen. Eines der beiden erhielt Mitte 2005 eine so genannte adaptive Optik, mit der das Instrument automatisch die störenden Turbulenzen der Lufthülle kompensiert und nun ebenso scharfe Bilder liefert wie das Hubble-Weltraumteleskop. Der Astrophysiker Shrinivas Kulkarni vom California Institute of Technology (kurz Caltech) in Pasadena drängte mich und andere junge Forscher seines Instituts, uns schleunigst um Beobachtungszeit zu bewerben. Denn wenn in der Fachwelt erst einmal bekannt wäre, wie großartig das Teleskop jetzt funktioniert, würden wir darum kämpfen müssen.

Also konzipierte ich zusammen mit meinen damaligen Postdoc-Kollegen Derek Fox und Doug Leonard eine Untersuchung, die zuvor praktisch nur mit dem Hubble-Teleskop möglich gewesen war: Wir jagten nach Supernova-Vorläufern. Das heißt, wir wollten wissen, wie Sterne aussehen, die gleich explodieren werden.

Theoretiker können schon seit Jahrzehnten vorhersagen, welche Himmelskörper sich in Supernovae verwandeln werden. Zum Beispiel wissen sie, dass helle blaue Sterne kurz vor der Explosion stehen. Allerdings versteht ein Astronom unter »kurz« rund eine Million Jahre. Gewiss würden wir den Ablauf besser verstehen, wenn wir seine gesamte Entwicklung beobachten könnten, aber geduldiges Betrachten einzelner Sterne kommt dafür nicht in Frage.

Im November 2005 gewährte uns das Keck-Observatorium eine einzige Nacht Beobachtungszeit. Aufgeregt flog ich zur Hauptinsel von Hawaii und hoffte auf gute Sichtverhältnisse, denn wir hatten nur diese eine Chance. Zum Glück spielte das Wetter mit – und in jener Nacht begann für mich ein Forschungsabenteuer, das seitdem die gängige Ansicht über die maximale Größe von Sternen und deren Ende völlig verändert hat.

Damals glaubten die Experten, dass sehr große Sterne nicht explodieren, sondern allmählich schrumpfen und in Form von Sternenwind Masse verlieren. Die meisten Astro-

physiker meinten sogar, wegen dieser starken Winde könnten die Sterne im gegenwärtigen Universum von vornherein nicht allzu sehr wachsen – höchstens bis auf rund 100 Sonnenmassen. Doch wie wir auf Grund unseres Hawaii-Abenteuers herausfanden, gibt es in unserem Universum Sterne von mindestens 200 Sonnenmassen, die ihr Dasein mit den energiereichsten Explosionen überhaupt beenden. Ebenso überraschte uns die Entdeckung, dass einige dieser Sterne auf völlig unerwartete Weise explodieren, wobei in ihrem Zentrum Antimaterie entsteht.

Derart riesige Himmelskörper – und wahrscheinlich sogar noch größere – waren auch die ersten, die sich in der Frühgeschichte des Universums aus Gas bildeten. Daher erfahren wir aus der Art ihrer Explosion, wie sich die dabei erzeugten chemischen Elemente durch den Kosmos ausbreiteten und letztlich zu den Keimen heutiger Sonnen, Planeten und Menschen wurden.

Ein unwahrscheinlicher Anfang

Während unserer knappen Zeit am Teleskop planten Fox, Leonard und ich, eine aktive Supernova zu beobachten. Dann wollten wir durch Vergleiche mit Archivaufnahmen des Hubble-Teleskops ein Bild des Sterns vor seiner Explosion finden. Natürlich ist es schwierig, auf einem Hubble-Foto zu erkennen, welcher Lichtpunkt unter den Milliarden Sternen einer Galaxie ein Supernova-Vorläufer ist. Dafür gilt es erst einmal, den Ort der Supernova sehr präzise zu vermessen. Vor der Installierung der adaptiven Optik im Keck-Observatorium war das wiederum nur mit dem Hubble-Teleskop möglich gewesen – und selbst damit hatten die Astronomen bis dahin nur drei Vorläufersterne zu identifizieren vermocht.

Unter den zur Beobachtungszeit aktiven Supernovae wählten wir eine namens SN 2005gl aus. Andere Teams hätten das für eine schlechte Wahl gehalten, und zwar aus gutem Grund: Üblicherweise suchen die Forscher nach Supernova-Vorläufern in einem Umkreis von rund 60 Millionen Lichtjahren, doch unser Kandidat lag mit 200 Millionen Lichtjahren mehr als dreimal so weit von der Erde entfernt. Damit wir den Vorläufer von SN 2005gl auf Hubble-Bildern finden konnten, musste er zu den leuchtkräftigsten je beobachteten Sternen gehören. Mit der Annahme, es könne so extrem stark leuchtende und somit massereiche Supernova-Vorläufer geben, gingen wir ein hohes Risiko ein.

Und wir hatten Glück. Nachdem wir die Position von SN 2005gl anhand der Keck-Daten vermessen hatten, fanden wir tatsächlich auf einem Hubble-Bild genau am richtigen Ort etwas, das einem Stern ähnlich sah. Falls es sich um einen einzigen Himmelskörper handelte, war er in der Tat extrem leuchtkräftig: eine Million Mal heller als die Sonne und somit mindestens 100-mal so schwer. Doch da ein solcher Koloss nach herrschender Auffassung gar nicht explodieren durfte, hätten die meisten Astronomen den Lichtfleck auf dem Hubble-Foto eher für einen Cluster aus kleineren und schwächeren Sternen gehalten, die zusammen die beobach-

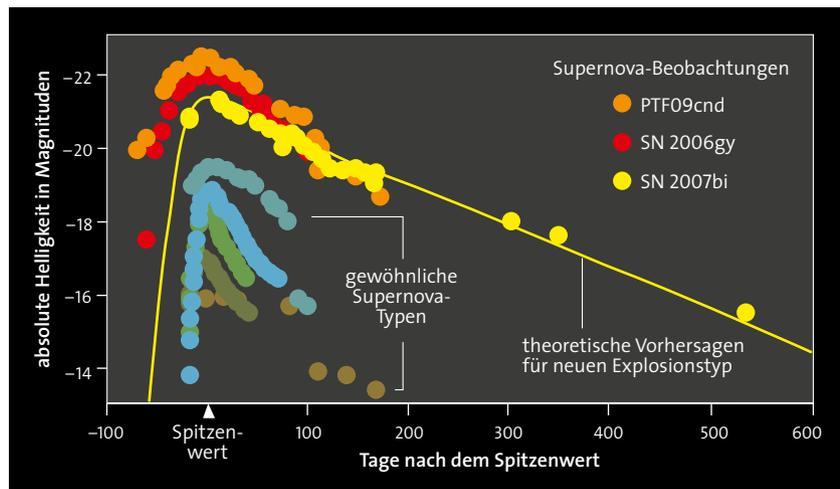
AUF EINEN BLICK

WIE HYPERRIESEN ENDEN

- 1 Einige Supernovae setzen ungeahnt viel **Energie** frei und leuchten besonders lange.
- 2 Archivaufnahmen zufolge müssen ihre **Vorläufersterne** 100-mal mehr Masse als die Sonne gehabt haben – doch nach der gängigen Theorie dürften so große Sterne gar nicht explodieren!
- 3 An manchen Supernovae ist offenbar die spontane **Bildung vieler Teilchen und Antiteilchen** beteiligt. Solche Vorgänge spielten vor allem bei der Explosion der ersten Sternriesen im frühen Universum eine Rolle.

Die grellsten Explosionen

Die vom Autor und seinen Mitarbeitern untersuchten Supernovae erwiesen sich als die energiereichsten Sternexplosionen, die je beobachtet wurden. Ein Rekordereignis begann 2006 (rot) und wurde 2009 von einem anderen überboten (orange). Beide dauerten relativ kurz. Eine weitere Supernova im Jahr 2007 erreichte zwar nicht den höchsten Spitzenwert, setzte aber die größte Gesamtenergie frei (gelb). Sie war das erste Beispiel für einen neuen Supernova-Typ, der offenbar von sehr massereichen Sternen ausgeht (siehe Kasten auf den folgenden Seiten).



tete Helligkeit erzeugten. Mit unseren Daten ließ sich diese Möglichkeit zunächst nicht ausschließen.

Obwohl unser Resultat nicht beweiskräftig war, suchte ich weiter nach Indizien für das Schicksal extrem massereicher Sterne. 2006 kam mir erneut der Zufall zu Hilfe. Wieder saß ich eines Nachts im Keck-Observatorium, doch diesmal herrschte scheußliches Wetter. Stundenlang wartete ich am Steuerungscomputer und begann mich gerade zu fragen, ob die umständliche Anreise umsonst gewesen war, als endlich die Wolken aufrissen und ein paar Sterne preisgaben. Ich nahm eine Supernova-Explosion namens SN 2006gy ins Visier. Robert Quimby, damals Doktorand an der University of Texas in Austin, hatte sie erst acht Tage zuvor mit einem Teleskop entdeckt, das 20-mal kleiner war als die riesigen Keck-Spiegel. Aber schon nach einer Viertelstunde bildete sich wieder eine geschlossene Wolkendecke. Scheinbar war die Nacht ein kompletter Fehlschlag.

Noch eine unmögliche Explosion

Doch dann analysierte ein Team um den Caltech-Kollegen Eran Ofek meine Daten, und SN 2006gy entpuppte sich als die leuchtkräftigste bis dahin entdeckte Supernova-Explosion. Zum gleichen Ergebnis kam Nathan Smith an der University of California in Berkeley. Das stellte uns vor ein Rätsel, denn keiner der damals bekannten Supernova-Typen vermag so viel Strahlung zu erzeugen. Da SN 2006gy in einer noch nicht von Hubble fotografierten Galaxie lag, konnten wir den Vorläuferstern nicht detailliert untersuchen; doch angesichts der Heftigkeit seiner Explosion musste er mindestens 100 Sonnenmassen haben.

Für die exzessive Leuchtkraft zogen wir zwei mögliche Erklärungen in Betracht. Erstens: Es handelte sich um Wärmestrahlung einer Stoßwelle, die entstand, als die Explosionsreste der Supernova den langsameren Sternwind, den der Stern selbst vor seiner Explosion emittiert hatte, einholten

und wegfeigten. Oder zweitens: Supernovae bringen neue Elemente hervor, und zwar vorwiegend in Form radioaktiver Isotope, die später in stabilere Elemente zerfallen. Vielleicht erzeugte die gewaltige Explosion riesige Mengen radioaktiven Materials, dessen langsamer Zerfall Energie in eine expandierende Wolke aus Sterntrümmern pumpt und sie zur Fluoreszenz brachte? Nur: Wodurch entstand genug radioaktive Substanz zur Erklärung der ungeheuren Leuchtkraft?

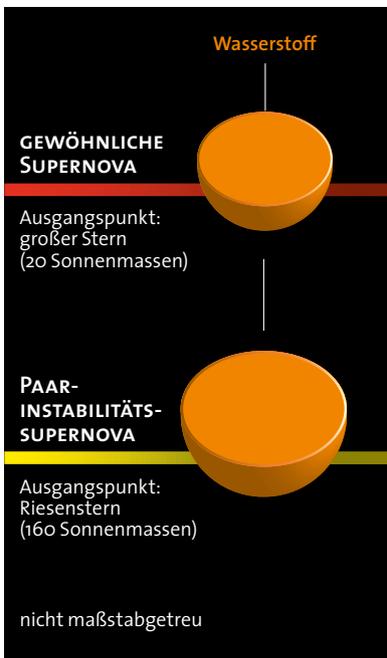
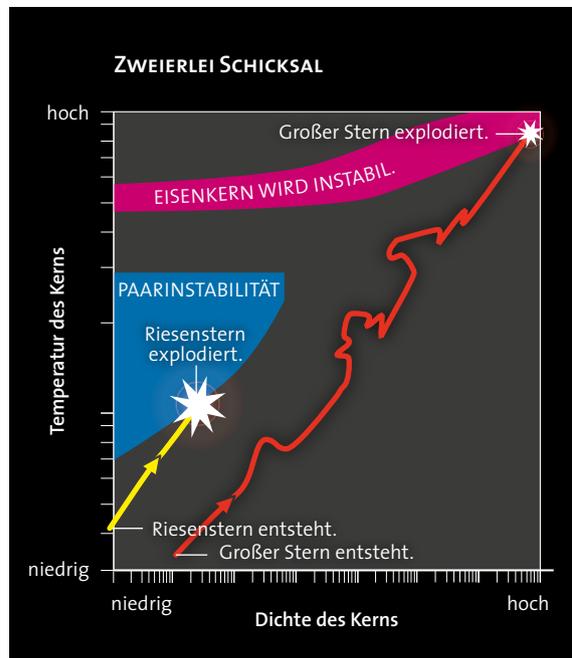
Auf der Suche nach einer Antwort stießen wir auf verstaubte theoretische Artikel vom Ende der 1960er Jahre. Drei junge Astrophysiker – Gideon Rakavy, Giora Shaviv und Zalman Barkat – hatten damals ein neuartiges Modell für Sternexplosionen vorgeschlagen.

Sterne leuchten, weil ihr Kern so dicht und heiß ist, dass Wasserstoffatome zu Helium und schwereren Elementen verschmelzen; dabei wird Fusionsenergie frei. Die physikalischen Vorgänge im Kern eines massereichen Sterns und dessen weitere Entwicklung hängen im Wesentlichen von der dortigen Dichte und Temperatur ab. In der Regel wird der Sternkern mit der Zeit dichter und heißer; dabei entstehen durch Fusion sukzessive immer schwerere Elemente – erst Helium, danach Kohlenstoff, später Sauerstoff und so weiter. Dazwischen können Tausende bis Milliarden Jahre vergehen, je nachdem, wie schnell die nuklearen Fusionsprozesse Temperatur und Dichte im Sterninneren verändern.

Rakavy und sein Team hatten berechnet, was geschieht, wenn ein sehr massereicher Stern – hunderte Male so schwer wie die Sonne – ein Stadium erreicht, in dem sein Kern vorwiegend aus Sauerstoff besteht. Bei kleineren Sternen wissen wir, was dann passiert: Der Stern zieht sich unter der eigenen Schwerkraft zusammen, und sein Kern erhitzt sich, bis die Fusion von Sauerstoff zu Silizium möglich wird. Doch der Kern eines Hyperriesen wird den Berechnungen zufolge bei der Kontraktion zwar heiß, aber nicht sehr dicht. An Stelle der Fusion von Sauerstoff tritt so genannte Paarerzeugung auf.

Wie große Sterne enden

Sterne strahlen durch nukleare Fusion, wobei neue Elemente entstehen. Während ein Stern altert, wird sein Kern heißer und dichter (siehe Diagramm links im Bild) und erzeugt immer schwerere Elemente, die sich wie Zwiebelschalen anordnen (Zeichnung, rechter Bildteil). Ein relativ schwerer Stern mit ungefähr 20 Sonnenmassen (rote Kurve im Diagramm) wird schließlich so dicht, dass er kollabiert und einen Großteil seiner Energie und Masse ausstößt. Doch ein sehr schwerer Stern mit rund 160 Sonnenmassen (gelbe Kurve) vernichtet sich schon viel früher – in einer noch heftigeren Explosion.



In genügend heißer Materie emittieren Atomkerne und Elektronen sehr energiereiche Photonen im Gammastrahlungsbereich. Da Masse und Energie nach Albert Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$ austauschbar sind, können sich zwei energiereiche Photonen beim Zusammenstoß spontan in ein Partikelpaar verwandeln – insbesondere in ein Elektron und sein Antiteilchen, ein Positron. Auf diese Weise wird die Energie der Photonen größtenteils in Form von Materie quasi eingefroren. Die Elektronen und Positronen üben aber viel weniger Druck aus als die Photonen, aus denen sie hervorgegangen sind. Während Letztere mit ihrem Strahlungsdruck den Kollaps des Sterns unter seinem eigenen Gewicht aufgehalten haben, wird der Kern nun instabil und beginnt, sich rasch zusammenzuziehen.

Instabil durch Paarerzeugung

Ebenso schlagartig steigt die Dichte, und das setzt die Sauerstofffusion in Gang. Da dies nicht in einem stabilen, sondern in einem kollabierenden Kern geschieht, läuft die Zündung explosiv ab: Die von der Fusion freigesetzte Energie heizt das Material weiter auf, und das wiederum beschleunigt die Fusion durch positive Rückkopplung. Der Stern kann in Minutenschnelle so viel Sauerstoff verbrennen, dass die dadurch erzeugte Energie die gesamte Gravitationsenergie des Sterns übersteigt. Darum vernichtet sich der Himmelskörper bei diesem Explosionstyp praktisch restlos, während typische Supernovae einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch hinterlassen. Zurück bleibt lediglich eine rasch expandierende Wolke, die größtenteils aus den bei der Explosion gebildeten Elementen besteht.

Die Theoretiker sagten voraus, diese so genannte Paarinstabilitätssupernova würde neben anderen relativ schwe-

ren Elementen eine riesige Menge Nickel-56 bilden. Das Isotop Ni-56 ist radioaktiv und wird letztlich zu nichtradioaktivem Eisen. Dann könnte unserer Ansicht nach der Zerfall von Ni-56 die starke Leuchtkraft von SN 2006gy erklären.

Gegen das theoretisch durchaus plausible Szenario sprach nur, dass es nach damals gängiger Meinung in der Natur nicht wirklich vorkam. Derart massereiche Sterne, hieß es, dürften sich gar nicht bilden, zumindest nicht im gegenwärtigen Universum. Und selbst wenn sie entstünden, würden sie so starke Sternwinde erzeugen, dass sie rasch den größten Teil ihrer Masse verlören und niemals genügend massereiche Kerne bilden könnten, um die Paarinstabilität zu erreichen. Bestenfalls knapp eine Milliarde Jahre nach dem Urknall wären die ersten Sterne schwer genug gewesen, um als Paarinstabilitätssupernovae zu explodieren – vielleicht.

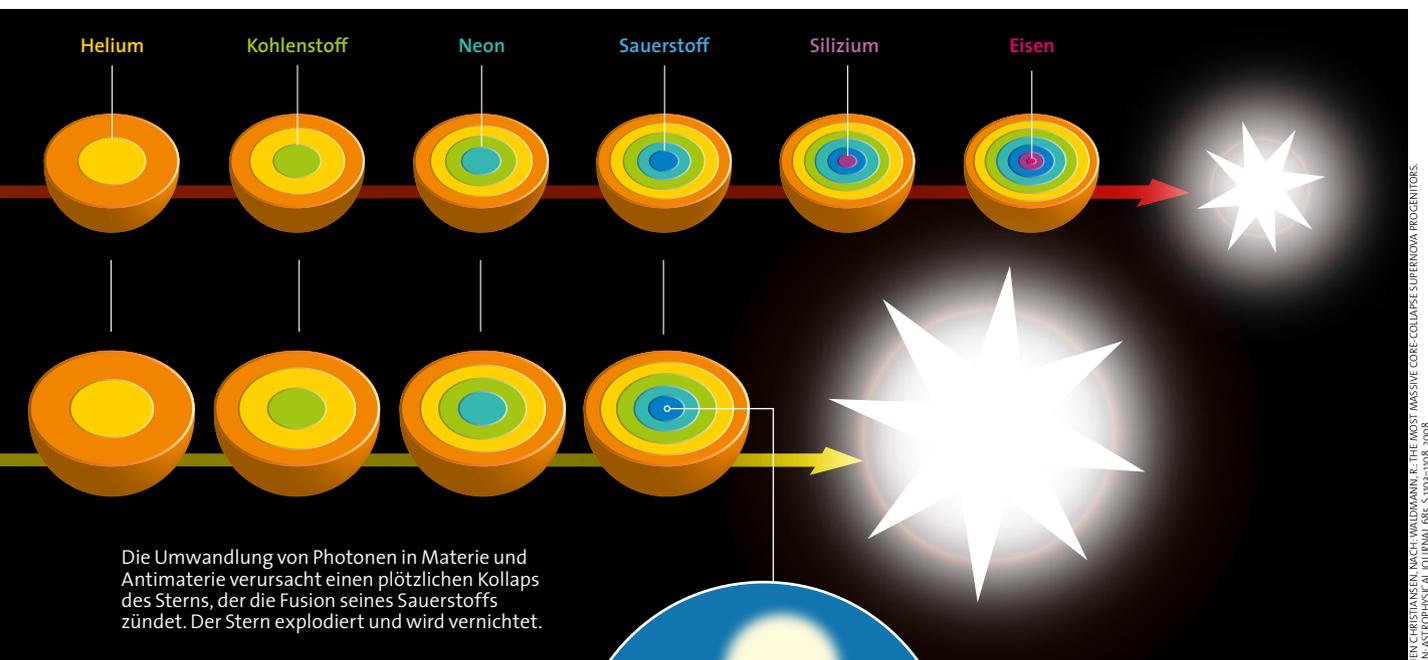
Unterdessen wurden viele Astronomen auf die spektakuläre neue Supernova SN 2006gy aufmerksam und begannen sie eifrig zu erforschen. Obwohl dabei das Paarinstabilitätsmodell eine Renaissance erlebte, schien es ausgerechnet auf SN 2006gy nicht zuzutreffen: Die Lichtkurve – das Abnehmen der Strahlung mit der Zeit – passte nicht zur Nickel-

W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema
»Supernovae« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/supernovae



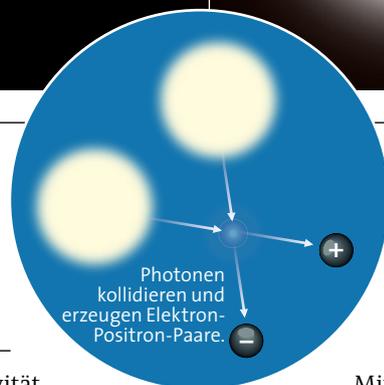
radioaktivität. Bei Paarinstabilität sollte das meiste Licht nicht von der Explosion selbst stammen, sondern von Ni-56 und den anderen dabei erzeugten Isotopen. Doch SN 2006gy leuchtete erst viele Monate und verschwand dann plötzlich – viel zu schnell für einen durch Radioaktivität angetriebenen Vorgang. Wahrscheinlich handelte es sich gar nicht um eine Paarinstabilitätssupernova, und unsere Alternativerklärung, die ungewöhnliche Helligkeit stamme von einer Stoßwelle, gewann die Oberhand. Doch nun suchte ich erst recht nach Paarinstabilitätseignissen.

Endlich ein Volltreffer?

Einige Monate nach dem Zufallstreffer trotz Wolken über Hawaii machte ich Urlaub in Colorado. Dort erreichte mich eine E-Mail von Peter Nugent vom Lawrence Berkeley National Laboratory. Wir beide hatten gerade mit dem Probeauftrag für eine große Supernova-Suche begonnen. Jetzt mailte er mir das höchst seltsame Spektrum einer Supernova. So etwas hatte ich noch nie gesehen.

Da die Atome jedes Elements Licht ganz bestimmter Wellenlängen absorbieren und aussenden, liefert das Spektrum einer astronomischen Quelle Informationen über ihre chemischen Bestandteile. Demnach musste Nugents Supernova namens SN 2007bi ungewöhnlich zusammengesetzt und extrem heiß sein.

Nach meiner Rückkehr zum Caltech verfolgte ich die weitere Entwicklung von SN 2007bi. Das Objekt emittierte rund zehnmal mehr Strahlung als eine typische Supernova, und die Lichtmenge nahm sehr langsam ab. Diese Quelle leuchtete einfach immer weiter – tage-, wochen-, monatelang.



Allmählich war ich überzeugt, wir hätten endlich eine Paarinstabilitätssupernova gefunden. Es dauerte über ein Jahr, bis sie schließlich verschwand. Aber ich brauchte mehr Daten, um sicher zu sein.

Daher setzte ich zusammen mit mehreren Mitarbeitern die Beobachtung von SN 2007bi mit Teleskopen des Palomar-Observatoriums am Caltech fort. Rund ein Jahr nach der Entdeckung dieser Explosion wurde ihre Strahlung schließlich schwächer; nun bat ich meine Caltech-Kollegen Richard Ellis und Kulkarni, sie mit den großen Keck-Teleskopen zu beobachten, und versprach ihnen, ein Durchbruch stehe kurz bevor.

Unterdessen zog ich mit meiner Familie nach Israel und begann meine gegenwärtige Tätigkeit am Weizmann Institute of Science in Rehovot. Im August 2008 sandten mir Kulkarni und sein Doktorand Mansi Kasliwal das neueste Spektrum von SN 2007bi. Bei einer ersten groben Analyse traute ich meinen Augen nicht: Diese Explosion produzierte eine unglaubliche Menge an Nickel-56, die fünf bis sieben Sonnenmassen gleichkam. Das war zehnmal mehr, als je beobachtet worden war – und genau das, was man von einer Paarinstabilitätssupernova erwarten durfte. Offenbar hatten wir wirklich eine große Entdeckung gemacht.

Ende 2008 reiste ich nach Garching, um mit Paolo Mazzali am Max-Planck-Institut für Astrophysik zu arbeiten. Als Koryphäe für die exakte Analyse von Supernova-Spektren sollte Mazzali meine grobe Schätzung überprüfen. Außerdem besaß er zusätzliche nützliche Daten, die er mit dem Very Large Telescope des European Southern Observatory in Chile gewonnen hatte. Die Resultate stimmten tatsächlich mit meiner früheren Einschätzung überein: mehrere Son-



nenmassen von Nickel-56 sowie relative Häufigkeiten anderer Elemente, die zum Paarinstabilitätsmodell passten.

Obwohl ich mir nun ziemlich sicher war, dass wir endlich eine Paarinstabilitätssupernova identifiziert hatten, legte ich die Daten nach meiner Rückkehr nach Israel beiseite und wandte mich wieder der anfangs untersuchten Supernova SN 2005gl zu. Als Fox, Leonard und ich Ende 2005 ihren mutmaßlichen Vorläufer gefunden hatten, konnten wir nicht ganz ausschließen, dass es sich dabei um einen Sterncluster handelte. Nun, drei Jahre später, war die Supernova verschwunden, und das ließ einen simplen Test zu: Falls unser Wunschkandidat nicht der explodierte Stern war, musste er noch immer da sein. Leonard und ich studierten noch einmal Hubble-Aufnahmen.

Ein zweiter Anlauf

Gegen Ende 2008 stand fest: Der Stern war verschwunden. Der Vorläufer von SN 2005gl musste wirklich sehr leuchtstark und wahrscheinlich ziemlich massereich gewesen sein – vergleichbar mit Eta Carinae, einem der schwersten blauen Riesen in unserer Galaxis. Damit war die herrschende Theorie für Hyperriesen – wonach sie ihre Masse größtenteils vor der Explosion einbüßen – zumindest in diesem Fall falsch. Es gibt also einige sehr helle und schwere Sterne, die explodieren, bevor sie all ihre Masse verlieren – und vielleicht existieren noch immer einige Hyperriesen, die als Paarinstabilitätssupernovae enden können.

Mit diesem Wissen kehrte ich zu SN 2007bi zurück und suchte intensiv nach Indizien für eine Paarinstabilitätsexplosion. Mein Team und ich analysierten das Spektrum und seine zeitliche Entwicklung; wir verglichen alte und neue Explosionsmodelle. Gegen Ende 2009 wussten wir mit fast unausweichlicher Sicherheit, dass SN 2007bi eine Paarinstabilitätssupernova war. Nach mehr als zwei Forschungsjahren konnten wir endlich unsere Resultate zu publizieren.

Seitdem haben wir drei weitere Ereignisse dieses Typs gesammelt. Alles in allem scheinen sie extrem selten vorzukommen – nur einmal unter 100 000 Supernovae – und setzen einen Stern von 140 bis 200 Sonnenmassen voraus. Sie gleichen riesigen Fabriken zur Elementsynthese und erzeugen

die energiereichsten Explosionen, die wir kennen. Damit verdienen sie den Namen Hypernovae.

Besonders faszinierend an dem neuen Supernova-Typ ist, dass er uns einen Blick ins frühe Universum gewährt. Die allerersten Sterne, die einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall zündeten, hatten 100 bis 1000 Sonnenmassen (siehe SdW 2/2002, S. 26). Manche dieser Giganten explodierten wahrscheinlich durch einen Paarinstabilitätsmechanismus. Somit waren die entfernten Verwandten einiger heutiger Supernovae die ersten, die das Universum mit schwereren Elementen versorgten und so Sterne und Planeten wie unsere Sonne und die Erde ermöglichten.

Unseren Beobachtungen zufolge sind auch im heutigen Universum – entgegen früherer Meinung – Hyperriesen wohl gar nicht so selten. Urtümliche Sterne konnten nur in einem fast reinen Wasserstoff- und Heliummilieu extrem groß werden. Bald bremste die Anreicherung von Produkten nuklearer Fusionsprozesse das Sternwachstum. In Anwesenheit schwererer Elemente kollabieren Sterne schneller und zünden deshalb früher; das umgebende Gas wird weggeblasen, bevor der Stern es sich einverleiben und weiterwachsen kann. Aber offenbar bremsen die schwereren Elemente das Sternwachstum nicht so stark, wie Astrophysiker geglaubt haben.

Die 2007 von Nugent und mir geplante Supernova-Suche ist nun in vollem Gang; sie heißt Palomar Transient Factory (etwa: Palomar-Fabrik für veränderliche Quellen). Im Rahmen des Projekts suchen wir nach weiteren Paarinstabilitätsexplosionen; tatsächlich fanden wir dabei einen Kandidaten, der SN 2007bi ähnelt. Künftige Instrumente wie das James-Webb-Weltraumteleskop der US-Weltraumbehörde NASA werden wahrscheinlich auch sehr weit entfernte Paarinstabilitätsexplosionen aufspüren können. Vielleicht werden sie eines Tages sogar das spektakuläre Ende der allerersten Sterne enthüllen, die unser Universum hervorgebracht hat. ~

DER AUTOR



Avishay Gal-Yam promovierte an der Universität Tel Aviv (Israel) in Astrophysik und forschte dann am California Institute of Technology in Pasadena. Jetzt ist er außerdem leitender Wissenschaftler am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel).

QUELLEN

- Gal-Yam, A., Leonard, D. C.:** A Massive Hypergiant Star as the Progenitor of the Supernova SN 2005gl. In: *Nature* 458, S. 865–867, 2009
- Gal-Yam, A. et al.:** Supernova 2007bi as a Pair-Instability Explosion. In: *Nature* 462, S. 624–627, 2009
- Hillebrandt, W. et al.:** Rätselhafte Supernova-Explosionen. In: *Spektrum der Wissenschaft* 7/2005, S. 36–45

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155294

Gleich und Gleich gesellt sich gern

Objekte, die auf Wasseroberflächen schwimmen, verhalten sich oft unerwartet. Verantwortlich dafür sind die beteiligten Grenzflächenenergien.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Warum lagern sich Tannennadeln in Pfützen und Teichen gerne zusammen (siehe Foto unten)? Warum schwimmen Styroporkügelchen auf einer Wasseroberfläche mal zu deren Rand, mal aber auch zu deren Mitte hin (Foto S. 50 oben)? Und warum ziehen nahe den Kügelchen platzierte Heftzwecke diese zunächst an, um sie anschließend doch in die Flucht zu treiben? Und vor allem: Was hat all dies miteinander zu tun?

Auf eine erste Gemeinsamkeit stoßen wir schnell. Ähnlich wie Tannennadeln sind auch Styroporkugeln äußerst gesellig – genauso wie Blasen, die aus einem gefüllten Champagnerglas aufsteigen. Kaum haben sie die Oberfläche erreicht, tun sie sich zusammen. Dabei zeigt sich eine weitere Auffällig-

keit: Stets scheint der Glasrand die schwimmenden Objekte magisch anzuziehen.

Allerdings lässt sich diese Tendenz umkehren. Platziert man einige Styroporkügelchen auf der Oberfläche des Wassers in einem Glas, bewegen sie sich erwartungsgemäß zum Rand und bleiben dort gewissermaßen hängen. Füllt man das Glas aber vorsichtig weiter auf, bis sich das Wasser linsenförmig über dessen Rand wölbt, lösen sich die Kügelchen wieder und wandern zur Mitte.

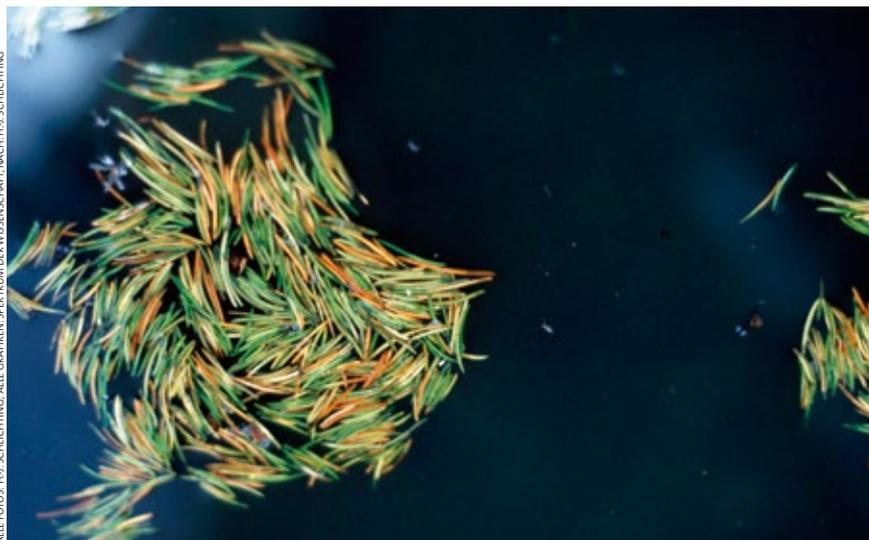
Das Verbindende der entgegengesetzten Verhaltensweisen liegt darin, dass die Bewegung stets zur höchsten Stelle der Wasseroberfläche gerichtet ist. Im Fall des übervollen Glases liegt diese in der Mitte der aufgewölbten

Linse, im Fall des weniger gefüllten Glases liegt sie am Glasrand. Denn dort zieht sich das Wasser ein Stück weit am inneren Glasrand hoch (siehe Grafik S. 50 unten). Mit dieser Feststellung spitzt sich das Problem aber eher noch zu. Nun müssen wir nicht nur die gegen die Schwerkraft gerichtete Bewegung des Styropors erklären, sondern auch die des Wassers, das die Glaswand emporklettern.

Rücken wir der Angelegenheit zunächst mit einem allgemeinen physikalischen Prinzip zu Leibe: Natürliche Vorgänge laufen stets so ab, dass dabei so viel Energie wie möglich an die Umgebung abgegeben wird. Eine Styroporkugel rollt also genau deshalb zum jeweils tiefsten Punkt ihrer Umgebung und bleibt dort schließlich liegen, weil

Vielleicht ist viel mehr an der Oberfläche – vielleicht ist alles falsch, was nicht Oberfläche ist?

Elias Canetti (1905–1994)



Tannennadeln auf einer Wasserpfütze lagern sich gerne zusammen, denn auf diese Weise senken sie die Energie des Gesamtsystems »Tannennadeln / Pfütze«.



Styroporkugeln auf einem Wassertropfen driften zu dessen höchster Stelle.

sie auf diese Weise Energie durch Wärme an die Luft und den Boden abgeben kann. In der Schule wurde uns zwar eher beigebracht, in einer solchen Situation mit der nach unten gerichteten Schwerkraft zu argumentieren; doch die energetische Betrachtungsweise ist völlig äquivalent.

Entgegen der Schwerkraft zieht sich das Wasser am Glas hoch

An diesem Prinzip kommen natürlich auch die Styroporkügelchen in unserem Experiment nicht vorbei, obschon sie das Gegenteil dessen tun, was wir spontan erwarten würden. Das liegt daran, dass neben der Höhen- auch die so genannte Grenzflächenenergie eine Rolle spielt.

Gemäß dem genannten Prinzip wachsen jene Grenzflächen bevorzugt, für deren Ausbildung besonders wenig Grenzflächenenergie nötig ist, die also

überschüssige Energie an die Umgebung abgeben können. Und weil die Grenzfläche zwischen Wasser und Glas viel weniger Energie benötigt als die zwischen Glas und Luft, neigt das Wasser dazu, sich an der Glaswand »hochzuziehen«. Die dabei gewonnene Energie ist so groß, dass auch die damit verbundene Zunahme der Grenzflächenenergie Wasser/Luft ebenso wie die der Höhenenergie des Wassers kompensiert werden kann – zumindest so lange, bis ein bestimmter Gleichgewichtszustand erreicht ist, der sich durch einen charakteristischen Kontaktwinkel zwischen Glas, Wasser und Luft auszeichnet.

Ähnlich wie die Glaswand würden sich auch Styroporkugeln gern vollständig mit Wasser umgeben. Doch hier tritt ebenfalls bald ein Gleichgewichtszustand ein; das Wasser wird also nur ein Stück weit an den Styroporkugeln hochgezogen und bildet – genau wie am Glasrand – einen konkaven, nach unten gekrümmten Meniskus aus. Was geschieht nun als Nächstes? Um das herauszufinden, müssen wir überlegen, wie das System in einen Zustand mit noch geringerer Energie gelangen könnte. Richtig: Indem sich die Styroporkugeln zum Glasrand bewegen, können sie, wie die unten stehenden Illustrationen zeigen, die Grenzflä-

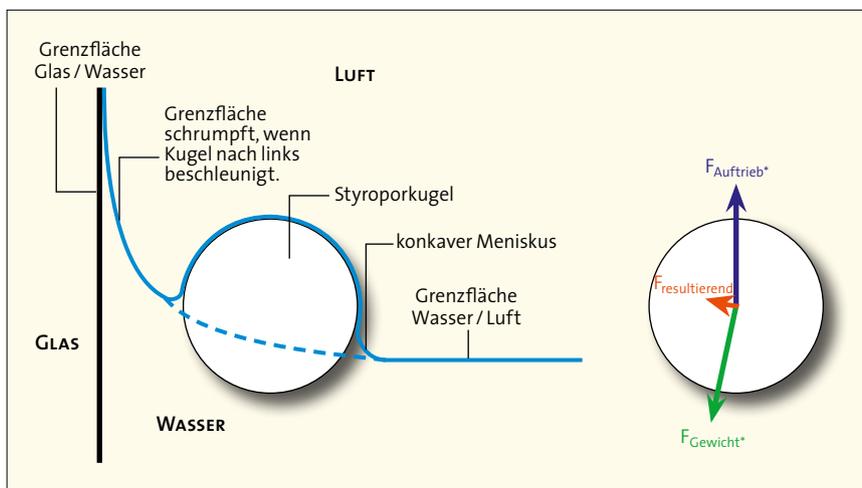
che zwischen Luft und Wasser weiter verkleinern.

Statt über Energien zu sprechen, können wir all dies ebenso mit Kräften beschreiben. Betrachten wir die Illustration unten noch einmal. Legt man die Styroporkugeln auf die Wasseroberfläche, sinken sie so lange tiefer, bis die dabei wachsende Auftriebskraft des Wassers die Gewichtskraft der Kugeln gerade ausgleicht.

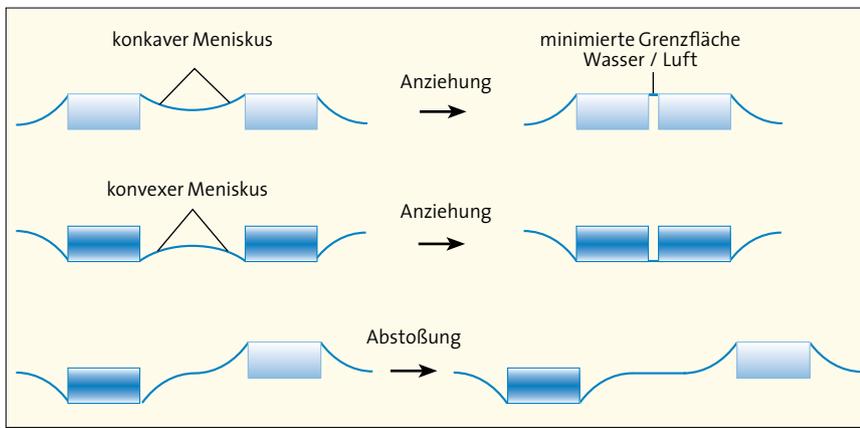
Zusätzlich werden die Kugeln durch hochsteigendes Wasser teilweise benetzt. Dadurch wächst ihre Masse, so dass sie durch die Kraft F_{Gewicht^*} ein wenig tiefer ins Wasser »gezogen« werden. Entsprechend kommt eine zusätzliche Auftriebskraft F_{Auftrieb^*} ins Spiel. Der Stern (*) deutet an, dass nur diejenigen Kräfte gemeint sind, die durch die Benetzung zusätzlich wirken.

Sobald die Wasseroberfläche auch nur ein wenig gekrümmt ist, heben sich beide Kräfte nicht einfach auf, sondern addieren sich zu einer kleinen Kraft $F_{\text{resultierend}}$, die in Richtung des Glasrands zeigt und die Kugel an der geeigneten Oberfläche hochgleiten lässt. Deshalb treiben auf dem Wasser schwimmende Gegenstände, zumindest wenn ihre Dichte geringer ist als die des Wassers, stets zur höchsten Stelle.

So wird die Anhänglichkeit der Tannennadeln verständlich. Jede von ihnen ist von einem konkaven Wasser-meniskus umgeben. Sobald nun eine Nadel die andere »spürt« – genauer: die von deren Meniskus ausgehende



An einer Styroporkugel, die auf einer Wasseroberfläche schwimmt (links), zieht sich Wasser hoch und bildet konkave Menisken aus. Durch die Benetzung wird die Kugel mit der zusätzlichen Kraft F_{Auftrieb^*} weiter ins Wasser gezogen, als es allein auf Grund ihrer Gewichtskraft der Fall wäre. Dies ruft die zusätzliche Kraft F_{Auftrieb^*} hervor. Bei gekrümmten Oberflächen wirken die Kräfte in leicht unterschiedliche Richtungen (rechts), so dass eine Kraft $F_{\text{resultierend}}$ die Kugel zum Glasrand hin beschleunigt. So schrumpft die Grenzfläche Wasser/Luft und damit deren Energie.



Auf einer Wasseroberfläche können zwei Objekte mit konkaven (obere Zeile) oder konvexen Menisken (mittlere Zeile) die Größe und damit die Energie der Grenzfläche zwischen ihnen minimieren, indem sie sich aufeinander zubewegen. Spürt hingegen ein konkaver Meniskus die Gegenwart eines konvexen, stoßen sich beide voneinander ab (unten).

Krümmung –, entsteht auch hier eine kleine resultierende Kraft, die beide aufeinander zutreibt. Oft verhaken sich die Nadeln allerdings, so dass sie keine energetische Minimalkonfiguration erreichen, sondern sich nur abschnittsweise parallel ausrichten.

Objekte, die dichter sind als Wasser, lassen sich ebenfalls zum Schwimmen bringen. Legt man eine Heftzwecke vorsichtig mit ihrem »Kopf« auf die Wasseroberfläche, so geht sie nicht unter, weil sie zusätzlich zur Auftriebskraft von der elastischen »Wasserhaut« wie von einer gespannten Folie gehalten wird (siehe Fotos unten).

Während jedoch eine Styroporkugel mit einem konkaven Meniskus einhergeht, delt die schwerere Heftzwecke die Wasseroberfläche ein und umgibt sich mit einem konvexen Meniskus. Die senkrecht zur Wasseroberfläche wirkende Reaktionskraft, die sich aus

Grenzflächen- und Auftriebskraft zusammensetzt, bewirkt schließlich, dass die Heftzwecke an der tiefsten Stelle der Delle zur Ruhe kommt.

Wahlweise schnelle Annäherung oder überstürzte Flucht

Sobald jedoch eine weitere Heftzwecke in der Nähe ist, nehmen beide von ihren Menisken Notiz und bewegen sich aufeinander zu, weil dadurch die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft verkleinert wird (siehe Grafik oben.) Heftzwecken neigen also ebenso wie Styroporkugeln zur Geselligkeit mit ihresgleichen, suchen sie allerdings in tiefen Regionen. In normal gefüllten Gläsern findet man sie daher eher in der Mitte, in übervollen Gläsern driften sie stattdessen schnell zum Rand, über den sie meist sogar hinauschießen.

Die Beobachtung der Menisken erinnert übrigens stark an magnetische

und elektrische Phänomene. Doch dort stoßen gleichnamige Pole oder Ladungen einander stets ab; im Fall der konkaven und konvexen Menisken an der Wasseroberfläche findet hingegen Gleiches zu Gleichem.

Setzt man, am besten mit Hilfe einer Pinzette, eine Heftzwecke in die Nähe einer bereits auf dem Wasser befindlichen zweiten Heftzwecke, so macht man eine weitere, nun leicht zu erklärende Entdeckung. In dem Moment, in dem die Heftzwecke das Wasser so eben berührt, ergreift die andere überstürzt die Flucht. Dafür eilt aber eine nicht allzu weit entfernte Styroporkugel heran. Erst wenn wir die Heftzwecke loslassen und der konkave Meniskus, der bei der leichten Berührung des Wassers entstanden ist, sich in einen konvexen umstülpt, sucht die Styroporkugel erneut das Weite, während die vertriebene Heftzwecke zurückkehrt. ~



Heftzwecken dellen eine Wasseroberfläche konvex ein (links). »Spüren« sie die Krümmung der Oberfläche, die von einer zweiten Heftzwecke in ihrer Nähe verursacht wird, treiben beide aufeinander zu (rechts).

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.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155296

Ein Abenteuer in n Dimensionen

Eine Kugel passt gerade noch in eine Kiste, und doch ist sie darin praktisch nicht mehr zu finden. Solche Merkwürdigkeiten erwarten jeden Besucher hochdimensionaler Räume.

Von Brian Hayes

Wie jeder Schüler habe ich brav die Formeln für den Flächeninhalt des Kreises (πr^2) und für das Volumen der Kugel ($(4/3)\pi r^3$; r bezeichnet wie üblich den Radius von Kreis beziehungsweise Kugel) auswendig gelernt – und bin, wie so ziemlich jeder Schüler, nicht auf die Idee gekommen, ernsthaft über sie nachzudenken. Gibt es eine Beziehung zwischen den beiden? Lassen sie sich über die vertraute Welt der zwei- und dreidimensionalen Objekte hinaus auf höhere Dimensionen verallgemeinern? Was ist das »Volumen« einer vierdimensionalen »Kugel«? Gibt es vielleicht eine allgemeine Formel, die ein Inhaltsmaß für das »runde Standardobjekt« im n -dimensionalen Raum angibt?

Erst ungefähr 50 Jahre nach meiner ersten Begegnung mit den genannten Formeln hatte ich endlich Anlass – und Gelegenheit –, mich mit diesen Fragen ausführlicher zu befassen. Die allgemeine Formel für das Volumen der n -dimensionalen Kugel war dank Google und Wikipedia schnell zu finden (siehe unten). Aber die Abhängigkeit des Volumens von der Dimension widersprach nicht nur meinen Erwartungen; sie zählt zum Verrücktesten, was mir je in der Mathematik begegnet ist. Mit Erschrecken musste ich feststellen, dass mir

ein wahrhaft bemerkenswertes Phänomen ein halbes Jahrhundert lang verborgen geblieben war.

In jenen Kindheitstagen, als ich die Volumenformel auswendig lernte, spielten wir auch viel mit Bällen – und ärgerten uns jedes Mal über die Unterbrechung, wenn ein Ball im Gebüsch landete. Damals wusste ich es noch nicht; aber wir konnten von Glück reden, dass unser Spielfeld nur die Dimension 2 hatte. Hätten wir den Ball in einem höherdimensionalen Raum verloren, würden wir vermutlich noch heute nach ihm suchen.

Verloren im Raum

Der Mathematiker Richard Bellman hat dieses Phänomen »den Fluch der Dimensionen« (»the curse of dimensionality«) genannt: Mit zunehmender Dimensionszahl wird es immer schwieriger, ein bestimmtes Ding zu finden oder seine Größe zu messen. Das hat ganz praktische Konsequenzen. Ein Standardproblem der angewandten Mathematik ist das Lösen eines Gleichungssystems mit mehreren Unbekannten. Das läuft darauf hinaus, einen Punkt in einem mehrdimensionalen Raum zu finden – eine Dimension für jede Unbekannte. Ebenso verhält es sich mit Optimierungsproblemen: Jede Größe, die man variieren kann, entspricht einer Dimension. Je mehr Unbekannte oder Variable, desto leichter verirrt man sich im Raum der Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit, den Fluch der Dimensionen zu veranschaulichen, ist die Kugel in der Kiste (ball in a box). Man packe eine n -dimensionale Kugel in einen n -dimensionalen Würfel, der genau so groß ist, dass die Kugel eben hineinpasst. Mit zunehmendem n nimmt der Anteil des Würfelvolumens, der von der Kugel ausgefüllt wird, dramatisch ab.

Im Deutschen versteht man übrigens unter »Kugel« sowohl das massive runde Objekt als auch dessen Oberfläche, die korrekt als »Sphäre« zu bezeichnen ist. Genau genom-

AUF EINEN BLICK

N-DIMENSIONALE KUGELN UND WÜRFEL

- Die Begriffe **Kugel** und **Würfel** lassen sich ohne Weiteres auf Räume hoher Dimension verallgemeinern.
- Mit **zunehmender Dimension** nimmt eine Kugel einen immer kleineren Teil des sie eng umschließenden Würfels ein.
- Für n gegen unendlich strebt das Volumen der **n -dimensionalen Einheitskugel** sogar gegen null.

men ist eine Sphäre definiert als die Menge aller Punkte, die von einem gegebenen Punkt, dem »Mittelpunkt«, den Abstand r haben – den Radius der Sphäre. Eine Kugel dagegen ist die Menge aller Punkte, deren Abstand vom Mittelpunkt kleiner oder gleich dem Radius r ist. Was der Abstand zweier Punkte sein soll, ist auch in Räumen beliebiger Dimension einfach und einleuchtend definierbar.

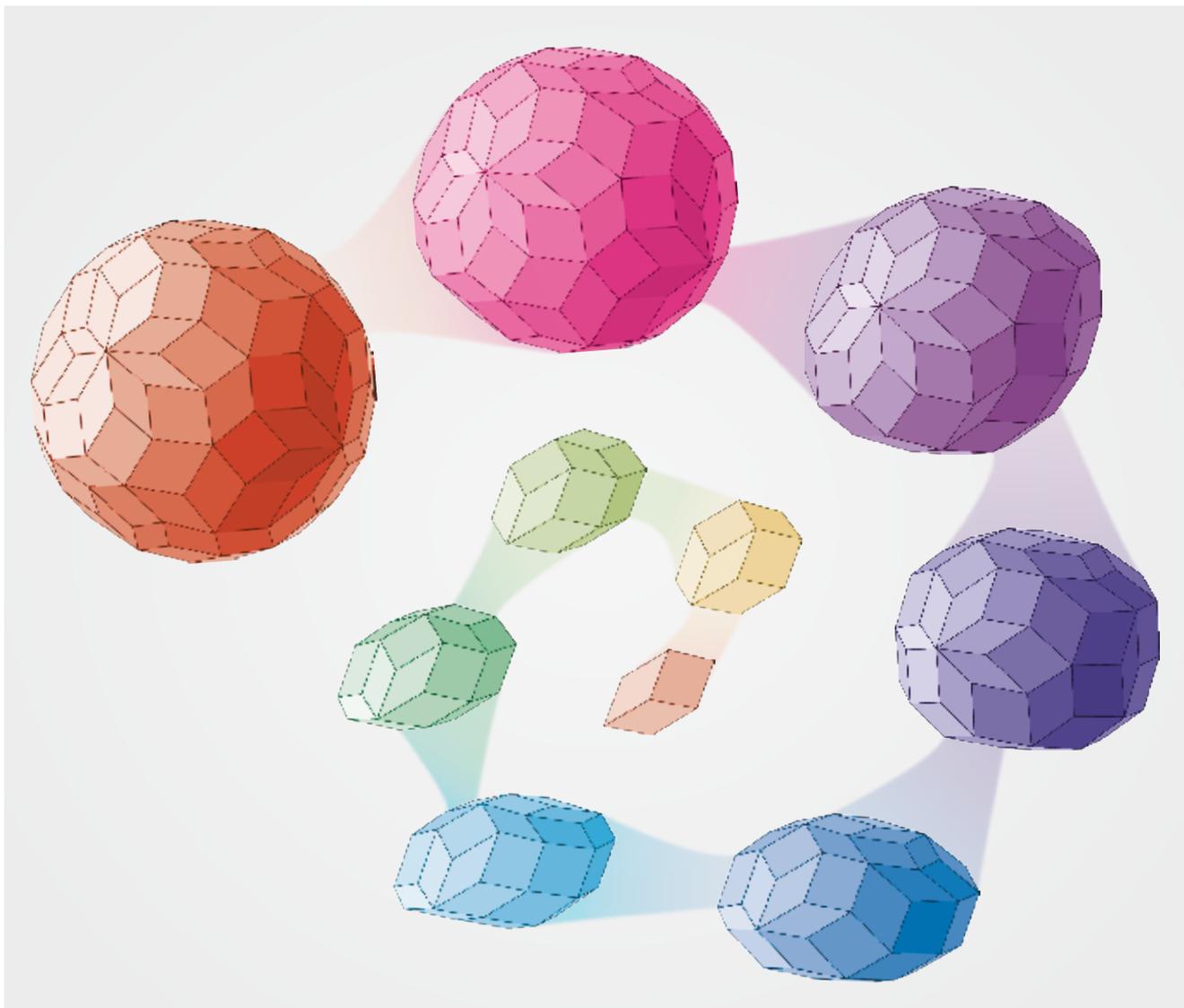
Eine Kugel im n -dimensionalen Raum wird kurz als » n -Kugel« bezeichnet; entsprechend ist das Wort » n -Würfel« zu verstehen. Bei dem Begriff » n -Sphäre« ist Vorsicht geboten, denn die Topologen verstehen darunter den Rand der

$(n+1)$ -dimensionalen Kugel. So ist die 2-Sphäre die Oberfläche unserer vertrauten 3-Kugel – für einen Topologen eine sinnvolle Bezeichnung, weil es sich um eine zweidimensionale Fläche handelt (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 7/2012, S. 60).

Die allgemeine Formel

Eine n -Kugel vom Radius 1 (»Einheitskugel«) passt genau in einen n -Würfel der Kantenlänge 2. Die Oberfläche der Kugel berührt dabei die Mittelpunkte jeder Seitenfläche des Würfels. Welchen Teil des Würfelvolumens füllt die Kugel aus?

Die Einheitswürfel der Dimensionen 3 bis 12 in der Projektion in den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum. Diese Darstellung zeigt zwar, dass die Eckenzahl mit der Dimension ansteigt, untertreibt aber diesen Anstieg gewaltig: In Wirklichkeit hat der 12-Würfel bereits $2^{12} = 4096$ Ecken! Eine »Seitenfläche« eines n -dimensionalen Würfels ist nichts weniger als ein kompletter Würfel der nächstniederen Dimension $n-1$. Die Vorlagen zu diesem Bild stammen aus dem Buch »Discovering Rhombic Polyhedra No. 3« von Naoki Yoshimoto.



GRAFIK: KATSUWA KATO, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, MIT FRIEDRICH GEN. VON CASPAR SCHWABE

In den niedrigdimensionalen Räumen, mit denen wir vertraut sind, lässt sich diese Frage sehr einfach beantworten (Bilder rechts). Ganz unten in dieser Hierarchie befindet sich die eher langweilige Dimension 1. Eine 1-Kugel mit $r=1$ und ein 1-Würfel mit $s=2$ sind ein und dasselbe Objekt – eine Strecke der Länge 2. In der Dimension 1 füllt die Kugel also den Würfel komplett aus, das Volumenverhältnis ist genau 1,0.

In Dimension 2 ist eine Kugel in einem Würfel nichts anderes als eine Kreisscheibe in einem Quadrat; also kann sich eine der Formeln aus meiner Schulzeit nützlich machen. Für $r=1$ ergibt die Flächeninhaltsformel πr^2 den Wert π , während für den Inhalt der Quadratfläche $s^2=4$ gilt. Das Verhältnis dieser beiden Zahlen beträgt etwa 0,79. In drei Dimensionen ergibt sich für das Volumen der Kugel $(4/3)\pi$ und für das des Würfels 8; das macht ein Verhältnis von ungefähr 0,52.

Die unglaubliche schrumpfende n -Kugel

Es sieht so aus, als würde die Kugel mit zunehmendem n einen immer kleineren Teil des Würfels ausfüllen. Es gibt auch einen einleuchtenden Grund dafür, warum sich diese Tendenz fortsetzen sollte: Die von der Kugel nicht bedeckten Bereiche des Würfels liegen in dessen Ecken. Wächst n um 1, dann verdoppelt sich die Zahl der Ecken. Es ist also zu erwarten, dass die Kugel einen zunehmenden Teil des Würfelvolumens – nämlich den in der Nähe der Ecken – nicht mehr erreicht.

Wer es genauer wissen will, muss die Volumina für $n > 3$ ausrechnen. Für den Würfel ist das nicht schwierig: Ein n -Würfel der Kantenlänge s hat das Volumen s^n ; einer, in den eine Einheitskugel passt, muss die Kantenlänge 2 und damit das Volumen 2^n haben.

Wie aber steht es mit der n -Kugel? Wie schon erwähnt hat mich meine Schulbildung nicht mit den dafür nötigen Formeln ausgerüstet, aber nach wenigen Klicks liefert Wikipedia (in der deutschen Version unter »Kugel«) die gesuchte Volumenformel:

$$V(n, r) = \frac{\pi^{\frac{n}{2}} r^n}{\Gamma\left(\frac{n}{2} + 1\right)}$$

Das Einzige, was in ihr über den Schulstoff hinausgeht, ist die Gammafunktion Γ . Das ist eine Verallgemeinerung der Funktion, die man mit dem Ausrufezeichen schreibt und »Fakultät« nennt. Es gilt $\Gamma(n+1) = n! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n$ für jede natürliche Zahl n . Im Unterschied zur Fakultät ist die Gammafunktion aber nicht nur für natürliche Zahlen, sondern für jede reelle Zahl definiert; zum Beispiel ist $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$.

Kaum hatte ich die Formel gefunden, wollte ich sie ausprobieren. Also schrieb ich ein einzeliges Programm in der algebraischen Programmiersprache »Mathematica« und ließ mir eine Tabelle mit dem Volumen der Einheitskugel in verschiedenen Dimensionen ausgeben. Dabei hatte ich klare Erwartungen: Ich nahm an, dass das Volumen der Einheitskugel mit wachsendem n beständig größer würde, allerdings in geringerem Maß als das des Würfels mit $s=2$, der sie ge-

nau umschließt. Das würde Bellmans Behauptung vom Fluch der Dimensionen bestätigen. Die ersten Tabellenwerte sahen auch entsprechend aus:

n	$V(n, 1)$
1	2
2	$\pi \approx 3,1416$
3	$\frac{4}{3}\pi \approx 4,1888$
4	$\frac{1}{2}\pi^2 \approx 4,9348$
5	$\frac{8}{15}\pi^2 \approx 5,2638$

Vor allem waren die Werte für 1, 2 und 3 diejenigen, die ich bereits kannte – diese Art von Bestätigung ist immer eine Beruhigung, wenn ein Programm zum ersten Mal läuft. Außerdem wächst das Volumen mit zunehmendem n , aber zunehmend langsamer, genau wie erwartet.

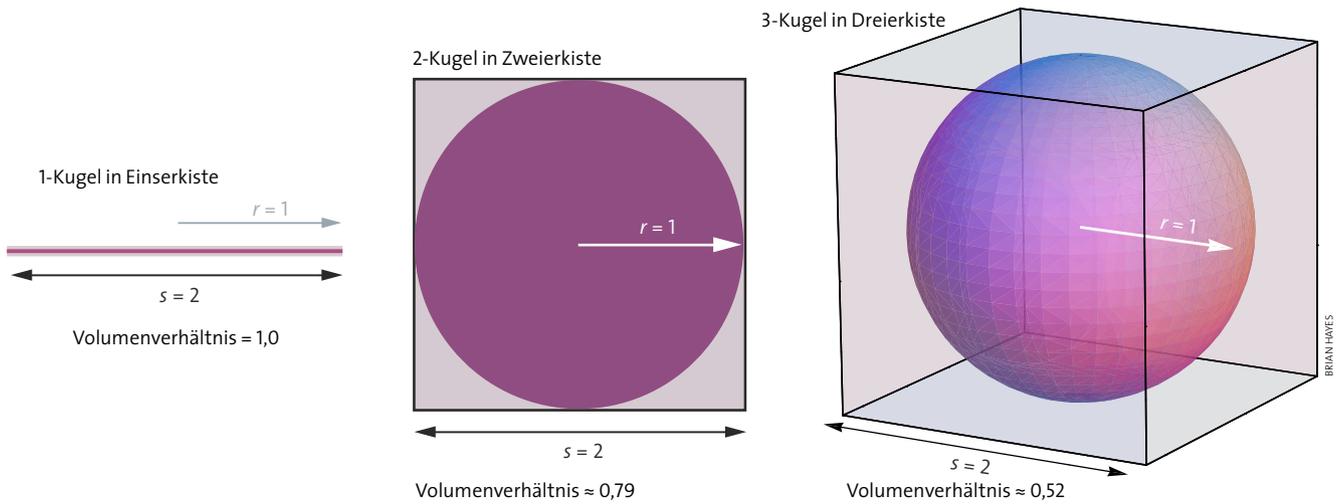
Dann allerdings fiel mein Blick auf die weiteren Tabellenzeilen:

n	$V(n, 1)$
1	2
2	$\pi \approx 3,1416$
3	$\frac{4}{3}\pi \approx 4,1888$
4	$\frac{1}{2}\pi^2 \approx 4,9348$
5	$\frac{8}{15}\pi^2 \approx 5,2638$
6	$\frac{1}{6}\pi^3 \approx 5,1677$
7	$\frac{16}{105}\pi^3 \approx 4,7248$
8	$\frac{1}{24}\pi^4 \approx 4,0587$
9	$\frac{32}{945}\pi^4 \approx 3,2985$
10	$\frac{1}{120}\pi^5 \approx 2,5502$

Von Dimension 5 an nimmt das Volumen der Einheits- n -Kugel mit wachsendem n ab! Ich versuchte es noch mit einigen größeren Werten für n und lernte, dass $V(20,1)$ ungefähr 0,0258 ist und $V(100,1)$ in der Nähe von 10^{-40} liegt. Das sieht ganz so aus, als würde sich die n -Kugel für n gegen unendlich ins Nichts verkrümmeln!

Doppelt verflucht

Ich hatte immer gedacht, ich hätte Bellmans Fluch verstanden. Sowohl die n -Kugel als auch der n -Würfel werden mit zunehmendem n immer größer, aber der Würfel wächst schneller. Es ist aber noch viel schlimmer: Während der Würfel sich exponentiell ausdehnt, schrumpft die Kugel nicht nur relativ, sondern auch absolut zur Bedeutungslosigkeit zusammen. Im 100-dimensionalen Raum ist das Verhältnis von Kugel- zu Würfelvolumen auf den Wert $1,8 \cdot 10^{-70}$ gefallen. Das ist deutlich kleiner als das Verhältnis vom Volumen eines Atoms zu dem der Erde. Die Kugel in der Kiste ist so gut



Packt man eine Kugel mit Radius 1 in eine würfelförmige Kiste der (kleinstmöglichen) Kantenlänge 2, so nimmt die Kugel mit zunehmender Dimension einen immer kleineren Anteil des Würfelvolumens ein. Bei der Dimension 100 ist dieser Anteil auf unvorstellbar winzige $1,8 \cdot 10^{-70}$ geschrumpft.

wie verschwunden. Wenn man zufällig eine Billion Punkte im Innern des Würfels wählt, dann ist die Wahrscheinlichkeit dafür, auch nur mit einem davon die Kugel zu treffen, praktisch null.

Wohlgemerkt: Die fragliche Kugel ist nach wie vor die größte, die überhaupt in den Würfel hineinpasst. Wir sprechen nicht über eine einsame Erbse, die lose in einer Tiefkühlpackung klappert. Der Durchmesser der Kugel stimmt genau mit der Kantenlänge des Würfels überein, und ihre Oberfläche berührt jede seiner Seiten. (Eine Seite des n -Würfels ist ein $(n-1)$ -Würfel, siehe auch Bild S. 53.) Die Kugel sitzt absolut stramm in der Kiste – wäre sie nur eine Winzigkeit größer, würde sie den Behälter an allen Seiten ausbeulen. Nach Volumen gemessen existiert sie jedoch kaum – wie ein Schwarzes Loch, das durch den Kollaps seiner gewaltigen Masse nur noch einen Punkt im Raum einnimmt.

Lässt sich dieses Paradoxon irgendwie begreiflich machen? Nun, man kann es immerhin ein bisschen ausmalen. Hier mein erster Vorschlag. Die Kugel füllt zwar die Mitte des Würfels vollständig, nur hat der Würfel nicht viel Mitte. Fast sein gesamtes Volumen sitzt »außen«, sozusagen in den Ecken. Das sieht man durch simples Abzählen: Die Kugel berührt jede Seite des Würfels in deren Mittelpunkt, reicht aber in keine seiner Ecken. Ein 100-Würfel hat gerade einmal 200 Seiten, aber 2^{100} Ecken!

Aber man weiß doch, dass die Kugel in der Mitte vom Würfel sitzt! Statt per Zufall nach ihr zu suchen, kann man es doch so einrichten, dass sie mit Sicherheit getroffen wird. Das führt auf die zweite Idee: Man steche in Gedanken Spieße durch den gemeinsamen Mittelpunkt von Kugel und Würfel. Damit trifft man zwar mit Sicherheit die Kugel, doch selbst mit dieser massiven Nachhilfe hat die Kugel nicht viel Anteil an der Spießlänge.

Zwar gehen die kürzesten Spieße vom Mittelpunkt einer Würfelseite zu dem der gegenüberliegenden Würfelseite. Sie haben damit die Länge 2, was gleich der Kantenlänge des Würfels und dem Durchmesser der Kugel ist, und liegen komplett innerhalb der Kugel. Andererseits verlaufen die längsten Spieße zwischen zwei einander diagonal gegenüberliegenden Eckpunkten des Würfels. In einem n -Würfel der Kantenlänge $s=2$ ist der Abstand dieser Punkte $2\sqrt{n}$. In dem 100-Würfel, der eine Einheitskugel derselben Dimension einschließt, hat der längste Durchmesser also die Länge 20. Nur ein Zehntel dieses Spießes befindet sich innerhalb der Kugel. Außerdem gibt es insgesamt nur 100 kürzeste Spieße, aber 2^{99} längste.

Die dritte und verblüffendste Idee verdanke ich dem Wissenschaftsjournalisten Barry Cipra. In der Ebene passen in ein Quadrat der Kantenlänge 4 vier Einheitskreise, angeordnet in zwei Zeilen und zwei Spalten. In der Mitte bleibt dabei noch Platz für eine kleinere Kreisscheibe vom Radius $\sqrt{2}-1$. In drei Dimensionen fasst der entsprechende 3-Würfel acht Einheits-3-Kugeln und eine zusätzliche neunte vom Radius $\sqrt{3}-1$ in der Mitte. Allgemein kann man einen n -Würfel der Kantenlänge 4 stramm mit 2^n Einheits- n -Kugeln füllen, wenn die säuberlich – entlang jeder Dimension immer zwei nebeneinander – angeordnet sind. In die Mitte passt dann noch eine zusätzliche Kugel mit Radius $\sqrt{n}-1$.

Sehen wir uns an, was bei $n=9$ geschieht. Die »kleinere« Kugel in der Mitte hat jetzt den Radius 2, das ist doppelt so viel wie die $2^9 = 512$ sie umgebenden. Außerdem stößt sie an jede Seite des umgebenden Würfels an. Nimmt die Dimension weiter zu, dann sprengt die »kleine« Mittelpunktskugel die Kiste!

Warum ausgerechnet Dimension 5?

Dass das Volumen der Einheits- n -Kugel für n gegen unendlich gegen null strebt, war schon eine Überraschung. Aber noch erstaunlicher fand ich die Tatsache, dass es nicht monoton von der Dimension abhängt (Bilder S. 57 oben). Es ist schwer genug zu glauben, dass das Volumen für große Dimensionen immer kleiner wird; aber wieso wird es anfangs größer, so dass es zwischendurch ein Maximum annimmt?

Was ist so speziell am fünfdimensionalen Raum, dass sich die Einheitskugel darin breiter macht als in jeder anderen Dimension?

Ich kann eine Antwort anbieten, die leider in Wirklichkeit nicht viel erklärt: Alles hängt mit dem Wert von π zusammen. Weil π etwas größer als 3 ist, wird das maximale Volumen in Dimension 5 erreicht; wäre π zum Beispiel 17, würde das Volumen sein Maximum in der Dimension 33 annehmen.

Wie das? Schauen wir uns die Formel für das Volumen der n -Kugel genauer an. Da wir uns nur für Einheitskugeln interessieren, ist stets $r=1$, und wir können den Term r^n ignorieren. Damit bleibt die Potenz von π im Zähler und die Gammafunktion im Nenner. Betrachten wir nur gerade Werte für n , dann ist $n/2$ immer eine natürliche Zahl, und wir können die Gammafunktion durch die Fakultät ersetzen. Zur Abkürzung setzen wir $m=n/2$; dann nimmt die Volumenformel die Gestalt $\pi^m/m!$ an.

Daraus entnehmen wir, dass das Volumen der Einheits- n -Kugel durch einen Wettlauf zwischen π^m und $m!$ bestimmt ist. Anfangs, für kleine Werte von m , hat π^m die Nase vorn; für $m=2$ zum Beispiel ist $\pi^2 \approx 10$ und damit größer als $2! = 2$. Im weiteren Verlauf aber gewinnt unweigerlich $m!$ das Rennen. Sowohl π^m als auch $m!$ sind Produkte von m Faktoren; in π^m sind diese Faktoren aber alle gleich π , während sie in $m!$ alle Werte von 1 bis m annehmen. Für $m=7$ ist $m!$ erstmals größer als π^m . Von da ab wachsen die Fakultäten viel schneller als die Potenzen von π .

Diese vereinfachte Analyse erfasst bereits die wesentlichen Merkmale der Volumenkurve. Das Volumen einer Einheitskugel strebt mit wachsender Dimension gegen null, weil das Verhältnis $\pi^m/m!$ den Grenzwert null hat. Andererseits wächst dieser Quotient in niedrigen Dimensionen mit zunehmendem m . Also muss er unterwegs ein Maximum annehmen.

Um dessen genaue Lage herauszufinden, kehren wir zur ursprünglichen Gestalt der Formel zurück. Da die Gammafunktion für jede reelle Zahl definiert ist, haben wir sogar die Freiheit, die Dimension als stetige Variable zu behandeln, die jeden reellen Wert annehmen kann. Mit klassischer Analysis – Nullstelle der Ableitung suchen – fand ich das Maxi-

um der Volumenkurve bei $n \approx 5,2569464$; an dieser Stelle hat die Einheitskugel ungefähr das Volumen 5,2777680.

Mit einer eng verwandten Formel können wir auch die Oberfläche der n -Kugel berechnen. Diese Größe erreicht ebenfalls einen Gipfelwert und fällt von da ab gegen null. Das Maximum liegt bei $n \approx 7,2569464$; der Oberflächeninhalt erreicht also sein Maximum genau zwei Dimensionen später als das Volumen.

Die Dimensionen des Problems

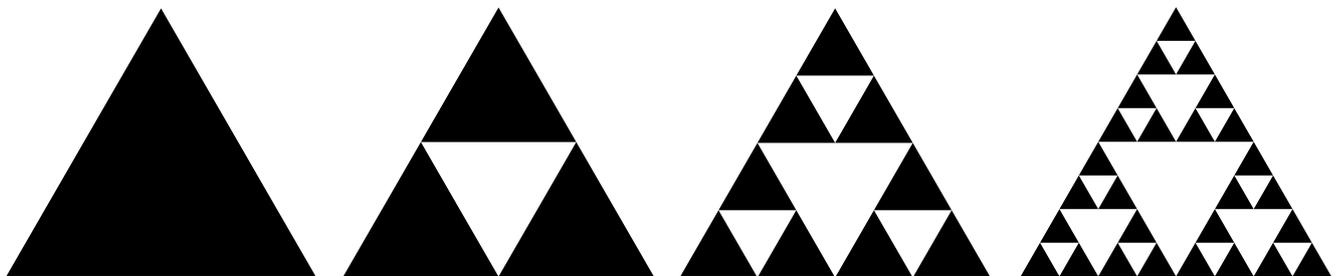
Das alles auszurechnen, ist nicht schwer, eine Bedeutung hinter den Ergebnissen zu finden, dagegen sehr. Ich kann – durch Vergleich der Potenzen von π mit Fakultäten – einsehen, warum das Volumen der Einheitskugel sein Maximum bei $m=5$ erreicht. Aber ich habe kein Gefühl für den fünfdimensionalen Raum, das mir diese Tatsache einleuchtend erscheinen ließe, von einer Vorstellung ganz zu schweigen.

Dass das Maximum nun auch noch bei einer nicht ganzzahligen Dimension erreicht wird, ist vollends widersinnig. Es gibt zwar den Begriff der fraktalen Dimension, die auch krumme Werte annehmen darf, aber das betrifft Objekte – eben die Fraktale –, nicht ganze Räume. Ein klassisches Fraktal ist das Sierpinski-Dreieck (Bild unten): Nimm aus der Mitte eines gleichseitigen Dreiecks eines mit der halben Seitenlänge weg, so dass drei kleinere übrig bleiben; verfähre mit den kleinen Dreiecken in derselben Weise, und so weiter. Das resultierende Fraktal hat die Dimension 1,585; es liegt jedoch in einer zweidimensionalen Ebene. Aber ein Raum mit 5,2569464 Koordinatenachsen, deren jede auf allen anderen senkrecht steht? Das ist nicht nur unvorstellbar, sondern schlechterdings absurd.

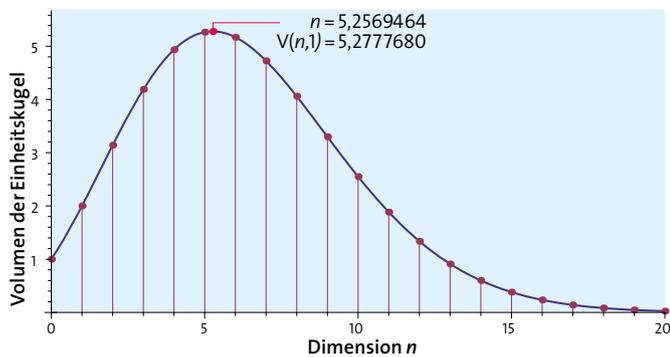
Überhaupt: Kann man die Volumina von Körpern vergleichen, die in verschiedenen Dimensionen leben? Was ist größer: eine Kreisscheibe mit einem Flächeninhalt von zehn Quadratzentimetern oder eine Kugel mit einem Volumen von fünf Kubikzentimetern? Die Frage zu stellen, scheint noch weitaus sinnloser, als Äpfel mit Birnen zu vergleichen – zunächst.

Ich glaube gegen den ersten Anschein, dass es sehr wohl eine vernünftige Basis für solche Vergleiche gibt. Volumen ist nämlich in jeder Dimension durch den Vergleich mit einem Standardobjekt dieser Dimension definiert. Das ist üblicherweise der Einheitswürfel, der daher manchmal auch als »Maßpolytop« bezeichnet wird. Er erstreckt sich in jeder Koordinatenrichtung von 0 bis 1 und hat definitionsgemäß in

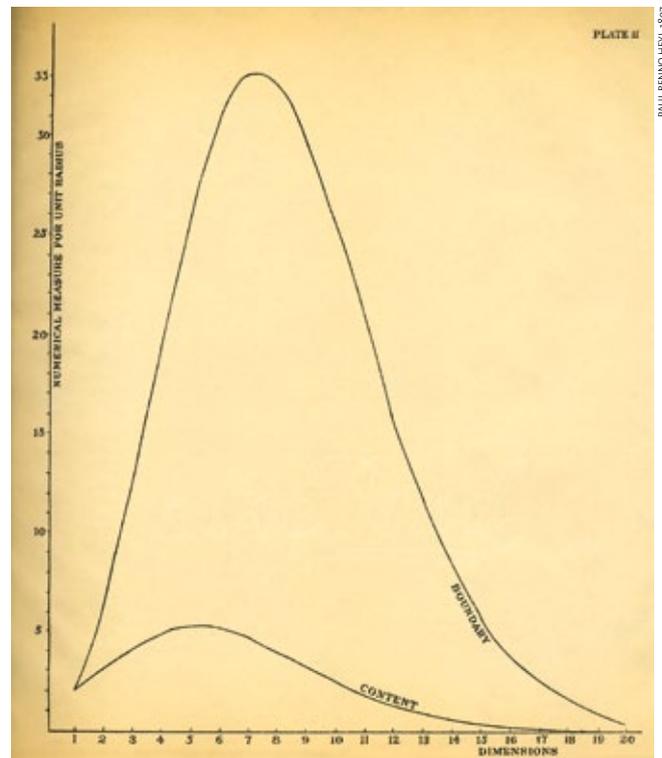
Das Sierpinski-Dreieck ist der Grenzwert einer unendlichen Folge von Prozessen, die jeweils aus allen Dreiecken das mittlere Viertel wegnehmen.



CHRISTOPH PÖPPE



Das Volumen der Einheitskugel in Dimension n nimmt bis zur Dimension $n=5$ mit wachsendem n zu und danach ab, um schließlich gegen null zu streben, wenn n gegen unendlich geht. Werden als Werte für die Dimension auch reelle Zahlen zugelassen, dann wird das maximale Volumen für $n \approx 5,2569464$ (oben, roter Punkt) erreicht. Diese Kurve für das Volumen (content) sowie die für den Oberflächeninhalt (boundary) hatte Paul Renno Heyl bereits 1897 gefunden. Die Grafik rechts stammt aus seiner Dissertation »Properties of the locus $r = \text{constant}$ in space of n dimensions«.



jeder Dimension das Volumen 1. Bei $n=1$ ist die Einheitskugel größer als der Einheitswürfel (und sie passt auch in keiner Dimension in den Einheitswürfel hinein, denn der hat nur Kantenlänge 1, während die Kugel eine Kiste der Kantenlänge 2 benötigt); das Verhältnis ihrer Volumina wächst bis $n=5$ und wird ab da immer kleiner. Um ebendieses sich ändernde Verhältnis von Einheitskugel- zu Einheitswürfelvolumen geht es in unserer Diskussion.

Zwiebeln schneiden

In der Schule waren die Volumenformeln eher so etwas wie Beschwörungsformeln, die man auswendig lernen und auf-sagen, aber nicht unbedingt verstehen sollte. Heute möchte ich mich damit nicht mehr zufriedengeben. Ich kann zwar die Formel für die n -Kugel hier nicht vollständig herleiten, möchte aber doch einen Eindruck vermitteln.

Die entscheidende Idee besteht in der Feststellung, dass eine n -Kugel aus unendlich vielen $(n-1)$ -Kugeln zusammengesetzt ist. Das sieht jeder, der eine Zwiebel in Scheiben schneidet. Noch besser geeignet sind andere annähernd kugelförmige Feldfrüchte wie Radieschen oder Rote Bete; man

muss nicht so weinen, und die Scheiben zerfallen nicht in Zwiebelringe, auf die es hier nicht ankommt.

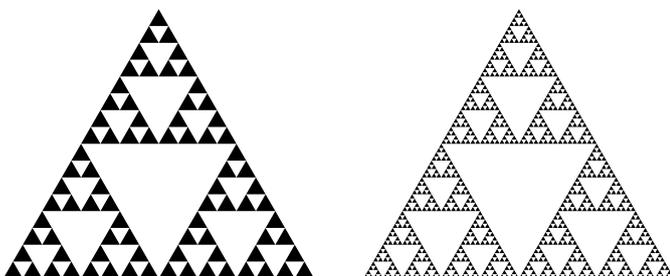
Jede Scheibe ist eine 2-Kugel. Die zerschneiden wir weiter in Streifen (1-Kugeln) und diese in winzige Würfel (0-Kugeln). Mit echtem Gemüse und echten Messern erhält man natürlich nur genäherte Ergebnisse, aber in der mathematischen Küche funktioniert das Verfahren perfekt. Vor allem produziert es unendlich viele unendlich dünne Scheiben.

Die Idee führt zu einem rekursiven Algorithmus für die Berechnung des Volumens der n -Kugel: Zerschneide sie in sehr viele $(n-1)$ -Kugeln und addiere die Volumina dieser Scheiben. Wie berechnet man das Volumen einer Scheibe? Mit demselben Verfahren. Zerschneide also jede $(n-1)$ -Kugel in $(n-2)$ -Kugeln, und so weiter. Das Verfahren endet schließlich bei $n=1$ und $n=0$, wo die Antworten ja bekannt sind. Das Volumen der 1-Kugel vom Radius r ist $2r$, der 0-Kugel weist man das Volumen 1 zu. Lässt man die Dicke der Scheiben gegen null streben, dann verwandelt sich die Summe in ein Integral und führt auf das exakte Resultat.

Für die tatsächliche Berechnung ist es bequemer, eine etwas andere Rekursion mit der Schrittweite 2 zu verwenden. Das heißt, man berechnet das Volumen der n -Kugel aus dem einer $(n-2)$ -Kugel. Das Ergebnis lautet: Das Volumen der n -Kugel ist gleich $2\pi r^{2/n}$ mal dem Volumen der $(n-2)$ -Kugel.

Damit kann man das Volumen der n -Kugel berechnen, indem man in Zweierschritten absteigt (bei jedem Schritt kommt der entsprechende Faktor hinzu), bis man bei $n=1$ beziehungsweise $n=0$ ankommt. Das ergibt für gerades n

$$1 \cdot \frac{2\pi r^2}{2} \cdot \frac{2\pi r^2}{4} \cdot \frac{2\pi r^2}{6} \cdot \dots \cdot \frac{2\pi r^2}{n}$$



und für ungerades n

$$2r \cdot \frac{2\pi r^2}{3} \cdot \frac{2\pi r^2}{5} \cdot \frac{2\pi r^2}{7} \cdot \dots \cdot \frac{2\pi r^2}{n}$$

Das Ergebnis ist für jede natürliche Zahl n das, was auch die Formel mit der Gammafunktion liefert.

Wer war's?

Auf die Frage, wer die Formel für das Volumen der n -Kugel zuerst aufgeschrieben hat, kenne ich keine gesicherte Antwort. Ich habe eine lange Kette von Verweisen zurückverfolgt, bin aber nicht sicher, ob ich an den tatsächlichen Ursprung gelangt bin.

Über die »On-Line Encyclopedia of Integer Sequences« (<http://oeis.org>), eine gigantische Materialsammlung von Folgen ganzer Zahlen, die wir Neil J. A. Sloane verdanken, und das Buch »Sphere Packings, Lattices, and Groups« von John Horton Conway and Sloane fand ich »An Introduction to the Geometry of N Dimensions« von Duncan Sommerville, veröffentlicht 1929. Sommerville, ein schottischer Mathematiker, der 1915 nach Neuseeland emigrierte, widmet der Formel für die n -Kugel einige Seiten und bringt auch eine Tabelle mit den Werten für die Dimensionen 1 bis 7. Allerdings sagt er wenig über ihre Herkunft.

Sommerville hat allerdings auch eine Bibliografie für nichteuklidische und n -dimensionale Geometrie veröffentlicht. Dort finden sich fünf Arbeiten über »Volumen und Oberfläche von Hypersphären«, die älteste aus dem Jahr 1866 stammt von William Kingdon Clifford, einem früh verstorbenen, genialen englischen Geometer. Clifford hat die Formel offenbar selbst hergeleitet; er war aber nicht der Erste.

An anderer Stelle erwähnt Sommerville den Schweizer Mathematiker Ludwig Schläfli (1814–1895) als einen Pionier der n -dimensionalen Geometrie. Schläflis in den frühen 1850er Jahren geschriebene Abhandlung zu diesem Thema wurde erst 1901 vollständig gedruckt, ein von Arthur Cayley ins Englische übersetzter Auszug erschien jedoch bereits 1858. Dessen erster Absatz enthält die Volumenformel für die n -Kugel und fügt hinzu, sie sei »vor langer Zeit« gefunden worden. In einer Fußnote zitiert Schläfli Arbeiten des belgischen Mathematikers Eugène Catalan (1814–1894) aus den Jahren 1839 und 1841. Beim Nachschauen stellt sich heraus, dass Catalan nicht die vollständige Volumenformel veröffentlicht hat, ihr aber ziemlich nahekam. Ihm gebührt also zumindest ein Teil der Ehre.

Keine dieser frühen Arbeiten beschäftigt sich mit den Konsequenzen der Formel: dem Maximum bei $n=5$ oder dem Verschwinden für n gegen unendlich. Zu diesem Thema verweist Sommersvilles Bibliografie nur auf die Dissertation eines Paul Renno Heyl, veröffentlicht 1897 von der University of Pennsylvania. Ich hatte kaum Hoffnung, diesen Text noch zu finden; aber die Bibliothekare der Harvard University machten ein Exemplar in einem Kellerregal ausfindig. Erst später erfuhr ich, dass der komplette Text (ohne Illustrationen) von Google Books digitalisiert worden ist.

Nach seiner Promotion arbeitete Heyl beim National Bureau of Standards. Er machte sich auch einen Namen als Verfasser wissenschaftlicher, philosophischer und religiöser Werke. Sein bekanntestes Buch war »The Mystery of Evil« von 1920, das heute noch im Handel ist.

In seiner Dissertation leitet Heyl sowohl die Formel für das Volumen als auch die für den Oberflächeninhalt her. Er diskutiert auf scharfsinnige Weise die mehrdimensionale Geometrie im Allgemeinen und kommt zu dem verwirrenden Schluss, dass die Einheitskugel »in einem Raum unendlicher Dimension überhaupt keinen Inhalt haben kann«. Überlassen wir Heyl die abschließenden Worte zu unserem Thema: »Man wird uns vielleicht die Annahme verzeihen, dass, wenn irgendwo, das Absolute und Unbedingte in einem Raum unendlicher Dimension zu finden sein sollte, aber wir sind zu einer gegenteiligen Schlussfolgerung gelangt. Es ist das Merkwürdigste, von dem ich in der Wunderwelt Höherer Räume weiß.« ~

DER AUTOR



Brian Hayes ist Verfasser der Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«, aus dem dieser Artikel stammt. In seinem Blog <http://bit-player.org> präsentiert er unter anderem ergänzendes Material zu seinen Kolumnen.

QUELLEN

- Catalan, E.:** Mémoire sur la réduction d'une classe d'intégrales multiples. In: Journal de Mathématiques Pures et Appliquées 4, S. 323–344, 1839
- Catalan, E.:** Théorème sur la réduction d'une intégrale multiple. In: Journal de Mathématiques Pures et Appliquées 6, S. 81–84, 1841
- Cipra, B.:** Disproving the Obvious in Higher Dimensions. In: Cipra, B.: What's Happening in the Mathematical Sciences 1. American Mathematical Society, Providence (RI) 1993, S. 21–25
- Clifford, W.K.:** Question 1878. In: Mathematical Questions, with Their Solutions, from the »Educational Times« 6, 1866, S. 83–87
- Conway, J.H., Sloane, N.J.A.:** Sphere Packings, Lattices, and Groups. Springer, New York, 3. Auflage 1999
- Schläfli, L.:** Theorie der vielfachen Kontinuität. Zürcher und Furrer, Zürich 1901. Nachgedruckt in: Ludwig Schläfli, 1814–1895, Gesammelte Mathematische Abhandlungen, Vol. I, Birkhäuser, Basel 1950, S. 167–387
- Sommerville, D.M.Y.:** Bibliography of Non-Euclidean Geometry, Including the Theory of Parallels, the Foundation of Geometry, and Space of N Dimensions. Harrison & Sons, London 1911
- Sommerville, D.M.Y.:** An Introduction to the Geometry of N Dimensions. Dover Publications, New York 1929

WEBLINKS

<http://oeis.org>
Englischsprachige Enzyklopädie von Folgen ganzer Zahlen, von Neil A.J. Sloane

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155302

© American Scientist
www.americanscientist.org

IN EIGENER SACHE

Nehmen Sie uns mit!

Ausgewählte Publikationen für Tablet-PCs



UNSERE KIOSK-APP

Sie möchten Magazine aus unserem Verlag unterwegs lesen, aber das gedruckte Heft lieber zu Hause lassen? Kein Problem: Wir bieten Ihnen mit unserer Kiosk-App eine Auswahl unserer Publikationen für das iPad und Android-Tablets an. Mit **Spektrum neo** reisen Sie in die Zukunft und ins Universum – oder staunen Sie in **epoc – Albrecht Dürer** über kleinste Details in seinen fantastischen Bildern. Die Ausgaben enthalten alle Artikel der Druckversion plus weiterführende Links, Bildergalerien oder auch kurze Videosequenzen. Weitere Titel zu spannenden Themen sind in Vorbereitung. www.spektrum.com/kioskapp



Königreiche der Sklaverei

Siedlungen wuchsen zu Städten heran und Königtümer zu mächtigen Reichen: An der Küste Westafrikas setzte der transatlantische Sklavenhandel seit dem 16. Jahrhundert gewaltige gesellschaftliche Veränderungen in Gang.

Von James Cameron Monroe

Als die ersten Europäer Westafrikas Küsten anliefen, war der Boden für den Handel mit Menschen längst bereitet: Kriege gehörten zum Alltag, und wer in Gefangenschaft geriet, wurde versklavt oder den Ahnen geopfert. Die Beute nun den weißhäutigen Fremden im Tausch zu überlassen – warum nicht, wenn es sich lohnte, wenn die exotischen Waren das Prestige der siegreichen Anführer mehrten? Doch aus gelegentlichen Geschäften entwickelte sich bald ein florierender Handel, denn der Bedarf an Arbeitskräften in den Kolonien der Neuen Welt schien nicht enden zu wollen. Das erforderte feste Handelsstationen an der Küste – die heutige Stadt Grand-Popo an der Grenze zwischen Benin und Togo ist aus einer portugiesischen Niederlassung entstanden. Notwendig war aber auch die Professionalisierung seitens der Lieferanten – und das sollte die Machtverhältnisse vollkommen verschieben und die Bildung zentral regierter Staaten fördern.

Wie drastisch der Menschenhandel Westafrika vom 17. bis 19. Jahrhundert verändert hat, untersuchen meine Kollegen und ich seit dem Jahr 2000 im Rahmen des Abomey Plateau Archaeological Project. Das namensgebende Hochland war

während dieser so genannten Atlantischen Epoche das Kernland des Königreichs Dahomey, das 1975 größtenteils in der Republik Benin aufging. Seine Geschichte lässt sich aber nicht untersuchen, ohne auch die seiner Vorgänger und Konkurrenten Allada und Hueda im Blick zu haben. Für unsere Forschung kombinieren wir zudem erstmals drei verschiedene Informationsquellen: Historiker werten schriftliche Berichte europäischer Augenzeugen aus; Ethnologen ergänzen diese anhand einheimischer Überlieferungen; und Archäologen erheben durch systematische Begehungen und gezielte Grabungen Daten zur Flächennutzung.

Unser Untersuchungsgebiet ist der Dahomey-Gap, ein Abschnitt der auch als »Sklavenküste« bekannten Bucht von Benin im Golf von Guinea (siehe Karte S. 62). Dieser Korridor unterbricht Westafrikas Gürtel des tropischen Regenwalds durch eine Savannenlandschaft mit Waldinseln, Sümpfen und Lagunen entlang der Küste. Letztere lieferten nicht nur Fisch und Frischwasser, sondern dienten auch als Wegenetz. Von den Lagunen aus war zwar das Meer erreichbar, doch gefährlicher Wellengang und Haie machten die Küstenfischerei wenig attraktiv. Die Flüsse, welche die Lagunen speisen, durchschneiden sieben Plateaus, die von der Küstenebene auf 20 bis 200 Meter über dem Meeresspiegel ansteigen. Dort lebten vor der Atlantischen Epoche die meisten Menschen: Es gab fruchtbare Ackerböden, und man war fern von den Moskitos und den Krankheiten der Sumpfgebiete. Eine von tropischem Regenwald bewachsene »zentrale Senke« teilt das Hochland in zwei Bereiche.

Über die Zeit vor dem ersten Kontakt mit Europäern wissen wir nur wenig. Überlieferungen zufolge sollen Herrscher der Yoruba, einer in Nigeria beheimateten Sprachgruppe, im 13. bis 14. Jahrhundert auf ihren Kriegszügen Ortschaften im Dahomey-Korridor unterworfen, andere neu gegründet und so die Keimzellen der späteren Reiche geschaffen haben. Sicher ist: Als europäische Kaufleute und Militärs im 16. Jahrhundert Kontakt mit den Gemeinwesen des Inlands aufnahmen, existierten bereits etliche Siedlungen, einige davon den

AUF EINEN BLICK

BENINS BEWEGTE VERGANGENHEIT

1 Der als **Dahomey-Gap** bezeichnete Abschnitt der »Sklavenküste« in der Bucht von Benin avancierte im 17. Jahrhundert zu einem Umschlagplatz des transatlantischen Sklavenhandels.

2 Archäologen, Historiker und Ethnologen untersuchen gemeinsam die sozialen und politischen Folgen dieser Entwicklung. Offenbar wurden die von den Europäern eingetauschten Luxusgüter zu Symbolen der Macht, der Menschenhandel zum wichtigsten Wirtschaftszweig der drei **Königreiche Allada, Hueda und Dahomey**.

3 Mit der Ächtung des Sklavenhandels im 19. Jahrhundert waren die Reiche im Dahomey-Gap gezwungen, sich neu zu orientieren. Dahomey meisterte die Krise insbesondere durch den **Export von Palmöl** – mit weit reichenden sozialen Folgen.

Berichten nach mit städtischem Charakter. Gemäß der klassischen Definition urbaner Zentren wohnten dort also tausende Menschen, und eine Mauer grenzte ihr Gebiet nach außen hin ab. Ein jüngerer Ansatz, das Phänomen Stadt zu fassen, unterstreicht hingegen die funktionalen Aspekte von Urbanität: Danach dient eine Stadt als wirtschaftliches, politisches und kulturelles Zentrum für ihr Umland. Dieses Modell eignet sich besser, um die Veränderungen sichtbar zu machen, die der transatlantische Sklavenhandel mit sich brachte.

Der Historiker Isaac Adeagbo Akinjogbin (1930–2008) von der Obafemi Awolowo University in Ile-Ife (Nigeria) hat einmal geschätzt, dass während der Atlantischen Ära ungefähr 15 Königreiche im Korridor existierten, von denen vor allem die drei schon genannten an Bedeutung gewannen.

Allada wurde im Lauf des 16. Jahrhunderts gegründet. Der Gütertausch mit Königreichen der bewaldeten Küstenzone

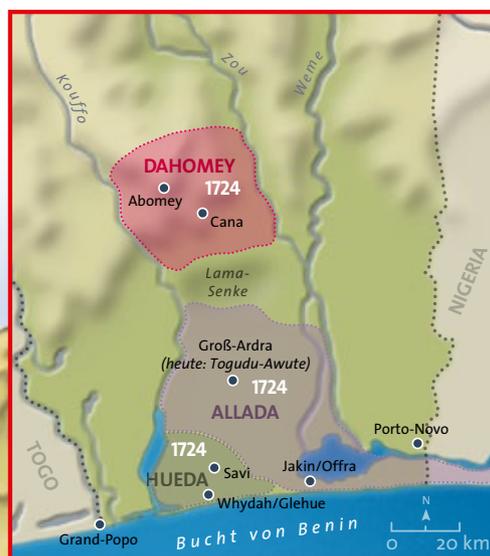
bildete den Grundstock seines Wachstums. Mitte des 16. Jahrhunderts, so berichten es Schriftquellen, trieben Portugiesen bereits Handel mit der Hauptstadt Groß-Ardra (heute Togudu-Awute). Experten schätzen ihre Einwohnerzahl für die Atlantische Zeit auf etwa 30 000. Insgesamt lebten in Allada wohl mehr als 200 000 Menschen, und zwar in »Städten und Dörfern in großer Anzahl«, wie der holländische Arzt Olfert Dapper 1668 schrieb. Zu seiner Zeit dominierte das Königreich den gesamten Süden des Dahomey-Korridors und konnte Tributzahlungen von kleineren Königreichen und Fürstentümern einfordern.

Der Archäologe und Historiker Alexis B. A. Adandé von der Université d'Abomey-Calavi in Benin leistete in den 1980er Jahren Pionierarbeit in dieser Region. Seine Grabungen und die Analyse der Überlieferungen bestätigten, dass die Stadt einst einen wichtigen Marktort darstellte, wo die Bewohner

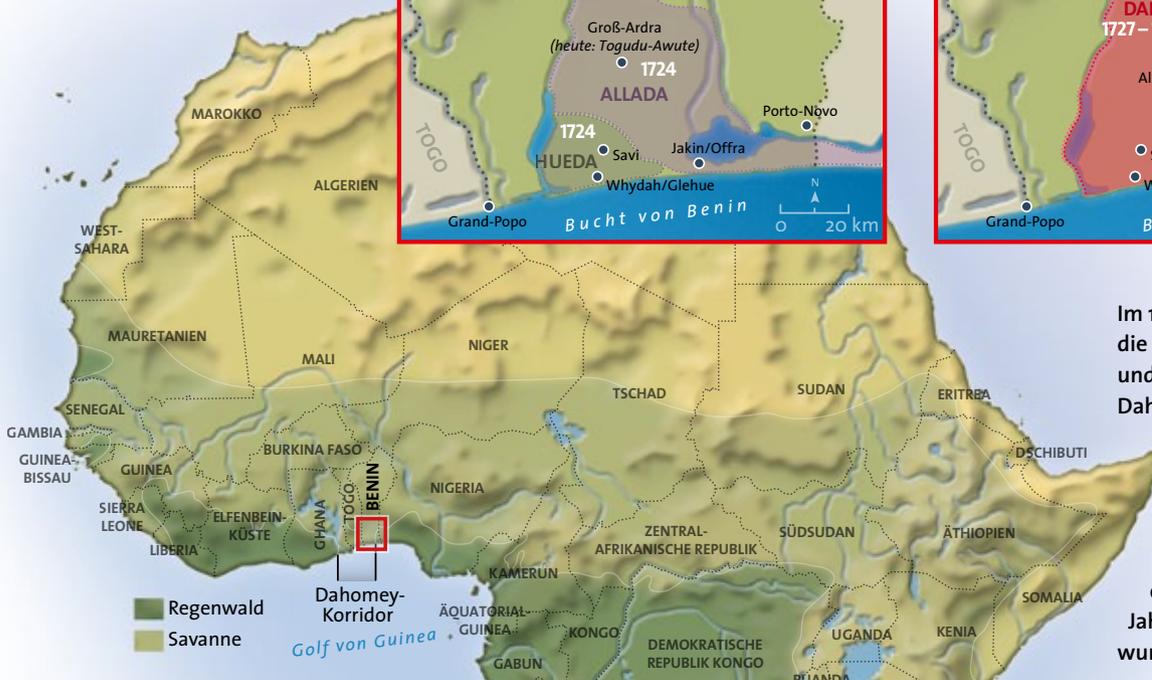
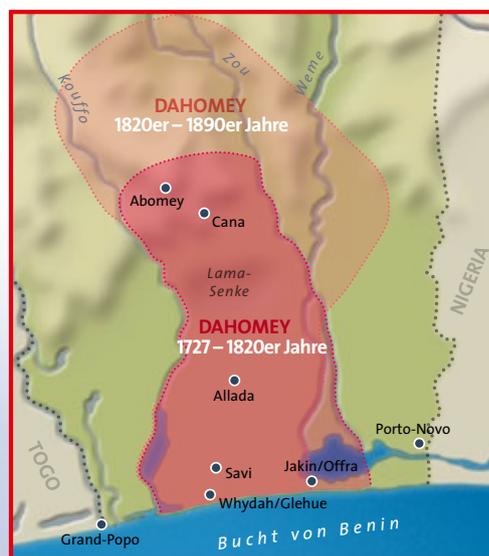
Im 18. Jahrhundert existierte ein eingespieltes Netzwerk des Sklavenhandels: Afrikanische Könige schickten ihre Soldaten auf Menschenjagd, die Gefangenen wurden an europäische Seefahrer verkauft, die sie in die Kolonien der Neuen Welt exportierten. Dass Europäern das afrikanische Landesinnere weitgehend unbekannt war, illustriert diese Karte von 1743. Unten im Bild: das Königspaar von Hueda.



DIE DREI REICHE 1724 UND ...



... DIE WEITERE ENTWICKLUNG DAHOMEYS



Im 17. Jahrhundert dominierten die Königreiche Allada, Hueda und Dahomey das Gebiet des Dahomey-Gaps in der Bucht von Benin. Dahomey erwies sich als die stärkste Macht. Straff regiert und militärisch aufgerüstet expandierte es, bis es in den 1890er Jahren französische Kolonie wurde.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH LAW, R.: THE SLAVE COAST OF WEST AFRICA, 1550–1750 (...), CLARENDON PRESS, 1991, UND MANNING, P.: SLAVERY, COLONIALISM AND ECONOMIC GROWTH IN DAHOMEY, 1640–1960, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1982

des Umlands jeden vierten Tag allerlei Güter wie Salz, Textilien oder Korbwaren feilboten. Mehr und mehr standen auch Gefangene zum Verkauf. Um 1680 dürften es schon bis zu 5000 pro Jahr gewesen sein, 30 Jahre später doppelt so viele. Hauptabnehmer waren Europäer, die mit Kaurischnecken bezahlten, der wichtigsten Währung in der Region, aber auch mit Textilien, Eisen- und Messingbarren, Gewehren und Alkohol. Archäologen entdeckten in den Siedlungsschichten später noch weitere Importwaren wie Glasperlen, Tabakspfeifen und Keramikgefäße.

Das Auftauchen solcher Objekte wirkte sich erheblich auf die Sozialstruktur aus. Zeitgenossen beschrieben, dass bei Krönungen oder bei Totenfeiern für verstorbene Herrscher große Mengen solcher Luxusgüter zur Schau gestellt und ausgewählten Personen überreicht wurden. Auf diese Weise demonstrierten die Herrscher ihre weltliche Macht wie auch ihre Stellung als lebender Gott und Mittler zur Welt der Ahnen. Die Importwaren avancierten damit zu Trägern symbolischer Bedeutung. Gleichzeitig sicherte ihre Weitergabe dem Regenten die Loyalität der Beschenkten und integrierte Fürsten des Umlands in das politische System Alladas.

Freilich versuchten die Potentaten, den Löwenanteil für sich zu behalten. Sie schickten nicht nur Militärexpeditionen

auf Sklavenfang, sie verlangten auch von den Abnehmern, ausschließlich mit ihnen zu verhandeln (siehe Bilder rechts). Als Allada gegen Ende des 18. Jahrhunderts die immer noch wachsende Nachfrage an der Ware Mensch nicht mehr befriedigen konnten, witterte vor allem das küstennahe Hueda seine Chance, das mit der Stadt Glehue über einen sicheren Hafen verfügte.

Scherben im Radius von fünf Kilometern

Hueda wurde erstmals 1671 in einem Schriftstück erwähnt, als Franzosen in seiner Hauptstadt Savi einen Handelsposten gründeten. Auch dort lebten mindestens 30 000 Menschen; im gesamten Reich vermutlich mehr als 100 000. Der englische Sklavenhändler Robert Norris schrieb im 18. Jahrhundert: »Savi hatte einen Umfang von etwa vier Meilen. Die Häuser, aus Lehmwänden gebaut, waren mit Stroh bedeckt. Die Handelshäuser der europäischen Händler waren weitläufig und luftig, unterteilt in komfortable Wohnungen und auf der Außenseite umgeben von einer großen Galerie, die sich zu Balkonen hin öffnete. Die Stadt wimmelte derart von Menschen, dass es unmöglich war, ohne große Mühen durch die Straßen zu gehen.«

Der Archäologe Kenneth Kelly von der University of South Carolina in Columbia unternahm mit Studenten und einheimischen Kollegen erstmals 1991 systematische Oberflächenbegehungen (Surveys). Auf 2000 Hektar entdeckten die Forscher eine dichte Konzentration an Artefakten, vor allem an lokaler Keramik. Diese Fläche deuteten sie daher als urbanen Bereich. Im Zentrum trennten tiefe Gräben wohl einen 6,5 Hektar großen königlichen Bezirk ab, in dessen Mitte sich einst eine Palastanlage befunden hatte. Schriftquellen berichten, dass europäische Händler in Handelsniederlassungen innerhalb dieses abgegrenzten Bezirks leben mussten. Dort kamen dementsprechend viele Importgüter zu Tage, darunter holländische Tabakspfeifen, chinesisches Porzellan, Wein- und Schnapsflaschen und sogar holländische Ziegelsteine, eingelassen in die Böden. All dies fand sich aber nicht in den privaten Bereichen der Königsfamilie, sondern dort, wo der Regent Gäste empfing. Das unterstreicht den symbolischen Charakter der Objekte.

Kellys Schüler Neil Norman, heute am College of William and Mary in Virginia, untersucht seit 2005 das Umland von

Savi. In einem Radius von fünf Kilometern fand er bei Surveys reichlich Scherben und andere Artefakte, zudem etliche Ruinen aus Lehmziegeln. Das bestätigt Berichte, nach denen auch das weitere Umfeld der Stadt dicht bewohnt war. Demnach hatte Hueda ein dreistufiges Siedlungsschema mit der Hauptstadt als politischem und wirtschaftlichem Zentrum, gefolgt von teilautonomen Provinzstädten mit einigen tausend Einwohnern und schließlich zahlreichen Dörfern, in denen jeweils wenige hundert Menschen lebten.

Manchen Europäern zufolge sicherte sich der König auch die Loyalität der Fürsten und Häuptlinge der ländlichen Regionen zu einem guten Teil mit geschenkten Importwaren. Solche Berichte müssen aber sehr kritisch gelesen werden, denn die Fremden durften sich kaum frei im Reich bewegen und kannten daher vor allem die Verhältnisse innerhalb der Palastmauern aus eigener Anschauung. So verwundert es nicht, dass Norman und sein Team solche Prestigeobjekte auf dem Land nur selten fanden. Daraus schließt der Forscher aber, dass der Königshof von Hueda sie für sich beansprucht hat. Vermutlich leistete das Spannungen zwischen

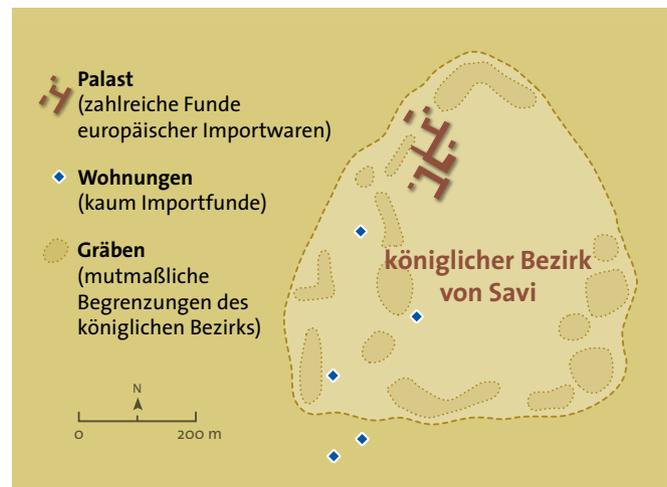
AUS LABAT, J.-B.: VOYAGE DU CHEVALIER DES MARCHAIS EN GUINÉE, ISLES VOISINES, ET À CAYENNE, FAIT EN 1725-27, AMSTERDAM 1731



Zeitgenössischen Berichten zufolge lebten Europäer in Savi, der Hauptstadt von Hueda, auf dem Palastgelände. So konnten die Herrscher verhindern, dass ihre Untertanen direkt mit den Fremden verhandelten. Ausgrabungen haben diese Nähe bestätigt. Importwaren wie holländische Ziegelsteine und chinesisches Porzellan (Foto unten links) fanden sich in Savi nur in bestimmten Bereichen des königlichen Palastes.



MIT FREIL. GEN. VON NEIL NORMAN, COLLEGE OF WILLIAM AND MARY, WILLIAMSBURG



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAFIK. NACH KELLY, K.: WORLD ARCHAEOLOGY 38, S. 351-369, 1997

Zentrum und Umland Vorschub, die das Reich destabilisierten und seinem raschen Aufstieg ein ebenso schnelles Ende setzten.

Hueda konnte sich im Ringen um die Vorherrschaft im Sklavenhandel eines neuen Mitspielers nicht erwehren: Dahomey. Als Vasall von Allada hatte es sich über fast ein Jahrhundert hinweg auf dem Plateau von Abomey ausgebreitet, bis es 1716 stark genug war zu rebellieren. Der Krieg dauerte acht Jahre, dann fiel Allada, 1727 auch Hueda. Dahomey übernahm nun die Kontrolle über die Haupthandelsroute zur Küste. Um das Reich zu konsolidieren, setzten die Könige wieder auf Rituale, bei denen Prestigeobjekte zur Schau gestellt und verteilt wurden. Zudem aber investierten sie in ihre Armee und bauten eine straffe Verwaltung auf. Dieses Phänomen kennen Archäologen und Historiker gut: Auf diese Weise festigten Eliten immer wieder ihre Macht, und eine Stammesgemeinschaft wandelte sich zu einem Staat.

Auch die Hauptstadt Abomey entwickelte sich nun zu einer weitläufigen Siedlung für etwa 30 000 Menschen mit Marktplatz und Palastanlagen im Zentrum. Immerhin halb so groß wurde das nahe gelegene Cana (siehe Bilder unten rechts), das an überregionalen Handelswegen lag. Auf beide Städte zusammen entfiel gut ein Fünftel bis ein Drittel der Be-

völkerung des Plateaus, der große Rest lebte in Dörfern und kleineren Städten, also Siedlungen, in denen zwischen einem Dutzend Familien und maximal 1000 Personen wohnten.

Archäologen erforschen diese ländlichen Gemeinschaften erst seit Kurzem. Einen besonderen Fund machte das Projet benino-danois d'archéologie (BDArch), das Klavs Randsborg von der Universität Kopenhagen und Alexis Adandé von der Université Nationale du Bénin leiten. Die Forscher entdeckten unterirdische Räume und Gänge, die mit Eisenwerkzeugen aus dem Gestein geschlagen worden waren, meist mit einem schachtartigen Eingang. Die Anlagen stammen wohl aus dem späten 17. bis frühen 19. Jahrhundert. Vermutlich dienten sie als Wasserspeicher – und als Zuflucht, wenn Sklavenjäger unterwegs waren.

Blutiges Ritual für den König

Das Abomey Plateau Archaeological Project der University of California, das ich seit 2000 leite, widmet sich vor allem Palastanlagen, die im ganzen Reich zu finden sind. Insbesondere die des Königs in der Hauptstadt sollten natürlich die Autorität des Herrschers und seiner Familie sichtbar machen. Allein im zentralen Komplex lebten bis zu 8000 Menschen. Er spielte aber auch bei großen Zeremonien eine bedeutende

Wer hat, der hat: Exotische Objekte wie Steinschlösser für Vorderlader (oben links), Kaurimuscheln (oben Mitte), Glasflaschen (oben rechts), Perlen (unten links) und Tabakspfeifen (unten rechts, Fragmente) waren bei Dahomeys Eliten als Prestigeobjekte heiß begehrt. Die hier gezeigten Funde stammen aus der Stadt Cana, die von ihrer Lage am Knotenpunkt mehrerer Fernhandelsstraßen profitierte.



ALLE FOTOS: J. CAMERON MONROE

Rolle. Die wichtigsten waren die »Xwetanu«, die dem königlichen Ahnenkult dienten. Hunderte von Gefangenen verloren alljährlich dabei ihr Leben: Ihr Blut wurde mit Erde vermengt; aus diesem Lehm entstanden dann neue Mauern, die oft die Schädel erschlagener Feinde als makabre Zier trugen.

Meine archäologischen Untersuchungen in den Palästen von Cana unterstreichen die besondere Bedeutung dieser Stadt: So fanden sich verschiedene europäische Handelsgüter wie Tischgeschirr, Flaschen und Tabakspfeifen. Ganz anders verhielt es sich im Hinterland, was Oberflächenbegehungen und Testgrabungen kürzlich bewiesen. Wie zuvor in Hueda profitierten auch in Dahomey die kleineren Fürstentümer nicht vom Sklavenhandel.

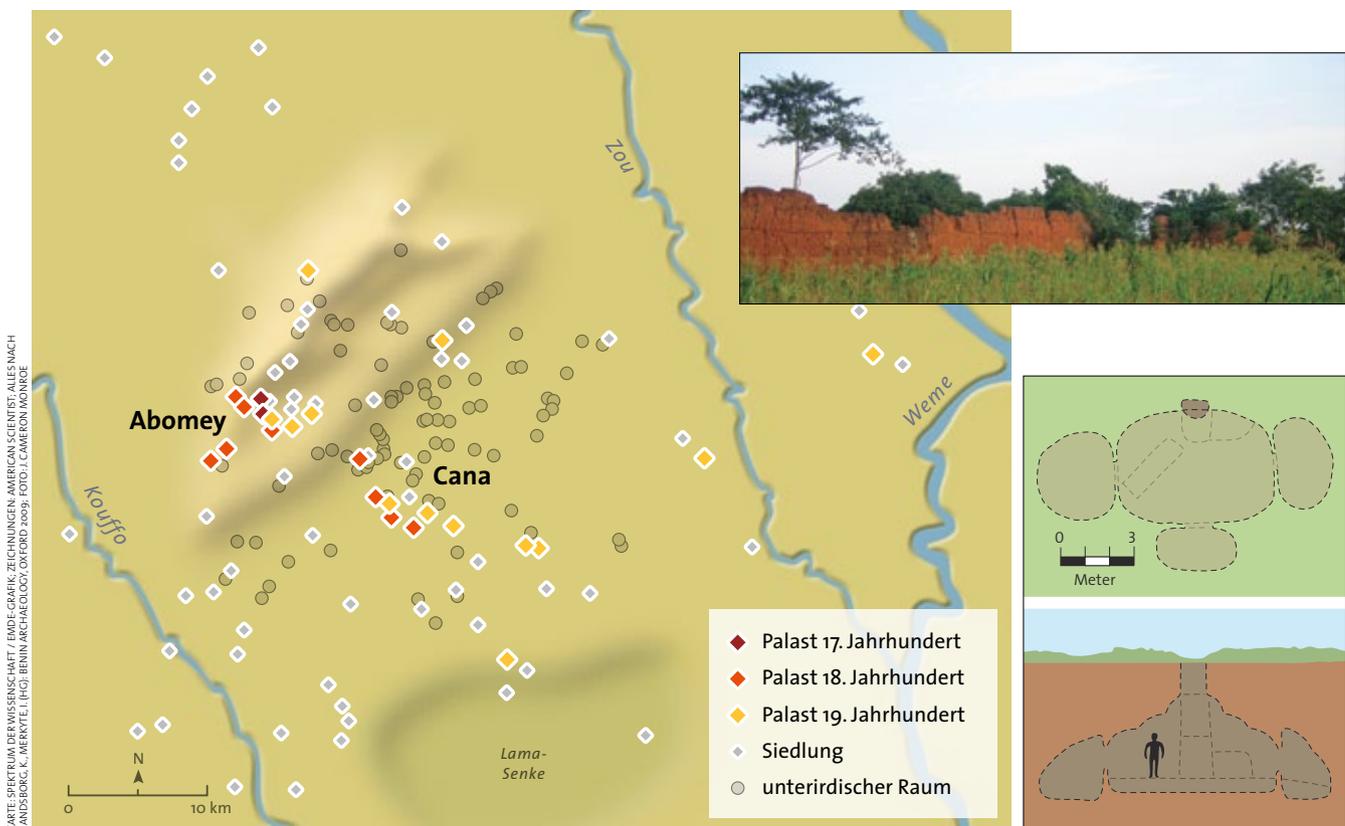
Dennoch zog das keine Destabilisierung nach sich. Dafür sorgten wohl die über das Plateau verteilten Paläste, die als Zwischenstationen entlang der Handelsrouten und als militärische Stützpunkte dienten. Seit 2000 hat unser Projekt auf dem Plateau oder in seiner unmittelbaren Umgebung 19 davon identifiziert. Fragmente von Importgütern, einheimische Überlieferungen und europäische Berichte haben es ermöglicht, jede dieser Strukturen sowie die neun bereits aus der Hauptstadt bekannten Paläste auf zumindest ein Jahrzehnt genau zu datieren. Demnach entstanden die ers-

ten kleineren Anlagen außerhalb Abomeys bald nach der Eroberung Alladas und Huedas. Sie wurden in Städten entlang der zur Küste führenden Haupthandelswege errichtet – offenbar um den Transport von Sklaven zu kontrollieren, sicher aber auch, um Aufstände in den eroberten Gebieten im Keim ersticken zu können. Im 19. Jahrhundert kamen dann weitere Paläste tief im Hinterland dazu, während in Abomey und Cana neue und größere als Verwaltungszentren gebaut wurden. Das Reich reagierte auf eine Entwicklung, die Westafrikas Staaten in ihren Grundfesten erschütterte: Die Ware Mensch ließ sich nicht mehr verkaufen.

Als erste Nation der Welt verbot Dänemark 1803 den Import von Sklaven, es folgten Großbritannien und die USA, 1836 dann Portugal als letztes europäisches Land. Mehr noch: Ab 1807 blockierten britische Kriegsschiffe Westafrikas Häfen für Sklavenschiffe, zeitweise unterstützt durch die US-Marine. Gleichzeitig ermunterten europäische Abgesandte die westafrikanischen Staaten, den Export landwirtschaftlicher Güter auszubauen. Vor allem die Nachfrage nach Palmöl wuchs, das als Rohstoff für Seifen, Kerzen und Schmiermittel diente.

Das Ergebnis war laut dem Historiker Antony Hopkins von der University of Texas eine Anpassungskrise: Während der Sklavenhandel auf Grund der erforderlichen wirtschaft-

Eine Karte der Königspaläste, von Siedlungen und unterirdischen Räumen ist die Frucht archäologischer Feldarbeit der letzten Jahre auf dem Abomey-Plateau in Dahomey. Die unterirdischen Kammern dienen vermutlich als Verstecke vor Sklavenjägern (Grafiken unten rechts). Durch neue Paläste im Hinterland von Abomey und Cana kontrollierten Dahomeys Herrscher die Landwirte. Das Foto zeigt die Ruine einer Anlage aus dem 19. Jahrhundert in Cana.





Mit dem Zusammenbruch des Sklavenhandels im 19. Jahrhundert wurde der Export landwirtschaftlicher Erzeugnisse wichtiger. Um Steuern auf die Profite zu erheben, ließen Dahomeys Könige Militärposten an Verkehrswegen und Marktplätzen errichten.

lichen und politischen Mittel hauptsächlich von einer Elite betrieben wurde, konnte nun jeder Palmenbesitzer am Handel teilnehmen. Auch die Eigner kleiner Plantagen sowie Zwischenhändler erwarben Reichtum – ein sozialer Prozess mit beträchtlichem Destabilisierungspotenzial.

Einige Dynastien Westafrikas trafen die richtigen Entscheidungen und überstanden diesen Wandel. Zu ihnen gehörte Dahomey. Der Herrscher schickte seine Soldaten weiterhin aus, Gefangene zu machen, aber diese wurden nun zur Feldarbeit eingesetzt. Immer mehr Sklaven lebten im Reich, die ländlichen Märkte gewannen an Bedeutung, die Gemeinwesen wurden wohlhabend. Die Regierung etablierte daraufhin ein Steuersystem, um von dieser Entwicklung zu profitieren. Beamte kontrollierten die wichtigsten Märkte und erhoben Abgaben. Ein Netzwerk von Außenposten kassierte Zölle von reisenden Händlern. Somit wird der Bau königlicher Paläste im Hinterland, abseits der Sklavenrouten, verständlich: Sie fungierten wohl als Knotenpunkte für diese neuen »Geldflüsse« in die Hauptstadt.

Auch nach drei Jahrzehnten intensiver Forschung im Süden Benins haben wir erst begonnen, die politischen und wirtschaftlichen Beziehungen zu rekonstruieren, die all die ländlichen Gemeinschaften mit den städtischen Zentren verbunden haben. Nach wie vor aber wissen wir wenig über das Alltagsleben in Allada, Hueda und Dahomey und fast nichts über die Zeit vor der Atlantischen Ära. Beides steht auf unserer Agenda für die kommenden Jahre. ~

DER AUTOR



James Cameron Monroe ist Archäologe an der University of California in Santa Cruz. Einen Schwerpunkt seiner Forschung bildet Westafrika zur Zeit des Sklavenhandels. Er leitet das Abomey Plateau Archaeological Project in der westafrikanischen Republik Benin, das Informationen aus schriftlicher und mündlicher Überlieferung sowie Archäologie zusammenführt. Der Beitrag

ist eine aktualisierte Fassung seines Aufsatzes »Urbanism on West Africa's Slave Coast«, der 2011 in »American Scientist« erschien (Band 99, S. 400–409). Die Redaktion dankt dem Archäologen Detlef Gronenborn vom Römisch-Germanischen-Zentrum in Mainz für seine Unterstützung.

QUELLEN

Kelly, K. G.: The Archaeology of African-European Interaction: Investigating the Social Roles of Trade, Traders, and the Use of Space in the Seventeenth- and Eighteenth-Century Hueda Kingdom, Republic of Bénin. In: World Archaeology 28, Routledge Publisher Abingdon, S. 351 – 369, 1997

Monroe, J. C., Ogundiran, A.: Power and Landscape in Atlantic West Africa: Archaeological Perspectives, Cambridge University Press, New York, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155297

© American Scientist
www.americanscientist.org



Das Bedienpult des Elektronenbeschleunigers mit den Kontrollbildschirmen.

Elektronenstrahlen gegen Krebsgeschwülste

»Im Röntgenhaus des Rudolf-Virchow-Krankenhauses in Berlin wurde ein 35-MeV-Betatron in Betrieb genommen. Es dient zur Tiefentherapie von Geschwulstkrankheiten. Das Betatron ist ein Elektronenbeschleuniger. Die Therapie mit Röntgen- oder Elektronenstrahlen beruht auf der Absorption dieser Strahlen im Gewebe des menschlichen Körpers. Der Arzt hat die Aufgabe, eine bestimmte Energiemenge in dem Gebiet der Geschwulst zur Wirkung zu bringen und dabei das übrige Gewebe zu schonen. Im Asklepitron 35, wie dieses Betatron genannt wird, ist ferner eine Röntgenanlage eingebaut. Sie ermöglicht das genaue Lokalisieren und das Einstellen des Bestrahlungsfeldes.« *Elektronik 8, 1962, S. 231*



Hören statt Sehen

»Fournier d'Albe hat einen Apparat erfunden, mit welchem der Blinde das Licht hören kann und diesen Apparat nennt er »Optophon«. Das Instrument zerfällt in zwei Telephone und in die

Selenbrücke, die Batterie, die Widerstände und einen Uhrwerkunterbrecher. Die Telephone befestigt der Blinde am Kopf. Eine Verminderung oder eine Vermehrung des Lichtes bewirkt eine Veränderung des Tones im Telephone und an der Stärke des Tones lässt sich auch die Helligkeit des Lichtes bestimmen.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik 24, 1912, S. 274*

Zähmung wilder Eichhörnchen

»Unser Eichhörnchen ist eines der scheuesten Waldtiere. Um so bemerkenswerter ist es, daß es im Eichwalde zu Wörishofen gelungen ist, die Eichhörnchen zutraulich zu machen. Ein österreichischer Offizier brachte die frühen Morgenstunden wegen Schlaflosigkeit im Walde zu. Zum Zeitvertreib legte er Haselnüsse auf die Baumstümpfe als Futter für die Eichhörnchen. Nach Verlauf von 6 Wochen wurden die Nüsse aus der Hand genommen.« *Kosmos 8, 1912, S. 311*

Grabmalerei in Tikal

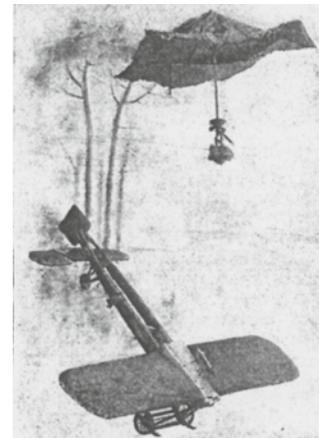
»Während der letztjährigen Grabungskampagne in dem Tempelzentrum Tikal (Guatemala) wurde ein Grab aufgefunden, dessen Wände mit Hieroglyphen bemalt sind. Dies ist bisher einmalig in der Maya-Archäologie. Das sehr gut erhaltene Datum 9.1.1.10.10. würde mit dem 18. März 457 n. Chr. zu übersetzen sein. Die übrigen 25 Glyphen sind noch nicht entziffert. Eine weitere Besonderheit des Grabes liegt in der Gestalt der Hauptperson begründet. Diese hat augenscheinlich in der Mitte des Grabes gesessen und war nicht, wie sonst üblich, ausgestreckt auf den Boden gelegt worden. Außerdem fehlten der Person der Kopf und die Hände.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik 16, 1962, S. 513*



Das Datum »9.1.1.10.10.« wurde in Hieroglyphenschrift auf die Grabwand gemalt (der Archäologe deutet auf die Zahl 10).

Schleudersitz für Bruchpiloten

»Die häufigen Abstürze von Aviatikern haben die Erfinder veranlaßt, nach Sicherheitseinrichtungen zu suchen, die wenigstens den Piloten zu retten vermögen. Interessant ist in dieser Beziehung eine Fallschirmvorrichtung. Gewöhnlich bildet der Schirm eine Art Paket, das hinter dem Sitz untergebracht ist. Durch die Stange steht es mit dem Sitz in Verbindung. Natürlich sind Schirm und Stange lösbar am Aeroplan befestigt, und der Sitz, der während des Unfalls den Aviatiker tragen soll, muss leicht getrennt werden können. Wird ein Hebel betätigt, so geben Riegel den Sitz frei. Beim Fallen des



Rettung an, doch nicht von der Stange.

Aeroplans hat die Luft den Schirm aus seinem Lager gehoben, um ihn zu entfalten, und nun trägt die aufgerichtete Stange den Sitz des Luftschiffers, der auf diese Weise gerettet wird.« *Technische Monatshefte 8, 1912, S. 250–251*

GEOMETRIE

Magische Sechsecke

Je nachdem, ob sie ihrerseits aus Sechsecken oder Dreiecken bestehen, ist ihre Konstruktion schwierig bis unmöglich – oder so einfach, dass man ein Spiel daraus machen kann.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Magische Quadrate gibt es im Überfluss. Die Aufgabe lautet: Man fülle die Zahlen von 1 bis n^2 in ein quadratisches Schema von $n \cdot n$ Feldern ein, so dass die Summe über jede Zeile, jede Spalte und über beide Diagonalen stets dieselbe ist. Es gibt zahlreiche Anleitungen zu ihrer systematischen Lösung und noch viel mehr Lösungen, die einfach durch Probieren zu Stande kommen – je größer die Quadratseite n , desto mehr.

Nun ist das Quadrat nicht die einzige Form, mit der man die Ebene lückenlos bepflastern kann. Da regelmäßige Sechsecke, im bekannten Bienenwabenmuster angeordnet, ein hübsches Bild abgeben, haben viele Leute nach einem »magischen Sechseck« gesucht, also einer Anordnung aus – zum Beispiel – 19 Sechsecken in Reihen der Längen 3, 4, 5, 4, 3, die derart mit den Zahlen von 1 bis 19 belegt werden, dass alle »Reihensummen« gleich sind (Bild unten, a). Dabei verläuft eine »Reihe« entweder waagerecht, schräg ansteigend oder schräg abfallend. Aus einer solchen Anordnung von Bienenwaben (ei-

nem »Sechseckssechseck«) kann man eine größere machen, indem man sie allseits mit einem Ring von Sechsecken umgibt. Das Verfahren ist beliebig wiederholbar; die so konstruierten Sechseckssechsecke haben sämtlich ungerade Seitenlängen.

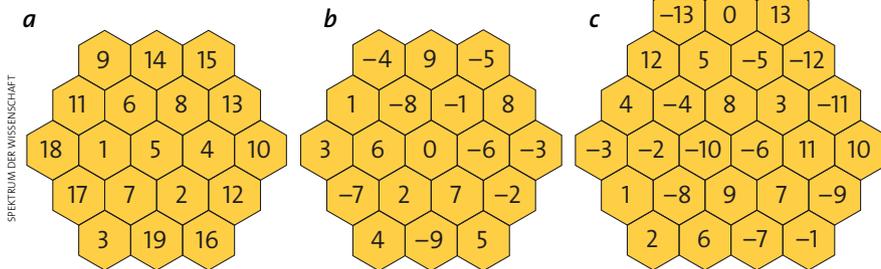
Dass im Fall der Seitenlänge 3 die magische Summe 38 betragen muss, lässt sich leicht ausrechnen. Eine magische Belegung mit Zahlen zu finden, ist jedoch alles andere als einfach. Als der legendäre Martin Gardner 1963 in den »Mathematical Games« im »Scientific American« über das Thema schrieb, wusste er eine geradezu tragische Geschichte zu erzählen. Ein Eisenbahnangestellter namens Clifford W. Adams war 1910 in einer Zeitung auf das (fehlerhaft gestellte) Problem gestoßen und hatte immer wieder daran gearbeitet – zunächst erfolglos. 47 Jahre später, während er sich von einer Operation erholte, machte er sich erneut daran, fand eine Lösung – und verlegte den Zettel, auf dem er sie notiert hatte. Es kostete ihn weitere fünf Jahre, die schon gefundene Lösung zu rekonstruieren.

Diesmal sandte Adams den Zettel an Gardner. Der war zunächst wenig beeindruckt, schickte die Lösung an einen Fachmann namens Charles W. Trigg und erfuhr dann zu seiner Überraschung, dass diese Lösung – bis auf Drehungen und Spiegelungen – nicht nur die einzige für das beschriebene Sechseck der Seitenlänge 3 ist, sondern die einzige überhaupt. Für alle anderen Seitenlängen gibt es nämlich keine Lösungen, abgesehen von der trivialen für die Seitenlänge 1: eine Eins in einem einsamen Sechseck.

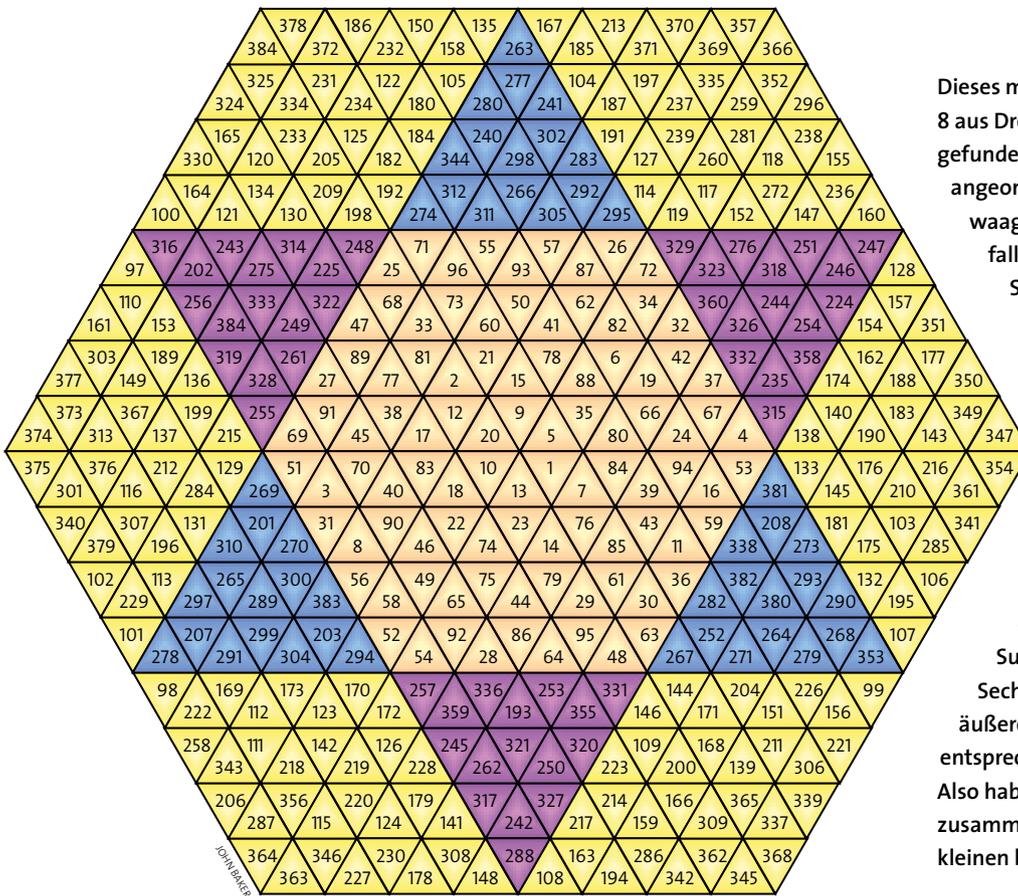
Die magischen Sechsecke von Stralsund

Hoffen wir, dass dem armen Adams die Erkenntnis erspart geblieben ist, dass seine jahrzehntelange Arbeit umsonst war. Nicht nur war inzwischen im Dezember 1958 in der »Mathematical Gazette« ein magisches Sechseck erschienen, das im Wesentlichen ein Spiegelbild von Adams' Lösung war. Schlimmer noch: Die Lösung war schon vor seiner Geburt bekannt. Ernst von Haselberg (1827–1905) hatte 1888 in der »Zeitschrift für den mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht« den Lesern die Aufgabe gestellt und musste die Lösung ein Jahr später mangels Einsendungen selbst nachtragen. Im Hauptberuf war er Stadtbaumeister von Stralsund. Dass heute noch das Rathaus seiner Heimatstadt die bekannte Schauffassade im Stil der Backsteingotik trägt, ist seinen Sanierungsbemühungen zu verdanken.

Warum ist von Haselbergs Lösung die einzig mögliche? Warum widersetzt sich das Sechseckmuster so hartnäckig der magischen Belegung, während das



Es gibt bis auf Drehungen und Spiegelungen nur ein einziges magisches Sechseck aus kleineren Sechsecken im strengen Sinn (a). Für die Belegung desselben Schemas mit den Zahlen von -9 bis 9 existieren dagegen mehrere Lösungen, darunter die von Ivan Paa-sche (1986), die bemerkenswerte Symmetrien aufweist (b). Bild c zeigt ein magisches Sechseck mit sechs Zeilen und Belegung von -13 bis 13.



Dieses magische Sechseck der Seitenlänge 8 aus Dreiecken hat John Baker 2004 gefunden. Die Zahlen von 1 bis 384 sind so angeordnet, dass die Summe über jede waagerechte, ansteigende oder abfallende Reihe gleich der magischen Summe $m = 4620$ ist. Kleine und große Zahlen sind säuberlich nach innen und außen getrennt: Das innere (orange) Sechseck mit Seitenlänge 4 enthält genau die Zahlen von 1 bis 96. Das »violette Dreieck«, bestehend aus den kleinen violetten Dreiecken und dem zentralen Sechseck, enthält viermal die magische Summe m ($16m$ für das ganze Sechseck minus dreimal $4m$ für die äußeren Streifen); dasselbe gilt für das entsprechend definierte »blaue« Dreieck. Also haben die kleinen violetten Dreiecke zusammen dieselbe Summe wie die kleinen blauen, nämlich $13\ 824$.

Quadratmuster in dieser Beziehung sehr entgegenkommend ist? Zwei Gründe springen ins Auge. Erstens ist im Sechseck jedes Feld an drei Gleichungen (Bedingungen für die Summe) beteiligt; das gilt im Quadrat nur für die Felder, die auf einer der beiden Diagonalen liegen, während sich ein »gewöhnliches« Feld nur in zwei Summen einfügen muss.

Zweitens und entscheidender: Die Reihen, die an die Stelle der Zeilen und Spalten im magischen Quadrat treten, sind unterschiedlich lang! Während die mittlere Zeile fünf Plätze zur Verfügung hat, um die magische Summe von 38 zu erreichen, müssen die oberste und die unterste das mit jeweils nur drei Plätzen schaffen. Kein Wunder, dass tendenziell die großen Zahlen am Rand liegen – mit der merkwürdigen Ausnahme 3 in der linken unteren Ecke – und die kleinen in der Mitte. Das schränkt die Freiheit, die Zahlen auf die Felder zu verteilen, erheblich ein – so sehr, dass nur dieses eine Sechseck übrig bleibt.

An dieser Stelle kommt Hans-Friedrich Bauch, Mathematikprofessor an der Fachhochschule Stralsund, ins Spiel. Ein ganzes Jahrhundert nach von Haselberg, 1989, entdeckte er im Stralsunder Stadtarchiv dessen Originalaufzeichnung und begann daraufhin eigene Untersuchungen, an denen auch seine Studenten beteiligt waren.

Wie häufig in der Mathematik, war eine geschickte Bezeichnungsweise der Schlüssel zu neuen Erkenntnissen. Bauch sortierte die magischen Figuren – quadratische wie sechseckige – nicht nach der Seitenlänge, sondern nach der Zeilenzahl. Für die Quadrate macht das keinen Unterschied; bei den Sechsecken öffnet es einem die Augen dafür, dass es neben den Anordnungen mit ungerader Seitenlänge auch solche mit gerader Zeilenzahl gibt; das Bild links unten zeigt neben zwei Fünfzeilern einen Sechszeiler (*c*).

Diese neuen Sechseckmuster sind weniger symmetrisch als die bisherigen; so wechseln sich beim Sechszeiler

die Seitenlängen 3 und 4 ab. Das Zentrum der – etwas geringeren – Drehsymmetrie liegt nun nicht mehr im Mittelpunkt eines Sechsecks, sondern auf einer Ecke des Musters.

Die erste Erkenntnis ist enttäuschend: Sechseckssechsecke mit gerader Zeilenzahl können überhaupt nicht magisch sein. Ein einfaches Argument (Kasten S. 70) zeigt, dass ein Vierzeiler die magische Summe null haben müsste; und die Beweisführung lässt sich auf jede gerade Zeilenzahl erweitern.

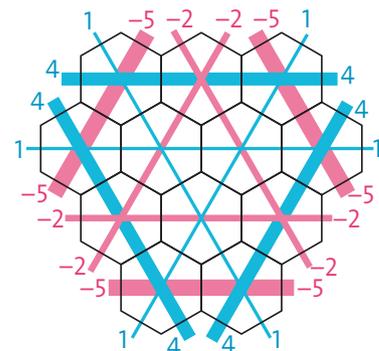
An dieser Stelle macht Bauch aus der Not eine Tugend. Wenn die magische Summe null sein muss, dann suchen wir eben nach magischen Sechsecken mit Summe null! Dazu lässt man die Einträge nicht mehr – im Beispiel des Sechsecks mit Seitenlänge 3 – von 1 bis 19 laufen, sondern von -9 bis 9. Und für jemanden, der keine Angst vor negativen Zahlen hat, ist es nicht weniger natürlich, eine Folge ganzer Zahlen ausgewogen um die Null herum anzuordnen, als sie von 1 an loslaufen zu lassen.

Das vierzeilige Sechseckssechseck hat keine magische Belegung

Beweis: Nehmen wir an, es gäbe eine solche Belegung mit der magischen Summe m . Dann addieren wir zunächst alle langen Viererreihen (dünne blaue Linien). Dabei werden die drei zentralen Felder doppelt gezählt. Zur Kompensation addieren wir -2 -mal die inneren Dreierreihen (dünne rote Linien). Dadurch gehen drei Felder am äußeren Rand mit dem Faktor -4 in die Summe ein. Zum Ausgleich addieren wir 4 -mal die äußeren

Dreierreihen (dicke blaue Linien) und schließlich -5 -mal die äußeren Zweierreihen (dicke rote Linien).

Nach Konstruktion summieren sich die Beiträge in jedem Feld zu null. Also muss die Gesamtsumme gleich null sein. Andererseits müsste dieselbe Summe $3m - 2 \cdot 3m + 4 \cdot 3m - 5 \cdot 3m = -6m$ betragen, denn die Summe über jede Reihe ist nach Annahme gleich der magischen Summe m . Daraus folgt $6m = 0$.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Freiheit, die man sich auf diese Weise herausnimmt, trägt alsbald reiche Früchte. Es wird nämlich deutlich einfacher, die magischen Bedingungen zu erfüllen. Die kurzen Reihen müssen sich nicht mehr anstrengen, um auf die magische Summe zu kommen, und die langen laufen nicht mehr Gefahr, zu groß zu werden. Es genügt, wenn jede von ihnen durchschnittlich ist; nichts anderes bedeutet eine Summe von 0.

Und siehe da: In dieser Form hat das Problem nicht nur genau eine, sondern mehrere Lösungen. Das Bild S. 68 *b* zeigt eine davon. Für den Sechseiler fanden die Studenten Christian Schäfer und Ronny Zapf 2006 eine magische Belegung mit Summe 0 (Bild S. 68, *c*).

Auch die Beschränkung auf die Seitenlängen 1 und 3 entfällt. Wahrscheinlich gibt es unter den gelockerten Bedingungen magische Sechsecke jeder Größe. Der derzeitige Rekordhalter hat die Seitenlänge 8, Einträge von -84 bis 84 (Bild S. 71 oben) und – bei der symmetrischen Belegung unvermeidlich – die magische Summe 0.

Wie bei den magischen Quadraten kann man davon ausgehen, dass mit

zunehmender Größe die Zahl der möglichen Anordnungen schneller anwächst als die Zahl der Bedingungen. Damit steigt auch die Anzahl der Lösungen – und der Rechenaufwand fürs Durchprobieren.

Sechseckssechsecke und Dreieckssechsecke

Alles in allem bleiben magische Sechsecke aus Sechsecken schwer aufzuspüren und in jedem Sinn ungesellige Einzelgänger, selbst wenn man sich die Freiheit nimmt, die Folge der Einträge mit irgendeiner Zahl anfangen zu lassen. Flexibilität und eine gewisse Reichhaltigkeit kommen erst auf, wenn man die einzelnen Bausteine eines Bienenwabennusters »zersägt«, indem man vom Mittelpunkt zu jeder der Ecken schneidet. Das ergibt die dritte und letzte aller überhaupt möglichen Pflasterungen der Ebene mit regulären Vielecken: die mit gleichseitigen Dreiecken.

Diese fügen sich bereitwillig zu einem Sechseck, das im Gegensatz zu den Bienenwabennustern sogar einen glatten statt gezackten Rand hat. Allerdings ergeben sich hier nun die symmetrischen

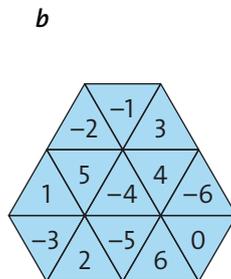
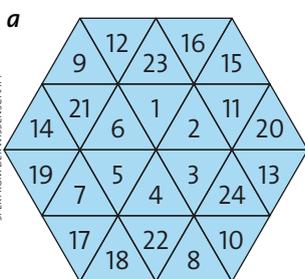
rischesten Figuren, wenn nicht ein Dreiecksmittelpunkt, sondern eine Ecke den geometrischen Mittelpunkt des Musters bildet.

Wieder stellt sich die Frage, ob man diese Dreiecke so mit Zahlen belegen kann, dass alle geraden wie schrägen Reihen dieselbe Summe ergeben. Eine Reihe enthält lauter Dreiecke, die mit der Spitze abwechselnd nach oben und nach unten zeigen.

Diesmal lautet die Antwort »Ja«. Hans-Friedrich Bauch selbst hat 1991 eine magische Belegung im strengen Sinn für das vierzeilige Dreieckssechseck gefunden (Bild unten, *a*) – und es gibt noch mehr. Damit es eng wird mit den Lösungen, muss man schon zum kleinsten Exemplar der weniger symmetrischen Variante übergehen (Bild unten, *b*). Für dieses Muster gibt es nur zehn wesentlich verschiedene Lösungen mit der Summe 0.

Wieder wächst die Zahl der Möglichkeiten rasch mit der Seitenlänge an. John Baker, freischaffender Mathematikpädagoge in Australien, hat viele magische Dreieckssechsecke gesucht und gefunden, bis zu dem monumentalen Muster der Seitenlänge 8 und 384 Einträgen (Bild S. 69).

Die Anzahl der Dreieckssechsecke zu dieser Seitenlänge muss gigantisch sein, schon weil es häufig gelingt, die kleinsten Zahlen in dem zentralen Sechseck mit der halben Seitenlänge so unterzubringen, dass dieses selbst magisch ist. Dann kann man ein magisches Zentralsechseck gegen ein ande-



Ein magisches Dreieckssechseck der Seitenlänge 2, gefunden von Hans-Friedrich Bauch 1991 (*a*); magisches Dreieckssechseck minimaler Größe mit Dreieck im Zentrum (*b*), berechnet 2007 von Matias Palomäki.

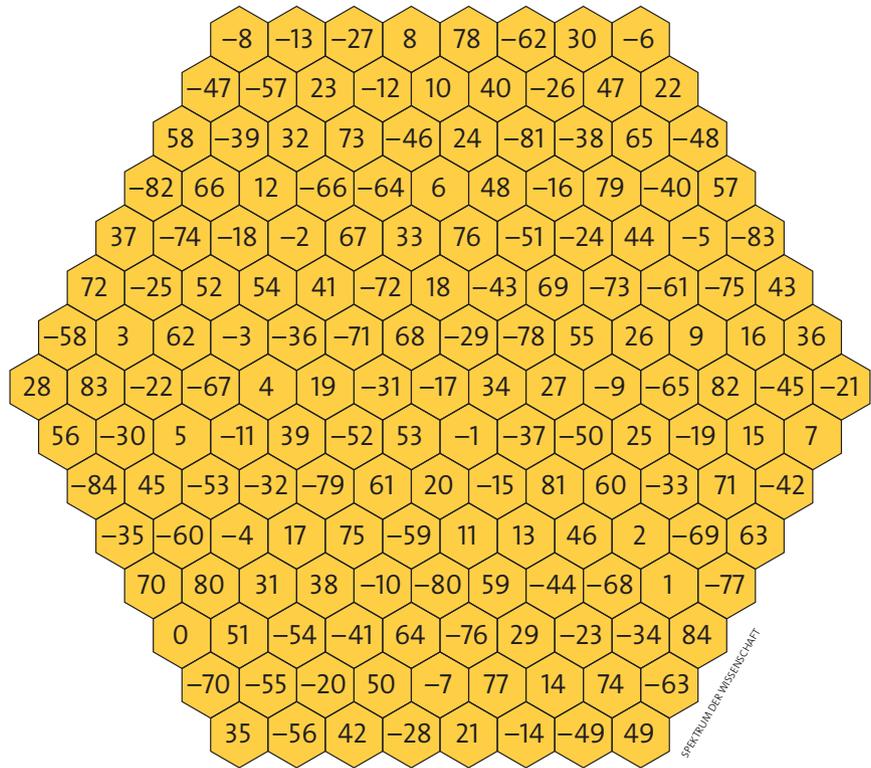
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

res austauschen, ohne dass sich im Außenbereich etwas ändern müsste. Also gibt es mindestens so viel große magische Sechsecke, wie es kleine gibt, mal der Zahl der Möglichkeiten, die größeren Zahlen im Außenbereich anzuordnen. Und das ist nur eine untere Abschätzung. Wenn man bedenkt, dass es zur Seitenlänge 2 bereits 59674527 wesentlich verschiedene magische Belegungen gibt ...

Wie in den Sechseckssechsecken gibt es Reihen, die nicht parallel sind und trotzdem kein Feld gemeinsam haben. Mehr noch: Zwei Reihen, die sich überhaupt treffen, haben im Allgemeinen gleich zwei gemeinsame Felder, was die Erfüllung der Summengleichungen eher erleichtert als erschwert.

Wenn das Schema, wie häufig, eine gerade Anzahl von Feldern hat, kann man die magische Summe 0 nicht durch Beginn der Zahlenfolge beim richtigen negativen Wert erzwingen. Bei 24 Einträgen ist der Bereich von -11 bis 12 zu groß und der von -12 bis 11 zu klein. Die Lösung des Problem besteht darin, dass man die Null weglässt. Die Aufgabe lautet nun also, die Zahlen von 1 bis 12 und von -1 bis -12 so zu verteilen, dass in jeder Reihe die magische Summe 0 herauskommt.

Unter dieser Bedingung gibt es nun eine derartig große Anzahl an Lösungen, dass man sie zu einem Einpersonenspiel umfunktionieren kann. Bauchs Kollege Klaus-Peter Rudolph hat es erfunden und »Gurami« genannt (Bild unten). Man spielt es mit Papier und Bleistift (oder äquivalenten Mit-



Dieses magische Sechseck der Seitenlänge 8 hat Louis K. Hoelbling am 5. Februar 2006 in die englische Wikipedia (Stichwort »magic hexagon«) eingestellt.

teln am Computer). Der Aufgabensteller gibt alle Vorzeichen vor: Positive Felder sind hell, negative dunkel. Wie beim Sudoku sind einige Felder bereits ausgefüllt. Die restlichen muss der Spieler so aus dem noch verfügbaren Zahlenvorrat belegen, dass in jeder Reihe die Summe der hellen Felder gleich derjenigen der dunklen Felder ist.

Der Name »Gurami« spielt auf den gleichnamigen, in Ostasien verbreiteten Speisefisch an, der auch bei Aquariumsbesitzern wegen seines charakteristischen Kussmundes beliebt ist. Auf ihn kommt es beim Spiel jedoch nicht an, sondern vielmehr auf die Flossen. Geeignet stilisiert, sind sie in Richtung der Reihen angeordnet, die es mit den richtigen Zahlen zu füllen gilt. Auf ihnen kann man Zwischenergebnisse notieren.

Auch hier kommt es darauf an, durch geschicktes Kombinieren die Zahl der zu probierenden Möglichkeiten niedrig zu halten. Anders als beim Sudoku muss man jedoch ein bisschen rechnen. ☺

DER AUTOR



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

QUELLEN

Bauch, H.-F.: Magische Figuren in Parketten. In: Mathematische Semesterberichte 38, S. 99–115, 1991

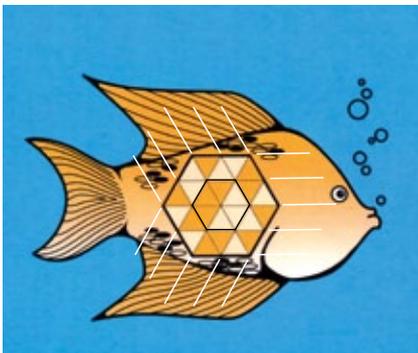
Gardner, M.: Mathematical Games. Permutations and Paradoxes in Combinatorial Mathematics. In: Scientific American 8/1963, S. 112–119

Rudolph, K.-P., Bauch, H.-F.: Gurami – das neue Zahlenrätsel. Mit 60 Aufgaben für kreative Tüftler. Bambus Spieleverlag, Berlin 2011

WEBLINKS

www.gurami-raetsel.de
Beschreibung des Rätseltyps, Beispielaufgaben und Lösungshinweise

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1155298



Der Gurami-Zahlenfisch mit leicht abgewandelten Flossen (weiße Striche) zum Notieren von Zwischenergebnissen.

Wie riskant ist das Fracking?

Für höhere Förderleistungen und zur Erschließung unkonventioneller Quellen von Erdgas werden Gesteinsformationen rund um das Bohrloch durch Einpressen einer Flüssigkeit aufgebrochen. Gefährdet dieses »Fracking« das Grundwasser?

Von Chris Mooney

Umweltschützer warnen vor einer neuen Gefahr für das Trinkwasser. Sie drohe von der massiven Ausweitung einer umstrittenen Bohrmethode zur Gewinnung von Erdgas. Dieses »hydraulic fracturing« (hydraulisches Aufbrechen) oder kurz Fracking kam schon im letzten Jahrhundert ab den späten 40er Jahren vereinzelt zur Anwendung: Wenn eine konventionelle, vertikale Bohrung auf eine Schiefergesteinsschicht traf, wurden mit Chemikalien versetztes Wasser und Sand unter hohem Druck in die Erde gepresst, um das Gestein aufzubrechen und das enthaltene Erdgas freizusetzen. Heutzutage kom-

binieren Mineralölkonzerne diese Methode jedoch mit der neuen Horizontalbohrtechnik. Dabei wird eine zunächst abwärtsgerichtete Bohrung nach einer 90-Grad-Drehung innerhalb der Gesteinsschicht parallel zur Erdoberfläche um mehrere hundert Meter fortgesetzt.

Diese Neuerung hatte einen regelrechten Gasrausch zur Folge. Abgeschlossene, methanreiche Schiefergesteinsschichten ließen sich plötzlich gezielt ausbeuten. In den USA gibt es schätzungsweise 23 Billionen Kubikmeter an erschließbaren Vorkommen dieses »unkonventionellen« Schiefergases; weltweit dürften es über 900 Billionen und in Deutschland nach den jüngsten Zahlen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zwischen 0,7 und 2,3 Billionen Kubikmeter sein. Allerdings könnte die Gewinnung schwieriger und teurer werden als von den Bohrfirmen behauptet. Darauf lassen jedenfalls E-Mails aus Industriekreisen schließen, welche die »New York Times« im Juni 2011 veröffentlichte.

Als wesentliche Hürde erweist sich, dass zum Fracking bei Horizontalbohrungen sehr viel größere Mengen an Wasser und Chemikalien erforderlich sind als bei vertikalen Bohrlöchern. Deshalb braucht man riesige Becken oder Tanks zur Speicherung des mit Chemikalien belasteten »Flowback«, wie das zurückgepumpte Wasser nach dem Aufbrechen der Bohrlöcher genannt wird.

Um sich ein Bild von den Gefahren des Frackings zu machen, veranstaltete die Environmental Protection Agency (EPA), die oberste Umweltschutzbehörde der Vereinigten Staaten, im März 2011 eine Tagung in Arlington (Virginia). Eingeladen waren unter anderem Wissenschaftler der führenden Erdgas- und Bohrfirmen wie Devon Energy, Chesapeake und Halliburton. Sie sollten zu der Frage Stellung nehmen, ob Fracking – wie vielfach vermutet – in verschiedenen US-Bundesstaaten für das Eindringen von Giftstoffen und Erdgas in Trinkwasservorkommen verantwortlich ist. Die Antwort hat große Bedeutung in einem sich zuspitzenden Konflikt, der in den US-Bundesstaaten New York, Pennsylvania, Texas und Colorado sowie in Ländern wie Australien,

AUF EINEN BLICK

UMSTRITTENE BOHRMETHODE

- 1 Die neuartige Technik der **Horizontalbohrung** macht auch unkonventionelle Erdgasquellen wie **Schieferformationen** zugänglich. Allerdings muss die gashaltige Gesteinsschicht dazu entlang der Bohrung in regelmäßigen Abständen aufgebrochen werden. Das geschieht durch Einpressen großer Mengen mit Chemikalien versetzten Wassers.
- 2 Bei diesem so genannten **Fracking** entstehen Risse im Gestein. Durch sie könnten, wie Umweltschützer befürchten, Gase und die zum Aufbrechen benutzte Flüssigkeit in höher gelegene Schichten aufsteigen und dort das **Grundwasser** verunreinigen.
- 3 Tatsächlich gibt es in den USA dokumentierte Fälle, in denen Brunnen in der Nähe von Erdgasbohrungen **giftige Chemikalien** enthielten und sogar Leitungswasser entflammbar war.
- 4 Genaue Untersuchungen ergaben jedoch, dass nicht das Fracking selbst die Verseuchungen verursacht hatte, sondern unsachgemäßes **Einzementieren** des Förderrohrs oder fehlerhafter Umgang mit dem »**Flowback**«, dem nach dem Aufbrechen zurückgepumpten Wasser.
- 5 Fracking ist wegen der **enormen Wassermengen** jedoch besonders anfällig für solche Probleme. Außerdem lässt sich erst mit weiteren Untersuchungen definitiv klären, ob wirklich keine Verbindung zwischen dem Bohrloch und höher gelegenen Grundwasserleitern entstehen kann.





ILLUSTRATIONEN: DON FOLEY

So läuft das Fracking ab: Nachdem eine Bohrung in eine mehr als 1500 Meter tief liegende Schieferformation abgeteuft und dann in horizontaler Richtung weitere 1500 Meter fortgesetzt worden ist, wird der Bohrmeißel herausgezogen

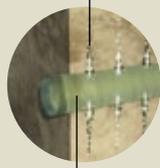
(untere Diagramme, links) und ein Gemisch aus Wasser, Sand und Chemikalien durch den Schacht in den Untergrund gepresst (Mitte). Dadurch bricht das Schiefergestein, und aus den entstehenden Rissen kann das eingeschlossene Gas entweichen (rechts). Es drückt die Flüssigkeit zurück zur Oberfläche. Das Abwasser wird in Becken oder Tanks gespeichert.

Schiefergestein

Bruchstelle



Bohrmeißel



Fracking-Flüssigkeit



Erdgas

Frankreich, Kanada und nicht zuletzt Deutschland ausgetragen wird (siehe Kasten auf S. 76/77).

Als unabhängiger Experte nahm auch Anthony Ingraffea, Professor für Ingenieurwissenschaften von der Cornell University in Ithaca (New York), an der Tagung teil. Dort erlebte er, wie die Industrieforscher den Verdacht weit von sich wiesen, Fracking könne bestätigte Fälle von Kontaminationen verursacht haben, bei denen Brunnen giftige Chemikalien enthielten und aus Wasserhähnen ein brennbares Wasser-Gas-Gemisch kam. Schließlich, so die Argumentation, läge die Schieferschicht ein bis zwei Kilometer tief in der Erde, von flacheren Grundwasserleitern durch dicke Gesteinsformationen getrennt. Ebendeshalb sei es bisher ja so schwierig gewesen, das Schiefergas überhaupt zu erschließen. Auch wenn bei Fracking starke Kräfte ausgeübt würden, reichten diese keineswegs aus, um Risse zu erzeugen, die von der Bohrung bis zum oberflächennahen Grundwasser reichten.

»Ich sah imposante PowerPoint-Präsentationen, die zeigten, wie die Firmen sich das Geschehen im Untergrund vorstellen«, sagt Ingraffea. Früher arbeitete er für das weltweit operierende Erdgasversorgungsunternehmen Schlumberger, wurde dann aber zu einem der führenden Kritiker des Gasrauschs. »Der Referent kam jeweils zu dem Schluss, eine Verunreinigung des Grundwassers sei höchst unwahrscheinlich.« Doch diese Analysen, erklärt der Cornell-Wissenschaftler, berücksichtigten nur einzelne Fracks, also einen einmaligen Wasserstoß in eine seitliche Schiefergesteinsschicht. Um Zugang zu möglichst viel Erdgas zu bekommen, würden die Firmen pro Standort jedoch ein Dutzend oder mehr Löcher in geringen Abständen bohren. Das könne das umgebende Gestein in zahlreiche Segmente aufbrechen und einmal entstandene Risse nach und nach vertiefen.

Schuldig per Definition?

Die Beschäftigung mit dem Thema kommt reichlich spät. Zumindest gilt das für die USA, wo Fracking bereits in großem Stil zum Einsatz kommt. Eine von der EPA in Auftrag gegebene, umfangreiche Sicherheitsstudie wird frühestens Ende dieses Jahres erwartet – und das auch nur in einer vorläufigen Fassung. Bis dahin ist eine abschließende Bewertung kaum möglich.

Grund zur Sorge gibt es durchaus. Ehrfurcht gebietend sind allein schon die 7,5 bis 15 Millionen Liter Wasser, versetzt mit rund 20 000 bis 100 000 Litern an Chemikalien, die für jede einzelne horizontale Bohrung benötigt werden. Diese Menge ist mit der Anzahl der Seitenschächte zu multiplizieren, die von der Sohle jeder vertikalen Bohrung vorgetrieben werden. Der Transport und die Aufbewahrung der Flüssigkeiten erfordern Flotten von Tanklastwagen sowie riesige Speicherbehälter.

Noch problematischer ist, den Flowback nach dem Fracking zu bewältigen. Bis zu 75 Prozent des Wassers, das in die Erde gepresst wird, kehrt zur Oberfläche zurück. Es ist nicht nur mit einem Chemikaliencocktail belastet – Zusätzen, die das Fließen der Fracking-Flüssigkeit erleichtern, das Bohrrohr

schützen und Bakterien abtöten –, sondern enthält oft auch radioaktives Material und Salze aus dem Untergrundgestein. Diese Giftbrühe muss vor Ort zwischengespeichert und schließlich zu Abwasserreinigungsanlagen transportiert werden. Die meisten Firmen nutzen offene Becken im Erdreich. Viele US-Bundesstaaten verlangen, zumindest die Böden dieser Gruben mit Kunststofffolien auszukleiden, um Leckagen vorzubeugen. Andere fordern zusätzlich einen ausreichenden Abstand der Becken von Oberflächengewässern. Doch diese Vorsichtsmaßnahmen können nicht verhindern, dass etwa Beckenverkleidungen reißen oder die Behälter bei Starkregen überlaufen. Im Bundesstaat New York ist deshalb geplant, nur Wassertanks zur Speicherung des Flowbacks zuzulassen und Vorkehrungen für den Fall des Überlaufens zu verlangen.

Trotzdem kann es immer zu Unfällen kommen. »Dies ist kein risikoloses Geschäft«, erklärt Terry Engelder, Experte für Fracking an der Pennsylvania State University in University Park. Im Grunde ein Befürworter des Verfahrens, hat er damit operierende Firmen dennoch gelegentlich kritisiert. Einige in der »New York Times« veröffentlichte Enthüllungsgeschichten belegen die Kontamination der Haupteinzugsgebiete von Flüssen in Pennsylvania, etwa des Susquehanna und des Delaware. Ursache war hier der unsachgemäße Umgang mit Flowback. In Pennsylvania floss aus Leitungen in Haushalten verseuchtes Wasser, das manchmal sogar entflammbar war. Bohrfirmen wurden vorgeladen und mit Bußgeldern belegt. Jüngst verhängte das Umweltministerium von Pennsylvania mehr als eine Million Dollar Strafe gegen die Firma Chesapeake, weil sie durch unsachgemäßes Bohren die Brunnen von 16 Haushalten mit Methan verunreinigt hatte.

Solche Vorkommnisse lassen sich dem Fracking anlasten, sofern sich die Bezeichnung auf den gesamten Fördervorgang bezieht, nicht jedoch, wenn nur das Aufbrechen des Umgebungsgesteins im Untergrund gemeint ist. Selbst Experten sind da unterschiedlicher Ansicht. »Die Verwendung von Chemikalien in dieser Größenordnung stellt grundsätzlich eine Gefahr dar, aber mehr im allgemein industriellen Sinn, nicht, was das Fracking selbst betrifft«, argumentiert Val Washington, ehemals stellvertretende Kommissarin im Umweltministerium des Bundesstaats New York. Doch Ingraffea sieht das anders. »Die Industrie sollte aufhören, auf dem Argument ›Nicht das Fracking verursacht die Verunreinigung‹ herumzureiten. All die Begleitumstände sind ein notwendiger Bestandteil des Verfahrens. Die Bohrfirmen betreiben Wortklauberei und verstecken sich hinter Definitionsfragen.«

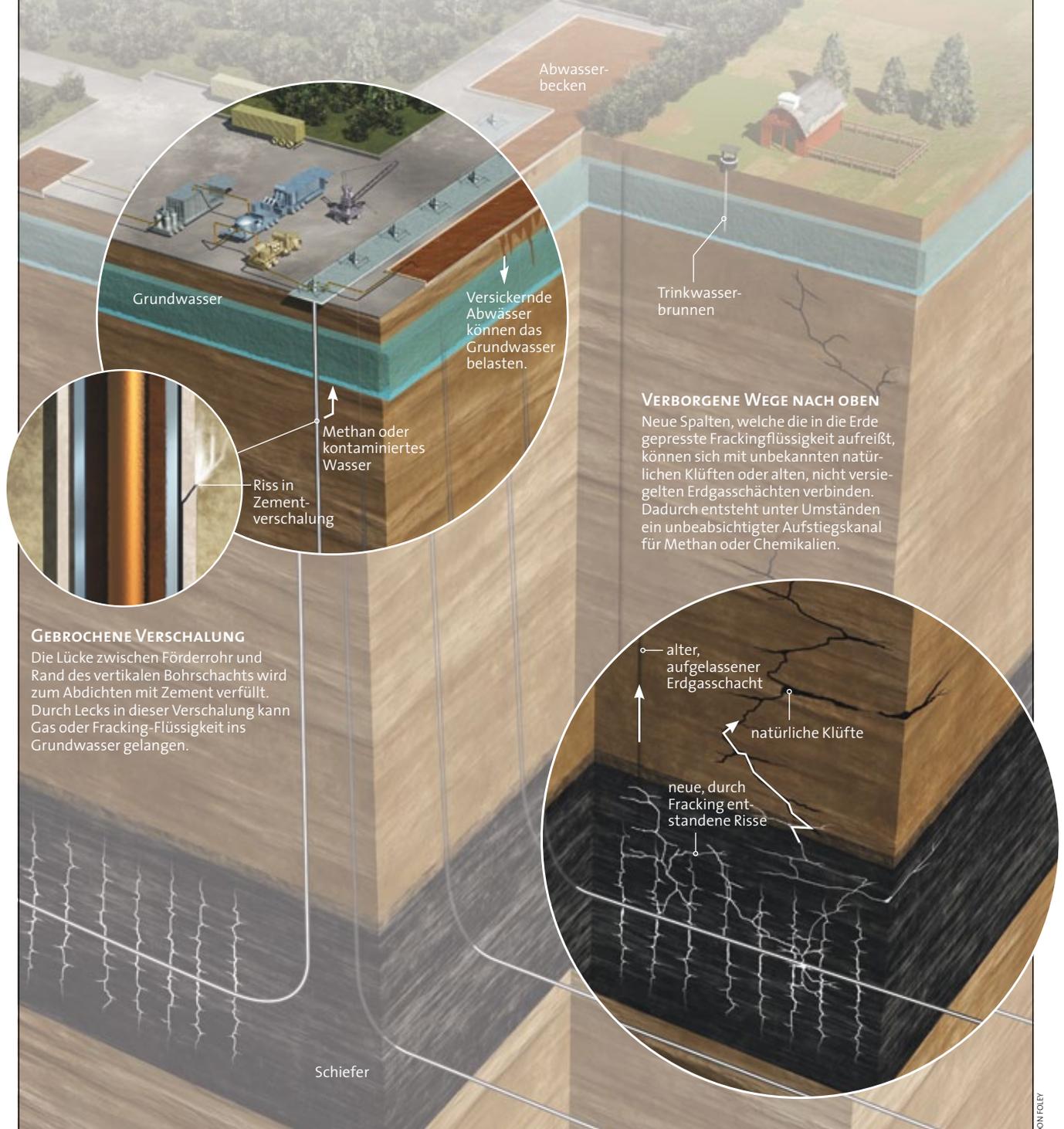
Allerdings haben die Firmen insofern Recht, als es die Risiken durch das Aufbrechen des Gesteins selbst sind, welche die Öffentlichkeit am meisten beunruhigen. Es geht dabei um Befürchtungen, dass das Fracking vielleicht unvorhergesehene Durchlässe für Gase oder Flüssigkeiten schafft, so dass sie von den tief liegenden Schiefervorkommen bis in das oberflächennahe Grundwasser aufsteigen können.

Wie komplex dieses Thema ist, zeigt eine Zwangsmaßnahme der EPA im Jahr 2010 gegen Range Resources, eine Erdgas-

Potenzielle Gefahren für das Trinkwasser

Um möglichst viel von dem Gas einer Schieferformation zu fördern, werden rund um ein Auffangbecken für das Abwasser auf engem Raum ein Dutzend und mehr Horizontalbohrungen niedergebracht und gefracked. Auf drei Arten kann es dabei zur Verunreinigung von Grundwasser kommen. Erstens besteht die Gefahr, dass das Auffangbecken für die chemikalienbelasteten Abwässer undicht wird oder überfließt (obere Detailgrafik).

Letzteres ist im September 2011 in Pennsylvania infolge einer Überflutung durch den Tropensturm Lee passiert. Zweitens kann relativ weit oben im vertikalen Bohrschacht ein Leck in der Zementverschalung auftreten (Ausschnittvergrößerung links). Drittens besteht die Möglichkeit, dass sich durch das Fracking entstandene Risse mit natürlichen Spalten im Gestein oder alten Bohrschächten verbinden (untere Detailgrafik).



gesellschaft aus Fort Worth, die Lagerstätten im berühmten Barnett-Schiefer in Texas exploriert. Die Umweltbehörde fand in zwei Trinkwasserbrunnen von Häusern in der Nähe zweier Erdgasbohrungen dieser Firma Verunreinigungen mit thermogenem, also unter Hitzeeinwirkung entstandenem Methan aus großen Tiefen. Es lässt sich von biogenem Methan unterscheiden, das von Mikroorganismen unter Sauerstoffabschluss in jenen oberflächennahen Gesteinsschichten produziert wird, in denen sich das Grundwasser befindet. Zudem behauptete die EPA, das Wasser einer der Brunnen enthalte Substanzen wie Benzol, die manchmal als Zusatz beim Fracking dienen, und sei entflammbar. Deshalb wies die Behörde das Unternehmen an, den betroffenen Parteien saube-

res Wasser zu liefern. Außerdem sollte die Firma untersuchen, ob auch andere Brunnen in der Nähe verunreinigt seien.

Range Resources erhob Einspruch und bestritt vor einem Berufungsgericht jegliche Verantwortung unter Hinweis auf die vorhandenen »langen horizontalen und vertikalen Distanzen«. Überraschenderweise nahm die EPA Ende März ihre Zwangsmaßnahme vorläufig zurück, weil sie diese ohne vorherige Anhörung der Firma verhängt und ein anderes US-Gericht in einem ähnlichen Fall inzwischen das Recht auf eine solche Anhörung bestätigt hatte. Aber selbst wenn, wie die Umweltbehörde meint, Range Resources verantwortlich ist, muss nicht unbedingt das Fracking tief in der Erde das Problem verursacht haben. Daher verlangte die EPA auch von

Fracking in Deutschland

Hier zu Lande spielt Fracking bisher keine große Rolle. Es wurde seit den 1960er Jahren gelegentlich bei herkömmlichen vertikalen Erdgasbohrungen in großen Tiefen eingesetzt. In Verbindung mit unkonventionellen Lagerstätten und Horizontalbohrungen kam es dagegen nur ganz vereinzelt probeweise zur Anwendung.

Das könnte sich allerdings ändern. Die herkömmlichen deutschen Erdgasreserven von geschätzten 133 Milliarden Kubikmetern werden bei der momentanen jährlichen Förderung von rund 13 Milliarden Kubikmetern, die etwa ein Sechstel des heimischen Bedarfs deckt, voraussichtlich in zehn Jahren erschöpft sein. Daneben gibt es jedoch größere Mengen an unkonventionellen Vorkommen in Schiefergesteinen, Sand- oder Kalksteinhorizonten und Kohleflözen (Karte rechts). Der genaue Umfang ist allerdings noch ziemlich unsicher. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe erstellt gerade eine Studie dazu und hat im April erste Ergebnisse vorgelegt. Demnach bewegen sich die mutmaßlichen Vorräte zwischen 0,7 und 2,3 Billionen Kubikmetern, wovon aber wohl nur 10 bis 30 Prozent tatsächlich gewinnbar wären.

Die Förderung dieses Erdgases würde den Einsatz von Fracking in großem Maßstab erfordern. Tatsächlich hat die Industrie erhebliches Interesse daran. Das zeigt sich an der beträchtlichen und stetig steigenden Zahl an Konzessionen für Explorationsgebiete, die eine Reihe von Energieunternehmen erworben hat.

Ausgelöst durch Berichte über Verunreinigungen des Grundwassers in den USA, regt sich angesichts dieser Entwicklung auch in Deutschland Widerstand. Bürgerinitiativen haben sich gebildet, die ein Verbot des umstrittenen Verfahrens fordern – oder zumindest ein Moratorium, bis die Risiken geklärt sind. In Frankreich gibt es ein solches Moratorium bereits. Hier zu Lande wurde auf Bundesebene wenig unternommen. Exumweltminister Norbert Röttgen versprach nur, eine Studie in Auftrag zu geben, die Chancen und Risiken der unkonventionellen Erdgasförderung in Deutschland beurteilen soll. Den interessierten Firmen empfahl er, vorerst auf das Verfahren zu verzichten. Nach bisheriger Rechtslage hätte der Bund allerdings auch nicht die Befugnis, Verbote zu erteilen, da die Zuständigkeit bei den regionalen Bergämtern liegt.

Betroffen sind hauptsächlich zwei Bundesländer. In Nordrhein-Westfalen hatten die massiven Protesten aus der Bevölkerung teilweise Erfolg: Hier bleiben alle Anträge zur unkonventionellen Gasförderung einstweilen unbearbeitet, bis das Ergebnis einer jüngst ausgearbeiteten Risikostudie vorliegt. Niedersachsens Regierung steht dem Fracking wohlwollender gegenüber; vom Wirtschaftsministerium gibt es keine Einwände dagegen. Aber auch in diesem Bundesland regen sich Proteste verschiedenster Gruppen, so dass angekündigte Bohrungen auf unbestimmte Zeit verschoben wurden.

Um das Vertrauen der Bevölkerung zu gewinnen, hat die Firma ExxonMobil einen ungewöhnlichen Weg beschritten und 2011 im Internet einen »Informations- & Dialogprozess« initiiert (dialog-erdgasundfrac.de). Das Unternehmen beauftragte einen unabhängigen Expertenkreis, eine Risikostudie zu erstellen, und versprach, sich an das Ergebnis zu halten. Dieses liegt inzwischen vor und gibt Entwarnung mit Vorbehalten. Zwar bestehe kein sachlicher Grund für ein generelles Verbot des Frackings, doch seien eine Reihe strikter Bedingungen und Einschränkungen zu beachten.

Außerdem rief ExxonMobil einen Arbeitskreis aus »gesellschaftlichen Akteuren« ins Leben, die so Gelegenheit erhielten, ihre Anliegen vorzubringen sowie die Vorgehensweise und Ergebnisse des Expertenkreises kritisch zu bewerten. Schließlich konnte und kann, wer will, online Fragen stellen und Kommentare abgeben. Der Ausgang dieses Dialogs ist freilich offen.

Gerhard Trageser

In Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen gibt es ausgedehnte Lagerstätten von Erdgas in Kohleflözen, in Schiefergesteinen und -tonen sowie in dichten Sand- oder Kalksteinhorizonten (Tight Gas). Die Grafik zeigt die mutmaßliche Ausdehnung dieser Vorkommen. Eingezeichnet sind außerdem die Gebiete, in denen Energieunternehmen bereits Konzessionen für Explorationsbohrungen erworben haben.

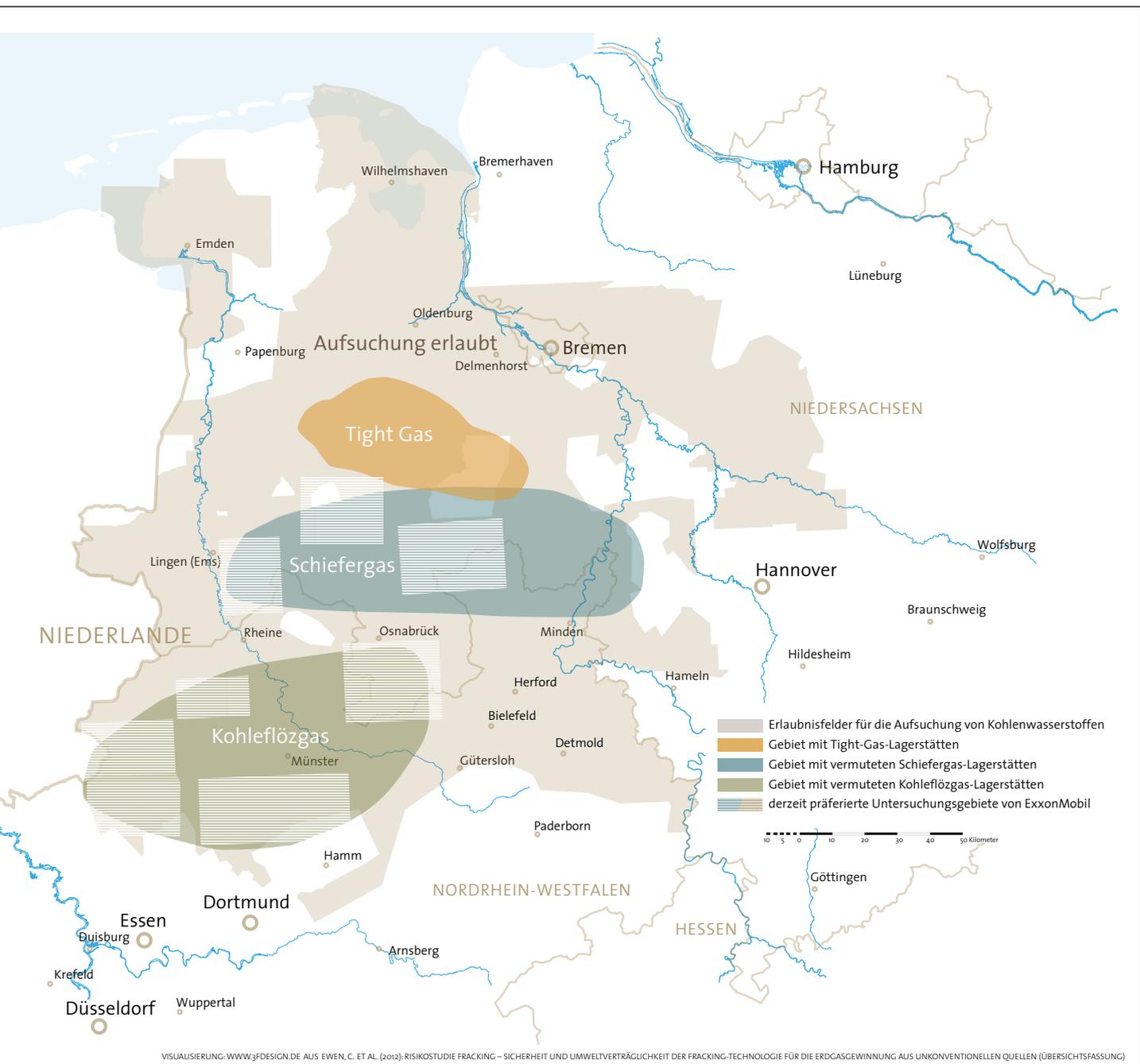
dem Unternehmen, zu ermitteln, wie das Erdgas an die Oberfläche gelangt sei.

Da gibt es viele Möglichkeiten. So könnte das Methan die gesamte Strecke vom aufgebrochenen Schiefergestein bis zur Oberfläche auf irgendeiner unbekanntem Route zurückgelegt haben. Vielleicht entwich es aber auch aus einem Leck in einem der einzementierten Rohre im vertikalen Teil des Bohrlochs, das sich viel näher an den Grundwasser führenden Schichten befand.

In der Tat gilt eine schadhafte Zementabdichtung als Hauptquelle von Verunreinigungen im Boden bei der Erdgasförderung. Ein solcher Defekt hat laut Definition der Industrie jedoch nichts mit dem Fracking zu tun. Auf dem Weg

nach unten muss jede Bohrung die oberflächennahen, Grundwasser führenden Gesteinsschichten passieren. Dabei trifft sie möglicherweise auch auf unbekannte, kleinere Erdgasaschen. Damit kein Gas an der Außenseite des Leitungsrohrs aufsteigen und von dort ins Grundwasser übergehen kann, wird deshalb die Lücke zwischen ihm und der Wand des Bohrlochs mit Zement gefüllt. Durch ein Leck in dieser Verschalung könnte aber nicht nur Gas, sondern auch der mit Chemikalien belastete Flowback austreten, der nach dem Aufbrechen des Schiefers unter hohem Druck nach oben zurückströmt.

Aus diesem Grund hält der Hydrogeologe Anthony Goro-
dy, der als Berater von Erdgasfirmen das Fracking im Prinzip



befürwortet, die Zementummantelung für die offensichtliche Schwachstelle des Verfahrens. Andere Wissenschaftler pflichten ihm bei. »Wenn Sie beim Verschalen der Bohrung nachlässig arbeiten, schaffen Sie möglicherweise ein Leck«, erklärt der Ökologe Robert B. Jackson von der Duke University in Durham (North Carolina). Obwohl viele Bestimmungen die Zementierung regulieren und die Industrie bestrebt war, ihre Verfahren zu verbessern, dürfte das Problem nicht vollständig in den Griff zu bekommen sein. »Ein erheblicher Prozentsatz der Zementverschalungen hält nicht dicht«, sagt Ingraffea. »Das wird immer so sein, es gehört einfach dazu.«

Fehlerhafte Ummantelungen sind für zahlreiche Fälle von Grundwasserkontamination im Zusammenhang mit neuartigen Erdgasbohrungen verantwortlich – so auch für den erwähnten, mit einer Million Dollar geahndeten Verseuchungsfall durch die Firma Chesapeake. Unter diesen Umständen könnte man sich auf den Standpunkt stellen, dass am Fracking an sich nichts auszusetzen sei und lediglich strengere Regeln nötig wären, um die Firmen beim Bohren gründlich zu überwachen.

Die unergründlichen Wege des Methans

Doch bleibt die Frage, ob nicht auch andere Ursachen für Verunreinigungen in Frage kommen. »Die Migration von Methan stellt in einigen Gebieten vermutlich ein Problem dar«, meint Engelder. Eine Untersuchung dazu hat kürzlich eine Gruppe um Jackson veröffentlicht. Ihr heiß debattierter Artikel gibt sowohl den Umweltschützern als auch der Industrie teilweise Recht. Jacksons Team analysierte Proben aus mehr als 60 privaten Trinkwasserbrunnen, die über dem Marcellus-Schiefer im Nordosten von Pennsylvania und über dem Utica-Schiefer in den ländlichen Gebieten des Bundesstaats New York liegen. In 51 Fällen fand sich Methan. Brunnen in der Nähe von Bohrplätzen enthielten wesentlich größere Mengen von dem Gas als andere. Wie chemische Analysen zeigten, war das meiste Methan thermogen; es stammte also nicht von Mikroorganismen in Oberflächennähe, sondern kam aus großen Tiefen.

Allerdings enthielt keine der Proben Fracking-Flüssigkeiten oder Salzlaugen aus tiefen Schiefergesteinsschichten. Auch Jackson hält daher eine fehlerhafte Zementierung und Verschalung der Bohrschächte für die wahrscheinlichste Ursache der Verunreinigungen. Dennoch stellt er eine weitere Möglichkeit zur Diskussion. Vielleicht setzen sich zumindest einige der beim Fracking entstandenen Risse im Gestein über die horizontale Schieferschicht hinaus fort. Diese Risse könnten sich mit bereits vorhandenen Spalten oder Durchlässen verbinden und es dem Gas so ermöglichen, weit nach oben zu steigen. Der Nordosten von Pennsylvania und die ländlichen Gebiete des Bundesstaats New York sind »mit alten, aufgegebenen Erdgasbohrungen übersät«, konstatiert Jackson. »Sei-

nerzeit wurden die Schächte weder verschalt noch nach beendeter Nutzung verschlossen. Stellen Sie sich einen Schweizer Käse aus Bohrlöchern vor, die einige hundert Fuß in die Tiefe reichen. Und niemand weiß, wo sie sich befinden.«

Doch wenn Methan bei den neuartigen Erdgasbohrungen in das Trinkwasser gelangt, warum trifft das nicht auch für die Fracking-Chemikalien zu? Hierüber können Jackson und Engelder nur Vermutungen anstellen. Direkt nach dem Fracking, so ihre Überlegung, entweicht das freigesetzte Methan noch heftig genug, um chemikalienbelastetes Wasser durch das Bohrloch zurück nach oben zu befördern. Aber der Überdruck lässt schnell nach. Anschließend hat zwar das Gas genügend Auftrieb, um aufzusteigen, nicht jedoch das Wasser.

»Fehlerhafte Zementverschalungen von Bohrlöchern sind für viele Fälle von Kontamination des Grundwassers beim Fracking verantwortlich«

Dennoch kann im Prinzip auch von den Chemikalien ein Risiko für das Grundwasser ausgehen, sofern hydraulisch erzeugte Risse sich mit vorhandenen Spalten oder alten Bohrlöchern verbinden. Kevin Fisher, Ingenieur

bei Pinnacle, einem Serviceunternehmen von Halliburton, hat 15 000 Klüfte in horizontalen Bohrschächten in den Schieferformationen Barnett und Marcellus untersucht und ihre Ausdehnung mit einem Messgerät für Mikroben ermittelt. Im Marcellus-Schiefer erstreckten sich die längsten Risse bis fast 600 Meter über das Schachtniveau. Damit bleibe noch ein ziemlich dicker Puffer, »eine sehr wirksame physische Barriere zwischen den Enden der hydraulisch erzeugten Frakturen und den Grundwasserleitern«, so Fisher.

Nach Ansicht einiger Ingenieure geben die Resultate ähnlicher Untersuchungen anderswo jedoch sehr wohl Anlass zur Besorgnis. In British Columbia (Kanada) erfassten die Aufsichtsbehörden 18 Fälle, in denen die bei neuen Erdgasbohrungen entstandenen Risse unerwartet Verbindungen zu anderen, bis zu 600 Meter entfernten Schächten hergestellt hatten. Laut Erdöl- und Erdgaskommission von British Columbia »hat sich die Fortpflanzung von Brüchen beim großräumigen hydraulischen Fracking als schwer vorhersagbar erwiesen«. Die Behörde warnte, dass die Risse länger werden können als erwartet, wenn die darüberliegenden Gesteinsschichten Schwachstellen aufweisen.

All diese Erkenntnisse liefern freilich keinen wirklichen Beweis für die direkte Kontamination eines Grundwasserleiters durch Fracken einer horizontalen Schiefergesteinsschicht. Wie die Leiterin der EPA, Lisa Jackson, kürzlich erklärte, ist bisher kein solcher Fall dokumentiert. Entwarnung gab auch jüngst eine groß angelegte Analyse aller vorliegenden Berichte aus drei Fracking-Gebieten durch ein Team um Charles Groat und Danny Reible von der University of Texas in Austin. Über das Ergebnis berichteten die beiden Forscher auf der jüngsten Jahrestagung der American Association for the Advancement of Science (AAAS) im Februar in Vancouver (Kanada).

Wenn sich eine Sache nicht beweisen lässt, heißt das freilich nicht, dass sie nicht existiert. Jeder Bohrplatz weist andere Charakteristika auf. Die »New York Times« und die Environmental Working Group, eine amerikanische Umweltorganisation, deckten kürzlich einen mutmaßlichen Verunreinigungsfall von 1984 auf. Sie behaupten, damals hätte sich eine gefrackte Erdgasbohrung in West Virginia mit einem alten, aufgelassenen Bohrloch in unmittelbarer Nähe überkreuzt, wodurch Trinkwasser verseucht worden sei. Die Industrie bezweifelt das jedoch.

Mit Computersimulationen zu neuen Erkenntnissen?

Für ein endgültiges Urteil über das Fracking, gleich ob im engen oder weit gefassten Sinn, sind einfach mehr Daten erforderlich. Die schon erwähnte EPA-Studie wird sie eventuell liefern. Sie befasst sich mit den diversen Möglichkeiten, wie bei Bohrungen die Grundwasserleiter kontaminiert werden könnten. Die Palette reicht von nicht abgedichteten, lecken Speicherbecken über fehlerhafte Zementierung von Bohrschächten bis hin zu potenziellen Verbindungen zwischen tief in der Erde verborgenen Brüchen und der Oberfläche. Die EPA nimmt fünf mutmaßliche Fälle von Grundwasserverunreinigung unter die Lupe, um die jeweilige Ursachen festzustellen. Außerdem wird sie zwei Bohrungen von Anfang bis Ende komplett überwachen. Eine wichtige Rolle spielen auch Computermodelle, um rechnerisch zu ermitteln, was sich unter Tage abspielt, wo keine direkten Beobachtungen möglich sind.

Ingraffea rät zu einer groß angelegten Simulation, die mehrere Erdgasbohrungen und horizontale Schächte innerhalb einer Kubikmeile (4,168 Kubikkilometer) umfasst. Sie soll über einen Bohrzeitraum von mehreren Wochen hinweg die Bewegungen von Gasen und Flüssigkeiten sowie die Bildung von Rissen im Gestein nachvollziehen und so Aussagen über die Wahrscheinlichkeit einer Kontamination erlauben. Der Aufwand wäre enorm. »Dazu bräuchte es mehrere Supercomputer«, sagt Ingraffea. Doch die Mühe lohne sich; zumindest würde ein solches Modell aufdecken »unter welchen Voraussetzungen Erdgasmigration am ehesten möglich ist«.

Das von Wissenschaftlern verwendete Standardprogramm für derartige Simulationen, das auch die EPA benutzt, ist derzeit Tough2. Ingraffea hält es jedoch nicht für leistungsfähig genug. Seiner Ansicht nach dürfte es schwierig sein, damit »alle Daten über Verwerfungen, Verbindungsstellen und Fortsetzungen von Brüchen« detailliert genug zu verarbeiten, um festzustellen, wann eine eigenständige neue Leitungsbahn entsteht, die eine ungewollte Fließbewegung ermöglichen würde. Große Konzerne benutzen ihre eigenen Programme, die laut Ingraffea sehr viel leistungsfähiger, aber eben Betriebsgeheimnis seien. »Die klügsten Köpfe sowie die besten Modelle und Daten finden sich allesamt bei Bohrfirmen und Serviceunternehmen«, klagt der Forscher.

Unterdessen sind sich Gorody und Lisa Jackson darin einig, dass die EPA chemische Untersuchungen in Trinkwasserbrunnen vor und nach dem Beginn neuer Erdgasbohrungen vornehmen sollte. Chemikalien, die erst später auftreten,

würden das Standardargument der Industrie widerlegen, das Wasser sei auf natürliche Weise verunreinigt worden und die Anwohner hätten dies zuvor nur nicht bemerkt.

Geoffrey Thyne, Erdölgeologe am Enhanced Oil Recovery Institute der University of Wyoming in Laramie, macht einen anderen Vorschlag zur Lösung des Fracking-Rätsels: Die Unternehmen sollen verpflichtet werden, ihrem jeweiligen Chemikaliencocktail einen leicht nachweisbaren, nicht natürlich vorkommenden Indikatorstoff beizufügen. Falls dieser irgendwo unerwartet auftaucht, wäre das ein untrügliches Zeichen für eine Verunreinigung durch das Fracking. Thyne hält das für »relativ leicht machbar«, schränkt aber ein: »Die Industrie ist wenig begeistert von diesem Vorschlag.« Die EPA will ihn zumindest »erwägen«. Im Übrigen hat sie von den Firmen sehr wohl detaillierte Angaben über deren Fracking-Additive, kann sie aber nicht öffentlich machen, weil viele als »vertrauliche Betriebsinformation« klassifiziert sind. Nur neue Gesetze würden diese Situation ändern.

Auch wenn die Untersuchungen durch die EPA und andere Institutionen Klarheit über die strittigen Punkte bringen, kommt das im Grunde zu spät. Fracking »ist nie sorgfältig untersucht worden«, sagt Amy Mall, führende Politikanalystin am Natural Resources Defense Council, einer gemeinnützigen Umweltschutzorganisation aus New York City. »Es handelt sich um ein großes Experiment, das ohne solide wissenschaftliche Basis durchgeführt wird.« ~

DER AUTOR



Chris Mooney ist einer der Moderatoren des Podcasts Point of Inquiry (www.pointofinquiry.org), das sich kritisch mit Fragen aus Wissenschaft, Religion, Philosophie und Politik auseinandersetzt, und Autor von drei Büchern, darunter »The Republican War on Science«.

QUELLEN

New York State Department of Environmental Conservation:

Revised Draft Supplemental Generic Environmental Impact Statement On The Oil, Gas and Solution Mining Regulatory Program. 7. September 2011

Osborn, S.G. et al.: Methane Contamination of Drinking Water Accompanying Gas-Well Drilling and Hydraulic Fracturing. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 108, S. 8172–8176, 2010

WEBLINKS

www.umweltbundesamt.de/chemikalien/publikationen/stellungnahme_fracking.pdf

Informationen des Umweltbundesamts zum Fracking

<http://dialog-erdgasundfrac.de/risikostudie-fracking>

Risikostudie von Experten im Rahmen des »Informations- & Dialogprozesses« der ExxonMobil

www.unkonventionelle-gasfoerderung.de

Website mit kritischen Informationen zum Thema

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155299

Bücher und mehr



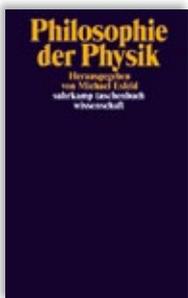
NEU

David Graeber
SCHULDEN
Die ersten 5000 Jahre
 2012, 536 S., geb., Klett-Cotta
Bestell-Nr. 3633
€ 26,95 (D), € 27,80 (A)

Ein radikales Buch im doppelten Wortsinn, denn Graeber packt das Problem der Schulden an der Wurzel,

indem er bis zu ihren Anfängen in der Geschichte zurückgeht. Das führt ihn mitten hinein in die Krisenherde unserer Zeit: Von der Antike bis in die Gegenwart sind revolutionäre Bewegungen immer in Schuldenkrisen entstanden. Ein ebenso radikaler wie befreiender Blick auf die Wurzeln unserer Schuldenkrise.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Herausgegeben von Michael Esfeld
PHILOSOPHIE DER PHYSIK
 2012, 481 S., kart., Suhrkamp
Bestell-Nr. 3621
€ 18,00 (D), € 18,50 (A)

Seit ihren Anfängen bei den Vorsokratikern sind Philosophie und Physik eng miteinander verbunden. Dieser Band soll die Vielfalt und Lebendigkeit der philosophischen Auseinandersetzung mit der Physik im deutschsprachigen Raum heute aufzeigen.

Philosophie und Physik im deutschsprachigen Raum heute aufzeigen.



Mitarbeit: Stefan Heusler
QUANTEN-DIMENSIONEN, DVD-ROM
Doppelspalt Verschränkung Quantencomputer
 2010, in DVD-Box., für PC und Mac, Lehr-Programm gem. § 14 JuSchG., Klett, Sciencemotion
DVD-ROM

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 Physikdidaktikern der Universität Münster entwickelt. Ein großer Spaß für alle Physikinteressierten und auch ideal für den Unterricht in der Oberstufe.



Stefan Ineichen, Bernhard Klausnitzer, Max Ruckstuhl
STADTFAUNA
600 Tierarten unserer Städte
 2012, 434 S. m. 600 Farbfotos, geb., Haupt
Bestell-Nr. 3521
€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Von der Laus bis zum Wildschwein – 600 tierische Stadtbewohner im Porträt!

Städte sind nicht nur von Menschen bewohnt, sondern bieten auch einer großen Vielfalt von Tieren Wohnraum und Nahrung. Diesen erstaunlichen Artenreichtum macht die »Stadtfauna« sichtbar. Die allesamt mit Farbfotos illustrierten, von Spezialisten verfassten Artporträts geben Auskunft über Lebensweise und Verbreitung der Tiere, die städtische Gärten und Gebäude, Bahnareale und Blumenwiesen, Gewässer und Stadtwälder besiedeln. Das hier vereinigte Wissen stellt einen einzigartigen Überblick über die städtische Fauna in Mitteleuropa dar.



Michael Stocker, Sebastian Meyer
WILDTIERE
Hausfreunde und Störenfriede
 2012, 352 S. m. 120 Farbfotos u. 100 Zeichn., geb., Haupt
Bestell-Nr. 3522
€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Dieses Buch lädt ein auf einen

Rundgang durch Haus und Garten, aufs Dach und auf den Dachboden, ans Fenster und auf den Balkon, an die Fassade und in Innenräume und Keller. Mit Tierporträts und Tipps fürs Beobachten bietet es spannendes Wissen rund um die Natur in der Nähe.

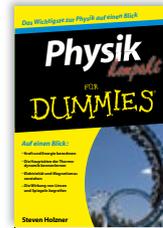
Außerdem Tipps und Anleitungen: mit Bauplänen für Nisthilfen, Wissen fürs Bauen und Renovieren, Vorschläge fürs Entschärfen von Tierfallen.



Carsten Könneker
WISSENSCHAFT KOMMUNIZIEREN
Ein Handbuch mit vielen praktischen Beispielen
 2012, XII, 204 S. m. 30 SW- u. 50 Farbb., kart., Wiley-VCH
Bestell-Nr. 3612
€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Dieses Buch ist eine unverzichtbare Hilfe für alle Naturwissenschaftler und Studenten, die ihre Arbeit gegenüber verschiedenen Zielgruppen besser kommunizieren wollen; seien dies Laien, Medien, Drittmittelgeber oder Kollegen anderer Fachbereiche. Das Buch erklärt die gute Praxis von Meldungen, Pressemeldungen, Artikeln, Kommentaren, Vorträgen, Drittmittelanträgen, Weblogs usw. anhand von vielen Beispielen aus der medialen Praxis.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



Steven Holzner
PHYSIK KOMPAKT FÜR DUMMIES
Ein Grundkurs
 2012, 224 S., kart., Wiley-VCH
Bestell-Nr. 3548
€ 10,- (D), € 10,30 (A)

Dieses Büchlein verhilft zu einem schnellen Überblick über die Physik. Steven Holzner erklärt leicht verständlich, was Sie über Kräfte und Bewegungen, Energie, Wärme, Licht, elektrische Felder und Kernphysik unbedingt wissen sollten.



Bernd Pröschold
STERNSTUNDEN, DVD-VIDEO
Landschaften im Rhythmus des Kosmos
 2011, Laufzeit ca. 53 Min., 10 Seiten Booklet
Bestell-Nr. 3630 € 15,90

Siebzehn Zeiträuferrahmen präsentieren den Sternhimmel über aufregende Orte unserer Erde! Das Sternmeer der Milchstraße, der Tanz der Polarlichter, das Wechselspiel von Tag und Nacht – das sind die Leitmotive dieser DVD. Die bis zu 24-stündigen Aufnahmen werden von Musik begleitet. Drehorte: Norwegen, Dänemark, Deutschland, Österreich, Schweiz, Frankreich, Kroatien, Kanar. Inseln, Chile

Als Extras bietet Ihnen die DVD ein Making-of und ein Begleitwort von Ranga Yogeshwar im Booklet.
Lieferbar auch als Blu-ray unter:
www.science-shop.de/artikel/1151887



Klaus Schmech
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 Schmech hat die bedeutendsten ungeknackten Codes der Verschlüsselungsgeschichte zusammengetragen.



Patrick Wyse Jackson
PALÄONTOLOGIE FÜR NEUGIERIGE
Was Sie schon immer über Fossilien, Erdgeschichte und Evolution wissen wollten
 2012, 95 S. m. 60 Farbb., geb., Primus Verlag

Bestell-Nr. 3532 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Eine kompakte Einführung in die Paläontologie!

Patrick Wyse Jackson erklärt anschaulich, wie und warum Fossilien erhalten blieben, wie sie klassifiziert werden und welche Informationen sie über die Geschichte der Erde liefern.

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

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)

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



Lisa Randall

DIE VERMESSUNG DES UNIVERSUMS

Wie die Physik von morgen den letzten Geheimnissen auf der Spur ist

2012, 490 S. m. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3496 € 24,99 (D), € 25,70 (A)

In ihrem neuen Buch berichtet die Physikerin Lisa Randall aus den Laboren und Denkfabriken ihrer Kollegen: Welchen Fragen gehen Physiker heute nach? Welche Rolle spielen so gigantische Apparate wie der Teilchenbeschleuniger LHC am CERN? Was hat es mit der Suche nach dem Higgs-Boson auf sich? Wie hängt angewandte mit theoretischer Physik zusammen?

Lisa Randall zeichnet das Bild der gegenwärtigen Physik in all ihren Facetten und lässt ganz konkret werden, wie die moderne Grundlagenforschung funktioniert.

% Sommerschnäppchen



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.



Andras Gedeon

FORTSCHRITTE DER MEDIZIN DURCH WISSENSCHAFT UND TECHNIK
99 wegweisende Veröffentlichungen aus 5 Jahrhunderten

2010, XII, 540 S., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3027

früher € 59,95, jetzt nur € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Dieser aufwändige Farbbildband ist eine Sammlung von 99 Essays über Meilenstein-Publikationen der letzten 500 Jahre aus dem weiten Feld wissenschaftlicher und technologischer Forschungsdisziplinen, die den Fortschritt der Medizin vorangebracht haben.



Alejandro Balaguer

AQUA MATER

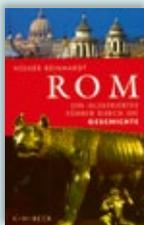
Wahrheiten und Bilder
• Anden • Amazonas
• Mittelamerika • Antarktis

2007, 260 S., mehr als 150 Farbabb., Kunstdruckpapier,

Großformat, deutsch/englisch, geb., Graph Ediciones

Bestell-Nr. 3486 Früher € 39,90, jetzt nur € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Eindrucksvolle Bilder und Texte führen uns auf eine zauberhafte Reise zu Seen und Flüssen, Wasserfällen und Gletschern, Bergen, tropischen Wäldern und dem Eis der Antarktis.



Volker Reinhardt

ROM

Ein illustrierter Führer durch die Geschichte

1999, 287 S. m. 104 meist farb. Abb., 1 zweifarb. Stadtplan, geb., Beck

Bestell-Nr. 3489 Früher € 19,90, jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Die zweieinhalbttausendjährige Geschichte der Stadt wird hier aus den sichtbaren Zeugnissen ihrer Vergangenheit erzählt und gedeutet. Ein historisches Gesamtbild, ein neuartiger und lebendiger illustrierter Stadt- und Geschichtsführer für alle Romreisenden mit über 120 weitgehend farbigen Abbildungen.



Werner Bils

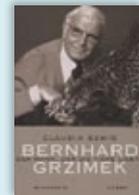
BIOLOGISCHES WISSEN IN FRAGE UND ANTWORT, 4 BÄNDE MIT CD-ROM

899 Aufgaben und Lösungen zu Zoologie und Botanik, Zellbiologie und Genetik, Evolution, Ökologie und Verhalten, Humanbiologie und Tierphysiologie

2012, 1056 S. m. zahlr. farb. Abb., kart., Quelle & Meyer

Bestell-Nr. 3619 Früher € 79,80, jetzt nur € 39,95 (D), € 41,10 (A)

Die Vermittlung biologischen Wissens ist sowohl an allgemeinbildenden Schulen als auch in außerschulischen Bildungseinrichtungen eine komplexe und daher schwierige Aufgabe. Aber was ist mit der Überprüfung des erlernten Stoffes? Welche Fragen sollen sinnvoller Weise gestellt werden? Woher nimmt man diese und, vor allem, die richtigen Antworten zur Kontrolle? Ganz einfach: aus der vierbändigen Reihe Biologisches Wissen in Frage und Antwort!



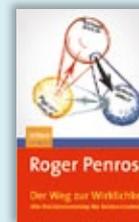
Claudia Sewig

BERNHARD GRZIMEK
Der Mann, der die Tiere liebte. Biografie

2009, 447 S., 64 z. T. farb. Fotos auf Taf., geb., Lübbe

Bestell-Nr. 3482 Früher € 24,95, jetzt nur € 7,95 (D), € 8,20 (A)

Die abenteuerlichen Afrikareisen seit Beginn der 1950er Jahre, der Kinofilm »Serengeti darf nicht sterben«, »Ein Platz für Tiere«, die zahllosen Bücher und das beharrliche Werben für den Naturschutz – der Name Bernhard Grzimek weckt auch heute noch zahlreiche Erinnerungen. Claudia Sewig zeichnet ein differenziertes Bild des großen Tierfilmers und Zoodirektors – eine widersprüchliche Persönlichkeit, deren Arbeit bis heute fortwirkt.



Roger Penrose

DER WEG ZUR WIRKLICHKEIT
Die Teilübersetzung für Seiten-einsteiger

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 Laien lesbar macht. Wer ein Faible für die Grundfragen der Wissenschaft hat, findet in diesem klar und kompetent geschriebenen Buch überraschende Ideen.

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Graphen aus dem Chemielabor

Ein erst vor acht Jahren entdecktes Material aus Kohlenstoff, das nur eine Atomlage dick ist, könnte die Elektronik revolutionieren. Allein – bislang fehlen geeignete Herstellungsmethoden. Doch Chemiker sind dabei, sie zu entwickeln.

Von Klaus Müllen

In den 1980er Jahren sang Madonna: »We are living in a material world«. Zwar meinte der Popstar damit die vorherrschende materialistische Einstellung des Westens, aber ihre Aussage stimmt auch im wörtlichen Sinn: Wir leben in einer Welt, die von Materialien geprägt ist. Ohne Kunststoffe, Metalle oder Halbleiter müssten wir auf die meisten Annehmlichkeiten des modernen Lebens verzich-

ten. Neue Materialien sind stets auch die Voraussetzung für neue Technologien. So hat erst die Entdeckung von Flüssigkristallen jene LCD-Flachbildschirme ermöglicht, die inzwischen die noch vor wenigen Jahren üblichen Kathodenstrahlröhren fast vollständig verdrängt haben. Desgleichen existieren nur dank der Entwicklung von Metalllegierungen mit speziellen magnetischen Eigenschaften mittlerweile Festplatten mit gigantischen Speicherkapazitäten von mehreren Terabytes.

Gerade die Elektronik profitiert besonders häufig von neuen Materialien – und ist auf sie angewiesen, wenn sich ihre Leistungsfähigkeit weiter im bisherigen Tempo steigern soll. Als Hoffnungsträger Nummer eins gilt dabei aktuell das Graphen. Es besteht aus einer einlagigen Anordnung von Kohlenstoffatomen in Form eines Wabengitters. Diese »Wunderfolie« ist dem Silizium, dem Grundmaterial heutiger Computerchips und Solarzellen, in mehrfacher Hinsicht überlegen. Erstens können sich Ladungen darin wesentlich schneller bewegen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 86). Zweitens ist Graphen im Gegensatz zu Silizium transparent und eignet sich – anders als dieses – deshalb auch für Displays und Leuchtdioden. Und drittens hat es noch einen entscheidenden Vorteil gegenüber den gängigen Halbleitersubstraten: Man kann daraus im Prinzip wesentlich kleinere Schaltkreise bauen. Bei alledem ist das Material chemisch, thermisch und mechanisch sehr stabil.

Deshalb verwundert es nicht, dass die russischen Forscher Andre Geim und Konstantin Novoselov von der University of Manchester (England), die 2004 als Erste die besonderen Eigenschaften von Graphen erkannten, dafür nur sechs Jahre später den Nobelpreis für Physik erhielten (Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 16). Ihr Herstellungsverfahren für das Material war allerdings mühselig und vergleichsweise primitiv. Sie nutzten aus, dass der von Bleistiftminen be-

AUF EINEN BLICK

WEGE ZUM WUNDERSTOFF

1 Graphen gilt als Hoffnungsträger Nummer eins für die künftige **Nanoelektronik**. Für Forschungszwecke wird es bisher von Hand mit Klebefolie von Graphit abgepellt – ein Verfahren, das sich nicht für die großtechnische Produktion eignet. Zudem weist das so erhaltene Material zahlreiche **Strukturfehler** auf.

2 Deshalb versuchen sich Chemiker an effizienteren Herstellungsmethoden, etwa indem sie Graphen schrittweise aus **Benzolringen** aufbauen. Doch ab einer gewissen Größe sind die entstehenden Moleküle kaum noch handhabbar.

3 Am besten lässt sich Graphen direkt auf einer Metalloberfläche synthetisieren. So ist es bereits gelungen, Proben mit über zehn Nanometer Durchmesser herzustellen. Außerdem konnten die Autoren auf diese Weise gezielt **Graphenbänder** einer vorgegebenen Breite oder Form erzeugen.

4 Das Verfahren ist jedoch aufwändig. Für technische Anwendungen genügt oft ein weniger perfektes Material, das sich mit einfacheren, groberen Methoden wie der **Pyrolyse** oder der Abscheidung aus der Gasphase gewinnen lässt – oder auch auf dem Umweg über **Graphenoxid**.

5 Auf diese Weise konnten die Autoren bereits Graphenschichten als Fensterelektroden für **Solarzellen** erzeugen. Außerdem ließen sich Metalloxidteilchen in Graphenhüllen verpacken, so dass sie ein besseres Elektrodenmaterial für **Lithiumionenbatterien** ergaben. Sogar ein Katalysator für **Brennstoffzellen** aus stickstoffdotiertem Graphen konnte hergestellt werden.

kannte Graphit aus aufeinandergestapelten Graphenmolekülen besteht. Mit Klebeband pellten sie deshalb ganz vorsichtig möglichst dünne Schichten davon ab. Diese übertrugen sie auf einen Siliziumwafer und prüften mit einer Kombination aus Mikroskopie und Spektroskopie die Dicke. Manchmal erwies sich die Schicht tatsächlich als lediglich einlagig, bestand also aus Graphen.

Mit diesem Verfahren lassen sich natürlich nur winzige Mengen des begehrten Materials erzeugen. Außerdem zeigt sich immer erst im Nachhinein, ob die Herstellung erfolgreich war: Wie dick oder groß die jeweils abgezogene Schicht ist, lässt sich weder vorhersagen noch regulieren. Überdies weist das so erhaltene Graphen zahlreiche Strukturdefekte auf, vor allem an den Rändern. All das schreit geradezu nach einem besseren Herstellungsverfahren.

Vor allem Chemiker fühlen sich herausgefordert, mit ihrer Stoffkenntnis und ihrem Methodenarsenal einen effizienten Syntheseweg zu finden. Ihr Ansatz unterscheidet sich

dabei naturgemäß von dem der Physiker und Materialforscher. Diese versuchen aus einer größeren Struktur, dem Graphit, die kleinere Komponente, das Graphen, rein mechanisch herauszupräparieren. Chemiker bevorzugen dagegen die umgekehrte Vorgehensweise: Sie ersinnen Wege, das gewünschte Molekül wie beim Lego aus kleineren Bausteinen zusammenzusetzen.

Meine Mitarbeiter und ich haben in unseren eigenen Arbeiten aus der jüngsten Zeit beide Konzepte angewendet. Im Vordergrund stand dabei, die Struktur des jeweils hergestellten Materials möglichst genau zu kontrollieren und so gezielt Substanzen mit ganz bestimmten Eigenschaften zu erhalten. Deshalb machen wir es auch nicht wie die Polymerchemiker, die eine große Zahl an gelösten Molekülen einfach miteinander reagieren lassen, so dass diese sich zu langen Ketten verbinden; dabei entsteht ein Gemisch aus gleichartigen, aber unterschiedlich großen Molekülen. Wir orientieren uns eher an der Vorgehensweise organischer Chemiker, in-



Chemiker suchen nach Wegen, Graphen wie ein Puzzle aus kleineren Bestandteilen zusammenzusetzen.

DANIELA LEITNER

dem wir einzelne Molekülbausteine kontrolliert verknüpfen. Das hat den Vorteil, dass das Produkt jeweils eine genau definierte Größe, Form und Elektronenstruktur aufweist.

Im Übrigen sind wir nicht ganz und gar auf das Graphen fixiert. Vielmehr haben wir auch ein Auge für das, was bei der Herstellungsprozedur gewissermaßen am Wegesrand liegt, etwa in Form von Zwischen- oder Nebenprodukten. Ebenso folgen wir gelegentlich Seitenpfaden unserer Syntheseroute, wenn diese zu Produkten führen, die nützliche Anwendungen in der Materialwissenschaft versprechen.

Ring für Ring in Richtung Graphen

Organische Chemiker befassen sich schon lange, vor allem aber seit den Pionierarbeiten von Erich Clar (1902–1987) in den 1930er Jahren, mit so genannten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAKs). Dabei handelt es sich um kleine Teilstücke einer Graphenscheibe, sozusagen Mini-graphene. Sie kommen im Steinkohleteer, aber auch in interstellarer Materie vor. Die kleinste Einheit eines solchen PAK-Moleküls und damit auch des Graphens ist das Benzol – eine ringförmige Verbindung aus sechs Kohlenstoffatomen, in der sich die Elektronen relativ frei bewegen können. An jedem Eck befindet sich noch ein Wasserstoffatom. Hängt man nun in Gedanken an dessen Stelle jeweils ein weiteres Benzolmolekül und verbindet es mit allen Nachbarringen, ergibt sich eine Art Superbenzol mit immerhin schon 42 Kohlenstoffatomen (Bild unten). Das lässt sich im Prinzip fortsetzen, wobei immer größere Verwandte entstehen. Letztendlich landet man so beim Graphen.

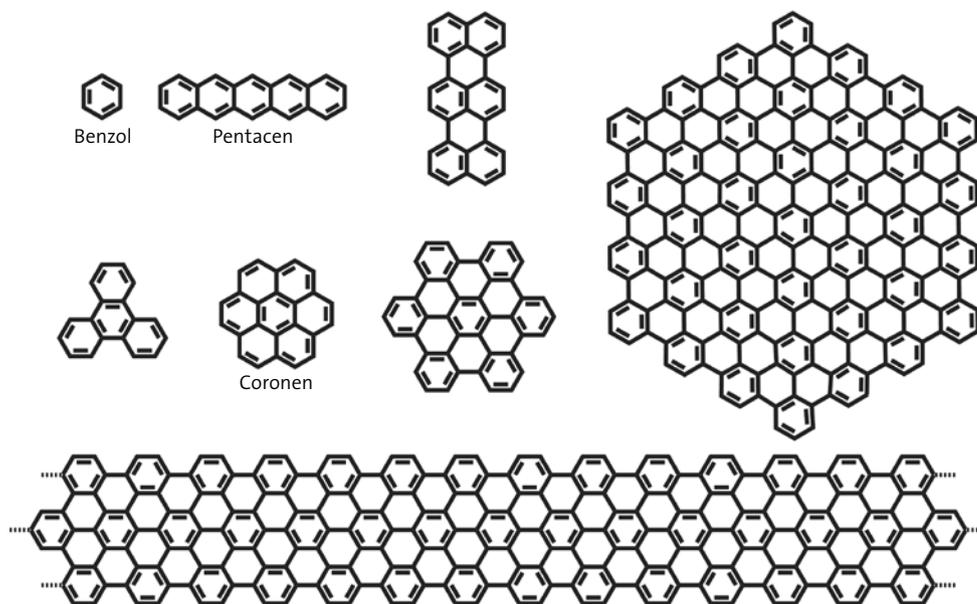
Die kleineren PAKs können Chemiker schon seit Langem mit etablierten Syntheseverfahren in allen Variationen problemlos herstellen. Mit Seitenlängen von etwa einem Nanometer sind sie zwar nur rund ein Tausendstel so groß wie die aus Graphit abgepellten Graphenproben, die in der Regel einige Mikrometer messen. Dennoch sind auch sie teilweise technisch durchaus interessant. Je nachdem, wie die sechs-

gliedrigen Kohlenstoffringe zusammengefügt sind, haben solche PAKs bestimmte Eigenschaften wie Farbe oder Leitfähigkeit. Das macht sie zu potenziellen Bausteinen für das gerade entstehende Gebiet der organischen Elektronik. Aber nicht nur die Zahl und Anordnung der Ringe lässt sich je nach gewünschter Anwendung in weiten Grenzen variieren. Auch andere chemische Modifikationen sind möglich, um die Eigenschaften noch gezielter an die jeweiligen Erfordernisse anzupassen. Insbesondere beeinflusst der Einbau von Schwefel- oder Stickstoffatomen in das Grundgerüst die elektronischen Eigenschaften des Moleküls.

Eine andere viel versprechende Option, die wir selbst verfolgen, besteht darin, bewegliche Kohlenwasserstoffketten an den starren Kern der scheibenförmigen PAKs anzufügen. Das bringt diese dazu, sich spontan übereinanderzustapeln. Entlang der entstehenden Säulen, welche die Form von Geldrollen haben, können dann elektrische Ladungen von Scheibe zu Scheibe hüpfen (siehe Bild rechts). Solche Transportkanäle für Ladungen bieten sich für elektronische Bauelemente an. Wichtig ist, eine möglichst hohe Ordnung innerhalb der Stapel zu erzielen. Außerdem kommt es darauf an, dass die Scheiben in definierter Weise relativ zu einer Unterlage – etwa einer Elektrode – orientiert sind. So können sie parallel oder senkrecht dazu ausgerichtet sein: Im ersten Fall stehen die Säulen aufrecht auf der Unterlage, im zweiten liegen sie seitlich nebeneinander. Die Kunst des Chemikers besteht also darin, nicht nur die gewünschten Moleküle herzustellen, sondern sie auch auf kontrollierte Weise in komplexen supramolekularen Hierarchien anzuordnen. Erst dadurch entsteht in der Regel ein technisch einsetzbares Material.

Trotz dieser vielfältigen Möglichkeiten, die relativ kleine PAK-Moleküle bereits bieten, stellten wir uns der Herausforderung, sie immer weiter zu vergrößern, um so letztlich Graphen herzustellen. Dafür haben wir eine besondere Synthesemethode entwickelt. Sie startet beim Diphenylethin ($C_6H_5-C\equiv C-C_6H_5$). Dabei handelt es sich um zwei durch eine

Als ringförmige Verbindung aus sechs Kohlenstoffatomen verkörpert Benzol gewissermaßen die Grundeinheit des Graphens. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), in denen mehrere Benzolringe in einer Art Kachelmuster aneinandergesetzt sind, stellen größere Ausschnitte aus dem Graphen dar – einige haben die hier angegebenen Trivialnamen. An den Ecken sitzen jeweils noch Wasserstoffatome, die der Übersichtlichkeit halber weggelassen wurden.



KLAUS JACULEN

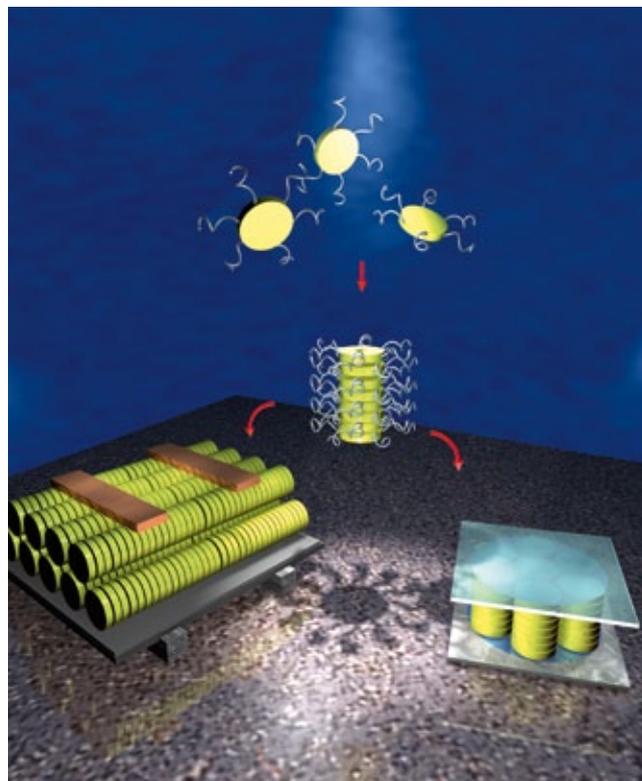
Dreifachbindung verknüpfte Kohlenstoffatome, an denen jeweils ein Benzolring hängt. Drei solche Moleküle lassen sich mit Hilfe eines Kobaltkatalysators zum propellerförmigen Hexaphenylbenzol zyklisieren (siehe Bild S. 86). Dieses besteht aus einem zentralen Benzolring, an dessen sechs Ecken je ein weiterer solcher Ring angebunden ist. Die äußeren Ringe sind allerdings wie bei einem Windrad gekippt, weil sie sich gegenseitig räumlich behindern. Durch eine chemische Reaktion gelingt es jedoch, sie »platt zu schlagen«. Dabei verlieren sie zwei ihrer fünf Wasserstoffatome und verbinden sich direkt miteinander zum oben erwähnten Superbenzol. Im Verlauf dieser Reaktion entstehen zwischen ihnen zugleich sechs neue Sechsecke. Deshalb haben wir den Vorgang Cyclodehydrierung genannt. Sie kann chemisch durch ein Oxidationsmittel wie Eisen(III)-chlorid oder auch elektrochemisch durch Zufuhr von Elektronen an einer Kathode erfolgen.

Um mit dieser Reaktion immer größere Moleküle herzustellen, gilt es, durch Anhängen weiterer Benzolringe an den Seiten jeweils molekulare Propeller der nächsten Stufe zu erzeugen und diese wieder einzuebnen. Das ist freilich leichter gesagt als getan, weil die zunehmende Größe der Moleküle ihre Handhabung erheblich erschwert. Die Substanzen sind in organischen Lösungsmitteln kaum mehr löslich, was das Abtrennen von unerwünschten Nebenprodukten und die Charakterisierung des Reaktionsprodukts zum Problem macht. Dennoch ist es uns mit einer Reihe chemischer Tricks gelungen, mit dem Verfahren Moleküle mit Graphenstruktur herzustellen, die weit mehr als zehn Nanometer messen und damit nur noch etwa 100-mal kleiner sind als von Graphit abgepellte Proben.

Synthesechemie an Oberflächen

Natürlich wäre es schön, noch größere Ausdehnungen zu erreichen. Aber im Hinblick auf technische Anwendungen ist das gar nicht unbedingt sinnvoll! Als Werkstoff für die Elektronik hat Graphen nämlich auch einen Nachteil: Zwar können sich die Elektronen darin extrem schnell bewegen, doch ist das Material kein Halbleiter, sondern ein Halbmetall. Das bedeutet, dass nur eine kleine Energiedifferenz zwischen besetzten und unbesetzten Elektronenniveaus besteht, die sich leicht überwinden lässt. Deshalb würde sich ein daraus gefertigtes elektronisches Schaltelement nie auf »aus« stellen lassen, sondern immer eingeschaltet bleiben. Theoretischen Berechnungen zufolge sollte die Energielücke aber größer sein, wenn Graphen in Form schmaler Streifen vorliegt. Aus diesem Grund haben Physiker Kohlenstoffnanoröhren, die sich auf verschiedenen Wegen relativ leicht herstellen lassen, mit energiereicher Strahlung aufgeschnitten und dadurch streifenförmige Moleküle erhalten. Allerdings sind deren Ränder nicht einheitlich – Grund genug, sich auch hier eine chemische Syntheseroute zu überlegen.

Nur taucht dabei ein anderes Problem auf: Die Streifen tendieren schon während ihrer Entstehung dazu, sich übereinanderzutürmen. Dann sind sie – ebenso wie größere Graphenmoleküle – aber nicht mehr in den gängigen Lösungs-

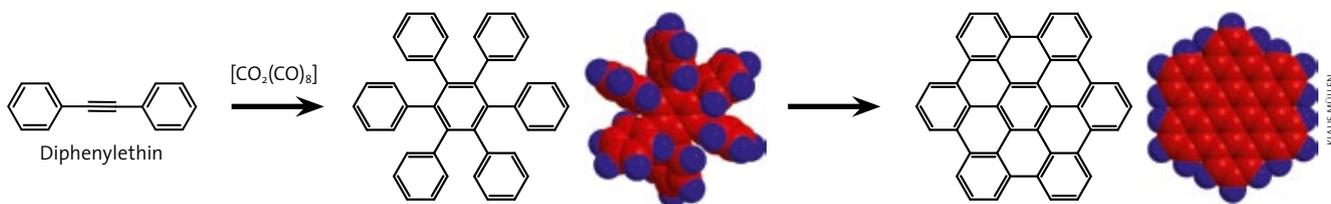


Mit geeigneten chemischen Randgruppen versehen, stapeln sich PAKs zu Säulen, die sich stehend oder liegend auf einer Unterlage anordnen können. Solche Säulen eignen sich möglicherweise als Ladungstransportkanäle in elektronischen Bauteilen.

mitteln löslich, so dass es schwer ist, sie nach ihrer Herstellung in Form dünner Filme auf Oberflächen abzuscheiden. Solche dünnen Schichten aber braucht es für eine Elektronik mit organischen Materialien. Mit elektrischen Kontakten versehen, können sie etwa als Dioden fungieren, die den Durchtritt von Ladungen steuern oder Licht abstrahlen. Sie aus einer Lösung abzuscheiden, hat große Vorteile: Es ist sehr viel einfacher und preiswerter, als sie etwa im Hochvakuum aufzudampfen. Zudem bietet es die Chance, Schaltungen mit den gleichen einfachen »Druckverfahren« herzustellen, wie sie bei heutigen Platinen üblich sind.

Das Problem ist also, dass es zwar gelingt, Graphenscheiben und -nanostreifen in erstaunlicher Perfektion und Größe zu synthetisieren, nicht aber, sie anschließend zu ultradünnen Filmen zu verarbeiten. Wie lässt sich diese Schwierigkeit überwinden? Eine Möglichkeit wäre, nach geeigneten Lösungsmitteln zu suchen oder Zusätze zu finden, die das Lösen erleichtern. Ein eleganterer Ausweg besteht jedoch darin, die Synthese unmittelbar auf einer Oberfläche durchzuführen; denn dort sollen die Makromoleküle am Ende ja auch ihre Funktion ausüben.

Ein solches Verfahren haben wir gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Roman Fasel an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in Dübendorf (Schweiz) entwickelt. Es besteht darin, zunächst kleine, gas-



Die gezielte Herstellung von genau definierten Ausschnitten aus dem Graphen lässt sich durch die Synthese von »Superbenzol« veranschaulichen. Als Ausgangssubstanz dient Diphenylethin. Darin hängt an zwei Kohlenstoffatomen, die über eine Dreifachbindung miteinander verknüpft sind, jeweils ein Benzolring. Drei solche Moleküle lassen sich mit Hilfe eines Kobaltkatalysators zum Hexaphenylbenzol verbinden. Das ist ein Benzolring, der an

jeder seiner sechs Ecken einen weiteren solchen Ring trägt. Diese äußeren Ringe behindern sich räumlich und stehen deshalb schräg zueinander wie bei einem Propeller. Man kann sie jedoch mit einem Oxidationsmittel wie Eisen(III)-chlorid »platt schlagen«. Dabei verlieren sie vier ihrer fünf Wasserstoffatome und verbinden sich direkt miteinander. Zugleich entstehen zwischen ihnen insgesamt sechs neue Sechsecke.

förmige Benzolmoleküle auf einer kalten Metalloberfläche zu kondensieren. Wir halten ihre Menge absichtlich so gering, dass sie nur eine einlagige Schicht bilden und sich nicht übereinander stapeln. Außerdem befinden sich in den Benzolbausteinen an bestimmten Stellen Halogenatome wie Brom oder Jod statt des sonst üblichen Wasserstoffs.

Die Kohlenstoff-Halogen-Bindungen brechen auf, sobald die Substanzen die Metalloberfläche berühren. Die resultierenden hochreaktiven Zwischenprodukte diffundieren auf der Unterlage umher und verbinden sich beim Aufeinandertreffen, wobei ausgedehnte Polymere entstehen. Wie beim Hexaphenylbenzol sind die meisten Ringe darin zunächst noch gekippt. Im abschließenden Schritt werden sie mit dem oben geschilderten Verfahren platt geschlagen. Den besten Beweis, dass dieses Reaktionsschema wie gewünscht und absolut präzise abläuft, liefert die Abbildung des erhaltenen Produkts mit einem Rastertunnelmikroskop: Entsprechende Aufnahmen zeigen die ausgedehnten graphenartigen Strukturen mit atomarer Auflösung.

Präzises Molekülwachstum

Über die Art der abgeschiedenen Moleküle konnten wir die Form und somit auch die Elektronenstruktur der Graphenstreifen gezielt variieren. Eine wichtige Rolle spielte dabei, an welchen Stellen im Ausgangsmolekül die Halogenatome saßen, da sie die Verknüpfungspunkte zwischen den PAKs bei der Polymerisation festlegen. Auf diese Weise konnten wir zum Beispiel gestreckte oder zickzackförmige Graphennanostreifen herstellen (Bilder rechts). Ausgehend von einem Gemisch aus Molekülen mit zwei oder drei Bindungsstellen ließen sich sogar γ -förmige Polymere erzeugen, die somit an drei Enden mit Elektroden versehen werden können – Vorbedingung für ihren Einsatz als Transistoren, bei denen eine am Gate (Gatter) anliegende Spannung den Stromfluss zwischen Source (Quelle) und Drain (Abfluss) steuert.

Der Fantasie der Materialchemiker sind an dieser Stelle kaum Grenzen gesetzt. Wenn man in den kleinen Vorläufermolekülen zwei Verknüpfungspunkte vorsieht, dann entstehen bei der Reaktion schmale Graphenstreifen. Drei oder gar

sechs Verknüpfungspunkte erlauben dagegen das zweidimensionale Wachstum innerhalb der Ebene, so dass wabenförmige Netzwerke entstehen. Auch deren Struktur lässt sich gezielt beeinflussen. So haben wir kranzförmige Vorläufermoleküle mit einem Loch in der Mitte synthetisiert, bei deren zweidimensionaler Verknüpfung eine monomolekulare Schicht mit regelmäßig angeordneten Poren entstand (Bild S. 88). Auf diese Weise erhielten wir neuartige Membranen mit absolut einheitlicher Porengröße. Ein solches Material kann gasförmige Atome oder Moleküle selbst dann noch trennen, wenn sie fast gleich groß sind.

Generell liefert unser Verfahren die gewünschten Makromoleküle in einer Präzision, wie sie die klassische Polymersynthese nicht annähernd bieten kann. Zwar lassen sich damit keine größeren Mengen herstellen. Doch darauf kommt es auch gar nicht an. Im Gegenteil: Wenn mit einer einzelnen Schicht von Graphenmolekülen – also einer unwägbaren kleinen Menge – die erwünschte elektronische Funktion erzielbar ist, dann spricht das für höchste Sparsamkeit beim Materialverbrauch.

Die maßgeschneiderte Herstellung riesiger Makromoleküle mit genau definierter Größe, Zusammensetzung und Form verheißt nicht weniger als einen Paradigmenwechsel in der Polymersynthese. Bisher ist noch gar nicht absehbar, wohin er führen wird. Ganz sicher lässt sich unser Ansatz aber auch noch auf ganz andere Materialien als Kohlenstoffwabengitter anwenden.

Erst einmal bleiben bei den graphenartigen Strukturen selbst allerdings Fragen zu beantworten. Wie lang können die Streifen gemacht werden? Gelingt es, breitere Bänder daraus herzustellen, indem man sie kontrolliert seitlich zusammenwachsen lässt? Und ist es möglich, gezielt Kohlenstoff- durch Stickstoff- oder Boratome zu ersetzen, um auf diese Weise eine Dotierung wie bei anorganischen Halbleitern zu erreichen?

Vor allem aber bleibt ein Punkt zu klären: Gelingen solche Synthesen auch auf Isolatoroberflächen? Nur dann ließen sich die Produkte nämlich unmittelbar in elektronischen Bauelementen einsetzen. Für unsere Versuche haben wir Me-

tallflächen verwendet, weil das Metall als Katalysator für den ersten Reaktionsschritt – das Entfernen der Halogenatome – eine wichtige Rolle spielt. Die metallische Unterlage erlaubte zudem, die gebildeten Graphenschichten im Rastertunnelmikroskop zu betrachten; mit einer Isolatoroberfläche wäre das nicht möglich. Doch Dioden oder Transistoren funktionieren nur mit nichtleitender Unterlage. Man müsste die Graphenschichten also dorthin übertragen – sicherlich ein diffiziler Vorgang – oder sie am besten direkt darauf erzeugen.

Wenn das gelingt, haben Graphenmoleküle das Potenzial, in einer zukünftigen Elektronik auf Kohlenstoffbasis das Silizium als Halbleitermaterial zu ersetzen. Mehr noch: Durch die mögliche Wechselwirkung mit Licht bahnen sie zugleich den Weg für die schon länger anvisierte Optoelektronik. Hierbei übernehmen Photonen ganz oder teilweise die Aufgabe der Elektronen, was eine weitere enorme Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit mit sich brächte. Grundsätzlich ist es möglich, dem Graphengitter nachgebildete organische Halbleiter für die jeweiligen optischen und elektronischen Funktionen maßgeschneidert herzustellen und zu den notwendigen dünnen Filmen zu verarbeiten. Mit etwas Geschick lässt

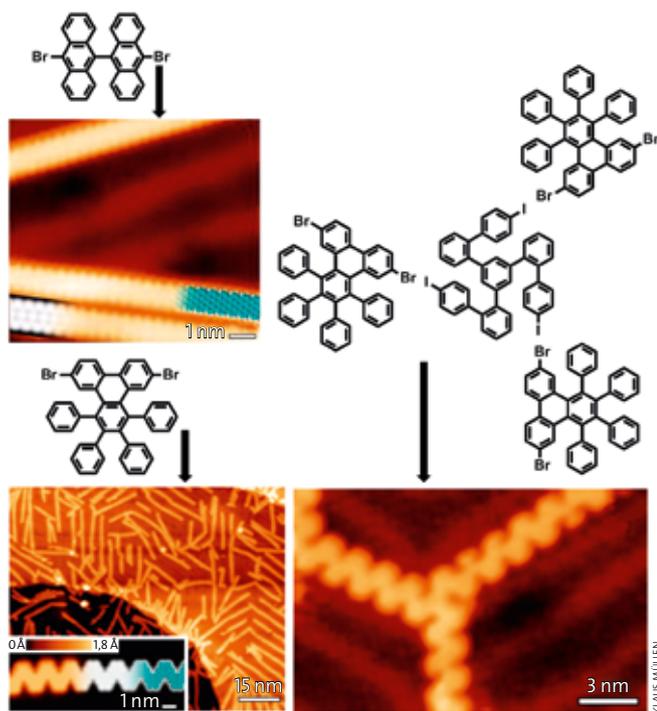
sich wohl zugleich erreichen, dass die Moleküle spontan Packungsformen annehmen, die für die anvisierte Aufgabe besonders günstig sind.

Allerdings ist – das sei nicht verschwiegen – die von uns erreichte hohe Präzision aufwändig und entsprechend teuer. Indes erfordert eine Vielzahl von wichtigen Materialfunktionen gar keine derart perfekten Strukturen. Deshalb erschien es uns sinnvoll, auch auf einfachere Verfahren wie die Pyrolyse – also die Zersetzung bei hohen Temperaturen unter Ausschluss von Sauerstoff – oder die Abscheidung von Kohlenstoff aus der Gasphase zurückzugreifen, die wegen der drastischeren Bedingungen unkontrollierter ablaufen. Dabei orientierten wir uns wiederum an den Erfordernissen der organischen Elektronik. So benötigt eine Solarzelle oder eine Leuchtdiode jeweils eine Elektrode, die elektrisch leitfähig und zugleich lichtdurchlässig ist. Als Material dafür dienen heute meist anorganische Oxide wie Indiumzinnoxid. Daraus gefertigte Elektroden haben jedoch beträchtliche Nachteile: Ihre Oberfläche ist sehr rau, und sie sind chemisch nur begrenzt stabil sowie derart spröde, dass sich keine elektronischen Bauelemente auf einem biegsamen Untergrund daraus fabrizieren lassen. Abgesehen davon, reichen die weltweiten Vorräte an Indium nicht aus, den wachsenden Bedarf zu decken.

Schon vor vier Jahren haben wir deshalb über zwei Verfahren berichtet, mit denen wir Graphenschichten herstellen konnten, die optische Transparenz mit elektrischer Leitfähigkeit verbinden und sich als Fensterelektroden für Solarzellen eignen. In einem Fall verschweißten wir PAKs einfach bei hohen Temperaturen zu Graphenschichten. Die Dehydrierung läuft dabei sehr viel gewaltsamer ab als bei dem oben geschilderten anspruchsvolleren Verfahren, was unregelmäßigere Strukturen ergibt. Deren Qualität reicht jedoch für den genannten Zweck.

Im anderen Fall griffen wir auf das schon von Geim angewandte Abpellen einzelner Graphenschichten von Graphit zurück. Als Chemiker machten wir das jedoch nicht einfach mechanisch mit Tesafilm. Vielmehr bedienten wir uns schon lange bekannter Methoden, um den Abstand zwischen den Schichten im Graphit zu vergrößern, so dass sie sich leichter ablösen lassen. Zum Aufweiten ist etwa das Einlagern von Metallen in die Zwischenräume geeignet.

Auch durch Zugabe starker Oxidationsmittel gelingt es, die Kohlenstoffschichten im Graphit voneinander zu trennen. Dieser verwandelt sich dabei in Graphenoxid – ein gelbes Material, das dank sauerstoffhaltiger chemischer Gruppen gut löslich und somit problemlos als Film abscheidbar ist. Allerdings fehlen ihm die meisten der vorteilhaften Eigenschaften von Graphen. Deshalb muss man nach der Abscheidung wieder möglichst viel von dem Sauerstoff aus dem Film entfernen und das Graphenoxid so in das ursprüngliche Graphen zurückverwandeln. Leider gelingt das nicht perfekt, so dass wir einen Kompromiss zwischen Einfachheit des Verfahrens und erwünschter Funktion eingehen mussten. Immerhin konnten wir auf diese Weise ebenfalls



Halogenatome wie Brom oder Jod ermöglichen die kontrollierte Verknüpfung von PAKs zu Polymeren einer bestimmten Geometrie. Sie werden bei der Anlagerung an eine Metalloberfläche abgespalten, so dass hochreaktive Zwischenprodukte entstehen, die auf der Unterlage umherwandern. Beim Aufeinandertreffen verbinden sie sich an den Stellen, an denen ursprünglich ein Halogenatom saß, zu Propellermolekülen, die sich durch Dehydrierung eibnen lassen. Hier ist gezeigt, wie es durch die Wahl der Ausgangssubstanz und der Position des Halogenatoms gelingt, lineare oder zickzackförmige Bänder zu erzeugen. Sogar y-förmige Polymere sind herstellbar.

funktionsfähige Graphen-Fensterelektroden für Solarzellen gewinnen.

Wir haben verschiedene Möglichkeiten erforscht, mit chemischen, elektrochemischen und thermischen Verfahren die Rückumwandlung von Graphenoxid in Graphen zu optimieren. Als besonders günstig erwies sich eine abschließende Hochtemperaturbehandlung mit kohlenstoffhaltigen gasförmigen Verbindungen wie Ethin ($\text{HC}\equiv\text{CH}$). Diese reparieren die Löcher, die im Graphen entstehen, wenn sich beim Entfernen des Sauerstoffs kleine Kohlenstoffreste mit ablösen.

Elektrische Energie effizienter speichern

Dieses Verfahren eröffnete auch völlig neue, überraschende Anwendungen für die Kohlenstoffolie. So lässt sich damit die Lithiumionenbatterie verbessern, die heutige Standardenergiequelle vieler mobiler Elektronikgeräte wie Handys, Digitalkameras und Notebooks. Als Anodenmaterial enthält sie üblicherweise Graphit, der beim Laden Lithiumionen einlagert. Seine Ladungsspeicherkapazität ist aber ziemlich begrenzt, weil es nur eine begrenzte Menge an Lithium aufnehmen kann. Deshalb suchen die Hersteller schon seit Langem intensiv nach Alternativen. Metalloxide zum Beispiel können deutlich mehr Ladung speichern. Allerdings bleiben sie während der Ein- und Auslagerung der Lithiumionen mechanisch nicht stabil und zerbröseln mit der Zeit. Um das zu verhindern, haben wir die Metalloxydteilchen in eine Graphenhülle eingepackt. Tatsächlich erhielten wir auf diese Weise eine Batterie mit hoher Ladungsspeicherkapazität, deren Anode ihre kompakte Form beibehält und deren Leistung über viele Lade-Entlade-Zyklen hinweg konstant hoch blieb.

Allerdings mussten wir auf einen Trick zurückgreifen, damit das Einwickeln funktionierte. Metalloxide tragen ebenso wie Graphenoxid auf ihrer Oberfläche negative Ladungen. Beide stoßen einander deshalb ab. Folglich galt es, die Ladung auf den Metalloxydteilchen zunächst umzukehren. Das gelang durch Zugabe einer Substanz, die sich an die Partikel band und dabei eine neue, positiv geladene Oberfläche er-

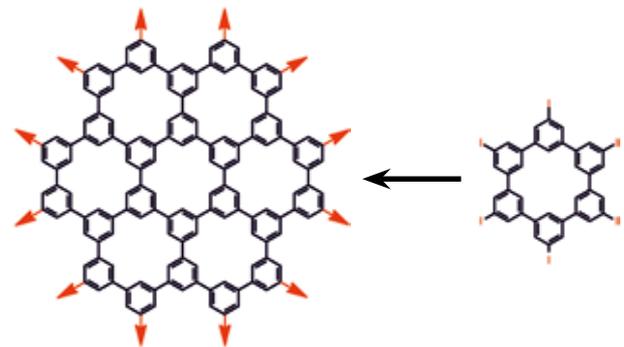
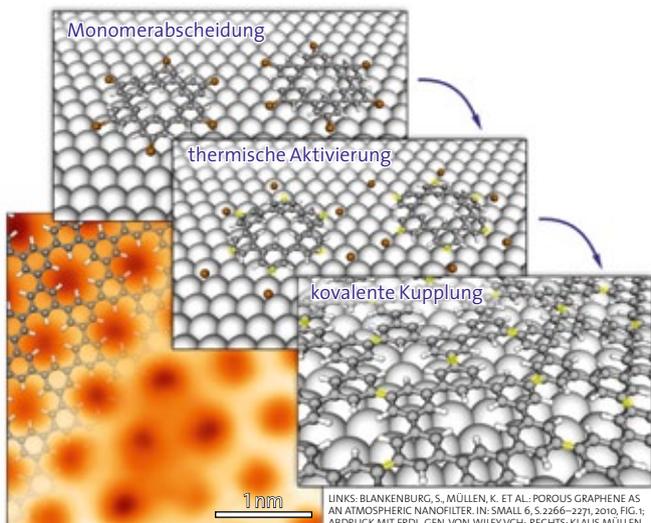
zeugte. Anschließend fügten wir das Graphenoxid hinzu. Dieses umhüllte die Teilchen dann ganz von selbst, weil sich beide wegen ihrer entgegengesetzten Ladung anzogen. Am Schluss verwandelten wir das Graphenoxid durch thermische Behandlung oder durch chemische Reduktion in Graphen zurück. Das Ergebnis war ein Hybridmaterial aus einem anorganischen Oxid mit einer stabilisierenden, aber nicht völlig geschlossenen organischen Hülle.

Neue Katalysatoren für Brennstoffzellen

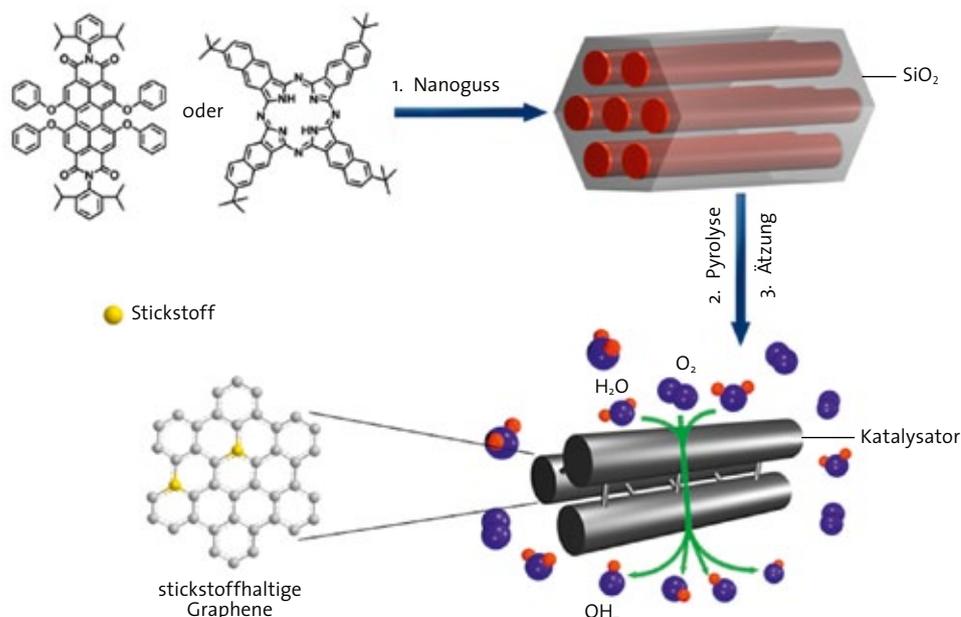
Es gibt weitere Beispiele für den Einsatz chemisch erzeugter Graphenfolien zur Speicherung oder Gewinnung von Energie. Als viel versprechender Energieträger der Zukunft gilt heute allgemein der Wasserstoff. Bei der berühmt-berüchtigten Knallgasexplosion verbindet er sich mit Sauerstoff unter Abgabe von Energie zu Wasser. In einer Brennstoffzelle läuft diese Reaktion in kontrollierter Form ab: Sie wandelt mit sehr hohem Wirkungsgrad chemische in elektrische Energie um. Deshalb sind Brennstoffzellen aussichtsreiche Kandidaten als Stromlieferanten für künftige Elektroautos.

Zum Zünden der Knallgasexplosion ist ein Funke nötig. Dessen Aufgabe übernimmt bei der Reaktion in der Brennstoffzelle ein Katalysator. Heutzutage besteht er in der Regel aus Edelmetallverbindungen mit Aktivkohle als Trägermaterial. Doch Edelmetalle sind teuer: Wenn nicht jedes Auto zusätzlich einige Gramm kostbares Platin enthalten soll, empfiehlt sich die Suche nach einem preiswerteren Ersatz.

An dieser Stelle kam uns eine theoretische Voraussage zu Hilfe. Danach können auch Graphene als Katalysatoren wirken, wenn in ihrem Gitter einzelne Kohlenstoff- durch Stickstoffatome ersetzt sind. Solche dotierten Graphene lassen sich mit unserem oben geschilderten Verfahren synthetisieren. Allerdings kämen sie dann womöglich noch teurer als Platin. Deshalb haben wir auf eine grobschlächtere, aber preiswertere Methode zurückgegriffen: die thermische Zersetzung von kohlenstoff- und stickstoffhaltigen Vorläufermolekülen, zum Beispiel bestimmten Farbpigmenten, bei



Mit »löchrigen« Vorläufern lassen sich auch Membranen mit exakt definierten Porengrößen anfertigen. Sie können dazu dienen, Stoffe anhand der Molekülgröße hochselektiv zu trennen.



Bei der thermischen Zersetzung (Pyrolyse) stickstoffhaltiger PAKs in den röhrenförmigen Hohlräumen einer Form aus Siliziumdioxid (SiO_2) entstehen Graphene mit winzigen Poren. Diese können nach dem Wegätzen des Trägermaterials an Stelle von teurem Platin als Katalysatoren für Brennstoffzellen dienen, deren Kathodenreaktion hier gezeigt ist.

etwa 800 Grad Celsius. Diese Pyrolyse sorgt zugleich für viele Poren, was sich günstig auf die katalytische Aktivität auswirkt; denn dadurch steht eine große innere Oberfläche zur Verfügung, an der Sauerstoff Elektronen aufnehmen kann (Bild oben).

Es gibt also eine Fülle von Verfahren zur Herstellung von Graphen, die sich in ihrem chemischen und verarbeitungstechnischen Aufwand unterscheiden. Welches jeweils in Frage kommt, hängt von der angestrebten Funktion ab – sowie im Fall einer technischen Umsetzung und kommerziellen Verwertung natürlich auch von den Kosten und den Erfordernissen des Marktes. Dabei umfasst der hier gegebene Überblick über unsere eigenen Arbeiten noch längst nicht alle Verfahren zur Erzeugung des begehrten Materials. Beispielsweise lassen sich dünne Graphenschichten auch durch chemische Dampfabcheidung (chemical vapor deposition, kurz CVD) herstellen.

Dabei werden kleine kohlenstoffhaltige Moleküle wie Methan oder Ethin bei sehr hoher Temperatur in energiereiche Bausteine mit zwei Kohlenstoffatomen umgewandelt, die dann auf einer geeigneten Oberfläche kondensieren und sich miteinander verbinden. Wie perfekt die Graphenschicht ist, hängt auch hier stark von Details des Verfahrens ab. Außerdem gelingt die Abscheidung bisher – wie bei unserer Synthese – nur auf Metalloberflächen, was die anschließende Übertragung auf ein Isolatormaterial erfordert. Dabei können zusätzliche Strukturdefekte auftreten, welche die Qualität des Materials vermindern.

Auch beim Graphen zeigt sich also, wie weit und mühsam der Weg von der Erzeugung und Verarbeitung eines Werkstoffs zu einer robusten Herstellungsmethode für ein daraus gefertigtes Produkt ist. Aber jede Technologie, die uns heute selbstverständlich vorkommt, war irgendwann einmal eine verrückte Idee, ein Experiment der Grundlagenforschung

oder eine theoretische Berechnung. Unsere Gesellschaft steht vor großen Herausforderungen auf dem Gebiet der Energieerzeugung – mit Auswirkungen auf viele andere Lebensbereiche. Sie zu meistern, gelingt nur mit intelligenten Materialien. Die kann man aber nicht im Versandkatalog bestellen – jemand muss sie ersinnen und realisieren. Da wir nun einmal in einer Welt leben, die ihren Wohlstand immer raffinierteren Materialien verdankt, brauchen wir auch für die Zukunft die richtigen Werkstoffe: Graphene dürften dabei eine herausragende Rolle spielen. ~

DER AUTOR



Klaus Müllen studierte in Köln Chemie und promovierte an der Universität Basel in der Schweiz. Nach seiner Habilitation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich hatte er Professuren in Köln und Mainz inne. Seit 1989 ist er Direktor des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung in Mainz.

QUELLEN

- Cai, J.M. et al.:** Atomically Precise Bottom-up Fabrication of Graphene Nanoribbons. In: *Nature* 466, S. 470–473, 2010
- Feng, X.L. et al.:** Towards High Charge-Carrier Mobilities by Rational Design of the Shape and Periphery of Discotics. In: *Nature Materials* 8, S. 421–426, 2009
- Treier, M. et al.:** Surface-Assisted Cyclodehydrogenation Provides a Synthetic Route towards Easily Processable and Chemically Tailored Nanographenes. In: *Nature Chemistry* 3, S. 61–67, 2011
- Yang, S.B. et al.:** Fabrication of Graphene-Encapsulated Oxide Nanoparticles: Towards High-Performance Anode Materials for Lithium Storage. In: *Angewandte Chemie* 47, S. 8586–8589, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1155301

Vom Graphen zum Silicen

Schon 1993 sagten es quantenmechanische Berechnungen voraus: Wie Kohlenstoff sollte auch das chemisch verwandte Silizium eine atomdicke Folie aus Sechsringen bilden. Dieses Silicen wäre für die Hochleistungselektronik vermutlich sogar noch geeigneter als Graphen. Doch jetzt erst gelang es Physikern, den Stoff im Labor herzustellen.

VON LARS FISCHER

Graphen, die Modifikation des Kohlenstoffs mit der zweidimensionalen Molekülstruktur, gilt inzwischen weithin als Wundermaterial. Dank seiner Zugfestigkeit und hohen Leitfähigkeit für Strom und Wärme könnte es eine Revolution in der Materialwissenschaft auslösen und insbesondere eine neue Ära in der Elektronik einläuten (siehe voranstehenden Beitrag). Einige Forscher allerdings vermuten, dass das wabenförmige Gitter aus Kohlenstoffatomen nur der erste Vertreter einer ganz neuen Klasse von Molekülen ist. So könnte quantenmechanischen Berechnungen zufolge auch Silizium, das im Periodensystem der Elemente direkt unter dem Kohlenstoff steht und sich chemisch sehr ähnlich verhält, das begehrte Sechseckgitter bilden. Gian G. Guzmán-Verri, Physiker an der Wright State University in Dayton (Ohio) und einer der Pioniere bei der Erforschung des aussichtsreichen Materials, taufte es 2007 auf den Namen Silicen.

Graphen hat ein großes Handikap: So verlockend seine besonderen Talente sind, so schwer ist es in bestehende Technologien zu integrieren. Das trifft vor allem auf die moderne Chipproduktion zu, wo die am leichtesten erreichbaren Anwendungen warten. Nach Einschätzung von Experten nimmt die Entwicklung graphenbasierter Schaltkreise selbst im günstigsten Fall noch zwei Jahrzehnte in Anspruch. Silicen dagegen ließe sich, so die Hoffnung, mit der bestehenden Technik in Mikrochips einbauen. Dabei hätte es gemäß den Berechnungen ähnlich günstige Eigenschaften wie das Kohlenstoffgitter und wäre für elektronische Bauteile daher mindestens ebenso geeignet.

Derlei Spekulationen haben nun eine solide Basis erhalten: Wissenschaftlern um Patrick Vogt von der Technischen Universität Berlin, Paola De Padova vom Istituto di Struttura della Materia in Rom sowie Guy Le Lay von der Université d'Aix-Marseille ist es gelungen, die zweidimensionale Siliziumfolie im Labor herzustellen. Noch ungleich aufwändiger war es freilich, ihre Identität auch zweifelsfrei nachzuweisen. Schon im Frühjahr 2010 habe es die ersten Indizien für die erfolgreiche Synthese gegeben, erklärt Vogt. »Um aber einen klaren Nachweis dafür zu führen, dass es sich bei diesen Schichten tatsächlich um Silicen handelte, benötigten wir weitere umfangreiche Untersuchungen.«

Silicen: In der Natur unbekannt

Das neue zweidimensionale Material hat es den Forschern nicht leicht gemacht. Lange war sogar völlig unklar, ob es Silicen überhaupt geben kann, und wenn ja, ob die Verbindung tatsächlich dem Graphen ähnelt. So existiert beim Silizium kein Gegenstück zum Graphit, der aus Graphenschichten aufgebaut ist und unter Normalbedingungen die stabile Form des Kohlenstoffs darstellt, während Diamant, die tetraedrische Form, metastabil ist. Bei Silizium existiert dagegen in der Natur ausschließlich die tetraedrische Version.

Anders als Kohlenstoff bildet dieses Element auch nicht so einfach graphenähnliche Schichtstrukturen. Letztendlich liegt das an der elektronischen Struktur der Siliziumatome. Bei Kohlenstoff ist die Energiedifferenz zwischen den vier Orbitalen der äußersten Elektronenschale ungewöhnlich hoch.

Dadurch wird unter gewissen Bedingungen nur ein Teil von ihnen für normale Bindungen genutzt, bei denen sich die Elektronen auf der Verbindungslinie zwischen den beteiligten Atomen konzentrieren. Die übrigen Orbitale stehen, indem sie sich seitlich überlappen, für Mehrfachbindungen zur Verfügung, die eine Besonderheit des Kohlenstoffs sind – und für die beweglichen Elektronen des Graphens.

Beim Silizium dagegen ist die Differenz zwischen den vier Orbitalen nur halb so groß. Deswegen gehen sie fast immer alle eine normale Einfachbindung ein. Die Bindungspartner ordnen sich dann um das Atom herum an wie die Spitzen eines Tetraeders. Für eventuelle Doppelbindungen oder gar frei umherschwirrende Elektronen bleibt kein unbeteiligtes Orbital mehr übrig.

Außerdem sind Siliziumatome deutlich größer. Die für die Stärke der Bindung entscheidende Überlappung der Orbitale fällt dadurch weitaus schwächer aus als beim Kohlenstoff, weshalb der Zusammenhalt zwischen zwei Siliziumatomen deutlich geringer ist. An diesen beiden Effekten liegt es, dass die Chemie des Siliziums nicht annähernd so vielseitig ist wie die des Kohlenstoffs und dass Silicen im Gegensatz zu Graphen in der Natur nicht vorkommt.

Umstrittene Nanofolie

Aus der Traum also? Keineswegs. Schon 1994 berechneten japanische Chemiker, dass ein zu Graphen analoges Blatt aus Siliziumatomen wahrscheinlich leicht gewellt, aber immerhin stabil wäre. Dieses Ergebnis bestätigten Guzmán-Verri und sein Team mit modernen Methoden im Jahr 2007. Bald da-

rauf gelang den Forschern der nächste Schritt: Auf der Oberfläche eines Silberkristalls erzeugten sie 1,6 Nanometer breite Bänder aus einer einzelnen Lage von Siliziumatomen, angeordnet in Sechsringen.

Diese ermutigenden Ergebnisse blieben allerdings nicht unwidersprochen. Die ukrainische Physikerin Elena F. Sheka stellte 2009 im Online-Repository Arxiv.org die Behauptung auf, Silici-

en im engeren Sinn könne es nicht geben: Eine hexagonale Anordnung von Siliziumatomen allein mache noch kein echtes Gegenstück zum Graphen. Silicen sensu stricto sei grundsätzlich nicht herstellbar. Das erkenne man schon daran, dass das Silizium keines der zahlreichen kleineren Moleküle mit analogen Bindungsverhältnissen bildet, die vom Kohlenstoff bekannt sind. Tatsächlich existieren keine Siliziumpendants

zu Ethylen (UPAC: Ethen) und Benzol (Benzen), den einfachsten Molekülen mit der für Graphen typischen dreieckig-planaren Bindungsgeometrie.

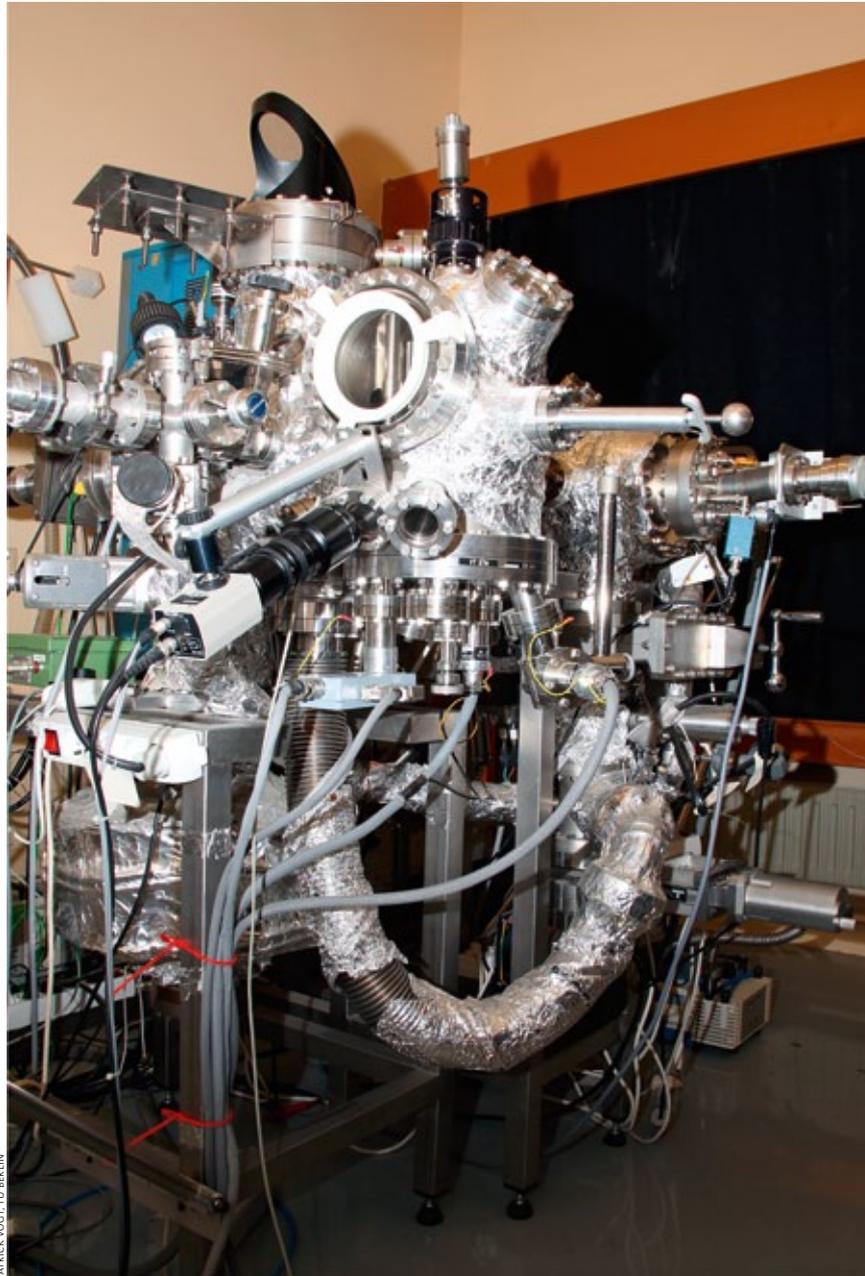
Indes gibt es auch gute Argumente, weshalb die von Guzmán-Verrí hergestellten Bänder aus Siliziumwaben tatsächlich äquivalent zu Graphen sind. So fanden die Forscher bei ihren Messungen Hinweise auf so genannte Dirac-Kegel. Diese charakteristische elektronische Eigenschaft zweidimensionaler Materialien ist auch vom Graphen bekannt. Außerdem zeigte sich, dass das Silizium der Bänder sich chemisch völlig anders verhielt, als zu erwarten wäre, wenn die Atome sich bloß auf der Oberfläche angelagert hätten.

Allerdings sind die Nanobänder keineswegs eben wie eine Graphenfläche – einige Siliziumatome ragen empor, während andere in Lücken der Substratstruktur darunter eingebettet sind. Die direkten Nachbarn eines Atoms bilden daher auch nicht wie im Graphen ein Dreieck, sondern ein Tetraeder, und deshalb könne man, kritisiert Sheka, keinesfalls von Silicen sprechen. Das lässt Vogt jedoch nicht gelten: Entscheidend seien weniger die genauen Bindungsverhältnisse als vielmehr die für die Anwendungen relevanten elektronischen Eigenschaften.

Trügerische Erfolgsmeldung

Letztendlich klären würde die Frage nur das Objekt der Begierde selbst, das sich den Synthesversuchen bis dahin entzogen hatte: eine monoatomare Siliziumschicht mit quasi unendlicher Ausdehnung in zwei Dimensionen und der typischen elektronischen Struktur des Graphens. 2010 vermeldete ein Team um den Physiker Boubekeur Lalmi von der Université d'Aix-Marseille tatsächlich den ersehnten Erfolg: Nachdem die französischen Wissenschaftler Silizium unter kontrollierten Bedingungen im Vakuum verdampft und auf einer Silberoberfläche abgeschieden hatten, sahen sie im Rastertunnelmikroskop die charakteristische Wabenstruktur.

Die Suche war damit allerdings nicht beendet; denn Lalmis Forscherkollegen erhoben Einwände: Waben allein mach-



PATRICK VOGT, TU-BERLIN

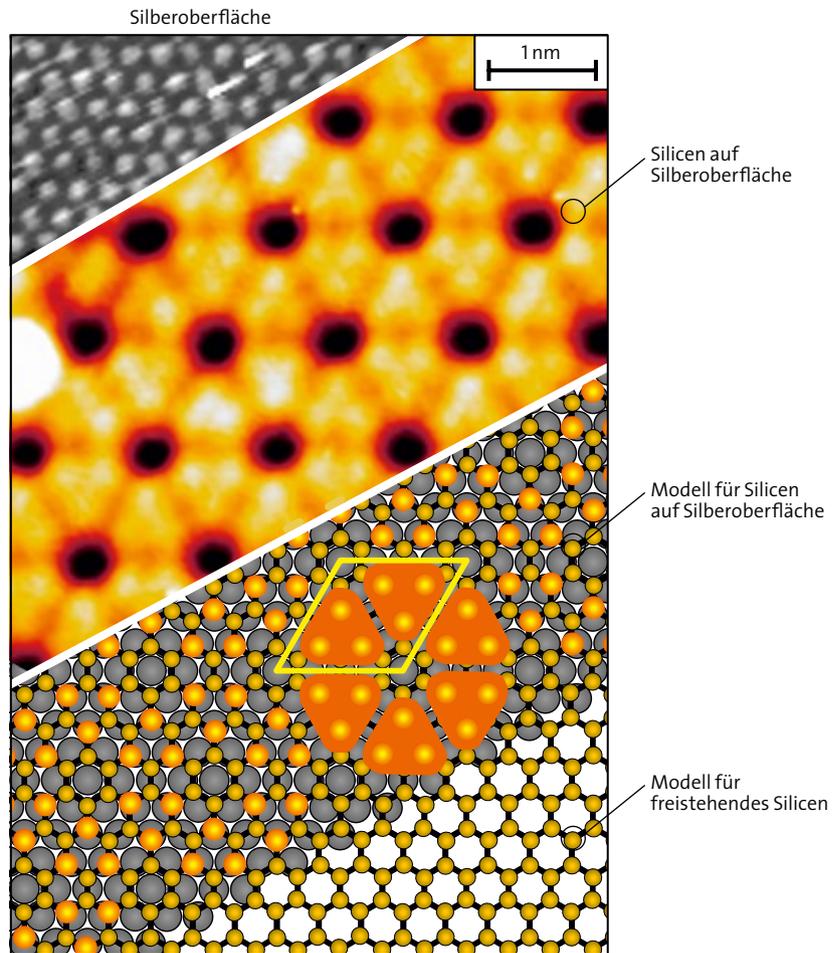
In dieser Anlage am Centre Interdisciplinaire de Nanoscience de Marseille erzeugten Wissenschaftler um Patrick Vogt von der Technischen Universität Berlin durch kontrolliertes Aufdampfen monoatomare Schichten aus Silizium auf einer Silberoberfläche und vermaßen sie mit einem integrierten Rastertunnelmikroskop.

ten noch kein Silicen, und die Bindungslänge in der gefundenen Struktur sei für Silizium deutlich zu kurz. Außerdem hätte das Team um Lalmi schlicht versäumt, zweifelsfrei nachzuweisen, dass es sich überhaupt um eine Siliziumschicht handelt. Vor allem aber sei es nicht gelungen, das Ergebnis zu reproduzieren, bemängeln die Forscher um Vogt und Le Lay.

Stattdessen präsentieren sie ihr eigenes Silicen, das völlig anders aussieht als die Ergebnisse von Lalmi und den Verdacht erhärtet, dass die früheren Befunde nur ein Artefakt der Messmethode waren. Das deutsch-französische Team liefert zu seinen rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen auch umfangreiche Messungen der physikalischen und elektronischen Eigenschaften der Siliziumschicht. Insbesondere konnten die Forscher nachweisen, dass der Film sich nicht etwa willkürlich niederschlägt, sondern an den Kanten der bereits vorhandenen Lage wächst. Das macht deutlich: Die Bindungen zwischen den Siliziumatomen bestimmen den Aufbau der Struktur und nicht etwa die Adsorption an die Silberoberfläche. »Die von uns aufgenommenen Rastertunnelmikroskopbilder zeigen deutlich«, erklärt Vogt, »dass die Anordnung der Siliziumatome zwar durch die Silberoberfläche beeinflusst wird, die hexagonale wabenartige Grundstruktur der zweidimensionalen Siliziumschicht aber erhalten bleibt.«

Die nächste Superfolie – schon in den Startlöchern?

Vor allem aber machen die Forscher um Vogt, De Padova und Le Lay im Photoemissionsspektrum der Oberfläche Anzeichen für die typische Bandenstruktur einer graphenanalogen Folie aus – obwohl sich das Material tatsächlich in einigen wesentlichen Punkten vom Gegenstück aus Kohlenstoff unterscheidet: Nur ein Drittel aller Siliziumatome weist die typische dreieckige Symmetrie auf, die anderen gehen tetraedrische Bindungsgeometrien ein oder haben Bindungswinkel zwischen diesen beiden Extremen. Entsprechend ist das Silicen des deutsch-französi-



Den rasterelektronischen Aufnahmen einer reinen und einer mit Silicen bedeckten Silberoberfläche (oben) ist hier ein Modell der beobachteten Struktur gegenübergestellt (unten). Demnach bilden die Siliziumatome ein wabenartiges Sechseckgitter. Die meisten von ihnen befinden sich in Lücken zwischen, einige aber auch mitten auf den Silberatomen. Letztere (orange) ragen aus der Oberfläche heraus und bilden die im Rastertunnelmikroskop gut zu erkennenden Dreiergruppen.

sehen Teams nicht flach, sondern gemäß den Vorhersagen gewellt. Die nach oben versetzten Atome der Schicht bilden im Rastertunnelmikroskop ein charakteristisches Dreiecksmuster, das auch von Computersimulationen bestätigt wird.

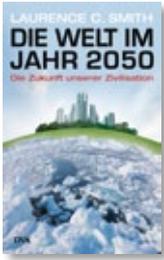
Mit dem Erfolg tritt die Erforschung des Silicens in eine neue Phase. »Ein Teil unserer aktuellen Arbeit zielt darauf ab, das Silicen von der Silberoberfläche zu lösen und dadurch unbeeinflusst messen zu können«, erklärt Vogt. Die Forscher erwarten, dass sich die Struktur ohne die Wechselwirkung mit dem Substrat verändert. Ein weiterer Ansatz bestehe darin, Silicen direkt auf anderen, für elektronische Anwendun-

gen interessanten Oberflächen abzuscheiden.

Noch sind viele Fragen offen. Nicht zuletzt ist unklar, ob sich die Folie überhaupt wie Graphen von der Unterlage abheben lässt. Ebenso wenig weiß man, wie sich die wellige Struktur im Detail auf die Eigenschaften auswirkt. Zudem winkt bereits ein völlig neues Gebiet. Schon die Berechnungen von 1994 deuteten darauf hin, dass auch das nächste Element in der Reihe, Germanium, ein stabiles zweidimensionales Gitter bildet. Dieses System wollen Vogt und seine Kollegen als Nächstes synthetisieren.

Lars Fischer hat Chemie studiert und ist Redakteur bei Spektrum.de.

VOGT, P. ET AL. / SILICENE – COMPELLING EXPERIMENTAL EVIDENCE FOR GRAPHENLIKE TWO-DIMENSIONAL SILICON. IN: PHYS. REV. LETT. 108, 5, 155301-155305, 2012. © BY THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY, MIT FRODO GEM. VON PATRICK VOGT



Laurence C. Smith

Die Welt im Jahr 2050

Die Zukunft unserer Zivilisation

Aus dem Englischen

von Martin Pfeiffer und Udo Rennert.

dva, München 2011. 480 S., € 22,99

KLIMAFORSCHUNG

Eine Prognose mit Schlagseite nach Norden

Dieses Zukunftsszenario ist wissenschaftlich fundiert, gut belegt und lebendig erzählt.

Nur der Süden kommt dabei zu kurz – wohl wegen der persönlichen Vorlieben des Autors.

Der amerikanische Geowissenschaftler Laurence C. Smith, Professor und stellvertretender Chef des Fachbereichs Geografie an der University of California in Los Angeles, hat sich mit der Frage befasst, wie die Welt im Jahr 2050 aussehen wird oder ausfallen könnte. Dabei fragt er nicht nach handelnden Menschen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, wie es vielleicht ein Sozialwissenschaftler tun würde, sondern – typisch für einen Naturwissenschaftler – nach den Kräften, die unabhängig von den Entscheidungen Einzelner die menschliche Entwicklung bestimmen.

Vier globale Kräfte sind seiner Meinung nach entscheidend: die Bevölkerungsentwicklung, der Verbrauch natürlicher Ressourcen, die Globalisierung und der Klimawandel. Hinzu kommt als fünfte Kraft der technische Fortschritt, der auf die vier genannten einwirkt. Die Begründung für seine Wahl zieht Smith aus der Geschichte: Die Kräfte, die in der Vergangenheit gewirkt haben, würden auch in Zukunft weiter dominieren.

Auf dieser Basis erzählt er, vielfach gestützt auf wissenschaftliche Modelle, die Geschichte der Zukunft in lebendigen Bildern. Viele der Themen sind uns vertraut, etwa die Herausforderungen der Energieversorgung der nächsten Jahrzehnte, das starke Bevölkerungswachstum vor allem in Afrika, die Verstärkung der Welt, die Folgen des Klimawandels, die Entwicklung der Wasserressourcen und vieles mehr.

Neuigkeitswert haben für mitteleuropäische Leser eher Themen, die den Norden betreffen. Wird die Nordwestpassage, der Seeweg durch die kanadische Arktis, in den nächsten Jahrzehnten im Wesentlichen eisfrei sein? Wem gehört der Nordpol? Was geschieht mit Gebäuden und Straßen, wenn der Permafrost in hohen Breitengraden auftaut, und wie wird sich die dortige indigene Bevölkerung entwickeln?

Das zentrale Ergebnis des Buchs: Der Norden hat eine glänzende Zukunft. Begünstigt durch den Klimawandel werden vor allem Kanada, die USA und

»Smith stellt sich Schwarzafrika im Jahr 2050 als einen ›heruntergekommenen, überbevölkerten und gefährlichen Ort‹ vor – wesentlich mehr hat er zu dieser Region nicht zu sagen«

Skandinavien profitieren. Diese Länder, so Smith, sind wirtschaftsfreundlich, globalisierungsorientiert, offen für Einwanderung und bieten stabile politische Rahmenbedingungen. Die Bilanz für Russland sieht schlechter aus, vor allem wegen des zu erwartenden Bevölkerungsrückgangs und seiner aus dem Kommunismus stammenden, schlecht an die natürliche Umwelt angepassten Infrastruktur.

Der Text ist flüssig und spannend geschrieben; Fachjargon wurde komplett vermieden. Der Autor hat darüber hinaus viele persönliche Erlebnisse eingeflochten. Dabei hat die wissenschaftliche Tiefe nicht gelitten: Sie ist in einem 70-seitigen Anmerkungs-

enthalten. Dort finden sich auch zu fast allen Fragen Hinweise auf weiterführende wissenschaftliche Veröffentlichungen.

Interessierten Zeitgenossen wird einiges bekannt vorkommen. Vieles hat man aus der Debatte um Nachhaltigkeit, Energieversorgung und Klimawandel bereits anderweitig gehört. Die Leistung des Buchs besteht in der konsistenten Zusammensetzung so vieler Mosaiksteine zu einem plausiblen Ganzen. Das ist in Kombination mit der in bestem Sinn populärwissenschaftlichen Sprache das Hauptargument, dieses

Werk zu lesen. Es erzählt eine plausible und gut belegte Geschichte der nächsten Jahrzehnte.

Allerdings leidet es unter einer grundsätzlichen Unklarheit: Will der Autor, wie er zu Beginn sagt, in einem Gedankenexperiment erkunden, wie die Zukunft aussehen kann, oder, wie viele Passagen im Text vermuten lassen, prophezeien, wie die Zukunft aussehen wird? Mehrfach formuliert der Autor »ich sehe«. Wissenschaftler sind aber keine Propheten.

Ein zweites Manko liegt in einer deutlich sichtbaren Einseitigkeit. Es geht nicht wirklich um »die Welt« im Jahr 2050, sondern vor allem um den Norden. Der Autor hat wohl eine Schwä-

che für diese Gebiete und ist sichtlich immer wieder froh, wenn er positive Entwicklungsmöglichkeiten für sie aufzeigen kann. Das ist alles in Ordnung. Ärgerlich nur, dass dabei der Süden aus dem Blick gerät. Außer düsteren Andeutungen, dass er sich Schwarzafrika im Jahr 2050 als einen »heruntergekommenen, überbevölkerten und gefähr-

lichen Ort« vorstellt, kommt da nicht viel. An dieser Stelle weckt der Titel falsche Erwartungen.

Insgesamt bietet das Buch trotz dieser Schiefelage einen wohl einmaligen Einblick in die Komplexität der Welt heute, insbesondere in Bezug auf den Umgang der Menschen mit der natürlichen Umwelt und die systemischen

Wechselwirkungen, die Vorhersagen und Gestaltung so schwer machen.

Armin Grunwald

Der Rezensent ist Professor für Technikethik in Karlsruhe; er leitet das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) sowie das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB).



Johannes Winterhagen

Abgeschaltet

Was mit der Energiewende auf uns zukommt

Hanser, München 2012. 252 S., € 17,90

ENERGIE

Pflichtlektüre für Entscheider

Das ist man bei dem heiß umstrittenen Thema Energiewende gar nicht mehr gewohnt: Johannes Winterhagen praktiziert die klassischen Tugenden sachliche Korrektheit, Informationsfülle und Ausgewogenheit.

Die Überraschung ist groß. Da hat sich ein in der Energiebranche unbekannter Technikjournalist darangemacht, die Energiewende zu hinterfragen! Seit Jahren verfolgen Experten, Unternehmer, Umweltaktivisten und Politiker ihre eigenen Positionen. Und nun legt dieser Grünschnabel mit seinem unscheinbaren Buch die gewaltige Herausforderung offen und hinterfragt Lösungswege.

Eigentlich wollte Johannes Winterhagen zu Beginn seiner mehrjährigen Recherche nur in Erfahrung bringen, wie eine umweltfreundliche Energieversorgung in der Zukunft aussehen könnte – wissend, dass für den fortschreitenden Klimawandel der CO₂-Anstieg in der Atmosphäre verantwortlich ist. Doch unmittelbar nach Fukushima überholte ihn die politische Dynamik. Kanzlerin Merkel rief den Ausstieg aus der Atomkraft und die Energiewende aus. So bekam sein Vorhaben aktuelle Brisanz und einen neuen Fokus.

Weil Winterhagen stets auf dem Boden der Fakten bleibt, liefert er das wahrscheinlich Beste zur Energie der Zukunft, das derzeit im Angebot ist – für den interessierten Laien wie für den Fachmann, der die Übersicht behalten will. Nüchtern und gleichwohl spannend analysiert er das Problem und bietet allen Lösungsvarianten genügend Raum. Er bleibt neutral, versucht nicht, ins Blaue zu spekulieren oder gar die einzig beste Lösung aus dem Hut zu zaubern.

Nebenbei ist das Werk ein bisschen Abenteuerbuch für Jugendliche, denn Winterhagen geht an vielen Stellen auf die Fragen seiner Kinder ein, denen er das Werk auch gewidmet hat. Nach der Einführung mit Jim Knopf und der Wilden 13 geht es um den wissenschaftlichen Wettlauf, den sich Julius Robert von Mayer (1814–1878) und James Prescott Joule (1818–1869) in den 1840er Jahren um die Entdeckung des Energieerhaltungssatzes lieferten.

Bis heute hat sich ihre Erkenntnis noch nicht überall herumgesprochen: Jedes Jahr werden hunderte neue Erfindungen zum Patent angemeldet, die auf ein Perpetuum mobile hinauslaufen, also eine Maschine, die aus dem Nichts neue Energie gewinnt und so die Menschheit beglückt. Tragisch, dass so etwas unmöglich ist. Winterhagen hat Recht: Wenn dies gelänge, wäre sein Buch entbehrlich – und die Energiewende sowieso.

Die größte Stärke des Autors ist unzweifelhaft die Ausgewogenheit, mit der er die vielfältigen Energieformen und ihre Umwandlungen im Einzelnen vorstellt. Völlig unaufgeregt, nahezu wissenschaftlich legt er Vor- und Nachteile offen, macht deutlich, dass »Speicherung« immer nur vorübergehend und mit Verlusten behaftet ist.

An der Kapitelfolge kann man den Erkenntnisprozess Winterhagens nachvollziehen. Zuerst widmet er jeder »alternativen Energie« von Wasser- über Windkraft und Fotovoltaik bis hin zu Solar- und Geothermie und schließlich Biomasse ein eigenes Kapitel. Da ihr Hauptproblem die heftig schwankende und kaum vorausberechenbare Verfügbarkeit ist, bespricht er folgerichtig Speichertechnologien und Infrastrukturen, die den fluktuierenden Strom aus erneuerbaren Energien zwischenspeichern und zur richtigen Zeit am richtigen Ort bereitstellen sollen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Hier spielt das Elektroauto als virtueller, verteilter Speicher im Smart Grid, dem intelligenten Stromnetz der Zukunft, eine wesentliche Rolle. Wären die 50 Millionen Pkws auf unseren Straßen alle mit einer ordentlichen Batterie von 200 Kilowattstunden Speicherkapazität ausgerüstet, könnten sie »eine knappe Woche lang Deutschland fast allein mit Strom versorgen und so auch eine längere Windflaute bei gleichzeitigem heftigem Schneefall überbrücken«.

»Die Batterien von 50 Millionen Elektroautos könnten Deutschland eine knappe Woche lang mit Strom versorgen«

Hier wie an anderen Stellen begnügt sich Winterhagen nicht mit technischen Beschreibungen und Rechnungen, sondern geht auch mit Industrie und Politik ins Gericht. »Dass man sich auf Aufholjagd befindet, bestreiten selbst Automanager mit Benzin im Blut nicht.« Gemeint ist: Erst haben sie die Entwicklung verschlafen, nun lassen sie sich von der Politik mit Fördergeldern zum Jagen tragen. Zum Ziel der Bundesregierung, bis 2020 eine Million Elektrofahrzeuge auf die Straße zu bringen, äußert er skeptisch: »Es gilt allerdings als offenes Geheimnis, dass es nicht mehr zu halten ist.«

Wasserstoff, Brennstoffzelle, der zehn Millionen teure Druckluftspeicher ADELE, bei dem der Energieversorger RWE die Federführung des EU-Projekts hat, oder auch Pumpspeicherverke: Alle Technologien nimmt sich der Autor der Reihe nach vor.

Für die Wasserspeicher fährt er eigens nach Alta in Norwegen, um herauszufinden, ob das Land bereits genügend Energie für ganz Europa speichern könnte. Immerhin erzeugt es 99 Prozent seines Stroms aus Wasserkraft und verfügt über 50 Prozent der europäischen Reservoirkapazitäten. Doch vor Ort muss Winterhagen erkennen, dass die abrufbare Leistung begrenzt ist. Zu schnelles Ablassen der gespeicherten Wassermassen würde die technischen Einrichtungen beschädigen. Quintessenz seiner Interviews: »Die norwegische Batterie könnte uns fünf windstille Tage lang mit 16 Gigawatt

Energie versorgen« – solange Deutschland der einzige Nachfrager wäre.

Weltweit trifft er Forscher am Arbeitsplatz, besucht amerikanische Solarthermiewerke, Offshore-Windparks in England, Geothermieanlagen in Bayern oder die »energieautarke« Insel Samsø in Dänemark, die trotzdem für alle Fälle ein Stromkabel zum Festland besitzt. Die Reise nach China, wo sich die Energiefrage mit noch größerer Schärfe stellt, steht noch aus.

Überhaupt sind seine Reportagen brillant. Dabei versteht er es, exakte Zahlen so geschickt einzubauen, dass der Leser nicht darüber stolpert.

Ogleich die Techniken zu alternativen Energien durch neue Materialien, veränderte Konstruktionen oder effizientere Verfahren noch erheblich an Ertrag zulegen können, werden sie nicht so viel Strom liefern, wie sich die Politik erhofft. Da der Atomausstieg nun besiegelt ist, so die bittere Erkenntnis Winterhagens, müssen wir für die Grundversorgung vorläufig auf fossile Brennstoffe zurückgreifen, mit den bekannten negativen Auswirkungen. Wahrscheinlich werden wir noch viele Jahre und Jahrzehnte mit ihnen leben müssen.

Zum Schluss formuliert Winterhagen sechs Thesen: 1. Energiesparen rettet die Welt nicht; 2. Wind- und Sonnenstrom reichen auf absehbare Zeit nicht aus; 3. Es geht nicht ohne große zentrale Kraftwerke; 4. Neue fossile Kraftwerke sollten Vorfahrt erhalten; 5. Die Energieforschung muss intensiviert werden; 6. Vergessen wir den Konsens! Streiten wir über den Weg!

Besonders die letzte These unterstreicht, dass sich alle um die Zukunft der Energie Gedanken machen müssen. Dafür liefert das Buch eine ideale Basis. Es sollte jedem Politiker als Pflichtlektüre empfohlen werden.

Reinhard Löser

Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Berlin.



Jahrgang-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) 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 Jahrgang-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-941205-92-5

spektrum.com/recherche

Weitere Produkte finden Sie auch unter www.spektrum.de/lesershop



Jordi Quoidbach

Glückliche Menschen leben länger. Experimentelle Streifzüge in die Psychologie der Lebensführung

Aus dem Französischen von Jutta Bretthauer. Springer Spektrum, Heidelberg 2012. 220 S., € 14,95

Der Psychologe und Glücksforscher Jordi Quoidbach schildert und deutet in vielen kleinen Kapiteln eine Menge psychologischer Studien, deren Teilnehmer ihr Glücksempfinden bewerten. Wer sich abends vor dem Einschlafen kleine angenehme Ereignisse des nächsten Tages vorstellt, wird sich schon nach kurzer Zeit wohler fühlen, wer aber schöne Erlebnisse ins Tagebuch schreibt, verdirbt sich damit die Stimmung. Zu jedem solchen statistischen Ergebnis liefert Quoidbach ein Rezept für Zufriedenheit. Manche sind sehr albern: Lächle kräftig auf Fotos – denn wer das auf dem Abschlussfoto der Schule tat, wurde später ein glücklicherer Mensch. Das Buch ist unterhaltsam, informativ und anregend – aber nehmen Sie den Inhalt nicht in jedem Punkt ernst! ADELHEID STAHNKE



Harald Fritzsich

Mikrokosmos. Die Welt der kleinsten Teilchen

Piper, München 2012. 192 S., € 19,99

Harald Fritzsich lädt wieder berühmte Physiker zu einem fiktiven Gespräch – diesmal über sein eigenes Forschungsgebiet. Neben Einstein, Newton und dem Alter Ego des Autors tritt Murray Gell-Mann auf, der das heutige Bild der Teilchenphysik prägte. Bei aller Erfahrung des Autors, schwierige Konzepte im Plauderton zu vermitteln, werden unbedarfte Leser einigen Ausflügen in die Gruppentheorie kaum folgen können. Bei den Eichbosonen wirft selbst Einstein ein: »Mein Gott, ist das schwierig!« Newton dagegen verwendet ganz selbstverständlich den Begriff »Quantenzahl« – und ist sonst meist zum Stichwortgeber degradiert. Immerhin erfordert es keine Konzentration, der langweiligen Rahmenhandlung zu folgen, die das Gespräch in Kapitel ordnet. Gut bedient ist mit der Lektüre, wer die Entwicklung des teilchenphysikalischen Theoriegebäudes nachvollziehen will. Wer Begriffe wie »Eichtheorie« fürchtet, dem wird auch das Buch die Angst davor nicht nehmen. MIKE BECKERS

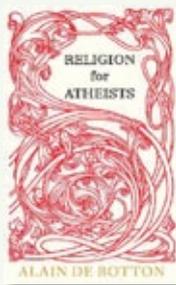


Alexander Hesse (Hg.)

Deutschlands Supergrabungen

Theiss, Stuttgart 2012. 176 S., € 19,95

Das Begleitbuch zum Zweiteiler der Fernsehserie »Terra X« präsentiert 20 bedeutende archäologische Fundstätten. Dem Team aus Redakteuren und dem Archäologen Matthias Wemhoff gelingt es, auf je acht Seiten den Bogen von der Entdeckung einer Stätte über ihre Erforschung bis hin zur Rekonstruktion der Vergangenheit zu schlagen. Dem medienwirksamen Titel entsprechend finden sich neben weniger Bekanntem wie mittelalterlichen Silberminen oder den Freizeitaktivitäten barocker Mönche »Stars« wie der Löwenmensch vom Lonetal, die Himmelscheibe von Nebra, das Mädchen aus dem Moor oder Ötzi, dessen Aufnahme in das Buch die Autoren mit seiner länderübergreifenden Bedeutung rechtfertigen. Spannende Einblicke in die Methodik führen den Leser mal ins Physiklabor, mal auf den Tiefkühler. Auch vor unbequemen Themen wie Raubgrabungen oder dem Landhunger unserer Industrienation scheuen die Autoren nicht zurück. KLAUS-DIETER LINSMEIER



Alain de Botton

Religion for Atheists. A Non-Believer's Guide to the Uses of Religion

Hamish Hamilton, London 2012. 320 S., £ 14,99

Eindringlich legt der Autor dar, wie Religionen tief verwurzelte menschliche Bedürfnisse befriedigen, die in einer säkularen Welt, die dem Götzen des Erfolgs huldigt, ungestillt bleiben: etwa der Wunsch nach einer Gemeinschaft gleich geachteter Individuen, die Anerkennung als Mensch trotz aller Schwächen oder Hilfe beim Umgang mit der eigenen Schuld. Der Atheismus sollte, so das Kredo von de Botton, vom hohen Ross der reinen Rationalität herabsteigen und nach dem Vorbild religiöser Zeremonien auch Wege entwickeln, praktische Lebenshilfe zu leisten. Die Vorschläge dazu wirken allerdings teils naiv bis hin zur Lächerlichkeit – so das »Agape-Restaurant«, in dem Wildfremde beim kollektiven Schmausen nach festem Ritual, inklusive Orgien an Fasching, zum intensiven Gefühl gegenseitiger Verbundenheit finden sollen. Ich fürchte, wer der Tröstungen des Glaubens bedarf, muss letztlich doch mit dem Original vorliebnehmen. GERHARD TRAGESER



Heinrich Päs

Die perfekte Welle

**Mit Neutrinos an die Grenzen von Raum und Zeit –
oder warum Teilchenphysik wie Surfen ist**

Piper, München 2011. 272 S., € 19,99

TEILCHENPHYSIK

Verrückte Neutrinos

Heinrich Päs erzählt die unglaubliche Geschichte der Elementarteilchenforschung und spekuliert über Zeitreisen und Extradimensionen.

Physik ist wie Surfen. Oder wie LSD. In seinem ersten populärwissenschaftlichen Werk nimmt uns Heinrich Päs, theoretischer Physiker an der Universität Dortmund, mit auf einen außergewöhnlichen Trip durch die Geschichte der Teilchenphysik – und zwar vor allem die Geschichte der kreativen Leistungen. Überraschende Anekdoten, Ausflüge in Philosophie und Kosmologie sowie futuristische Spekulationen machen es schwer, das Buch aus der Hand zu legen. Ein Schwerpunkt liegt auf der Erforschung der Neutrinos, »völlig verrückter Teilchen«, von denen die meisten die ganze Erde durchfliegen, ohne sich je bemerkbar zu machen.

Just zum Erscheinungsdatum des Buchs machten die Nachrichten von überlichtschnellen Neutrinos die Runde. Inzwischen ist klar, dass der Meldung ein Messfehler zu Grunde lag (Spektrum der Wissenschaft 5/2012, S. 21); aber das Buch ist deshalb nicht weniger aktuell. Die Erforschung der Neutrinos könnte viel zur Erweiterung des physikalischen Weltbilds beitragen. Vielleicht liefern sie gar »den Schlüssel zur Entwicklung des Universums«, wie der Autor andeutet.

Päs beginnt mit einem Ausflug in die antike Philosophie. Ob die griechischen Denker sich tatsächlich von Drogenlebnissen beeinflussen ließen, mag man glauben oder nicht; doch offenbar haben sie einige Konzepte der modernen Physik vorweggenommen. So suchen heutige Teilchenphysiker

nach Hinweisen, ob alle Teilchen und Kräfte Zustände einer einzigen Urkraft sein könnten – darüber dachte schon Platon nach.

Neutrinos könnten uns dank ihrer besonderen Eigenschaften verraten, ob eine solche Urkraft existiert; doch die »Geisterteilchen« widersetzen sich hartnäckig ihrer Erforschung. Da sie kaum mit Materie wechselwirken, erfordert ihr Nachweis riesige, äußerst empfindliche Detektoren. Der Autor erzählt von den erstaunlichen Anstrengungen, zu denen sich Forscher angesichts der experimentellen Schwierigkeiten inspirieren lassen: Die Detektoren von IceCube befinden sich tief unter der antarktischen Eisdecke, und für ein Experiment wurde sogar Blei von römischen Galeeren vom Meeresboden heraufgeholt!

Die Herkulesarbeit hat bereits spannende Erkenntnisse über die Neutrinos erbracht, obwohl die Messergebnisse nicht leicht zu deuten sind. Eines zumindest ist klar: Neutrinos sind um ein Vielfaches leichter als sämtliche anderen Materieteilchen. Doch warum ist das so, und woher bekommen sie überhaupt ihre Masse? Eine Erklärung könnte auch Antworten auf viele andere offene Fragen liefern – wie diejenige, warum es im Universum überhaupt Materie gibt anstatt nur Strahlung.

Neutrinos könnten sogar durch versteckte Dimensionen reisen, die für unsere Wahrnehmung zu klein sind. Päs spekuliert über Zeitreisen durch solche Extradimensionen und darüber, wie

Zeitmaschinen aussehen könnten. Ob diese für Menschen funktionieren würden, ist zweifelhaft, doch wer weiß – vielleicht werden eines Tages Neutrinos Botschaften in die Vergangenheit oder Zukunft übermitteln.

Die Entwicklung und Überprüfung naturwissenschaftlicher Ideen hängt immer vom Einfluss der Kultur ab, in welcher der Forscher zu Hause ist, sowie von dessen Eigenheiten und Träumen. Das zeigt der Autor mit oft haarsträubenden Anekdoten, die Wissenschaftler als Menschen interessant machen. Eine der harmloseren: Werner Heisenberg musste wegen Heuschnupfen zwangsweise einen Urlaub auf Helgoland verbringen. Er bekämpfte die Langeweile mit Klettern, Gedichteauswendiglernen und Rechnen – und erarbeitete ganz nebenbei die mathematische Grundlage der Quantenmechanik.

Auf Geschichten von Surftrips auf Hawaii und von der Hamburger Reeperbahn folgen physikalische Details aus Quantenmechanik oder Supersymmetrie. Und auch wenn sich der Autor öfter in Schwindel erregende Abstraktionshöhen aufschwingt, schafft er es doch auf unnachahmliche Weise, den Leser bei der Stange zu halten. Dank übersichtlicher Hervorhebungen und Zusammenfassungen bleibt diesem stets das Gefühl, zumindest den großen Zusammenhang zu verstehen.

Wer sich vorher wenig mit Teilchenphysik beschäftigt hat, wird allerdings mit einem Wust neuer Begriffe und Konzepte überschüttet. Ein Glossar zum schnellen Nachschlagen wäre hilfreich gewesen – was war noch einmal der »Seesaw-Mechanismus«, und was bedeutet die Abkürzung »LSND«? Ein wenig Abhilfe schafft das ausführliche Inhaltsverzeichnis, und wer tiefer in das Thema eindringen will, findet ein gut sortiertes Literaturverzeichnis vor. Rechnen Sie nicht damit, alles beim ersten Lesen zu verstehen, wohl aber mit einem außergewöhnlichen Einblick in die moderne Physik.

Manuela Kuhar

Die Rezensentin ist Physikerin und promoviert an der Universität Würzburg.

BrainScaleS und das Human Brain Project

Mehr als 100 Milliarden Nervenzellen, verschaltet zu einem Netzwerk mit rund einer Billion Verbindungen, machen unser Gehirn zu einem der komplexesten Dinge überhaupt. Um es besser zu verstehen, wollen Forscher in zwei großen Projekten seine Funktionsweise in bisher nicht da gewesenen Umfang nachahmen – die einen per Simulation mit Computern, die anderen über die Emulation durch physikalische Modelle.



ARTHUR W. TOGA, LABORATORY OF NEUROIMAGING UND RANDY BLICKNER, MARTINOS CENTER FOR BIOMEDICAL IMAGING (WWW.HUMANCONNECTOMAPROJECT.ORG)



GETTY IMAGES / BRENT STURTON

Unser wahrer Urahn?

Zwei Millionen Jahre alte Skelette aus Südafrika erschüttern das Weltbild der Paläontologen. Wider alle Erwartungen könnte diese kürzlich entdeckte Hominidenart am Ursprung der Menschengattung *Homo* stehen. Der neue Fundort verspricht eine Anzahl weiterer erhellender Fossiltschätze.



KENN BROWN & CHRIS WREN, MONDO/OUTRICH STUDIOS

Auf dem Weg zur Vereinigung der Naturkräfte

Bei den heftigsten Teilchenkollisionen versagen alle gängigen Beschreibungen, doch ein neuartiger Ansatz verspricht die Lösung. Was Physiker besonders begeistert: Die Schwerkraft fügt sich zwanglos in das theoretische Modell.

Neues aus dem Reich des Krösus

Weil er einen Spruch des Orakels von Delphi falsch auslegte, führte der lydische König Krösus sein Reich in den Untergang. Schon in der Antike war Lydien ein Mythos. Um dessen historischen Kern zu erforschen, graben Archäologen in der einstigen Hauptstadt Sardis und jetzt auch in der lydischen Provinz.

Geothermie

In verschiedenen Pilotanlagen versuchen Ingenieure, die Erdwärme für Kraftwerke nutzbar zu machen. Doch sind manche Probleme – wie Mikrobeben – noch nicht wirklich gelöst. »Spektrum der Wissenschaft« untersucht, welchen Beitrag die Geothermie für den Energiemix der Zukunft leisten kann.

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

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 August

»Magie im Bild«
Spiegel-Anamorphosen-Set zum Staunen und Selbermachen

- 6** Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Die **DVD »Das Wunder des Lebens«** von Lennart Nilsson dokumentiert die abenteuerliche Entstehung eines Menschen. In bis zu 2000-facher Vergrößerung wird einer der dramatischen Abschnitte der Entstehung bis hin zur Geburt eines Babys gezeigt. Ca. 45 Minuten Laufzeit



Das fadengeheftete **Din-A4-Spektrum-Artbook** bietet Ihnen auf 160 Seiten Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



Das **Buch »Die großen Fragen – Universum«** behandelt grundlegende Probleme und Konzepte in der Wissenschaft, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



online: spektrum.de/abo



E-Mail: service@spektrum.com



Tel.: +49 6221 9126-743



Fax: +49 6221 9126-751



Unser besonderer Tipp:

MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL

Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas,
Maße: 20 x 10 x 10 cm, Carl Aero

Bestell-Nr. 3652 € 159,-

Bei diesem Solar-Elektromotor handelt es sich um eine Konstruktion, die schon auf den ersten Blick Aufmerksamkeit erregt. Oft wird erstaunt gefragt, wie sich ein solcher frei schwebender Körper überhaupt in Bewegung versetzt.

Der Motor verfügt über eine Lagerung aus sechs Hochleistungs-Neodym-Magneten. Dadurch scheint der Anker des Motors frei im Raum zu schweben. Der Anker selbst ist mit hocheffizienten monokristallinen Solarzellen bestückt. Diese liefern nur dann Strom, wenn sie sich im Lauf der Drehbewegung jeweils auf der Oberseite befinden. Die Kommutation dieses Motors findet auf optischem Weg statt. So ist eine Steuerung des Motors vollkommen ohne Bürsten möglich. Weder durch die Achslagerung noch durch Bürsten besteht also ein Reibungswiderstand. Der einzige verbliebene Widerstand besteht in der winzigen Reibung an der Achsspitze und im Luftwiderstand.

Ein Video zum Titel finden Sie hier: www.science-shop.de/artikel/1156118

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):

Bestell-Nr. 3653 € 139,-



NEU

ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren der Biskuitporzellanmasse erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!



Hanno Depner

KANT FÜR DIE HAND

Die »Kritik der reinen Vernunft« zum Basteln & Begreifen. Mit Anleitung und 12 Bogen Bausatz

2011, 71 S. m. farb. Abb., 12 Bastelbogen, geb., Knaus

Bestell-Nr. 3629 € 19,99 (D), € 20,60 (A)

Der Bausatz »Kant für die Hand« des Philosophen Hanno Depner ermöglicht einen überraschenden und einzigartigen Zugang zu einem Hauptwerk der Geistesgeschichte. In 3 Stunden Bastelzeit wird Erkenntnis zum Abenteuer und ein Buch auf ganz neue Weise zur besten aller möglichen Beschäftigungen.

Ein Video zum Titel finden Sie unter www.science-shop.de/artikel/1066936



DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann ann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.



DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,-

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult sozusagen spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

Besuchen Sie uns im Internet unter: www.science-shop.de



NEU

ZAHLEN AM LAUFENDEN METER

Albrecht
Beutelspachers
Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x
2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.



NEU

NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3X42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker,
Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 € 199,-

Sobald es dunkel ist, kann die Beobachtung mit dem Night Eye losgehen. Schalten Sie es ein, wird ein grünes Bild sichtbar, das Ihnen jedes Detail vor Augen führt. Die Schärfe ist einstellbar bis 4 dpt. Das Night Eye ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. Night Eye ist kompakt und mit einer Hand bedienbar. Die schwarze Gummierüstung schützt das Gerät und bietet einen stabilen Halt in der Hand.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern und Deckgläschen, Präparierbesteck, Garnelenbrutanlage, MikrOkular II mit Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618 € 89,-

Hochwertiges Schülermikroskop mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, ein MikrOkular I (PC-Okular mit 640 x 480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optische Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan

WISSENSBECHER MATHEMATIK

Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK

Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE

Bestell-Nr. 3432 € 9,95



Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart