

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

TECHNIK
Computer-
simulationen
machen
Robotern Beine

JUNI 2011



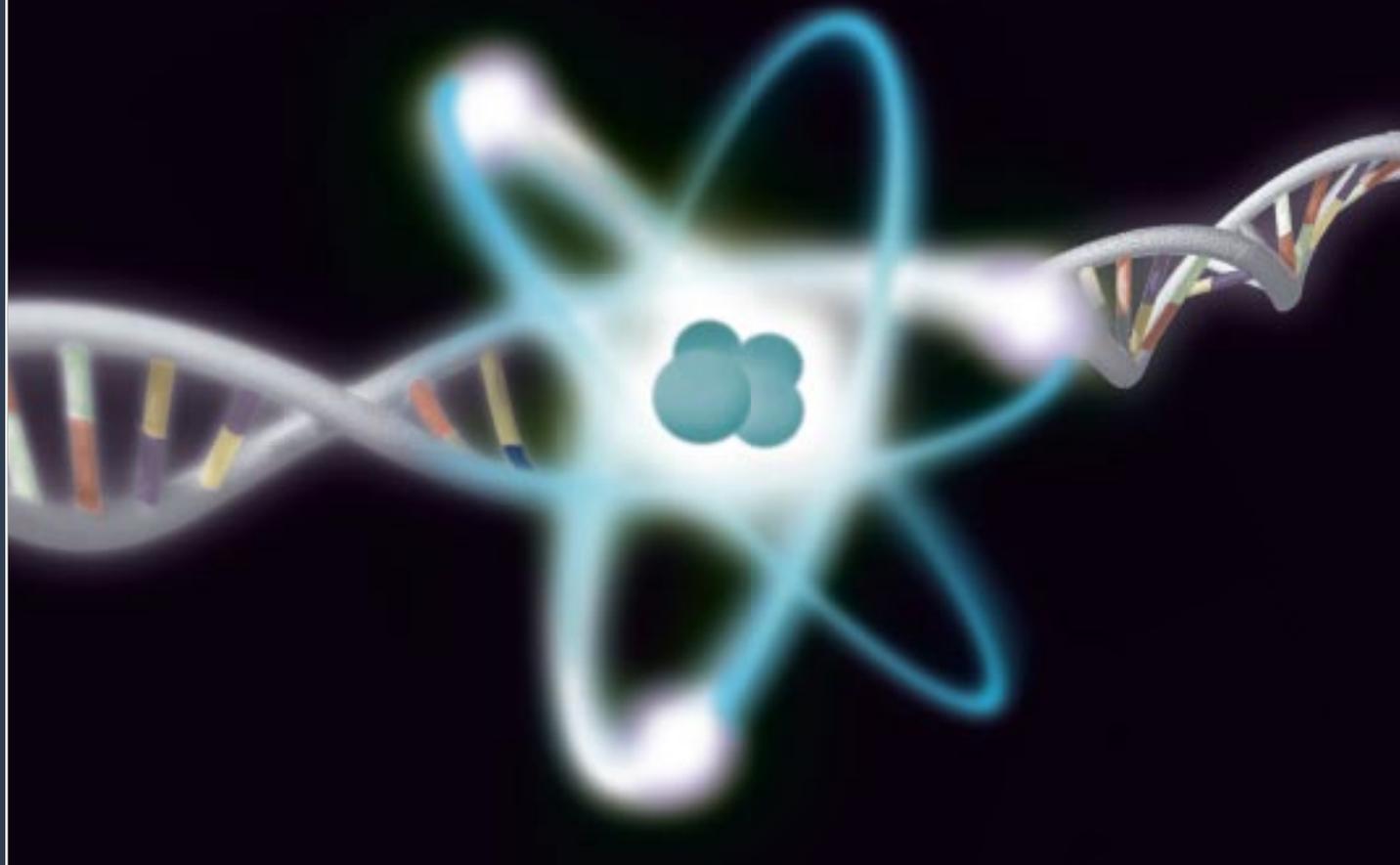
MEDIZIN
Stammzellen
à la carte

ABSOLUTER NULLPUNKT
Maxwellscher Dämon beschert
Physikern Kälterekorde

PALÄONTOLOGIE
Blut aus
Dinosaurierfossilien

Die Prinzipien der Natur

Quantenphysik und Genetik
fordern Philosophen heraus



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



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

6/11



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Die Natur der Natur

Vermutlich bin ich ein typischer Fall: Mein Interesse an Wissenschaft erwachte nicht im Schulunterricht, sondern als mir ein populäres Sachbuch in die Hände fiel. Als Teenager las ich Paul Davies' Gedanken über »Gott und die moderne Physik«. Später tastete ich mich über »Das Quark und der Jaguar« von Murray Gell-Man sowie Heisenbergs »Der Teil und das Ganze« zu Schrödingers »Was ist Leben?« weiter. Es waren die ganz großen Fragen, die mich faszinierten: Wie ist die Welt im Innersten beschaffen, warum gibt es Leben, wie entsteht Komplexität?

Solche fundamentalen Probleme sind Gegenstand der Naturphilosophie. Diese Disziplin setzt sich kritisch mit Begriffen wie »Raum«, »Zeit«, »Objekt« und »Kausalität« auseinander, um eine möglichst widerspruchsfreie Gesamtschau der Natur zu gewinnen. Ihre Anfänge liegen bei den Vorsokratikern im antiken Griechenland; herausragende spätere Vertreter waren unter anderem Aristoteles, Descartes und Leibniz.

Die Naturwissenschaft beschreibt und erklärt die Natur nicht einfach, wie sie »an sich« ist. Sie ist vielmehr ein Teil des Wechselspiels zwischen der Natur und uns selbst

Werner Heisenberg

ausgehend den Weg zu einem umfassenden Verständnis der Natur finden können. Auf diesen Pfad begeben sich für unser Titelthema zwei noch junge Philosophen: Michael Esfeld, Professor an der Universität Lausanne, nimmt ab S. 54 Kurs auf Fragen wie die, warum die Zeit eine Richtung hat und was überhaupt ein Naturgesetz ist. Marcel Weber, Professor an der Universität Konstanz, stellt ab S. 60 eine logisch saubere Begründung des Kausalitätsprinzips in der Molekularbiologie vor.

Besonders ans Herz legen möchte ich Ihnen zudem den Essay von Gerhard Börner (ab S. 66). Der bekannte Münchner Kosmologe traut sich an eine heikle Überlegung heran: Dürfen wir von den aktuellen Großprojekten der Forschung noch entscheidende Durchbrüche erwarten, wie sie etwa die moderne Physik im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts feierte? »Trotz der exponentiell wachsenden Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen und der Heerscharen eifrig tätiger Forscher scheint es in den Grundfragen nicht recht voranzugehen«, lautet sein diskussionswürdiges Resümee.

Herzlich Ihr

Carl Mönzel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Manche Dinosaurierfossilien enthalten noch winzige Reste organischer Substanzen. Die Paläontologin **Mary H. Schweitzer** von der North Carolina State University beschreibt ab S. 32 die spannende, über Jahre verlaufende Entdeckungsgeschichte dieser wissenschaftlichen Sensation.



Ein klassisches Gedankenexperiment hilft der aktuellen Grundlagenforschung auf die Sprünge: Wie sich Gasatome dank des maxwellischen Dämons auf zuvor nie erreichte Temperaturen abkühlen lassen, erklärt der Physiker **Mark G. Raizen** von der University of Texas in Austin ab S. 42.



Per numerischer Optimierung kommen Forscher den Geheimnissen unserer Bewegungssteuerung auf die Schliche. Ihre Erkenntnisse machen jetzt auch Robotern Beine, berichtet die Mathematikerin **Katja Mombaur** von der Universität Heidelberg ab S. 84.



32 Blut aus Fossilien



22 Stammzellen à la carte



78 Totes Meer in Gefahr



84 Gehende Roboter

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

- ▶ **22 Der biologische Jungbrunnen**
Konrad Hochedlinger
Vielleicht können Mediziner zur Therapie kranker Organe bald auf vielseitige Stammzellen zurückgreifen, die etwa aus Hautzellen der Patienten verjüngt wurden. Damit würden sie auch die ethische Problematik der embryonalen Stammzellen umschiffen

- ▶ **32 Blutspuren aus der Kreidezeit**
Mary H. Schweitzer
Vor Kurzem noch unvorstellbar: In Dinosaurierfossilien stecken Reste organischer Moleküle. Mitunter können Forscher sogar die Bausteinsequenzen einzelner Proteine bestimmen

- ▶ **42 Kälterekord dank Maxwells Dämon**
Mark G. Raizen
Auf einem Gedankenexperiment aus dem 19. Jahrhundert beruht ein neues Kühlverfahren, das Gasatome auf nie erreichte Tiefsttemperaturen bringt

- SCHLICHTING!
48 Wenn Shampoo Sprünge macht
H. Joachim Schlichting
Scherkräfte verflüssigen zähe Substanzen

- PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN ▶ **50 Himmelsmechanik mit Reibung**
Norbert Treitz
Gezeiteneffekte werden den Tag dem Monat gleich machen – in ein paar Milliarden Jahren

TITELTHEMA

SERIE PHILOSOPHIE

54 Das Wesen der Natur
Michael Esfeld
Realität, Kausalität, die Richtung der Zeit – das sind Grundthemen der modernen Naturphilosophie

60 Ursache und Wirkung – am Beispiel der Gene
Marcel Weber
Die kausale Rolle der Gene wirft heikle philosophische Fragen auf

- ESSAY
▶ **66 Naturwissenschaft in der Sackgasse?**
Gerhard Börner
Trotz steigenden Aufwands gibt es bei den großen Fragen der Forschung nur kleine Fortschritte



54

TITELTHEMA

Die Prinzipien der Natur

ERDE & UMWELT

78 Kann das Tote Meer überleben?

Eitan Haddock

Das Anzapfen des Jordans für Bewässerungszwecke und die Mineralgewinnung in Verdunstungsbecken lassen den einzigartigen Salzsee austrocknen.

Rettung brächte wohl nur eine Pipeline, die Wasser vom Roten Meer heranführt

TECHNIK & COMPUTER

▶ 84 Die Kunst, auf zwei Beinen zu gehen

Katja Mombaur

Numeriker entschlüsseln äußerst komplizierte Einzelheiten der menschlichen Bewegung – und lehren auch Roboter das Gehen

Nach S. 92 folgt eine 28-seitige Sonderbeilage des Helmholtz-Verbunds Regionale Klimaänderungen (REKLIM)

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft; DNA: Meganim [M]

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

- 08 Ur-Vielzeller gingen früher als gedacht an Land • Bei geheilten Blinden müssen Tast- und Sehsinn erst zusammenfinden • Eismond zaubert Polarlichter an Saturns Himmel • Licht heilt Plastikrisse • Ein Stoff – viele Farben • Darmbakterien machen Fett erst gefährlich

BILD DES MONATS

- 11 Der Feind im Nacken

FORSCHUNG AKTUELL

- 12 **Blitz, Donner, und Antiteilchen**
Terrestrische Gammablitz erzeugen Antimaterie in Erdatmosphäre
- 15 **Blut aus der Haut**
Menschliche Bindegewebszellen werden zu Blutkörperchen
- 17 **Sandwich als Teilchenfalle**
Nanofluid-Chip fixiert Kleinstpartikel ohne Einwirkung von außen
- 18 **Abelpreis für John W. Milnor**
Von Knotenkrümmungen und exotischen Sphären
- 20 **Springers Einwürfe**
Wie entsteht ein Meinungsumschwung?

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial
- 6 Leserbrief / Impressum
- 93 Rezensionen
Richard Dawkins:
Die Schöpfungslüge
Harald Zaun: SETI
Elisabeth Vaupel,
Stefan L. Wolff (Hg.):
Das Deutsche Museum in der Zeit des Nationalsozialismus u. a.
- 100 Wissenschaft im Rückblick
Vom Zeppelin zum Ultraschall
- 101 Exponat des Monats
Deutsche Antibabypille
- 102 Vorschau

Andersherum gedacht

Die Philosophin Elke Brendel betrachtete die Frage, welches Wissen möglich ist. (»Was können wir von der Welt wissen?«, Mai 2011, S. 68)

Harald Weiche, Garbsen: Das an einen Rechner gehängte Gehirn ist eine gruselige Idee, aber die Argumentation gegen diese Vorstellung scheint mir falsch aufgezogen. Es macht keinen Unterschied, ob unsere Welt so ist, wie wir sie erfahren, oder ob sie nur vorgetäuscht ist. Solange die Dinge so sind, wie sie sind, sind sie eben so. Erst in dem Moment, in dem Dinge möglich sind, die es eigentlich nicht geben sollte, erst dann darf man von einer »Simulation« sprechen.

Ich sehe keinen Apfel, ich sehe das Licht, dass von ihm ausgeht. Dieses Licht wird von mir wahrgenommen, interpretiert und zum Apfel in mir. Wie viele Kerne er hat, bleibt mir verborgen. Es ist nichts Ungewöhnliches, dass wir nur ein »Bild« von der Welt haben. Aber im Rahmen dieses Bildes bleibt der Apfel ein Apfel. Erst wenn ich hineinbeiße, merke ich womöglich, dass er aus Wachs ist.

Bevor man darüber sinnvoll spekulieren kann, ob ich nur in einer Petrischale schwimme, sollte man in Wachs gebissen haben – so lange unterschei-



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

den sich die Äpfel nicht. Zwei Funktionen, die an allen Stellen gleich sind, sind identisch. Also, liebe Skeptiker, ich behaupte, euch gibt es gar nicht. Beweist mir eure Existenz.

Fritz Kronberg, Rondeshagen: In dem Artikel findet sich das anscheinend unausrottbare falsche Sokrateszitat »Ich weiß, dass ich nichts weiß«. Dieses Zitat lautet in seiner bereits stark, aber wenigstens noch nicht sinnentstellend verkürzten Form: »Ich weiß, dass ich nicht weiß.« Diese beiden Varianten

unterscheiden sich nur durch ein kleines s, das den Sinn völlig verändert. Eine Professorin für Philosophie sollte eigentlich wissen, dass dieses aus der von Platon überlieferten Apologie des Sokrates stammende Zitat in der von ihr (falls es sich nicht um einen Übertragungsfehler handelt) verwendeten Form Unsinn ist.

Des Weiteren weiß ich nicht, ob sie mit dem Skeptizismus, der, wenn man ihn ernst nimmt, letztlich auf den Solipsismus hinausläuft, nicht ebenjenes meint. In der Beziehung scheint mir

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. Jan Osterkamp (Spektrumgramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke
 E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Entwicklungsredaktion: Dr. Reinhard Breuer (Ltg.)
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A)/ € 8,50 (L)/sFr. 14,-; im Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dözl; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483; Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Matthias O. Hüttköper, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053; Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2987, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 32 vom 01.01.2011.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2011 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



ihre Argumentation nicht stringent. Zum Dritten wundert es mich, dass sie in ihrer Argumentation gegen den »Skeptizismus« die meiner Ansicht nach einfachste Widerlegung desselben völlig außer Acht lässt, nämlich Ockhams Rasiermesser.

Giftpflanze Maniok?

Laut den Pflanzengenetikern Nagib Nassar und Rodomiro Ortiz ließe sich mit einem veredelten Maniok die Welternährung drastisch verbessern. (»Wurzel der Hoffnung«, März 2011, S. 80)

Norbert Mundigler, Wien: Maniok, Cassava, Yuca bezeichnet die Pflanze, Tapioka nur die daraus gewonnene Stärke. Außerdem enthält die Pflanze ein Blausäureglykosid – Linamarin –, das vor dem Verzehr durch Schälen, Waschen und Kochen entfernt werden muss. Für den Rohgenuss ist sie daher als bedenklich einzustufen.

Verlustreiche Nahrungskette

Sarah Simpson plädierte dafür, den wachsenden Proteinbedarf der Weltbevölkerung mit Fischen aus Aquakulturen zu decken. (»Die Blaue Revolution«, April 2011, S. 80)

Rainer Rolffs, Bonn: Der Artikel geht davon aus, dass die Menschheit große Mengen an tierischem Protein bräuchte, und stellt fest, dass neuartige Aquakulturen umweltschonender sein können als Fischfang und Massentierhaltung an Land. Zu wenig beachtet wird dabei jedoch der grundsätzlich hohe Verlust in der Nahrungskette, sowohl an Nahrungsenergie als auch an Proteinen – jedes tierische Nahrungsmittel erfordert ein Vielfaches an pflanzlichen. Dies gilt umso mehr für Raubfische.

Da bereits der größte Teil der Biomasseproduktion der Erde der menschlichen Ernährung dient, hauptsächlich über die Nutztiere, wäre der zusätzliche Ausbau der Aquakultur keine Lösung für die Umwelt- und Nahrungsprobleme, sondern verschlimmerte die Zer-

störung von Naturräumen und den weltweiten Hunger. Für die Fische ist die qualvolle Enge und der frühe, gewaltsame Tod sicherlich nicht angenehm. Und der Landwirtschaft, die unter der Auslaugung der Böden leidet und daher geschlossene Stoffkreisläufe bräuchte, ist bestimmt nicht damit geholfen, Milliarden Tonnen besten Getreides ins Meer zu kippen.

Die Lösung ist offensichtlich, wird im Artikel aber ignoriert: direkt das pflanzliche Protein zu essen, was gesund und schmackhaft ist. Um den Hunger zu bekämpfen und aus Rücksicht auf das nichtmenschliche Leben müssen wir den Verbrauch tierischer Nahrungsmittel drastisch reduzieren.

Falsche Nonius-Skala

Michael Groß erklärte, wie ein altes, aber präzises Messinstrument bei der Synthese von Nanostrukturen hilft. (»Schieblehre inspiriert Aufbau von Nanoringen«, Mai 2011, S. 21)

Reinhard Göller, Karlsruhe: Zu Beginn des Artikels sind Aufbau und Funktion einer »Nonius«-Skala falsch erklärt. Dort sind nicht zehn Millimeter (mm) in neun Teile (die hätten eine Länge von 1,11 mm), sondern neun Millimeter in zehn Teile (Länge genau 0,9 mm) untergliedert. Beim Verschieben ergibt sich dann eine ablesbare Übereinstimmung bei allen Vielfachen von 0,1 mm.

Nicht streng platonisch

Mathematiker Christoph Pöppe stellte Verallgemeinerungen der platonischen Körper vor. (»Unendliche regelmäßige Körper«, Januar 2011, S. 66)

Heinrich Bubeck, Ravensburg: Die »unendlichen platonischen Körper« des Artikels sind nicht im strengen Sinn platonisch, denn sie weisen nicht das höchstmögliche Maß an Regelmäßigkeit auf. So sind in dem Körper {3, 7} die Dreiecke zwar kongruent, aber nicht äquivalent. Das heißt, es gibt nicht zu je zwei Dreiecken des Polyeders eine Deckabbildung des ganzen Polyeders

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

studiVZ

www.spektrum.de/studivz

twitter

www.spektrum.de/twitter

auf sich selbst, die das eine auf das andere abbildet. So kann eine solche Deckabbildung niemals ein Oktaederdreieck auf ein Ikosaederdreieck abbilden oder umgekehrt.

Immerhin weisen sie das (geringere) Maß an Regelmäßigkeit auf, das traditionell mit dem Begriff »archimedische Körper« verbunden ist: Regelmäßigkeit der Flächen, gleiche Kantenlängen und Äquivalenz der Ecken. Man wird sie deshalb am einfachsten als »unendliche archimedische Polyeder« bezeichnen.

Für archimedische Körper wird allerdings nicht verlangt, dass alle Flächen gleich sind. Zu dieser gelockerten Forderung passen sicher mindestens 50 verschiedene unendliche Polyeder. Die genaue Zahl ist noch unbekannt; überhaupt ist das Feld theoretisch wie praktisch noch kaum beackert.

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

EVOLUTION

Gingen Ur-Vielzeller früher als gedacht an Land?

Lange waren Evolutionsforscher davon überzeugt, dass erst im Zeitalter des Silurs, also vor weniger als 450 Millionen Jahren, Lebewesen das Land eroberten. Seit einiger Zeit säen verschiedene Funde allerdings Zweifel: Auf Leben hinweisende Abdrücke und chemische Veränderungen in Böden, die schon lange vor diesem Zeitraum nicht von Meer bedeckt waren, könn-



Zur Torridonian-Formation gehört auch der Sandsteinpfeiler »Old Man of Stoer«, ein beliebtes schottisches Fotomotiv.

ten von Organismen stammen, die vielleicht bereits im Präkambrium auf dem Trockenen saßen. Paul Strother vom Boston College hat solche Spuren nun in der Torridonian-Formation in Nordwestschottland genauer untersucht. Die dort über eine Milliarde Jahre alten Gesteinsschichten lagen im Präkambrium unter Süßwasser und fielen gelegentlich trocken, wie verschiedene Indizien zeigen. So erkennt man etwa noch heute Stellen, die durch Regentropfen entstanden sind.

Zudem finden sich Ablagerungen, wie sie nur in Seen auftreten, und Risse, die sich beim Austrocknen an der Luft bilden. Strother und seine Kollegen haben jetzt aus den Sedimenten sehr gut erhaltene, dreidimensionale Strukturen isoliert und untersucht. Es handelt sich dabei eindeutig um die Überbleibsel von verschiedenen Arten

präkambrischer Eukaryonten, so die Forscher: also Lebewesen, deren Zellen wie bei den heute lebenden Vielzellern einen echten Zellkern besaßen. So zeigen sich etwa Dauerstadien mit komplex aufgebauten Schutzschichten sowie asymmetrische, ehemals organische Strukturen und verschiedene Thalli; das sind unstrukturierte Vegetationskörper, die für frühe mehrzellige Pflanzen typisch sind.

Laut den Forschern sind die Funde die ersten handfesten Belege für komplexe Organismen, die im Süßwasser und zeitweise wohl sogar an Land gelebt haben. Zudem sei die Torridonian-Fauna derart vielgestaltig, dass sie sich wahrscheinlich schon über längere Zeit entwickelt hätte, meint Strother – ihr Landgang habe also vielleicht früher begonnen als vermutet.

Nature 10.1038/nature09943, 2011

WAHRNEHMUNG

Bei geheilten Blinden müssen Tast- und Sehsinn erst zusammenfinden

Manche von Geburt an blinde Menschen können mit medizinischer Hilfe ihr Augenlicht wiedererlangen – etwa dann, wenn die Blindheit auf lichtundurchlässiger Hornhaut beruht und diese operativ ersetzt wird. Doch müssen erst zumindest einige Tage vergehen, bis die Betroffenen ihre bisherige, nur auf Tastwahrnehmungen beruhende Erlebniswelt mit optischen Reizen zusammenbringen können, berichtet ein Forscherteam um Richard Held vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge.

Held und seine Kollegen hatten fünf Kinder im Alter zwischen 8 und 17 Jahren untersucht, die an Linsen- beziehungsweise Hornhauttrübung litten und seit ihrer Geburt nur hell und dunkel unterscheiden konnten. Alle wurden erfolgreich operiert und erlangten ihre Sehfähigkeit. Bald nach dem Eingriff, spätestens jedoch inner-

halb der nächsten 48 Stunden führten die Forscher dann ihr Experiment durch: Sie baten die Kinder darum, zunächst einen Legobaustein zu befühlen, um ihn anschließend visuell von ähnlichen Objekten zu unterscheiden. Dieser Abgleich von Tastinformationen mit optischem Input gelang den Versuchspersonen praktisch nicht; ihre Trefferquote lag kaum über den 50 Prozent, die bei reinem Raten zu Stande kommen. Dagegen hatten die Kinder keine Schwierigkeiten, ertastete Legosteine mit den Fingern wiederzu-

erkennen oder gesehene visuell. Eine Wiederholung des Transferversuchs etwa fünf Tage später erbrachte dann bereits Trefferquoten von gut 80 Prozent, ohne dass die Probanden speziell dafür trainiert hätten. Offenbar genügte das normale Sehen in den dazwischenliegenden Tagen, um diesen deutlichen Lerneffekt hervorzurufen.

Damit liefert die moderne Medizin die Antwort auf ein Gedankenspiel, das der Naturphilosoph William Molyneux schon 1688 in einem Brief an den englischen Philosophen John Locke entwickelte: Wird ein zunächst Blinder, der plötzlich sehen kann, die ihm durch Fühlen bekannten Gegenstände sogleich mit den Augen erkennen können? Schon Locke hatte dies verneint – Helds Forschungen geben ihm nun Recht.

Nat. Neurosci. 10.1038/nn.2795, 2011



Der irische Naturphilosoph William Molyneux (1656–1698) hat das nach ihm benannte Problem als Erster formuliert.

PLANETENFORSCHUNG

Eismond zaubert Polarlichter an Saturns Himmel

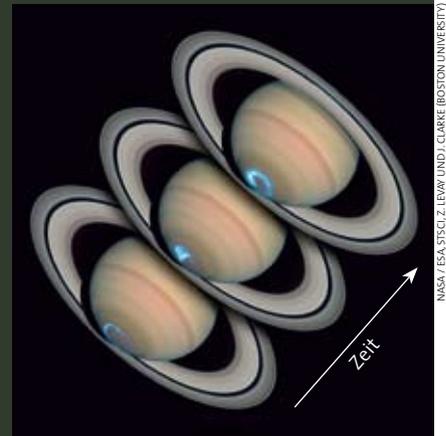
Der eisige Saturnmond Enceladus ist mit dem riesigen Ringplaneten elektrodynamisch gekoppelt und sorgt dabei für Polarlichter. Zu diesem Schluss kamen Xiaoyan Zhou vom Jet Propulsion Laboratory in Pasadena und 28 Kollegen nach der Auswertung von Daten der Raumsonde Cassini.

Dabei bestätigte das Team zunächst, dass ein nennenswerter Strom von Ionen und Elektronen vom Eismond ausgeht: Seine Kryovulkane spucken sie regelmäßig aus – in Form von Fontänen aus salzhaltigem gefrorenem Wasser. Die Teilchen bewegen sich dann entlang der magnetischen Feldlinien zu den Polregionen des Ringplaneten und lassen dessen Atmosphäre besonders im ultravioletten Wellenlängenbereich aufleuchten. Die Stärke der Erschei-

nung variiert dabei mit der Intensität des Teilchenstroms von Enceladus. Im sichtbaren Licht werden Saturns Polarlichter allerdings von der Planetenoberfläche überstrahlt. Erst im UV-Bereich heben sie sich gegenüber der vergleichsweise dunklen Oberfläche deutlich ab.

Auf der Erde resultieren Polarlichter aus den geladenen Teilchen des Sonnenwinds, die entlang der Magnetfeldlinien besonders an den Polen in die Erdatmosphäre eindringen. Beim weit von der Sonne entfernten Saturn sind solche Teilchen jedoch dünn gesät. Hier gäbe es keine Polarlichter, wenn nicht die vom Gezeiten Einfluss des Gasriesen angekurbelten Eisvulkane von Enceladus für steten Teilchennachschub sorgen würden.

Nature 472, S. 331–333, 2011



NASA / ESA, STSC, Z. LEWIS UND J. CLARKE (BOSTON UNIVERSITY)

Die Polarlichter des Saturns verändern sich mit einem Strom geladener Teilchen, den der Eismond Enceladus ausspuckt. Die Teilchen wandern von dort aus entlang magnetischer Feldlinien zum Pol des Gasriesen und hinterlassen beim Eindringen in die Atmosphäre einen ultravioletten Fußabdruck.

KUNSTSTOFFE

Licht kuriert Plastikrisse

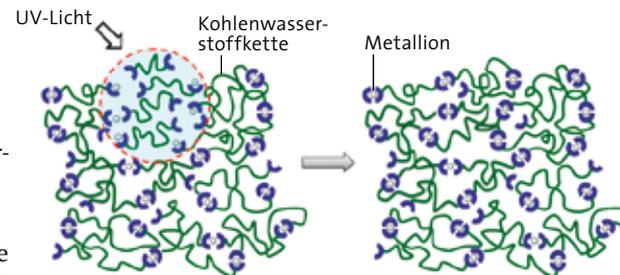
Wissenschaftler um Mark Burnworth von der Case Western Reserve University in Cleveland haben einen Kunststoff hergestellt, bei dem sich schadhafte Stellen mit UV-Licht flicken lassen. Das neue Material besteht aus kurzen Kohlenwasserstoffketten, die an beiden Enden spezielle, wie ein Greifer mit zwei Fingern geformte Moleküle tragen. Diese Endgruppen können sich mit Metallionen verbinden.

Als die Forscher Zinkionen hinzugeben, hefteten sich Greifermoleküle daran. Jedes Ion wirkte als Kleber, der zwei Kohlenwasserstoffketten ähnlich der Kupplung zweier Eisenbahnwaggons miteinander zu langen Fäden verband.

Wird der so gewonnene Kunststoff mit UV-Licht bestrahlt, nehmen die

Komplexe aus Zinkionen und Greifermolekülen Energie auf und gehen in einen angeregten Zustand über. Die Energie geben sie in Form von Wärme an das umgebende Plastik ab. Dadurch lösen sich die Kohlenwasserstoffketten voneinander und der Kunststoff schmilzt. Beim Abkühlen rasten die Kupplungen wieder ein und verbinden die Waggons erneut miteinander. So kann UV-Licht Schadhafte Stellen wie etwa Kratzer reparieren: Wärme schmilzt den Kunststoff lokal und lässt ihn zusammenfließen; nach Abschalten des UV-Lichts wird er wieder fest.

Mit einer Weiterentwicklung der Methode wird es laut Aussage der Forscher sogar möglich sein, selbstheilende Kunststoffe herzustellen. Das neue Verfahren lasse sich mit anderen



GINA FIORE FOR ADOLPHE MERKLE INSTITUTE, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY, US ARMY RESEARCH LABORATORY

Im Lichtkegel des UV-Lichts verflüssigt sich der Kunststoff, weil sich die gekoppelten Kohlenwasserstoffketten (grün) dort voneinander lösen (links). Beim Abschalten verbinden sich die Enden der Fäden dann neu, und das Material härtet aus (rechts).

kombinieren, bei denen eine Beschädigung die Farbe des Materials ändert. Dann würden nur defekte Stellen Licht einer entsprechenden Wellenlänge absorbieren – und somit automatisch repariert.

Nature 10.1038/nature09963, 2011

CHEMIE

Ein Stoff – viele Farben

Japanische Forscher haben ein poröses Gel entwickelt, dessen Farbe sich fast beliebig verändern lässt und trotzdem aus allen Blickwinkeln gleich aussieht. Verantwortlich dafür ist die besondere Struktur des Materials. Normalerweise basieren derartige Strukturfarben wie bei irisierenden Vogelfedern auf Interferenz und changieren mit dem Einfallswinkel des Lichts. Die Farbe des von einem Team um Yukikazu Takeoka von der Universität Nagoya

Strukturfarben durch diffuse Reflexion: Diese Gelscheiben verdanken ihre unterschiedliche Farbe lediglich winzigen Spritzern Azeton.

entwickelten Kunststoffes hängt dagegen von dem Lösungsmittelgemisch ab, das die feinen Kanäle des porösen Materials ausfüllt. In reinem Toluol ist es tiefblau, doch schon bei Zugabe von kleinen Mengen Azeton wechselt es über grün und violett nach gelb.

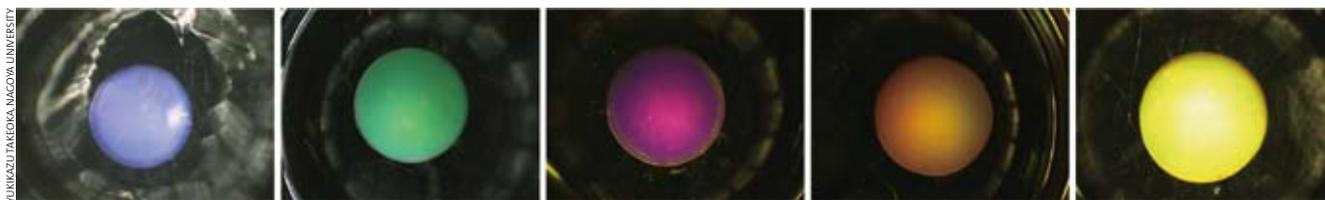
Bleibt die Temperatur bei der Herstellung des verwendeten Kunststoffes Poly-2-(2-methoxyethoxy)-ethylmethacrylat (PolyMEO2) unterhalb von 50 Grad Celsius, trennen sich noch während der chemischen Reaktion die sich bildenden Polymerketten vom Lösungsmittel wie Öl von Wasser. Dadurch entstehen wenige Mikrometer große Domänen, die durch Hohlräume und Kanäle voneinander getrennt sind.

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie auf spektrumdirekt.de

Die Farbe beruht auf diffuser Reflexion an den Grenzflächen der Domänen, die sich je nach Wellenlänge ändert.

Bei dem von Takeoka und seinem Team hergestellten Material ist der Brechungsindex von Polymer und Lösungsmittel nur für einen schmalen Wellenlängenbereich gleich, so dass dieses Licht ungehindert das Polymer passiert, während alle anderen Wellenlängen im Material gestreut werden und die Farbe erzeugen. Je nach Lösungsmittelgemisch und Temperatur ändert sich dieser Bereich der exakten Übereinstimmung – und damit auch die Farbe.

Angew. Chem. Intern. Ed. 10.1002/anie.201008182, 2011



MEDIZIN

Darmbakterien machen Fett erst richtig gefährlich

Zu fette Nahrung ist ungesund – das ist allgemein bekannt. Wie genau Fettstoffe (Lipide) in Lebensmitteln uns krank machen, hängt allerdings von vielen Faktoren ab und ist ziemlich kompliziert. Forscher um Zeneng Wang von der Cleveland Clinic haben jetzt die Stoffwechselwege aufgedeckt, über die unsere Darmflora gemeinsam mit der Leber einen herzscheidenden Stoff herstellt.

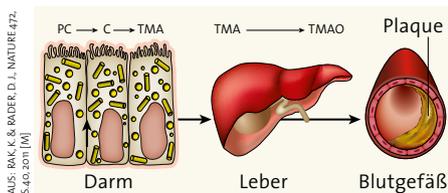
Zunächst verglichen sie dafür Fettabbauprodukte im Blut von gesunden Menschen und Herz-Kreislauf-

Patienten. Nach einem Infarkt sind demzufolge die Werte von solchen Lipiden erhöht, die beim Verdauen von Phosphatidylcholin (einem häufigen Fettbestandteil) entstehen – etwa Cholin und Trimethylamin-N-Oxid (TMAO), das bereits als gesundheitsschädliches Molekül bekannt ist. Mäuse produzieren in der Leber laut Wang und seinen Kollegen große Mengen an TMAO aus dem gasförmigen Vorläufermolekül Trimethylamin (TMA). Letzteres wiederum stellen Bakterien der Darmflora aus Cholin

her. Daher gilt: Je mehr Lipide in der Nahrung, desto mehr Cholin wird bakteriell abgebaut und desto mehr TMAO fällt an.

Bei Mäusen wie bei Menschen gehen laut Wang erhöhte Konzentrationen von TMAO immer mit einem größeren Arteriosklerosisisiko einher. Vielleicht sinke die Gefahr eines Herzinfarkts, wenn die TMAO-Menge reduziert wird, so hoffen die Forscher. Dies könnte möglicherweise einfach dadurch gelingen, dass Betroffene weniger Nahrungslipide aufnehmen. Vielleicht ließe sich aber auch die Darmflora verändern, um den bakteriellen Abbau des Cholins zu verlangsamen. Zudem sei vorstellbar, die Produktion von TMAO in der Leber mit Medikamenten gezielt zu blockieren.

Nature 472, S. 58–65, 2011



Darmbakterien bauen Phosphatidylcholin (PC) aus Nahrungsfett über Cholin (C) in TMA (Trimethylamin) um. Dies wird in der Leber zu TMAO, was vermutlich schädliche Ablagerungen in den Blutgefäßen fördert.

DER FEIND IM NACKEN

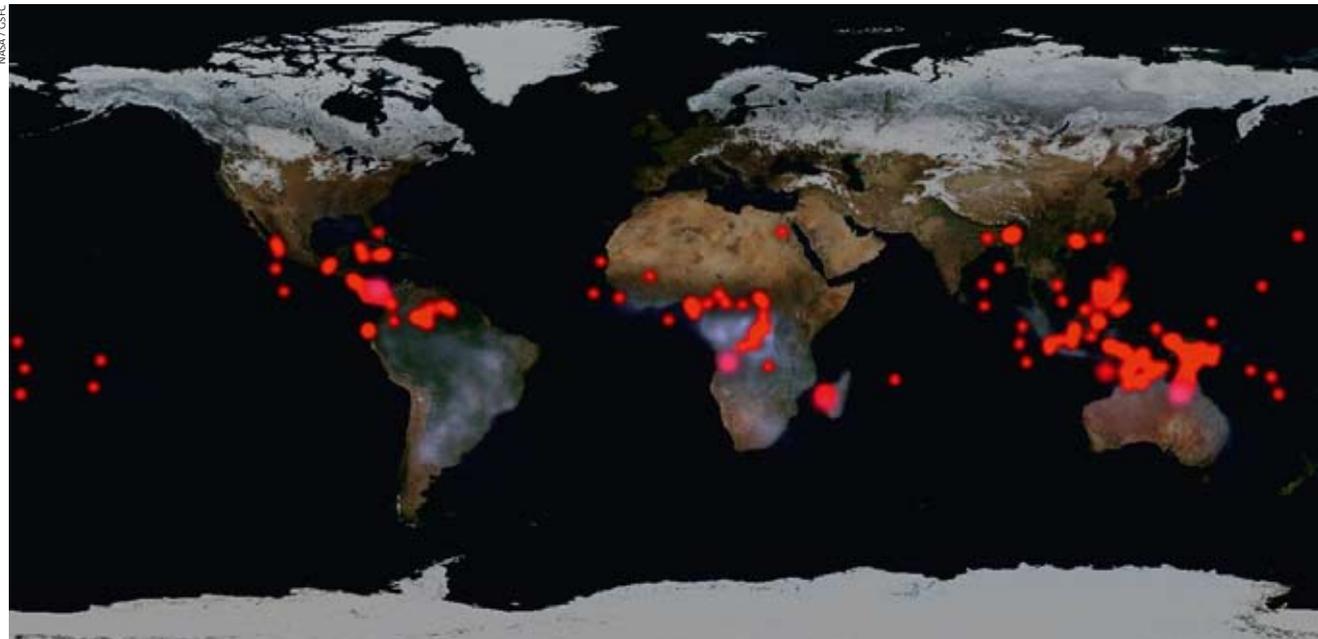


MICHAEL OHL, MUSEUM FÜR NATURKUNDE BERLIN

Auf dem Rücken einer Sackspinne wartete die Larve einer Fanghafte (*Mantispidae*, eine Familie der Netzflügler) darauf, dass diese ihren Eierkokon spinnt. Dann wurden beide von Harz umhüllt und blieben dadurch als Bernsteinfossil für die Nachwelt erhalten. Ohne diesen Zwischenfall wäre der »Spinnenreiter« in den Kokon eingedrungen, um die Eier zu vertilgen. Eine Spinne zu erklettern, gelingt nur den sehr beweglichen Erstlingslarven, die späteren Stadien sind madenartig.

Der Fund in Baltischem Bernstein belegt, dass die Fanghafte schon vor 44 Millionen Jahren auf diese ausgeklügelte Strategie zur Nahrungsbeschaffung setzte. Zudem liefert er das erste Fossil einer Fanghaftenlarve überhaupt. Die erwachsenen Tiere erinnern dank ihrer Vorderbeine an kleine Gottesanbeterinnen, mit denen sie aber nicht näher verwandt sind: ein Beispiel für konvergente Evolution.

Naturwissenschaften 98, S. 453–456, 2011



ATMOSPÄRENPHYSIK

Blitz, Donner, Antiteilchen

Das Weltraumobservatorium Fermi hat Antimaterie entdeckt, als es hinunter auf die Erde blickte. Entstanden sind die ungewöhnlichen Partikel in irdischen Gewitterwolken als Folge so genannter terrestrischer Gammablitz.

VON JAN HATTENBACH

Normalerweise beschäftigt sich Fermi nicht mit irdischen Angelegenheiten. Der NASA-Satellit blickt stattdessen tief ins Weltall, von wo ein steter Strom aus geladenen Teilchen und energiereicher Strahlung die Erdatmosphäre bombardiert. So gewinnt er Informationen über Supernovae, aktive Galaxienkerne und Schwarze Löcher. Insbesondere fahndet sein Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) nach Ausbrüchen von Gammastrahlen.

Sie stammen von den energiereichsten Explosionen, die Astronomen kennen, und vermutlich kündigt jede von ihnen vom Ende eines massereichen Sterns. Über 150 der Gammablitz, die der Burst Monitor seit Fermis Inbetriebnahme Mitte 2008 registrierte, besitzen jedoch einen ganz anderen Ursprung. Sie sind auf der Erde entstan-

den, genauer: in den Gewitterzellen der Troposphäre. In jedem Moment ereignen sich weltweit mehr als 1500 Gewitter; täglich entladen sich mehrere Millionen Blitze in die Atmosphäre unseres Planeten. Ein ausgewachsenes Gewitter produziert aber nicht nur Blitz und Donner, Regen und Sturm. 1994 registrierte das Burst and Transient Source Experiment (BATSE) an Bord des Gammasatelliten Compton erstmals einen terrestrischen Gammablitz. Später konnten Forscher mehrfach bestätigen, dass solche Terrestrial Gamma-Ray Flash oder kurz TGFs genannten Phänomene mit elektrischen Entladungen in Gewittern zusammenhängen.

Nun nahm auch Fermi die TGFs ins Visier, um so neue Einblicke in die Geschehnisse in Gewitterwolken zu gewinnen. Doch zunächst – Fermi um-

kreiste schon die Erde – mussten die Forscher die Auslöseelektronik des Burst Monitor anpassen. Denn terrestrische Gammablitz leuchten weniger als eine Millisekunde lang auf, während ihre kosmischen Verwandten sekunden- oder gar minutenlang registriert werden können.

Die meisten terrestrischen Gammablitz treten in tropischen Breiten auf, denn dort toben die heftigsten Gewitter. Entdecken kann sie der Satellit nur, wenn er sich direkt oberhalb der Gewitterzelle befindet. Am 14. Dezember 2009 registrierte Fermi aber ein Signal, ohne auch nur in der Nähe eines Gewitters zu sein. Zu diesem Zeitpunkt überquerte das Instrument den ägyptischen Teil der Sahara. Es stellte sich heraus, dass der zugehörige Gewitterblitz im südafrikanischen Sambia in über 4000

Die Karte zeigt die geografische Verteilung der bis Ende 2010 vom Gamma-Ray Burst Monitor des Fermi-Satelliten registrierten terrestrischen Gammablitze. Sie treten vor allem in den tropischen Zonen auf: dort, wo die stärksten Gewitter stattfinden.

Kilometer Entfernung niedergegangen war. Aus Sicht des Satelliten lag das unterhalb des Horizonts und damit außerhalb seines Blickfelds.

Hier hatte das Magnetfeld der Erde Schützenhilfe geleistet. Die Auslöser eines TGF sind Elektronen, die von den starken elektrischen Feldern einer Blitzentladung bis fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Treffen sie auf Luftmoleküle, werden sie abgebremst und erzeugen dabei Gammastrahlung. Andererseits spricht der Gamma Burst Monitor auch auf die Elektronen selbst an. Denn die elektrisch geladenen Partikel werden vom Magnetfeld der Erde auf korkenzieherförmige Bahnen entlang der Feldlinien

gezwungen. Deshalb bewegen sie sich in einem relativ schmalen, gekrümmten Bereich um den Erdglobus (Grafik S. 14) und können dabei weite Distanzen zurücklegen. Genau das gelang ihnen an jenem 14. Dezember.

Der Burst Monitor ist ein Detektor, in dem hindurchfliegende Partikel so genanntes Szintillationslicht erzeugen. Gammaphotonen, Elektronen und Positronen kann das Instrument indessen nur durch die Dauer des Signals unterscheiden. Der Blitz vom 14. Dezember 2009 erstreckte sich über ganze zehn Millisekunden. Das sprach für Elektronen als Auslöser, da sich diese auf Grund leicht unterschiedlicher Geschwindigkeiten entlang ihrer Bahn verteilen und damit ein deutlich länger andauerndes Signal erzeugen als ein TGF.

Mehr noch: 25 Millisekunden später registrierte der GBM ein zweites, schwächeres Signal. Grund dafür dürften so genannte magnetische Spiegelpunkte gewesen sein. An solchen Orten wirken die Flugrichtung eines Teilchens relativ zu den Magnetfeldlinien und die sich

verändernde Stärke eines Magnetfelds so zusammen, dass das Teilchen reflektiert und wie durch eine Sprungfeder auf gleichem Weg zurückgeschleudert werden. So etwas kann nur mit geladenen Teilchen geschehen, also hatten offenbar Elektronen das vermeintliche TGF-Signal ausgelöst!

Eine weitere Überraschung

Doch das war noch nicht einmal das bemerkenswerteste Detail dieses Ereignisses. Als die Wissenschaftler die Energieverteilung der Elektronenstrahlung untersuchten, fiel ihnen eine deutlich sichtbare Häufung bei einem Wert von 511 Kiloelektronvolt auf. Diese Energie gilt als eine Art Fingerabdruck für die gegenseitige Vernichtung von Elektronen und ihren Antiteilchen, den Positronen: Stößt ein Elektron mit einem Positron zusammen, entstehen zwei Gammaphotonen mit der Energie von jeweils 511 Kiloelektronvolt. Die Entdeckung zeigt, dass bei Gewitterblitzen auch Antimaterie entsteht, wahrscheinlich durch Streuung der bei Gewittern

Simulation: Wie Gewitterstürme Teilchenstrahlen ins All schleudern

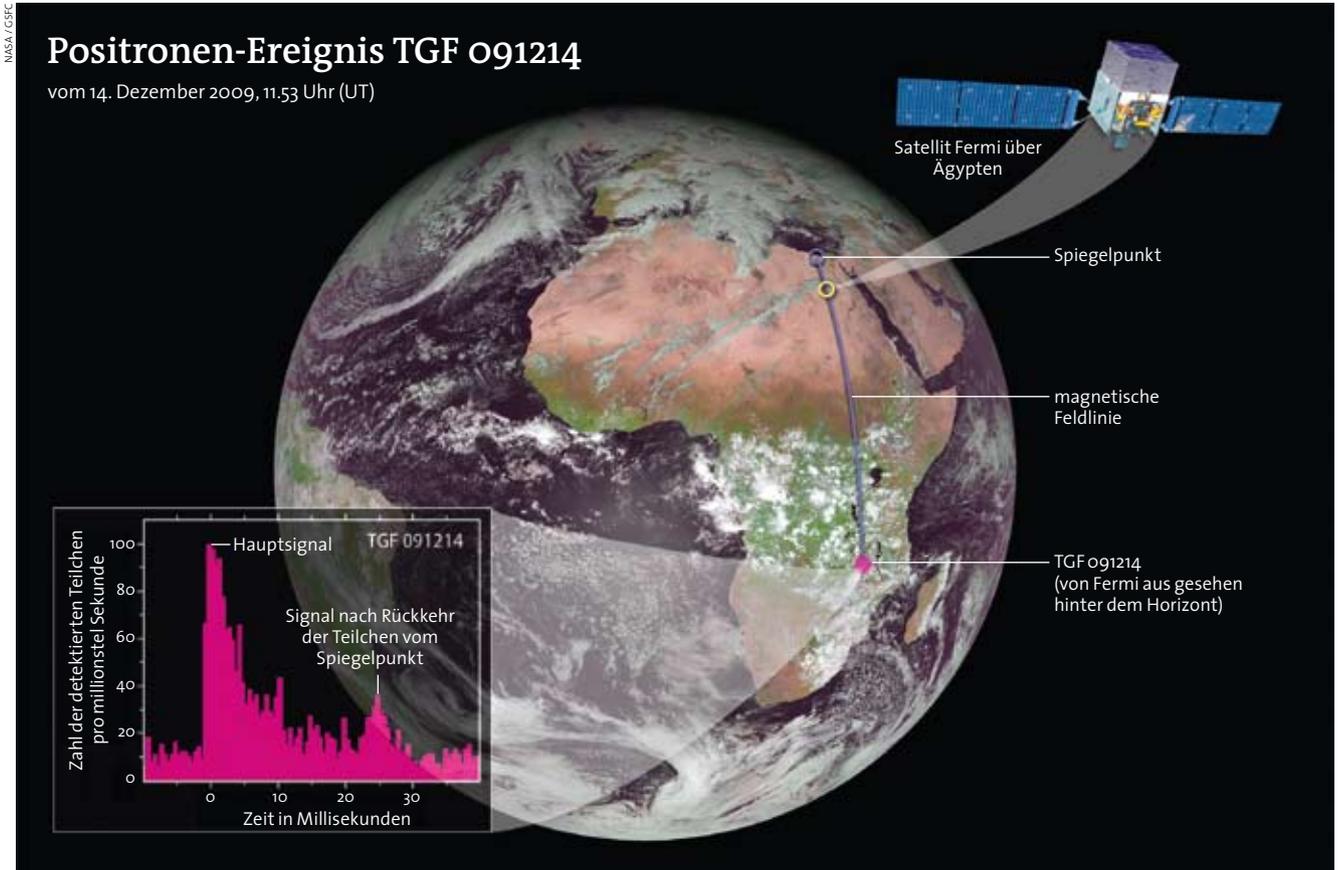


1 Elektrische Felder im obersten Bereich einer Sturmregion erzeugen eine sich aufwärtsbewegende Lawine von Elektronen (gelb). Werden die Teilchen durch Luftmoleküle von ihrer Bahn abgelenkt, senden sie energiereiche Gammastrahlen aus (pink). Die Daten entstammen einer Simulation, bei der ein terrestrischer Gammablitz (TGF) in 15 Kilometer Höhe entstand.

2 Gammastrahlen können Elektronen bis auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigen. Außerdem sind sie für die so genannte Paarbildung verantwortlich: Passiert ein energiereiches Gammaphoton einen Atomkern, kann seine Energie in ein Paar aus einem Elektron und einem Positron, also einem Teilchen und seinem Antiteilchen, umgewandelt werden. Entlang der Erdmagnetfeldlinien entkommen die energiereichen Elektronen und Positronen dann auf einer Spiralbahn ins All.

3 Bereits nach 1,98 Millisekunden sind die Strahlen aus Elektronen und Positronen in Höhen gelangt, wo sie von Raumfahrzeugen registriert werden können. Der Satellit Fermi umrundet die Erde in rund 600 Kilometer Höhe. Sein Detektor spricht sowohl auf Elektronen und Positronen als auch auf Gammaphotonen an, kann sie allerdings nur durch die Dauer des jeweiligen Signals unterscheiden.

NASA / GSFC / J. DWIVER, FLORIDA INSTITUTE OF TECHNOLOGY



erzeugten Gammaphotonen an Luftmolekülen. Dabei entsteht ein Paar aus einem Elektron und einem Positron. Letztere bewegen sich dann ebenso wie die Elektronen spiralförmig entlang der Magnetfeldlinien, auf Grund ihrer positiven elektrischen Ladung allerdings mit umgekehrtem Drehsinn. Treffen schließlich Teilchen auf Antiteilchen, kommt es zu der charakteristischen Energieaussendung.

Unerwartet sei die Entdeckung von Antiteilchen in terrestrischen Gamma-Blitzen nicht, erklärt Jochen Greiner vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, der auch Mitglied des Fermi-Teams ist. Die Energie der Gammaphotonen in TGFs kann schließlich 40 Megaelektronvolt und mehr betragen: Das ist ein Vielfaches der Energie, die zur Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren gebraucht wird. Mit dem Effekt der Paarerzeugung sind Astrophysiker ohnehin vertraut. Auch kosmische Gammastrahlung löst ihn aus, und Luftschauerdetektoren wie das argentinische Pierre-Auger-Teleskop oder Tscherenkow-Teleskope wie Magic oder

Den Gamma-Blitz (TGF) am 14. Dezember 2009 über Sambia entdeckte Fermi nur, weil sich vom Ort des Geschehens geladene Teilchen entlang der Linien des Erdmagnetfelds durch die Atmosphäre ausbreiteten. An einem magnetischen Spiegelpunkt wurden sie reflektiert und trafen so erneut auf die Detektoren des sich über Ägypten bewegenden Satelliten.

HESS können ihn registrieren. Überraschend aber war, sagt Greiner, der eindeutige Nachweis von Antiteilchen in so großer Entfernung von ihrem Entstehungsort.

Wie hängen TGFs mit »Elfen« zusammen?

Eine Reihe von Fragen bleibe jedoch offen. So ist noch nicht im Detail verstanden, wie aus der optischen Blitzentladung die Gammastrahlung entsteht. Auch der Zusammenhang zwischen TGFs und den so genannten »Kobolden«, »blauen Jets« oder »Elfen« sei vorerst noch rätselhaft.

Diese Leuchterscheinungen, über die Flugzeugpiloten und Astronauten schon lange berichten, erstrecken sich bis an die Grenze des Weltraums und treten ebenfalls über Gewitterwolken

auf. »Wir vermuten da einen Zusammenhang, aber Genaues wissen wir noch nicht«, meint Greiner.

Eine Gefahr geht von den Phänomenen übrigens nicht aus. Die dichte Erdatmosphäre schützt uns vor Gammastrahlung ebenso wie vor Antimaterie, und Verkehrsflugzeuge vermeiden das Durchfliegen von Gewitterzellen ohnehin. Außerdem produziert nicht jeder Blitz einen TGF. Schätzungen zufolge kommt es pro Tag rund um den Globus zu allenfalls 500 dieser Ereignisse. Warum allerdings einige Blitze Gammastrahlung und Antimaterie produzieren, andere hingegen nicht, ist eine Frage, welche die Forscher ebenfalls noch beantworten müssen.

Jan Hattenbach ist Physiker, Astronom und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

Blut aus der Haut

Möglicherweise müssen Leukämiepatienten bald nicht mehr auf einen passenden Spender von Stammzellen hoffen: Ein kanadisches Wissenschaftlerteam wandelte menschliche Bindegewebszellen in rote und weiße Blutkörperchen um.

VON GERLINDE FELIX

Um lebensbedrohliche Blutkrankheiten wie Leukämie zu heilen, müssen die Ärzte zuerst die körpereigenen Blutzellen mittels Chemotherapie vernichten. Dann transplantieren sie dem Patienten Stammzellen eines passenden Spenders, die das zerstörte Blutsystem komplett neu aufbauen sollen. Dazu gehören Sauerstoff transportierende rote Blutkörperchen (Erythrozyten) ebenso wie weiße Immunzellen (Leukozyten), die Infektionen bekämpfen, sowie die für die Blutgerinnung wichtigen Blutplättchen (Thrombozyten).

Für viele Patienten bedeutet das die Rettung – doch längst nicht für alle, weil sich nicht immer ein Spender mit übereinstimmenden Gewebemerkmalen findet. Ohne diese immunologische Kompatibilität würde der Empfänger die fremden Zellen abstoßen. Eine Alternative besteht darin, dem Patienten nach der Chemotherapie seine eigenen Stammzellen zu transplantieren. Diese werden zwar nicht abgestoßen, dafür ist jedoch das Rückfallrisiko erhöht, weshalb der Ansatz auch keine ideale Lösung bietet. Neue Wege eröffnet eine Studie, die Mick Bhatia vom Stammzel-

len- und Krebsforschungsinstitut der McMaster University in Hamilton, Kanada, mit seinem Team durchführte (Nature 468, S. 521–526). Ausgangspunkt waren Fibroblasten aus der Haut: unreife Bindegewebszellen, aus denen normalerweise neue Hautzellen hervorgehen. Stammzellforscher versuchen schon seit einiger Zeit, aus Fibroblasten andere Zelltypen herzustellen. In den letzten Jahren ist das zwar mehreren Teams geglückt, aber nur über einen Umweg: Die spezialisierte Zelle wird erst zu einer »stammzellähnlichen« Zelle umfunktioniert. Dies ge-

ANZEIGE



Diesen Monat in Cicero

Der letzte Hoffnungsträger

Bringt Peer Steinbrück die SPD wieder auf Regierungskurs?

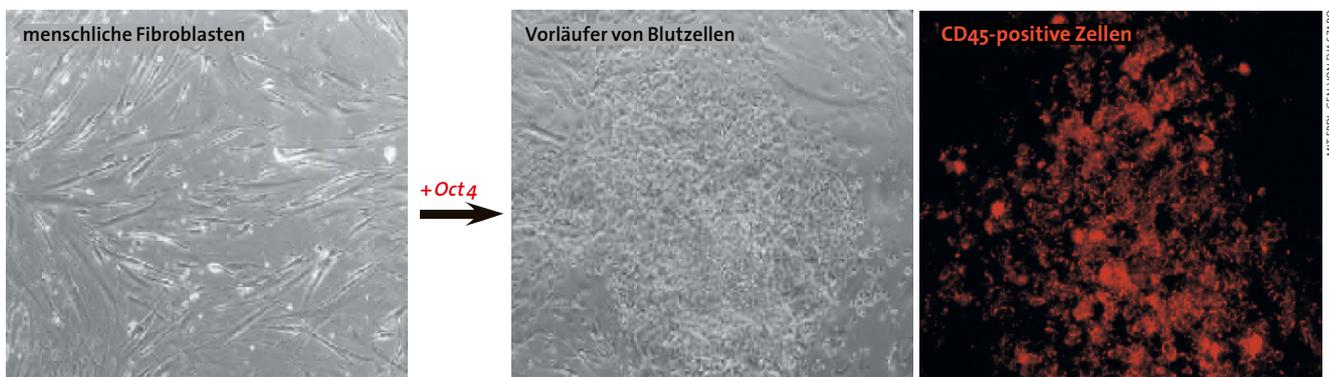
Die ganze Welt der Politik!

Jetzt Gratisheft anfordern!

www.cicero.de/probe

☎ 0800 282 20 04

Bestellnr.: 779254



Bekommen menschliche Fibroblasten (links) in Zellkultur das Gen *Oct4* eingepflanzt, formen sie Kolonien aus Blut bildenden Zellen (Mitte). Die Fluoreszenzfärbung rechts zeigt, dass die umgewandelten Zellen den typischen Blutzellmarker CD45 tragen.

lingt mittels in die Zellen eingepflanzter Fremdgene, die das embryonale Programm der Zelle wieder aktivieren. Die so entstandenen »induzierten pluripotenten Stammzellen« (ipS) können dann zu verschiedenen Zelltypen ausreifen.

Umwandlung ohne Umwege

Der Haken bei der Prozedur: Es besteht die Gefahr, dass sich Krebszellen bilden – ein großes Problem für die klinische Anwendung. Die direkte Umwandlung eines Zelltyps in einen anderen bringt hingegen ein wesentlich geringeres Krebsrisiko mit sich. Genau dieser Schritt gelang jetzt der Arbeitsgruppe um Mick Bhatia nach etwa zweijährigen Bemühungen: Sie transformierten menschliche Fibroblasten ohne Umweg über die ipS direkt in Vorläufer von Blutzellen. Hierzu schleusten die Forscher in die Fibroblasten das für die Umprogrammierung notwendige Gen *Oct4* ein, das bereits bei der Herstellung der ipS verwendet wurde. *Oct4* steuert wie der Dirigent eines Orchesters die Aktivität vieler Gene und verändert so die Identität der Zellen.

Im Verlauf dieser Neuprogrammierung begannen die Fibroblasten das für alle Blut bildenden Zellen charakteristische Markerprotein CD45 an ihrer Oberfläche auszubilden (siehe Bilder oben). »Gleichzeitig sind die für Fibroblasten spezifischen Gene immer seltener aktiv, je weiter der Wechsel fortgeschritten«, so die Wissenschaftler.

Als die Forscher die CD45-Zellkulturen in einem zweiten Schritt mit blut-spezifischen Wachstumsfaktoren (Zytokinen) versetzten, übertraf das Ergebnis alle Erwartungen: Aus den Fibroblasten sowohl von Neugeborenen als auch von Erwachsenen wurden »multipotente« Vorläufer von Blutzellen – also Zellen, die sich zu mehreren unterschiedlichen Zelltypen entwickeln können.

So entstanden innerhalb von nur 30 Tagen ab *Oct4*-Einschleusung Fresszellen, die normalerweise im Körper Abwehraufgaben erfüllen. Es handelte sich dabei um Granulozyten sowie um Monozyten, die durch weitere Zytokingabe zu Makrophagen ausreifen. Dies gelang nicht nur in Zellkultur, sondern ließ sich auch »in vivo« nach Transplantation der Vorläuferzellen in Mäuse beobachten. Schließlich fügte Bhatias Team zu den Vorläuferzellkulturen das Zytokin Erythropoetin hinzu, worauf sich auch rote Blutkörperchen (Erythrozyten) bildeten sowie Megakaryozyten, aus denen die für die Blutgerinnung benötigten Blutplättchen entstehen.

Einige Stammzellforscherkollegen dämpfen allerdings die Euphorie ein wenig: Die *Oct4*-behandelten Zellen ähneln ihrer Meinung nach zwar Blutzellen, es sei jedoch noch nicht ganz klar, ob sie wirklich funktionstüchtig sind. Andererseits steht Bhatia mit seinem Erfolg nicht allein da. Zwei andere Forschergruppen haben es ebenfalls geschafft, Hautzellen auf direktem Weg in andere Zelltypen umzuwandeln. Ma-

rius Wernig und seine Mitarbeiter von der Stanford University identifizierten eine Kombination aus drei Genen, die aus Mäusefibroblasten Nervenzellen machen – und zwar eindeutig funktionsfähige. Die Neurone erzeugten die für die Informationsweiterleitung nötigen elektrischen Aktionspotenziale und bildeten charakteristische neuronale Kontaktstellen (Synapsen). Über sie konnten die neuen Zellen sogar elektrische Signale mit anderen Neuronen austauschen (Nature 463, S. 1035–1041).

Stammzellforscher unter der Leitung von Deepak Srivastava vom Gladstone Institute of Cardiovascular Disease der University of California in San Francisco stellten wiederum Herzmuskelzellen her, indem sie drei herzspezifische Gene in Fibroblasten aus Mäusen einschleusten. In ein Mäuseherz implantiert, erledigten die so gewonnenen Zellen ihre Aufgabe einwandfrei und kontrahierten völlig normal (Cell 142, S. 375–386).

Einziges Nachteil beider Studien: Sie verwendeten nicht menschliche Fibroblasten, sondern solche aus Mäusen. Damit ist noch offen, ob sich diese Erkenntnisse auch direkt auf den Menschen übertragen lassen.

Ein gutes Stück Weg ist also bereits bewältigt, aber »es liegt noch eine Menge Arbeit vor uns, und Verbesserungen sind nötig«, gesteht auch Bhatia ein. Immerhin werden vermutlich schon 2012 erste klinische Studien anlaufen. Maßgeschneiderte Ersatzzellen zur Heilung menschlicher Krankheiten könnten demnach nur noch eine Frage der Zeit sein.

Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Wartenberg.

Sandwich als Teilchenfalle

Mit einem neuartigen Nanofluid-Chip ist es Züricher Forschern gelungen, Kleinstpartikel ohne Einwirkung von außen für Stunden frei schwebend an einer bestimmten Stelle festzuhalten.

VON JOACHIM EIDING

Atome, Moleküle oder winzige Teilchen zappeln in einer Flüssigkeit unablässig hin und her – ein als brownische Bewegung bekanntes Phänomen. Partikel ohne mechanische Kraft von außen festzuhalten, um sie genauer untersuchen zu können, gilt unter Physikern deshalb seit jeher als große Kunst. In neuerer Zeit wurden einige Methoden dazu entwickelt – beispielsweise optische Pinzetten mit gekreuzten Laserstrahlen. Sie sind jedoch relativ aufwändig und nicht universell einsetzbar. So taugen optische Pinzetten normalerweise nicht für Partikel mit Durchmessern unter 100 Nanometern.

Forscher an der ETH Zürich haben nun eine neuartige Methode erdacht, um Kleinstobjekte berührungslos zu fixieren (Nature 467, S. 692). Dazu konstruierte die Gruppe um Madhavi Krishnan und Vahid Sandoghdar ein mikroskopisch kleines »Sandwich« aus einem Glasplättchen und einer Siliziumscheibe mit oxidierten Oberflächen. In die Siliziumdioxidschicht ätzten die Wissenschaftler mit gängigen lithografischen Verfahren aus der Halbleitertechnik winzige Kanälchen, 20 Mikrometer breit und 200 Nanometer tief. Als Fallen für die Partikel brachten sie in den Rinnen

zusätzlich 100 Nanometer tiefe, kreisförmige Mikromulden mit speziell gewählten Durchmessern an.

Danach ließ das Züricher Team wässrige Suspensionen verschiedener Nanoteilchen mit einer Geschwindigkeit von 100 Mikrometer pro Sekunde durch die Anordnung strömen. Als Testobjekte dienten Goldbällchen, Lipidvesikel oder Polystyrolkugeln mit Durchmessern von 100, 50 beziehungsweise 20 Nanometern. Tatsächlich verirrt sich die Partikel in die Mulden und saßen, wenn diese die richtige Breite hatten, nach dem Abschalten der Strömung bis zu mehreren Stunden darin fest. Dabei lagerten sie sich keineswegs an die Wände an, sondern verharrten frei schwebend im Zentrum der Falle. Wurde der Lösung Kochsalz zugesetzt, entwichen die Teilchen jedoch binnen einer Minute aus ihrem Verließ.

Gefangen im Potenzialtrog

Wie lässt sich dieses Verhalten erklären? »Glas- und Siliziumdioxidoberflächen sind in Wasser negativ geladen«, erläutert Krishnan. Das liegt daran, dass sie Hydroxidionen (OH^-) aus der Lösung anlagern. Tragen nun die einzelnen Nanoteilchen – beispielsweise win-

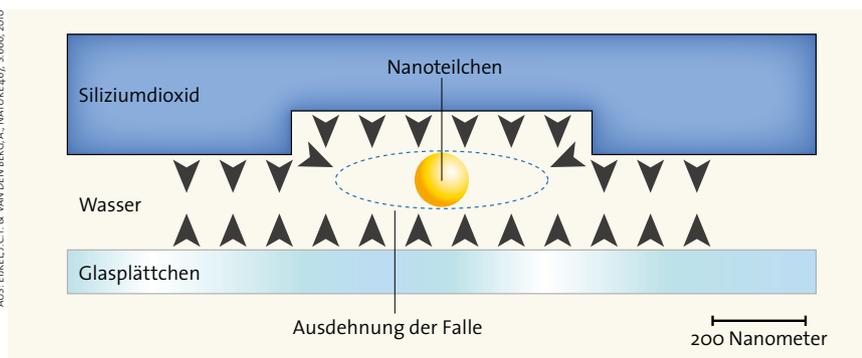
zige Goldbällchen, die bei der Reduktion von Goldsäure durch Natriumzitat entstehen – ebenfalls eine negative Ladung, werden sie von der Glasoberfläche abgestoßen. Der in den Kanälchen wirkende Kapillareffekt schiebt sie dann zu den Mulden, in denen jeweils nur ein Teilchen Platz findet. In der Mitte der Vertiefung bleibt es schließlich am Ort des geringsten elektrostatischen Potenzials gefangen.

Die Muldenbreite bestimmt, wie lange und auf wie engem Raum das Teilchen fixiert wird. Ist die Vertiefung zu schmal, entkommt es nach kurzer Zeit wieder. Bei einem Durchmesser von 200 Nanometern hielt die Nanowanne die 100 Nanometer dicken Goldbällchen nur für rund eine Minute fest. In einer 500 Nanometer breiten Mulde blieben die Partikel dagegen stundenlang gefangen. Allerdings war ihre Position in diesem Fall nicht mehr so genau festgelegt. Das ermittelten die Forscher, indem sie die Teilchenbahnen mit einer neuartigen Methode, der so genannten interferometrischen Mikroskopie, durch die Glasscheibe hindurch verfolgten.

Die brownische Bewegung lässt sich demnach nicht komplett unterdrücken – was auch Rechnungen bestäti-

Durch elektrostatische Abstoßungskräfte (Dreieckspfeile) bleiben 20 bis 200 Nanometer große Teilchen in Mulden innerhalb eines Sandwichs aus einer kristallinen Siliziumdioxid- und einer Glasscheibe gefangen. Die Abstoßung beruht darauf, dass sowohl die Partikel als auch die Oberflächen der Scheiben negative Ladungen tragen.

AUS: EIKEL, J. C. T. & VAN DEN BERG, A., NATURE 467, S. 666, 2010



gen. Entlang der Mittelsenkrechten der durchweg nur 100 Nanometer tiefen Mulden war sie bei den Goldklümpchen stets auf etwa 20 Nanometer eingeschränkt. Seitlich schwankte die Bewegungsfreiheit dagegen zwischen 150 Nanometern bei 500 Nanometer breiten Vertiefungen und 20 Nanometern bei einer Muldenbreite von 200 Nanometern. Präziser lassen sich Partikel auch mit optischen Pinzetten nicht fixieren.

Die Ergebnisse für die anderen Teilchenarten waren ähnlich. Die nur halb so großen Lipidvesikel verhielten sich ziemlich genau wie die Goldbällchen. Die noch kleineren Polystyrolkugeln ließen sich dagegen etwas schlechter festhalten. Sie blieben auch in einer 500 Nanometer breiten Mulde nur rund eine Minute gefangen. Tatsächlich spielt der Durchmesser der Teilchen aber kaum eine Rolle. Vielmehr kommt es in erster Linie auf ihre Ladung an: Je negativer sie ist, desto besser wirkt die Falle.

Wie gut die Partikel festgehalten werden, hängt aber auch davon ab, wie viele

Ionen die Flüssigkeit enthält. Die Forscher an der ETH Zürich verwendeten deshalb hochreines destilliertes Wasser. Bei Zusatz von Kochsalz entkamen die Teilchen prompt aus ihren Verliesen. Der Grund: Schwimmen viele Ionen in der Lösung, schirmen sie die Nanopartikel gegen elektrostatische Felder ab, und die Kanal- und Muldenwände wirken nicht mehr abstoßend genug.

Vorteile gegenüber der Laserpinzette

Der Vorteil der neuen Methode liegt darin, dass sie unabhängig von der Masse oder Größe der Teilchen funktioniert. Anders als bei der Laserpinzette kommt es auch nicht auf die Polarisierbarkeit der Partikel an. Sie müssen nur eine negative Ladung tragen, was bei vielen Nanoteilchen natürlicherweise der Fall ist. In der Biologie gilt das beispielsweise für Nukleinsäuren, die Träger der Erbinformation, sowie für eine große Zahl von Proteinen.

Allerdings verlieren solche Biomoleküle in reinem, deionisiertem Wasser

meist ihre normale Struktur: Sie denaturieren. Doch müssten sie sich nach Berechnungen der Züricher Forscher auch in leicht salzhaltigen Lösungen einfangen lassen, wenn die Kanäle und Mulden weniger tief sind. Das berührungslose Fixieren von Proteinen oder Nukleinsäuresträngen würde zum Beispiel die Möglichkeit eröffnen, die Faltung dieser Moleküle genauer zu analysieren – ein biologisch wichtiger Vorgang, den man bis heute nur ungenügend versteht.

Die ETH-Wissenschaftler sehen aber noch weitere Anwendungsmöglichkeiten für ihre Methode. So lassen sich längliche Teilchen wie etwa Nanostäbchen nicht nur fixieren, sondern auch ausrichten. Ferner könnte das Verfahren nach Ansicht seiner Erfinder zum Auftrennen von Partikelgemischen dienen – desgleichen zum Sortieren von winzigen Objekten oder zu ihrer Anordnung in dichten, regelmäßigen Gittern.

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.

MATHEMATIK

Abel-Preis für John W. Milnor

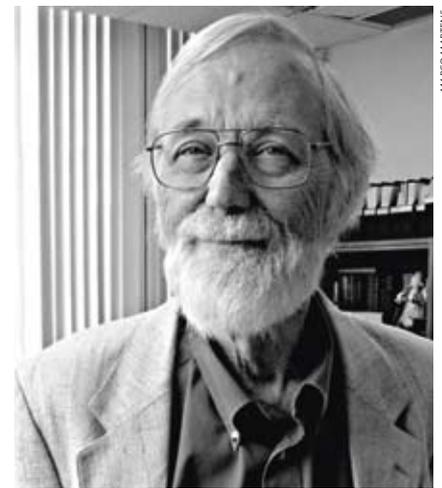
Der amerikanische Mathematiker hat zu vielen Gebieten bahnbrechende Beiträge geleistet. Berühmt geworden ist er vor allem durch seine topologischen Arbeiten über »exotische Sphären«.

VON DIERK SCHLEICHER

Topologie-Vorlesung an der Princeton University 1949. Professor Albert Tucker schreibt eine Behauptung ohne Beweis an die Tafel: »Jeder nicht-triviale Knoten hat Gesamtkrümmung größer als 4π .« Der 18-jährige Student John W. Milnor kommt wieder einmal zu spät, hält das Angeschriebene für eine Hausaufgabe und liefert eine Woche später den Beweis ab. Der Satz war aber gar keine Hausaufgabe, sondern eine bis dahin unbewiesene Vermutung, und der Student konnte den Beweis gleich als seine erste wissenschaftliche Arbeit in den »Annals of Mathe-

matics« veröffentlichen (Kasten rechts oben). Die nunmehr bewiesene Behauptung findet sich in der Literatur als Satz von Fáry-Milnor, weil der ungarische Mathematiker István Fáry (1922–1984) fast zeitgleich einen weiteren Beweis vorlegte.

Mit diesem Paukenschlag begann die lange und überaus fruchtbare Karriere des John Milnor, die nun, 62 Jahre später, mit dem Abel-Preis gekrönt wird. Die Auszeichnung wird erst seit 2003 vergeben und ist in Analogie zu den Nobelpreisen konzipiert: Mit einem Preisgeld von sechs Millionen norwegi-



MARCO MARTENS

John Willard Milnor, geboren am 20. Februar 1931 in Orange (New Jersey), promovierte 1954 in Princeton bei Ralph Fox. Auf dem Umweg über das MIT und Los Angeles kam er bald wieder nach Princeton, an das Institute for Advanced Studies. Im Jahr 1990 wurde er Direktor des neu gegründeten Institute for Mathematical Sciences an der State University of New York in Stony Brook (heute Stony Brook University), wo er bis heute arbeitet.

schen Kronen (etwa 750 000 Euro) und einer Zeremonie in Gegenwart des norwegischen Königs wird jedes Jahr das Lebenswerk eines großen Mathematikers gewürdigt. Zuvor gab es als nobelpreisähnliche Ehre für das Fach nur die Fields-Medaille, die alle vier Jahre an bis zu vier »junge« (zu verstehen als »bis zu 40-jährige«) Mathematiker verliehen wird und erheblich bescheidener dotiert ist. Diesen Preis erhielt Milnor schon 1962, dazu viele weitere renommierte Auszeichnungen wie die amerikanische National Medal of Science 1967 und den Wolf Prize 1989.

Ein Großteil seines umfangreichen Gesamtwerks bezieht sich auf dasselbe Teilgebiet der Mathematik wie seine genial erledigte Hausaufgabe: die Topologie. Das ist so etwas wie eine Geometrie ohne Längen und Winkel. Auf die genaue Gestalt ihrer Objekte – zum Beispiel geschlossene Kurven, Flächen oder Mengen in noch höherdimensionalen Räumen – kommt es nicht an, sondern nur darauf, wie sie mit sich selbst zusammenhängen. Zwei Objekte sind topologisch gleich (»homöomorph«), wenn es zwischen ihnen eine umkehrbar eindeutige und in beiden Richtungen stetige Abbildung gibt. Das heißt: Jeder Punkt in einem Objekt hat genau einen Partner im anderen, und wenn eine Folge von Punkten auf einen Grenzpunkt zustrebt, dann strebt die Folge der Partner gegen den Partner des Grenzpunkts. Da eine solche Abbildung (ein »Homöomorphismus«) die Gestalt eines Objekts bis zur Unkenntlichkeit verändern kann, ist es manchmal sehr schwierig nachzuweisen – oder zu widerlegen –, dass zwei gegebene Objekte homöomorph sind.

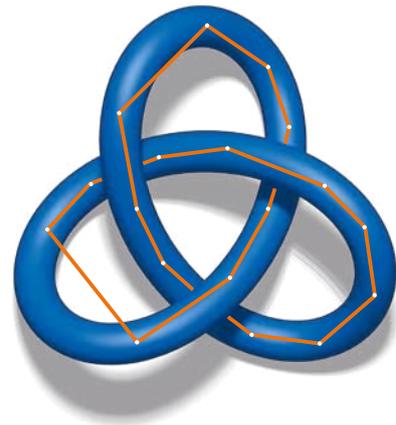
Wie bekommt man ein Gebilde mit dermaßen unbestimmter Form in den Griff? Man zieht ihm ein Korsett ein; das heißt, man nähert zum Beispiel eine Kurve durch einen Streckenzug (Kasten oben) an. Bei einer geschlossenen Fläche sind es entsprechend lauter Dreiecke (Bild S. 21). An einer solchen »Triangulierung« zählt man alle Ecken, Kanten und Flächen ab und berechnet aus ihnen eine einzige Zahl, das »topologische Geschlecht« der Fläche. Be-

Die Gesamtkrümmung einer Kurve

Ein Knoten ist eine geschlossene Kurve im dreidimensionalen Raum, die sich selbst nicht schneidet. Ein solcher Knoten ist trivial, wenn er sich ohne Selbstüberschneidung so verformen lässt, dass er zu einem Kreis wird, etwa wie ein verheddertes, aber unzerschnittenes Gummiband, das man glatt zieht.

Die Gesamtkrümmung einer Kurve – zum Beispiel eines Knotens – ist ein Maß dafür, wie sehr man den ganzen Weg entlang seine Richtung ändern muss, wenn man die Kurve entlangläuft. Eine Näherung für diese Zahl gewinnt man, indem man die Kurve »diskretisiert«, das heißt endlich viele Punkte auf der Kurve auswählt und von einem Punkt zum nächsten nicht die Kurve entlang, sondern die gerade Verbindungsstrecke läuft (Bild). Dabei muss man im Allgemeinen in jedem dieser Diskretisierungspunkte seine Richtung um einen gewissen Winkel ändern. Die Summe dieser Winkel, alle mit positivem Vorzeichen genommen, gibt ein Maß für die Größe aller Richtungsänderungen zusammen. Diese Zahl strebt gegen die Gesamtkrümmung der Kurve, wenn man nun die Diskretisierung verfeinert, das heißt immer mehr Punkte auf die Kurve legt, so dass der eckige Laufweg sich immer mehr der echten Kurve anschmiegt.

Jede geschlossene Kurve hat eine Gesamtkrümmung von mindestens 2π ; der Minimalwert 2π wird genau dann angenommen, wenn die Kurve eben und konvex ist. Man kann jeden Knoten leicht so deformieren, dass seine Gesamtkrümmung beliebig groß wird; aber wenn er nicht trivial ist, bleibt sie stets größer als 4π .



KNOTEN: JIM BELK / PUBLIC DOMAIN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

merkenswerterweise hängt diese Zahl nicht von der Wahl der Triangulierung ab (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 66); insbesondere bleibt sie unverändert, wenn man die Triangulierung verfeinert, das heißt ihr neue Eckpunkte und Kanten hinzufügt.

Damit ist die Situation in diesem Fall angenehm übersichtlich. Zwei geschlossene, orientierbare Flächen sind genau dann homöomorph, wenn sie das gleiche Geschlecht haben.

Topologie in höheren Dimensionen

Flächen sind zweidimensional, weil man sich auf ihnen in zwei voneinander unabhängigen Richtungen bewegen kann. Entsprechend erlaubt eine » n -dimensionale Mannigfaltigkeit« oder kurz » n -Mannigfaltigkeit« Bewegungen in n unabhängigen Richtungen. Das kann man sich für größere Werte von n nicht mehr vorstellen; eine 3-Mannigfaltigkeit sieht zwar auf kurze Distan-

zen so aus wie unser gewöhnlicher dreidimensionaler Raum, darf aber so mit sich selbst verbunden sein, dass man nach einem langen Geradeauslauf wieder bei seinem Ausgangspunkt ankommt. Gleichwohl kann man n -Mannigfaltigkeiten triangulieren. Wieder fasst man die Anzahlen ihrer Ecken, Kanten, Flächen und Teilmengen höherer Dimension zu charakteristischen Größen zusammen. Das sind allerdings kompliziertere Objekte (eine »Kette simplizialer Homologiegruppen«), wie Henri Poincaré (1854–1912) zwischen 1895 und 1904 ausgearbeitet hat.

Eigentlich waren die Mathematiker davon überzeugt, dass die Homologiegruppen ebenfalls von der Wahl der Triangulierung unabhängig seien, zumal sie durch eine Verfeinerung nicht verändert werden, wie schon Poincaré gezeigt hatte. Es hätte genügt zu zeigen, dass zwei verschiedene Triangulierungen derselben Mannigfaltigkeit eine ge-

Wie entsteht ein Meinungsumschwung?

Eine unbeugsame Minderheit entscheidet.

Das politische Klima kann überraschend umschlagen. Im Nahen Osten und in Nordafrika gerät von heute auf morgen die arabische Welt in Aufruhr. In Deutschland wird ein Grüner Ministerpräsident eines konservativ geprägten Bundeslands. Die Kanzlerin, nicht als leidenschaftliche Kernkraftgegnerin bekannt, lässt eine Ethikkommission über den möglichst raschen Ausstieg aus der Atomenergie beraten.

In jeder Gesellschaft gibt es dissidente Minderheiten, die oft jahrzehntlang verblich gegen die etablierte Politik anrennen. Doch hin und wieder setzt sich eine hartnäckige Minorität unerwartet durch und prägt die Mehrheitsmeinung.

Gehorcht der Umschwung Regeln? Diese Frage stellte sich ein Team um den Netzwerktheoretiker Sameet Sreenivasan vom Rensselaer Polytechnic Institute in Troy (US-Bundesstaat New York). Wie die Forscher auf der Tagung der American Physical Society in Dallas (Texas) im März berichteten, liefert ihr Computermodell eine überraschend konkrete Antwort (<http://arxiv.org/pdf/1102.3931v2>).

Sreenivasan und Kollegen simulierten ein Netz, dessen Knoten (»Individuen«) jeweils einen von zwei Werten (»Meinungen«) A oder B annehmen und in jedem Zeitschritt je ein zufällig gewähltes Netzglied zu ihrer Ansicht bekehren können – allerdings mit einer folgenschweren Anfangsbedingung: Zu Beginn tragen die allermeisten Knoten den Wert B; das heißt, es herrscht eine solide Mehrheitsmeinung. Nur ein kleiner Prozentsatz der Netzteilnehmer vertritt von Anfang an Position A – und lässt sich diese Überzeugung nie mehr nehmen. Anders gesagt, in dem von Meinung B dominierten Netz gibt es eine kleine, aber unerschütterliche A-Minderheit.

Sreenivasans Gruppe gab nun einen bestimmten kleinen Prozentsatz von anfänglichen Dissidenten vor und ließ dann die Simulation laufen, bis sich ein stabiler Endzustand einpendelte. Solange zu Beginn nur wenige unbelehrbare Abweichler auftraten, geschah nichts Aufregendes, außer dass sich ein paar B-Knoten – teils nur vorübergehend – zu A bekehrten. Doch sobald der Anteil der von vornherein entschlossenen A-Vertreter mit rund zehn Prozent angesetzt wurde, kippte das ganze System: Am Ende teilten alle Netzknotten die Meinung der vormaligen Minderheit.

Die Autoren sehen in dem Kippunkt bei zehn Prozent ein typisches Merkmal politischer Prozesse. Sie nennen als Beispiel die Suffragetten, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts in England und den USA das Frauenwahlrecht erstritten, sowie die amerikanische Bürgerrechtsbewegung, die sich just erhob, als der Anteil der Afroamerikaner an der US-Bevölkerung die Zehnprozentmarke überschritt.

In Deutschland begannen die Grünen als außerparlamentarische Bewegung, mauserten sich zur Fünfprozentpartei und prägen, seit sie zweistellige Ergebnisse erzielen, die gesamte Umwelt- und Energiepolitik. Umgekehrt scheint zu gelten, dass der Abstieg einer Partei unter zehn Prozent sie – zumindest vorläufig – zur politischen Bedeutungslosigkeit verurteilt. Dieses Schicksal droht gerade der FDP und der Linken.

Andererseits hat die rechtsradikale NPD zwar immer wieder erschreckende Wahlerfolge erzielt. Zwischen 1966 und 1968 zog sie in sieben Landesparlamente ein – in Baden-Württemberg sogar mit 9,8 Prozent der Stimmen; 2004 gelang ihr mit 9,2 Prozent das Gleiche in Sachsen. Doch bisher hat sie die Zehnprozent-schranke noch nicht durchbrochen.

Sreenivasans Netzwerkstudie wurde von Army und Navy gesponsert. Vielleicht stützt sie die Hoffnung, der Krieg in Afghanistan könnte enden, wenn wenigstens zehn Prozent der Afghanen um jeden Preis Frieden wollen.



Michael Springer

meinsame Verfeinerung haben. Denn dann müssten die Homologiegruppen zu beiden Triangulierungen von Anfang an gleich sein.

Das ist die (damals auch im Englischen so genannte) »Hauptvermutung der kombinatorischen Topologie«. Sie hat länger als ein halbes Jahrhundert jedem Beweisversuch widerstanden, bis John Milnor 1961 den Grund dafür entdeckte: Sie ist falsch!

Perelman und die Vorgänger

Können denn die Homologiegruppen eine Mannigfaltigkeit so eindeutig charakterisieren, wie das topologische Geschlecht das für die zweidimensionalen Mannigfaltigkeiten tut? Kann man mit ihrer Hilfe wenigstens die einfachsten Exemplare, die Sphären (verallgemeinerte Kugeloberflächen), von den anderen unterscheiden? Ausgerechnet für die Dimension 3 stellte sich diese Frage als äußerst schwierig heraus; sie hat das 20. Jahrhundert ungelöst überstanden.

Die Mathematiker versuchten es zunächst mit höheren Dimensionen – mit Erfolg: Stephen Smale (Fields-Medaille 1966) bewies die Vermutung für alle Dimensionen $n > 4$, Michael Freedman (Fields-Medaille 1986) für $n = 4$.

Der Fall $n = 3$, genauer: ein Spezialfall, der als »Poincaré-Vermutung« bekannt wurde, avancierte zu einem der berühmten »Millenniums-Probleme« und wurde von Grigori Perelman (Fields-Medaille 2006, nicht angenommen) erledigt. Perelman bewies eine viel stärkere Behauptung, die »Geometrisierungsvermutung« von William Thurston (Fields-Medaille 1982), der in jungen Jahren Postdoc bei Milnor war (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 86). Entscheidende Ergebnisse, die für Thurstons Vermutung die Grundlage bilden, wurden 1962 bewiesen – von John Milnor.

Das wohl bekannteste überraschende Ergebnis Milnors bezieht sich auf Homöomorphismen zwischen zwei siebendimensionalen Sphären oder kurz 7-Sphären, also »Oberflächen« achtdimensionaler Kugeln. Eine solche Abbildung darf zwar einen Zusammenhang weder zerreißen noch einen herstellen, wo vorher keiner war. Aber ein eigent-

VIDEOS

AUS DER WISSENSCHAFT –
SPANNEND UND INFORMATIV

TECHNIKGESCHICHTE

Der Mechanismus von Antikythera



Wüsste man nicht, dass es ein solches Wunderwerk gibt, hielte man seine Existenz für unmöglich: Dieser nach über 2000 Jahren vom Meeresgrund geborgene Zahnradmechanismus diente im antiken Griechenland der Berechnung astronomischer Ereignisse.

ÖKOLOGIE

Viel mehr als nur lästig



Die Befürchtungen sind nicht neu: Könnten Pinguine, die zu Forschungszwecken markiert wurden, unter den an ihren Flügeln angebrachten Metallbändern leiden? Nun hat eine Langzeitstudie Belege geliefert.

STREITGESPRÄCH

Der modellierte Patient



Vor welche ethischen Herausforderungen stellt uns die individualisierte Medizin? Ein kritischer Dialog mit dem Genetiker Hans Lehrach und dem Philosophen Urban Wiesing.

KOGNITIONSFORSCHUNG

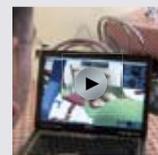
Der akustische Spiegel



Dass Fledermäuse ihre Beute per Echoortung identifizieren, ist lange bekannt. Doch woher wissen sie, ob unter ihnen eine ausgedehnte Wasserfläche liegt?

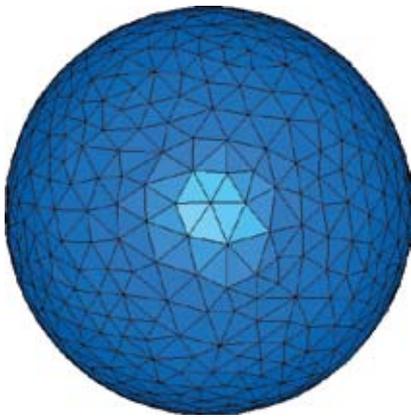
BIOCHEMIE

Foldit – das Online-Spiel zur Proteinfaltung



Erst die dreidimensionale Struktur, zu der sich ein Protein faltet, entscheidet darüber, welche Funktion es im Körper übernimmt. Doch wie findet man anhand der DNA-Sequenz des Proteins heraus, welche Struktur es einnehmen wird?

WWW.CALORG



Eine Triangulierung der zweidimensionalen Sphäre

lich glattes Objekt mit einem Knick zu versehen ist erlaubt (und kommt beim Triangulieren massenhaft vor). Entsprechend sollte es möglich sein, einen Knick zu glätten, das heißt durch eine beliebig geringe Verformung aus einer nur stetigen Abbildung eine differenzierbare zu machen, wenn die zu Grunde liegenden Objekte glatt sind.

Exotische Sphären

Umso größer war die Überraschung, als Milnor ein Gegenbeispiel fand. Es gibt einen Homöomorphismus von einer 7-Sphäre zu einer anderen, den man nicht zu einer differenzierbaren Abbildung glätten kann, und das, obgleich die Mannigfaltigkeiten, die er aufeinander abbildet, so glatt (differenzierbar) sind wie überhaupt möglich. Wenn man nun in Verschärfung des üblichen Kriteriums zwei topologische Objekte nur noch dann als gleich ansieht, wenn die vermittelnde Abbildung samt ihrer Umkehrung nicht nur stetig, sondern auch differenzierbar ist, dann gibt es auf einmal 28 wesentlich verschiedene 7-Sphären: eine gewöhnliche und 27 »exotische«. Damit hatte Milnor ein neues Gebiet der Mathematik eröffnet: die Differenzialtopologie.

Der Preisträger hat noch auf zahlreichen weiteren Gebieten große Leistungen erbracht: in der Spieltheorie, der K-Theorie und in den letzten 30 Jahren vor allem in der Theorie der dynamischen Systeme, in der auch die berühmte Mandelbrot-Menge zu Hause

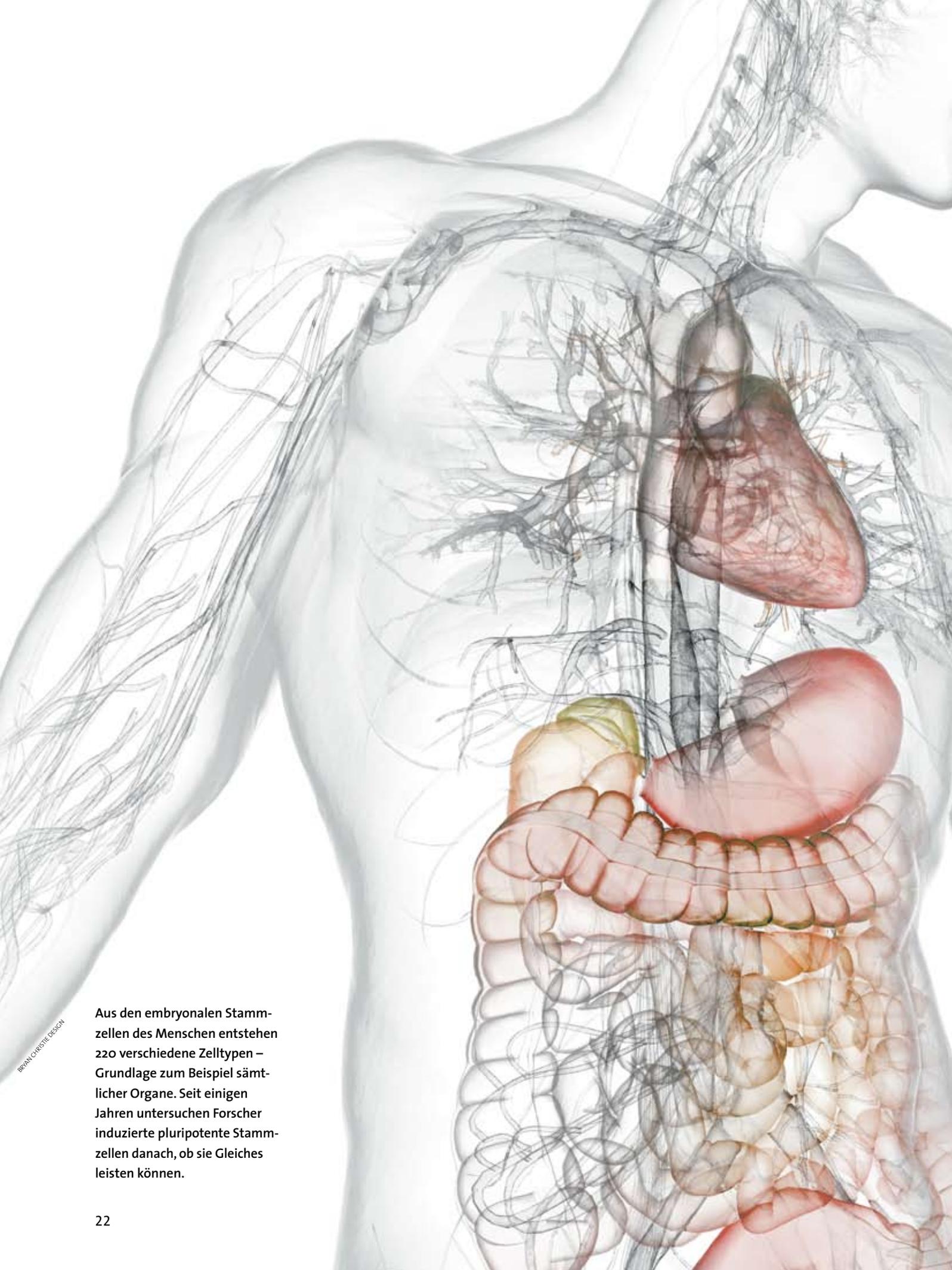
ist. Ganz gegen seine Gewohnheit hat er hier nicht irgendwelche Vermutungen widerlegt – vielleicht gab es keine widerlegbaren –, sondern dazu beigetragen, das Fachgebiet zu strukturieren, und zwar, wie auf vielen anderen Gebieten auch, mit einem grundlegenden Standardwerk. In diesem Fall diente und dient »Dynamics on the Riemann Sphere« als Einführung für quasi alle jungen Forscher auf dem Gebiet (mich eingeschlossen).

Nebenbei war und ist Milnor Pionier in einer ganz anderen Richtung, nämlich der computergestützten »experimentellen Mathematik«. Nicht zuletzt durch unzählige selbst programmierte Experimente hat er viele Phänomene entdeckt und formuliert, die der Entwicklung des Gebiets als Orientierung dienten. So mancher Doktorand konnte sich daraufhin rühmen, eine Vermutung von Milnor bewiesen zu haben.

Zu meinen prägenden Erlebnissen zählt die große Konferenz zu Ehren von John Milnors 60. Geburtstag. Schon damals war sein Werk so umfangreich, dass jeden Tag einer seiner ehemaligen Doktoranden in einem Hauptvortrag seine Durchbrüche auf einem anderen mathematischen Gebiet würdigen konnte. Soeben komme ich von der Konferenz aus Anlass seines 80. Geburtstags zurück. Ich wünsche ihm noch viele weitere aktive Jahre als Pionier und freue mich bereits auf die Konferenz zum 85. Geburtstag.

Übrigens: Die Geschichte mit der missverstandenen Hausaufgabe steht zwar in dem Festband zu Ehren seines 60. Geburtstags, ist aber falsch. Milnor wusste genau, was er tat, als er diesen Satz bewies. So erzählte er mir jedenfalls vor Jahren, als ich ihn darauf ansprach. Und warum er die Sache nicht richtiggestellt habe? »Wozu«, antwortete er mit seinem typischen verschmitzten Lächeln, »hätte ich diese nette Geschichte kaputt machen sollen?«

Dierk Schleicher ist Professor für Mathematik an der Jacobs University in Bremen. Sein Hauptforschungsgebiet sind dynamische Systeme. An Milnors Institut war er mehrere Semester Gastwissenschaftler.



BRAN CHRISTE DESON

Aus den embryonalen Stammzellen des Menschen entstehen 220 verschiedene Zelltypen – Grundlage zum Beispiel sämtlicher Organe. Seit einigen Jahren untersuchen Forscher induzierte pluripotente Stammzellen danach, ob sie Gleiches leisten können.

STAMMZELLEN

Der biologische Jungbrunnen

Vielleicht ist es bald keine Utopie mehr: Reife Körperzellen von Patienten werden einer Totalverjüngung unterzogen und lassen sich dann zur Therapie kranker Organe einsetzen – ohne die ethischen Probleme embryonaler Stammzellen.

Von Konrad Hochedlinger

Diesen Morgen im Winter Ende 2006 werde ich nie vergessen. Im Mikroskop erblickte ich ein kleines Häufchen von Zellen, die sich fast drei Wochen lang in einer Petrischale vermehrt hatten. Nun schimmerten sie in der ganzen Farbenpracht der Fluoreszenzmarker, die anzeigten, dass es sich dabei um embryonale Zellen handelte: genauer gesagt um so genannte pluripotente Zellen, die sich zu allen Zelltypen des Körpers entwickeln können.

Nur stammten die Zellen unter meinem Mikroskop überhaupt nicht von einem Embryo – sondern sie waren aus reifen, ausdifferenzierten Zellen erwachsener Mäuse entstanden. Ein ihnen verabreichter Cocktail aus ein paar Genen hatte dem Anschein nach auf sie wie ein Jungbrunnen gewirkt.

Bei aller Freude blieb ich jedoch zunächst skeptisch, ob ich den Befund wirklich so deuten durfte, und damit war ich zu der Zeit nicht der Einzige. Sollte es wirklich so einfach sein, die Uhr in einer Säugerzelle zurückzudrehen? Ließ sich der embryonale Zustand schlicht durch Zugabe einiger Gene wieder herbeizaubern?

Gerade ein paar Monate zuvor, im August 2006, war eine bahnbrechende Arbeit von Shinya Yamanaka von der Universität Kioto und seinen Kollegen erschienen. Darin beschrieben die Forscher, wie sie aus Hautzellen von Mäusen »induzierte pluripotente Stammzellen« (ipS-Zellen) gewonnen hatten (englisch: *induced pluripotent stem cells*, iPSCs).

HEILEN MIT EIGENEN ZELLEN

1 Forscher können **reife Körperzellen** heute in pluripotente Stammzellen verwandeln. Die **Reprogrammierung** gelingt durch Zugabe weniger Gene oder sogar nur einiger Proteine. Im Prinzip könnten diese **induzierten pluripotenten Stammzellen** (ipS-Zellen) sämtliche Körperzelltypen hervorbringen.

2 Der Medizin eröffnen verjüngte Zellen, die **von den Patienten selbst** stammen, viele **neue Behandlungsoptionen**. Zum Beispiel ließen sich damit schadhafte Gewebe ersetzen. Schneller dürfte ihr Einsatz für Krankheitsmodelle gelingen – also zur Untersuchung von Krankheitsursachen in Laborkulturen.

3 Was mit Körperzellen geschieht, wenn die Forscher deren **biologische Uhr** zurückdrehen, ist im Einzelnen noch nicht klar. Auch ob die ipS-Zellen wirklich genauso viel können wie **embryonale Stammzellen**, muss sich erst noch erweisen.

Seit Jahren hatten sich Wissenschaftler darum bemüht, die besonderen Eigenschaften von embryonalen Stammzellen möglichst detailliert zu verstehen, um diese unter Kontrolle zu bringen. Das große Ziel: ihr riesiges Differenzierungspotenzial einmal dafür nutzen zu können, verschiedenste quasiaußergeschneiderte Gewebe für Therapie- und Forschungszwecke heranzuzüchten. Dabei taten sich Hindernisse ganz verschiedener Art auf. Nicht zuletzt sahen sich die Wissenschaftler mit oft heftigen politischen und ethischen Auseinandersetzungen über die Verwendung von Embryonen konfrontiert. Aber auch mancher Rückschlag bei den Laborarbeiten selbst war zu verkraften, und mehrmals hielten vermeintliche Durchbrüche nicht, was sie versprochen. Vor diesem Hintergrund reagierten die übrigen Stammzellforscher auf die Studie aus Japan überrascht und zunächst eher vorsichtig. Doch an jenem denkwürdigen Morgen sah ich nun mit eigenen Augen, was mit Zellen geschehen konnte, wenn man sie gemäß dem Verfahren von Yamanaka behandelte.

Auch anderen Forschergruppen gelang es damals, die Ergebnisse der Japaner zu reproduzieren. Rasch kamen in den Folgejahren noch bessere Methoden auf, um solche Zellen zu erzeugen sowie sie auf ihr tatsächliches Potenzial hin zu überprüfen. Heute forschen weltweit einige tausend Wissenschaftler über induzierte pluripotente Stammzellen. Mit ihrer Hilfe möchten sie manche bisher nicht heilbaren Krankheiten tiefer ergründen und dann effektiver behandeln – darunter Diabetes vom Typ I (der so genannte Altersdiabetes), Alzheimer und Parkinson. Doch es geht nicht allein um medizinische Therapien: Die Entdeckung, dass eine Zellidentität schlicht mit ein paar zusätzlichen Genen auswechselbar ist, verändert auch unsere Vorstellungen von der menschlichen Embryonalentwicklung.

Alter und Krankheit in einem Jungbrunnen einfach abzuwaschen, erträumen sich die Menschen seit jeher. So nah wie heute waren wir noch nie daran, zumindest Zellen wieder zu verjüngen. Aber damit stehen wir erst ganz am Anfang. Noch lässt sich nicht vorhersagen, ob induzierte pluripotente Stammzellen die Medizin revolutionieren werden. Wir wis-

sen nicht einmal, ob sie und die embryonalen Stammzellen überhaupt gleichwertig sind.

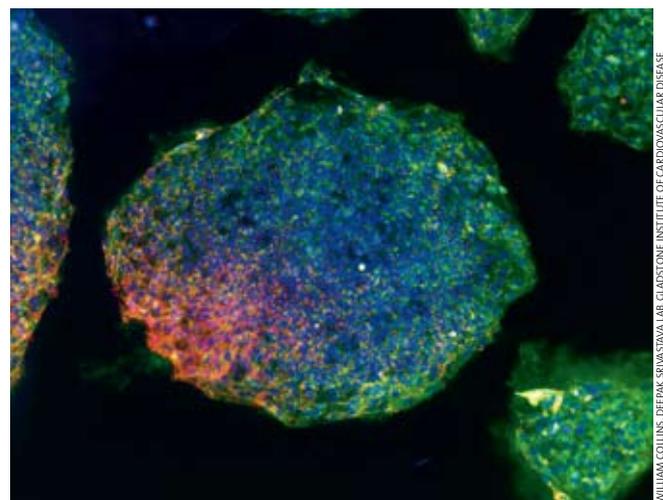
Die heutigen Forschungen über ipS-Zellen stützen sich weitgehend auf Erkenntnisse und Konzepte, die in den letzten 30 Jahren über Zellen früher Embryonen gewonnen wurden, also echten embryonalen Stammzellen. Vornehmlich gilt dies für das Phänomen Pluripotenz. Bei einem Säugetier verläuft die Entwicklung normalerweise lediglich in eine Richtung: Die Entwicklungsmöglichkeiten der zunächst unspezialisierten Zellen engen sich zunehmend ein – ein Vorgang, der sich gewöhnlich nicht wieder umkehrt.

Nur ganz früh in der menschlichen Embryonalentwicklung gibt es ein kleines Zeitfenster, in dem sich alle Zellen noch zu jedem der 220 Zelltypen eines Menschen entwickeln können. Entnimmt man sie in diesem Stadium und vermehrt sie im Labor, gewinnt man die so genannten embryonalen Stammzellen. Echte embryonale Stammzellen zeichnen sich dadurch aus, dass sie praktisch für immer fähig bleiben, sämtliche Gewebetypen des Organismus hervorzubringen: die besagte Pluripotenz.

Stammzellen verschiedener Güte

Für ein noch früheres Entwicklungsstadium verwenden Biologen den Begriff »Toti-« oder »Omnipotenz«. Totipotente Zellen können zusätzlich auch nichtembryonale Gewebe, also die verschiedenen Keimhüllen, hervorbringen und gewähren damit prinzipiell erst die Entwicklung eines vollständigen Lebewesens.

Schon bei einem nur wenig älteren Embryo haben sich die Stammzellen bereits auf verschiedene Richtungen festgelegt (siehe Grafik rechts). Sie können jetzt nur noch jeweils eine bestimmte Familie von Zelltypen hervorbringen, beispielsweise die verschiedenen Zellen von Muskelgewebe. Biologen nennen solche Stammzellen multipotent. Von ihnen bleiben im erwachsenen Organismus nur die so genannten adulten Stammzellen für die einzelnen Gewebe und sorgen dort für Nachschub an reifen Zellen. Beispiels-



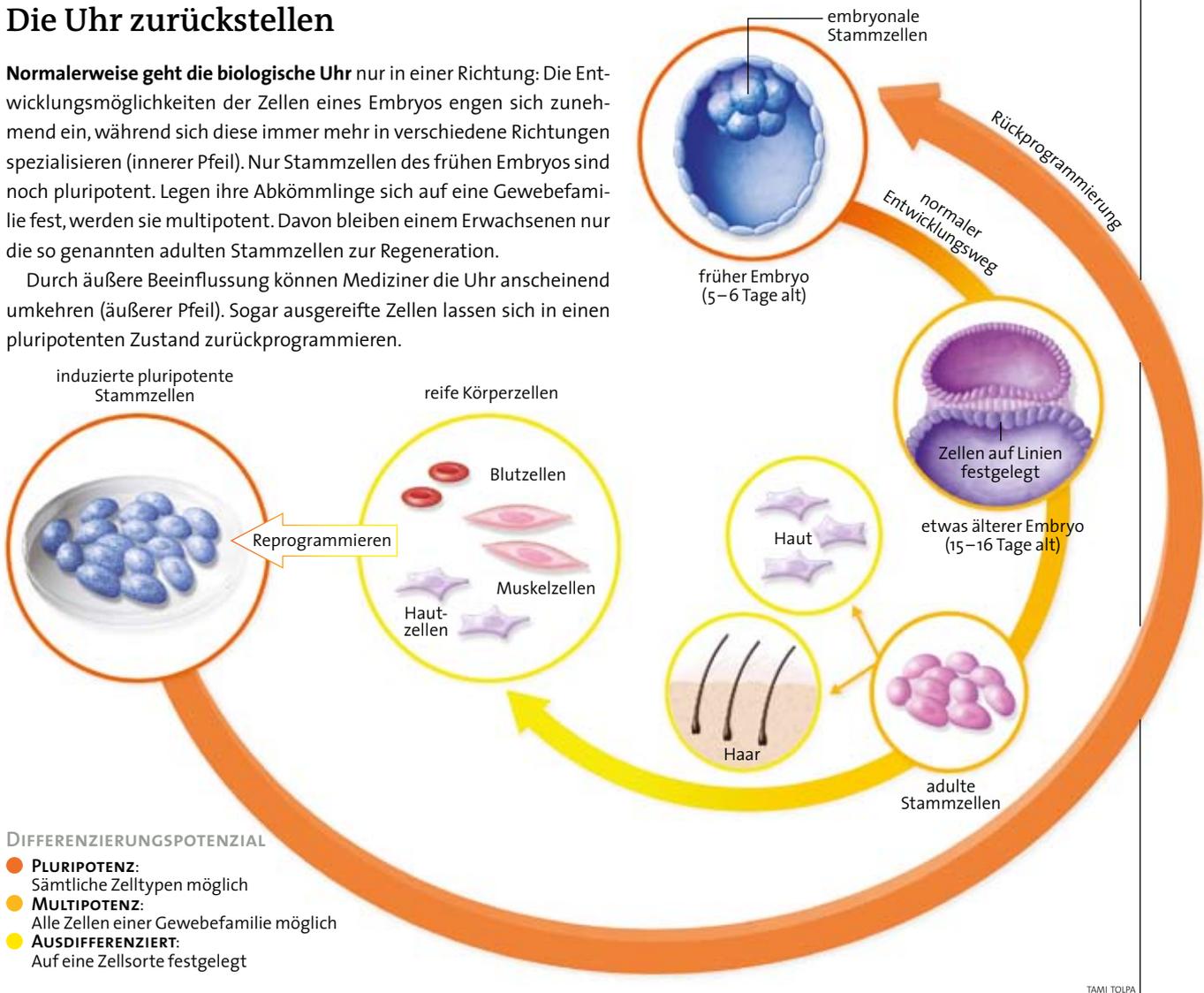
Eine Kolonie von ipS-Zellen schimmert durch Markierungen unter dem Mikroskop vielfarbig – Zeichen ihrer neuen Identität.

WILLIAM COLLINS, DEEPAK SHIVASTAVA, LAB, CLADSTONE INSTITUTE OF CARDIOVASCULAR DISEASE

Die Uhr zurückstellen

Normalerweise geht die biologische Uhr nur in einer Richtung: Die Entwicklungsmöglichkeiten der Zellen eines Embryos engen sich zunehmend ein, während sich diese immer mehr in verschiedene Richtungen spezialisieren (innerer Pfeil). Nur Stammzellen des frühen Embryos sind noch pluripotent. Legen ihre Abkömmlinge sich auf eine Gewebefamilie fest, werden sie multipotent. Davon bleiben einem Erwachsenen nur die so genannten adulten Stammzellen zur Regeneration.

Durch äußere Beeinflussung können Mediziner die Uhr anscheinend umkehren (äußerer Pfeil). Sogar ausgereifte Zellen lassen sich in einen pluripotenten Zustand zurückprogrammieren.



weise liefern die Blutstammzellen ständig Ersatz für die zwölf verschiedenen Arten von Blut- und Immunzellen, und Hautstammzellen erneuern alle paar Wochen Bestandteile von Haut und Haaren.

Bei Säugetieren fällt eine spezialisierte Zelle normalerweise nicht mehr in einen weniger differenzierten Zustand zurück. Die einzige Ausnahme davon sind Krebszellen. Manche davon können sich sogar im Prinzip unbegrenzt vermehren und werden damit letztlich unsterblich, ähnlich wie pluripotente Stammzellen.

Die Uhr zurückzustellen und eine ausdifferenzierte Zelle wieder jung und unspezialisiert zu machen, gelang noch vor Kurzem nur umständlich mit großem Aufwand und einigen Tricks. Der älteste Ansatz, um erwachsene Zellen in einen embryonalen Zustand zurückzusetzen – sie gewissermaßen zurückzuprogrammieren –, war das Klonen mit Hilfe von Eizellen durch Zellkerntransfer. Dabei wird der Zellkern einer Eizelle durch den Kern einer ausdifferenzierten Körperzelle ersetzt, dessen genetisches Material somit in ein em-

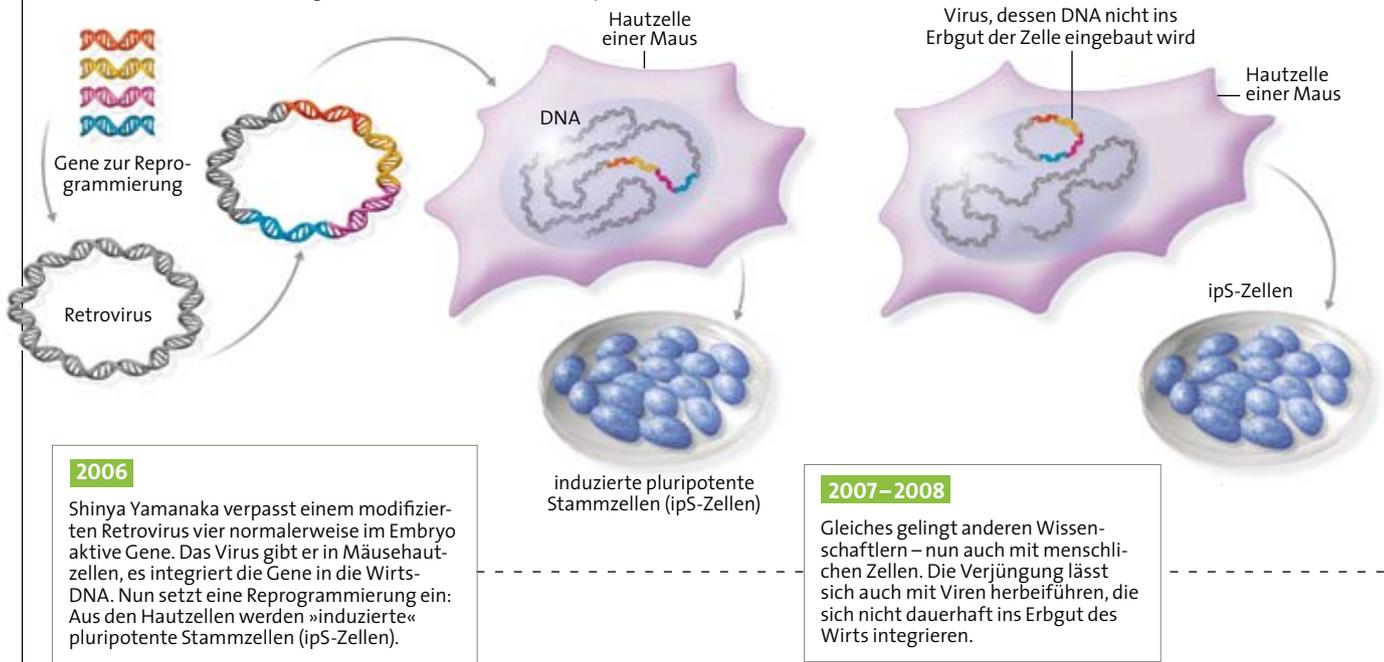
bryonales Milieu gelangt. Unter günstigen Umständen wird dieses dadurch so zurückprogrammiert, dass nun aus der hybriden Zelle ein früher Embryo entsteht, von dem man pluripotente Stammzellen gewinnen kann.

Verschiedene Pfade zurück zur Jugend

Diese Methode geriet spätestens Anfang 1997 mit dem Klon-Schaf Dolly in die Schlagzeilen, das im Jahr vorher auf die Welt gekommen war. Mit der ersten Isolierung humaner embryonaler Stammzellen 1998 rückte das Verfahren noch mehr ins Zentrum des Interesses, denn viele sahen im Zellkerntransfer eine Möglichkeit, geschädigtes Gewebe mittels patientengerechter pluripotenter Stammzellen zu ersetzen. Eine Eizelle enthält offensichtlich manche bis heute noch nicht gut verstandenen Faktoren, die das genetische Material der ausgereiften Zelle tatsächlich in einen ganz jungen Zustand zurückzusetzen scheinen. Sogar die Telomere werden wieder verlängert, jene Schutzkappen an den Chromosomenenden, die sich mit der Zeit abnutzen. Doch trotz einiger

Wege zu neuen Stammzellen

Vor wenigen Jahren erst gelang es Forschern, Hautzellen von Mäusen in pluripotente Stammzellen zu verwandeln. Zunächst half ein Retrovirus, dazu benötigte Gene in die Zellen einzubauen. Inzwischen gibt es einfachere, sicherere und effizientere Methoden – auch gentechnikfrei. Damit rücken Therapien immer näher.



Erfolge mit dem Klonen von Tieren gelang es bisher nicht, auf gleiche Weise menschliche embryonale Stammzellen zu erzeugen.

Yamanaka und sein Team ersannen darum einen völlig anderen Ansatz. Statt auf dem Umweg über Eizellen und Embryonen wollten sie erwachsene Zellen direkt in pluripotente umprogrammieren. Sie überlegten, dass es genügen könnte, den Zellen lediglich jene Gene zu verabreichen, die normalerweise nur beim Embryo arbeiten. Dazu identifizierten sie zunächst zwei Dutzend Erbfaktoren, die in pluripotenten

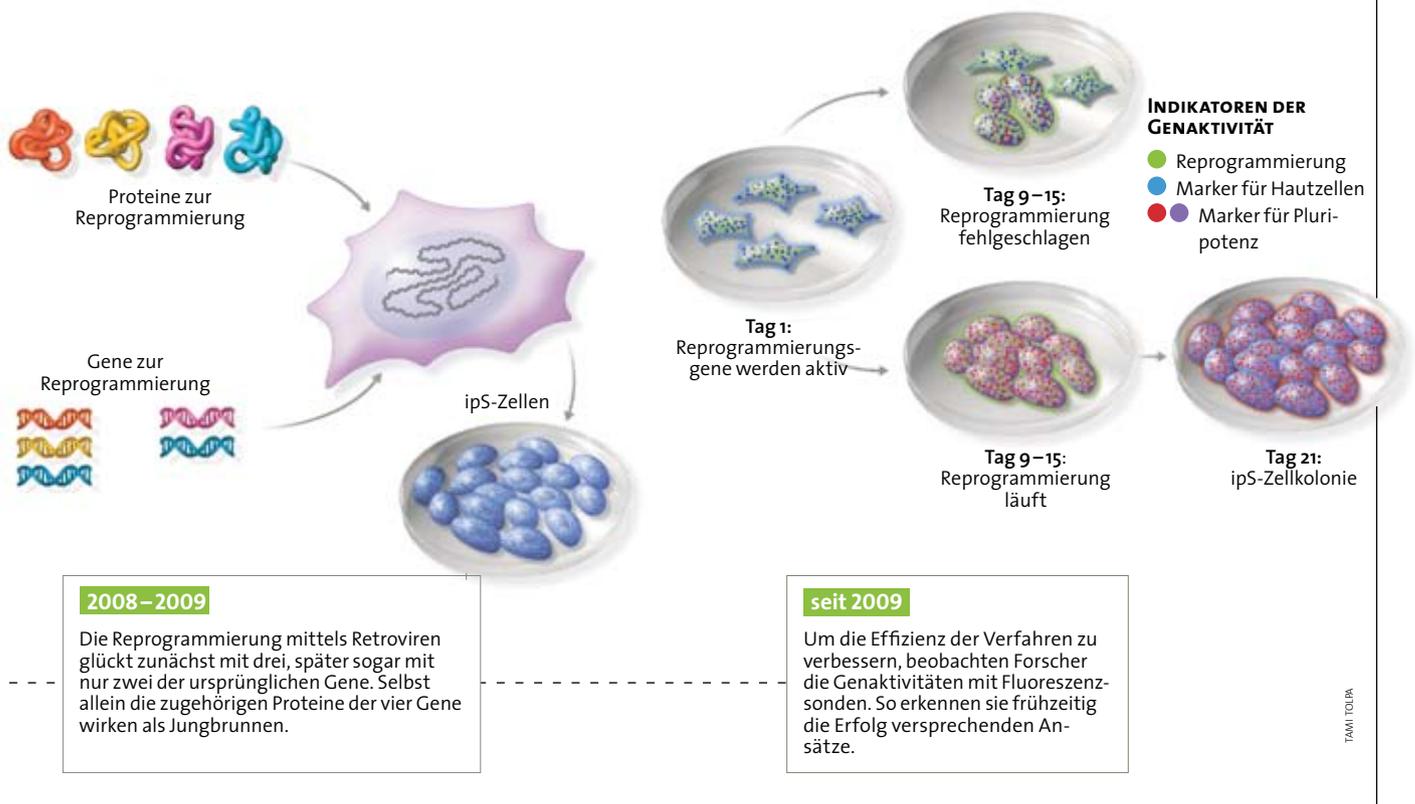
Zellen aktiv und später stumm sind. Diese DNA-Stücke schleusten sie mit Retroviren in Hautzellen von Mäusen ein (siehe Bild oben, links). Und tatsächlich verwandelten sich die reifen Hautzellen in pluripotente Zellen. Indem die Forscher dann systematisch einzelne der Gene wegließen, kreisten sie die zur Reprogrammierung nötigen Erbanlagen ein – auf diese vier: *Oct4*, *Sox2*, *Klf4* und *c-Myc*.

Dass dieser Weg funktioniert, bestätigten bald mehrere andere voneinander unabhängige Forschergruppen, darunter auch meine. Mittlerweile konnten rund ein Dutzend Zelltypen in induzierte pluripotente Stammzellen zurückverwandelt werden – von Maus, Mensch, Ratte und Affe. Sicherlich wird sich das Spektrum noch erweitern. Die Stammzellforscher sind von der neuen Methode nicht nur deswegen angetan, weil das mühselige, oft frustrierende Klonen umgangen wird. Vor allem entfallen damit viele der ethischen Bedenken und juristischen Einschränkungen für den Umgang mit menschlichen Embryonen. Allerdings bringen ipS-Zellen eigene Probleme mit sich. Zurzeit stehen bei diesen Forschungen, die erst einmal die Eigenschaften und das Potenzial solcher Zellen ausloten wollen, die Qualitätskontrolle und die Anwendungssicherheit im Vordergrund.

Unter dem Mikroskop wirken Kolonien von ipS-Zellen wie embryonale Stammzellen, und sie weisen auch die typischen molekularen Marker auf. Letztlich beweisen lässt sich die Pluripotenz aber nur über ihr Leistungsvermögen. Man muss akribisch prüfen, ob sie die gleichen – und zwar alle – Funk-

ALEXANDER MEISSNER (HARVARD UNIVERSITY) UND MARIUS WERNIC (STANFORD UNIVERSITY)

Forscher prüfen mit verschiedenen Tests, ob sie wirkliche pluripotente Zellen vor sich haben, die sämtliche Zelltypen des Körpers hervorbringen können. Injiziert man sie in einen frühen Mäuseembryo, sollten ihre Abkömmlinge sich später überall im Organismus finden – hier am grünen Leuchten zu erkennen. Einen vergleichbar aussagekräftigen Nachweis für menschliche ipS-Zellen gibt es noch nicht.



tionen erfüllen, die pluripotenten embryonalen Zellen zugeschrieben werden. Denn selbst in Kolonien echter embryonaler Zellen finden sich einzelne »taube« Exemplare ohne wirkliche Pluripotenz.

Das Potenzial einer ipS-Zelle untersuchen die Forscher heute mit bestimmten Funktionstests. Als Kriterien werten sie folgende Fähigkeiten, mit zunehmender Gewichtung:

- ▶ Sie bildet in Kultur bei entsprechenden Entwicklungsanreizen ein breites Spektrum von Körperzelltypen;
- ▶ sie erzeugt unter der Haut von Mäusen ein Teratom (einen Tumor mit Zellen aller embryonalen Zelllinien, genauer gesagt aller drei Keimblätter);
- ▶ sie trägt nach Injektion in einen frühen Mäuseembryo zu allen Zelllinien der neugeborenen Maus bei, einschließlich der Keimbahnzellen.

Embryonale Stammzellen erfüllen in der Regel alle drei Anforderungen – viele induzierte pluripotente Zellen jedoch nicht. Eine nähere Untersuchung ergab, dass bei den Versagern häufig die Überträgerviren für die eingeschleusten vier Gene nicht korrekt abgeschaltet sind. Und wichtige Gene in der zelleigenen DNA wurden nicht ordnungsgemäß in richtiger Weise aktiviert. Die betreffenden Zellen haben ihre Identität als Hautzellen zwar abgelegt, sind aber nur bedingt zurückprogrammiert und stellen somit keine wirklich pluripotenten Zellen dar.

Deswegen suchen die Wissenschaftler jetzt bei Zellkolonien, welche die genannten Tests auf Pluripotenz bestehen,

weitere Anhaltspunkte für »gute« und »schlechte« ipS-Zellen. Hieran forschen beispielsweise Thorsten Schläger, George Daley und ihre Kollegen von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts). Bei Hautzellen, die sich tatsächlich in pluripotente Zellen umwandeln, erkannten sie während der drei Wochen dauernden Übergangsphase ein charakteristisches Genaktivitätsmuster, das unvollständig verwandelte Zellen derselben Kolonie nicht aufwiesen. Es könnte somit als frühes Anzeichen für eine erfolgreiche Umwandlung dienen.

Strengste Prüfkriterien für humane induzierte Stammzellen

Der theoretisch härteste, überzeugendste Test für menschliche ipS-Zellen auf echte Pluripotenz verbietet sich aus ethischen Gründen: sie in menschliche Embryonen einzuführen und ihr Verhalten weiterzuverfolgen. Sämtliche anderen denkbaren Testkriterien müssen bei ihnen darum unbedingt erfüllt sein, bevor man sie als wirklich pluripotent einstufen oder gar für medizinische Zwecke verwenden kann.

Dazu zählt, dass die Überträgerviren für die Genfaktoren vollständig außer Gefecht gesetzt sein müssen. In diesem Zusammenhang entdeckten beispielsweise Mitarbeiter von Yamanaka, dass ein Drittel der Mäuse, denen sie als Embryonen ipS-Zellen injiziert hatten, später Krebskrankungen entwickelten. Schuld war eine unvollständige Ausschaltung der verwendeten Retroviren.

Ethische Grenzen

Theoretisch ließen sich, wie bei dieser Maus, mit ipS-Zellen auch menschliche chimäre Embryonen erzeugen – indem man in einen frühen humanen Embryo induzierte pluripotente Stammzellen injiziert. Ebenfalls könnte es in der Zukunft möglich sein, aus menschlichen ipS-Zellen Eier oder Spermien zu züchten, um dann im Reagenzglas mit künstlicher Befruchtung daraus Embryonen zu gewinnen.

So genannte pluripotente Zellen können nach der Definition zwar allein keinen Embryo hervorbringen: Sie haben nur das Entwicklungspotenzial für alle Typen von Körperzellen, nicht das für die ebenfalls notwendigen außerembryonalen Gewebe (das leisten nur so genannte omni- oder totipotente Zellen). Aber ipS-Zellen könnten theoretisch zur Zucht von Embryonen missbraucht werden.



Diese Maus ist eine Chimäre, was am gescheckten Fell erkennbar ist: Ein Mäuseembryo wurde mit induzierten Stammzellen versetzt, die sich integrierten und mitentwickelten.

KONRAD-HOCHBERINGER UND MATTHIAS STÄDTLEID,
MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL

Denn diese Klasse von Viren, zu der auch das Aidsvirus HIV gehört, integriert sich ins Genom der Wirtszelle: Ihre Erbinformation wird regelrecht ein Teil davon. Als Genfähren werden Retroviren gern verwendet, weil die durch sie eingeschleusten Gene dauerhaft in den Zellen verbleiben und langfristig aktiv sein können. Doch je nach dem Ort des Einbaus kann das Virus in der Wirts-DNA Schäden hervorrufen, die die Zelle entarten lassen. Darum entwickelten eine Reihe von Forschern alternative Methoden zur Erzeugung von ipS-Zellen, welche die Körperzellen nicht bleibend genetisch verändern.

Mein Team verwendet ein modifiziertes Adenovirus, das normalerweise Erkältungen hervorruft und sich nicht ins Zellgenom einbaut. Mit seiner Hilfe schleusten wir die vier Jungbrunnengene in Mäusezellen ein. Adenoviren bleiben gerade so lange in den Wirtszellen, wie es dauert, bis diese sich zu ipS-Zellen vermehren. Die pluripotenten Zellen, die wir erhielten, injizierten wir in Mäuseembryonen. Wünschgemäß wurden sie Teil der Embryonen und steuerten zu deren weiterer Entwicklung Zellen bei. Vor allem aber bekam keines der Tiere später einen Tumor. Mit diesem Ansatz, wie auch mit verschiedenen anderen Verfahren zur Erzeugung virusfreier ipS-Zellen, sollte eine der größten Hürden fallen, die einer medizinischen Anwendung von induzierten pluripotenten Stammzellen im Weg stehen.

Irgendwann möchten die Forscher allerdings ganz auf Viren verzichten können. Sie würden die Körperzellen gern einfach mit einem Wirkstoffcocktail behandeln, der die gleiche Reprogrammierung auslöst wie die künstlich zugeführten

Gene, also im Idealfall praktisch genau deren Wirkweise nachahmt. Verschiedene Wissenschaftler, darunter Sheng Ding vom Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien) und Douglas A. Melton von der Harvard University, haben auch bereits entsprechende Moleküle identifiziert, die, einzeln verabreicht, in den Zellen die gleichen Effekte erzeugen wie je eines der vier Reprogrammierungsgene. Und zwar stimulieren diese Substanzen jeweils einen molekularen Signalweg, den sonst das von dem betreffenden Gen kodierte Protein anstoßen würde. Doch als die Forscher ausgereifte Zellen mit den vier Wirkstoffen zugleich behandelten, war das Resultat enttäuschend: Sie erhielten auf die Weise keine pluripotenten Zellen. Trotzdem dürfte es nur eine Frage der Zeit sein, bis ein passendes Stoffgemisch für die wundersame Verwandlung kreiert ist.

Reservoir für gesunden Zellnachschub?

Prinzipiell können echte pluripotente Stammzellen alle Gewebetypen des Körpers hervorbringen. Darum denken viele bei den Anwendungsmöglichkeiten von ipS-Zellen zuerst an den Ersatz kranker Zellen und Organe – zum Beispiel an neue Nervenzellen bei Parkinson oder einer Rückenmarksverletzung; oder an frisches Herzmuskelgewebe nach einem Infarkt. Mit patienteneigenen Stammzellen gezüchtete Transplantate wären für einen solchen Zweck ideal, da sie vom Körper nicht abgestoßen würden. Am besten wird man dazu wohl mit einem winzigen Eingriff ein paar Hautzellen entnehmen, die man in ipS-Zellen rückprogrammiert. Die neuen Stammzellen könnten letztlich für jedes defekte Gewebe Nachschub liefern, sogar für besonders schwer zugängliche innere Organe wie die Bauchspeicheldrüse oder das Gehirn.

Mit Hilfe induzierter pluripotenter Stammzellen ließen sich wohl auch genetische Schäden therapieren. Es erscheint nicht ausgeschlossen, bei im Labor kultivierten Zellen krankheitsverursachende Mutationen zu reparieren, bevor man sie dem Patienten wieder einpflanzt. Das Regenerationspotenzial adulter Stammzellen wurde in diesem Sinn schon verschiedentlich genutzt. Allerdings hielt sich der Erfolg in Grenzen, denn adulte Stammzellen lassen sich außerhalb des Körpers nur schwer züchten und manipulieren.



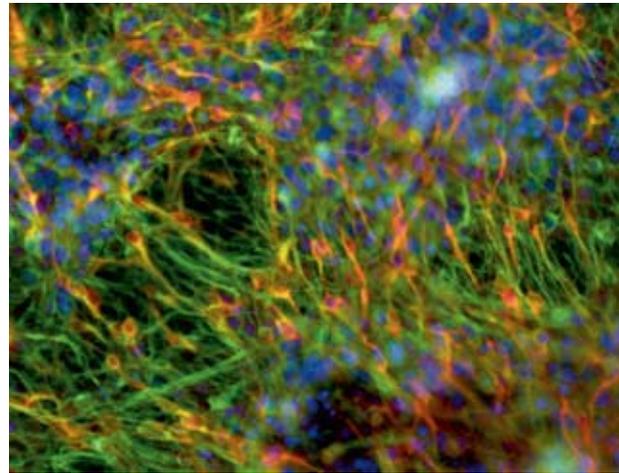
Behandlung in der Petrischale

Schon bald dürften aus ipS-Zellen gezüchtete Zellkulturen dazu dienen, Krankheitsursachen und Behandlungsmöglichkeiten zu erforschen. Zu dem Zweck möchten die Forscher aus Patientenzellen krankes Gewebe im Labor erzeugen, daran den Krankheitsverlauf beobachten und Reaktionen auf Medikamente untersuchen.

Bisher wurden aus menschlichen ipS-Zellen zwölf Gewebetypen gewonnen, darunter Zellsorten, die bei Parkinson beziehungsweise Diabetes entgleisen oder zu Grunde gehen. In solchen Zellkulturen haben Forscher bereits mehrere »Krankheiten behandelt«: etwa Symptome der spinalen Muskelatrophie, einer fortschreitenden Muskelschwäche bei Kindern; des seltenen Riley-Day-Syndroms (auch familiäre Dysautonomie genannt), einer Störung des vegetativen Nervensystems; sowie von Schizophrenie und Herzerkrankungen.

Bis ipS-Zellen für genetische Reparaturen oder Ersatzgewebe bereitstehen, wird wohl noch mindestens ein Jahrzehnt verstreichen. Sie würden dann von den Patienten selbst stammen und in der Kultur in gesunde Zellen umgewandelt. Verschiedene Tierversuche dazu gibt es schon: Ratten mit einer parkinsonähnlichen Erkrankung erhielten Transplantate von solcher-

maßen gewonnenen Neuronen. Mäuse mit Sichelzellanämie bekamen Blutvorläuferzellen mit dem reparierten Gen, die von ipS-Zellen abstammten, und wurden gesund.



PHYSOON KIM UND LORENZ STUBER, SLOAN-KETTERING INSTITUTE

Diese Nervenzellen entstanden aus induzierten pluripotenten Stammzellen, und die wiederum aus Hautzellen von Parkinsonpatienten.

Genetische Behandlungen mit reparierten ipS-Zellen könnten leichter gelingen, wie einige Studien mit Mäusen aufzeigen. Rudolf Jaenisch vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge gelang es damit im Jahr 2007 mit seinen Mitarbeitern, Nager mit Sichelzellanämie zu heilen. Die Krankheit beruht auf einer punktuellen Mutation in einem Gen. Die roten Blutkörperchen sind dann nicht wie üblich rund, sondern bei körperlicher Anstrengung länglich verformt und weniger leistungsfähig. Die Forscher haben zunächst Mäusehautzellen in ipS-Zellen umgewandelt. In ihnen ersetzten sie das defekte Gen durch ein normales. Dann züchteten sie aus den reparierten Zellen Blutstammzellen, die sie wieder in die Mäuse spritzten. Tatsächlich bildeten die neuen Blutstammzellen nun voll funktionsfähige rote Blutkörperchen. Im Prinzip müsste sich diese Vorgehensweise auch für Menschen mit dem Defekt eignen sowie auch für alle anderen Krankheiten, die auf einem einzelnen Gendefekt beruhen.

Wann könnten medizinische Behandlungen auf der Grundlage von induzierten pluripotenten Stammzellen Wirklichkeit werden? Aus den genannten Gründen sind schon für die ersten Tests am Menschen absolute Sicherheit und strengste Qualitätskontrolle unbedingte Voraussetzung. Gegenwärtige Verfahren gewährleisten das noch nicht. Bei den heutigen Ansätzen, ipS-Zellen oder auch embryonale Stammzellen ausdifferenzieren zu lassen, bleiben gelegentlich unreife Zellen übrig, die einen Tumor hervorrufen könnten. Das machte auch die folgende Studie an Ratten deutlich: Die Nager litten unter einer dem Parkinsonsyndrom vergleich-

baren Krankheit – dabei gehen Hirnneurone zu Grunde, die den Botenstoff Dopamin bilden. Die Tiere erhielten folglich dopaminproduzierende Neurone, die von ipS-Zellen abstammten. Zwar besserten sich nun die Krankheitssymptome, doch einige der Ratten bekamen später im Gehirn Teratome, komplexe Geschwülste, die auf unreife Zellen zurückgehen.

So rasch, wie dieses Forschungsgebiet zurzeit voranschreitet, könnten solche Hindernisse schon in den nächsten zehn Jahren überwunden sein. Das klingt zwar recht optimistisch, ist aber nicht unrealistisch. Von da an würden am Menschen Transplantationsstudien mit körpereigenen Zellen beginnen können, die von ipS-Zellen herrühren.

Therapien an Patientenzellen erproben

Auf andere Weise sollten die induzierten Stammzellen schon viel früher therapeutischen Nutzen bringen. Um Krankheiten zu erforschen, bei denen Gewebe abstirbt, darunter Diabetes vom Typ I, Alzheimer und Parkinson, und um gezielte Therapien zu finden, müsste man am besten direkt mit den betreffenden Geweben im Labor arbeiten. Doch sind diese nur sehr bedingt zugänglich und bisher auch schlecht über längere Zeit zu züchten. Induzierte Stammzellen könnten da vermutlich für Krankheitsmodelle aushelfen.

Forscher würden Haut- oder Blutzellen von Patienten zu ipS-Zellen umprogrammieren und damit die Zelltypen gewinnen, die bei diesen Menschen Probleme bereiten. Genau das gelang Clive N. Svendsen von der University of Wisconsin in Madison für die spinale Muskelatrophie, eine schwere

fortschreitende angeborene Muskelschwäche, und Lorenz Studer vom Sloan-Kettering Institute in New York für familiäre Dysautonomie, eine Störung des vegetativen Nervensystems: Die herangezüchteten differenzierten Zellen wiesen die gleichen Anomalien auf wie ihre Schwestern in den Patienten. Kürzlich konnten Wissenschaftler auf die gleiche Art weitere Krankheiten sozusagen nachahmen, unter anderem Herzmuskelerkrankungen, Parkinson und Schizophrenie.

An solchen Zellkulturen könnten Forscher auch detailliert verfolgen, wie sich eine Krankheit entwickelt. Bei Bedarf hätten sie zudem immer wieder Nachschub verfügbar, weil ipS-Zellen praktisch unbegrenzt kultivierbar sind. Anhand solcher Zellmodelle könnten sie letztlich die Ursachen des Defekts aufdecken und mit diesen Erkenntnissen Medikamente finden und ihre Wirkung überprüfen.

Erste Studien in der Richtung gibt es schon. Svendsen wie auch Studer behandelten ihre Zellkulturen mit zu erprobenden Substanzen und stellten danach einen teilweisen Rückgang der »Krankheitssymptome« fest. Nach dem gleichen Prinzip kann man sicherlich auch zukünftige Medikamente für eine Reihe anderer Erkrankungen testen, für die es bisher keine Therapie gab. Während die Transplantation von gezüchteten Zellen vergleichsweise wenigen Patienten zugutekäme, könnten neue Medikamente aus solchen Forschungen Millionen Menschen helfen.

Embryonale Stammzellen als Maßstab

Es gibt wichtige offene Fragen, auch praktische. So lässt sich bisher nicht sagen, ob es jemals gelingen wird, ipS-Zellen und dann Gewebetypen für Therapien mit der für einen breiten medizinischen Einsatz erforderlichen Effizienz herzustellen. Geklärt werden muss auch noch, ob ipS-Zellen nicht doch irgendwelche Erinnerungsreste an ihre Herkunft bewahren. Falls ja, könnte das der Züchtung von Körperzellen jeder gewünschten Sorte Grenzen setzen. Überdies verstehen die Forscher die Reprogrammierung selbst noch nicht wirklich. Es gibt zwar erste Einblicke, was mit einer Zelle beim Rückprogrammieren ungefähr passiert, doch die genauen biochemischen Reaktionen innerhalb dieser Zellen sind noch weitgehend nebulös.

Als Bezugspunkt zur Untersuchung solcher Fragen und als Qualitätsmaß sind embryonale Stammzellen auch zukünftig unverzichtbar. Nur der Vergleich kann erweisen, ob und in welchen Fällen sie sich für eine bestimmte Anwendung eher eignen und wann ipS-Zellen. Zum Beispiel liefern neue Studien Hinweise auf Mutationen in der DNA bei ipS-Zellen, die in normalen embryonalen Stammzellen nicht auftreten. Ob sich das auf die Qualität der induzierten Stammzellen und von aus ihnen gezüchteten reifen Zellen irgendwie auswirkt, bleibt zu klären.

Und nicht zuletzt könnten wirklich pluripotente induzierte Stammzellen doch auch ethische Bedenken hervorrufen, denn theoretisch ließen sich aus ihnen menschliche Embryochimären züchten. Mit Mäusen geschieht das schon routinemäßig (siehe Kasten S. 28).

In den letzten Jahren ist die Forschung bei der Reprogrammierung von Zellen erstaunlich weit vorangekommen. Zuerst stürzten die Klonierungserfolge das Dogma, dass eine einmal festgelegte Zellidentität die Rückkehr in die Vergangenheit verhindert. Dann zeigte die Entdeckung von ipS-Zellen – induzierten pluripotenten Stammzellen –, dass diese Schranken sogar mit nur ein paar wenigen Kniffen durchaus überbrückbar sind. Wie die Rückverwandlung mit Hilfe einiger weniger genetischer Schalter genau abläuft, wird die Wissenschaftler jedoch noch jahrelang in Atem halten.

Diese Forschungen bleiben spannend. Werden sie eines Tages den modernen Jungbrunnen schaffen? Ich selbst halte das durchaus für möglich. Aber auch wenn das nicht gelingt – induzierte pluripotente Stammzellen eignen sich zu Studien an vielen Krankheiten. Schon das könnte die Medizin revolutionieren, ähnlich wie vormals Impfungen und Antibiotika. ~

DER AUTOR



Konrad Hochedlinger ist an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) außerordentlicher Professor für Stammzell- und regenerative Biologie. Er gehört dem Harvard Stem Cell Institute und dem Howard Hughes Medical Institute an und forscht am Massachusetts General Hospital. Hochedlinger ist gebürtiger Österreicher und studierte zunächst an der

Universität Wien. Für die Promotion wechselte er zur Arbeitsgruppe von Rudolf Jaenisch ans Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, wo er auch Postdoc war. Er berät das Pharmaunternehmen iPierian, das Produkte auf Stammzellbasis entwickelt.

QUELLEN

Stadtfeld, M., Hochedlinger, K.: Review: Induced Pluripotency: History, Mechanisms, and Applications. In: *Genes & Development* 24, S. 2239–2263, 2010

Takahasi, K., Yamanaka, S.: Induction of Pluripotent Stem Cells from Mouse Embryonic and Adult Fibroblast Cultures by Defined Factors. In: *Cell* 126, S. 663–676, 10. August 2006 (online)

Wu, S. M., Hochedlinger, K.: Harnessing the Potential of Induced Pluripotent Stem Cells for Regenerative Medicine. In: *Nature Cell Biology* (im Druck)

Zhu, H. et al.: Investigating Monogenic and Complex Diseases with Pluripotent Stem Cells. In: *Nature Reviews Genetics* 12, S. 266–275, April 2011

LITERATURTIPPS

Breuer, H.: Der Mann am Genschalter. Porträt: Rudolf Jaenisch. In: *Spektrum der Wissenschaft* 7/2009, S. 48–54

Gespräch mit einem führenden Stammzellforscher

Epping, B.: Stammzellhype: Mehr Kontrolle bitte. Porträt: Hans R. Schöler. In: *Spektrum der Wissenschaft* 7/2010, S. 34–40

Ethische Fragen der Stammzellforschung

Gerd Kempermann: Neue Zellen braucht der Mensch. Piper, München 2008

Abhandlung eines Fachmanns zur Stammzelldebatte

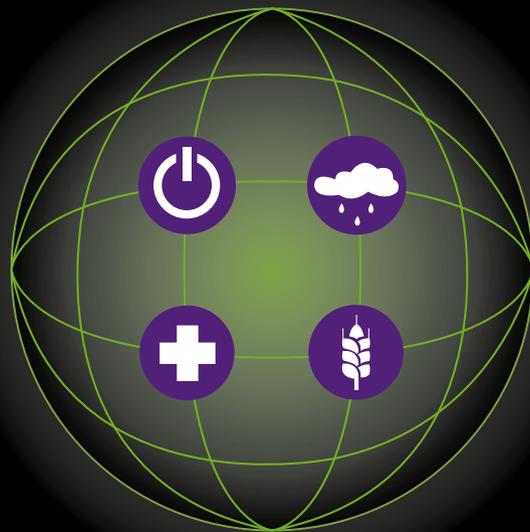
WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1069962



Where creativity meets great science

CALL FOR SCIENTIFIC SESSION PROPOSALS



Europe's largest inter-disciplinary
science conference takes place in Dublin,
11th – 15th July 2012.

To submit proposals visit www.esof2012.org by 30th June 2011

PALÄONTOLOGIE

Blutspuren aus der Kreidezeit

Das hatten Paläontologen bisher für unmöglich gehalten: Einige Dinosaurierfossilien enthalten offenbar Überreste von Proteinen. Unter günstigen Bedingungen bleiben demnach organische Substanzen viele Millionen Jahre lang in Versteinerungen erhalten.

Von Mary H. Schweitzer



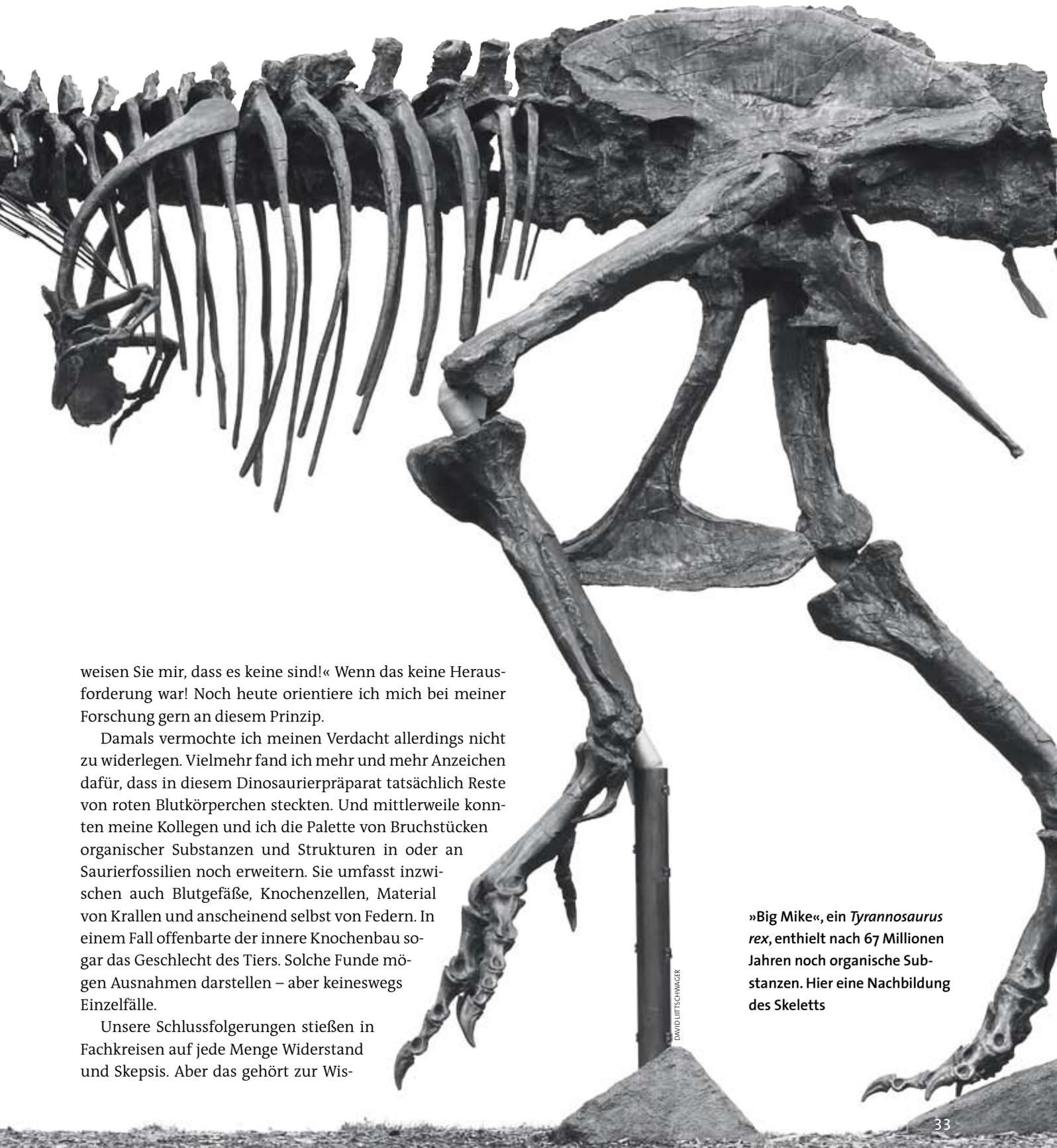
Ungläubig startete ich im Mikroskop auf die kleinen, roten Gebilde. Vor mir hatte ich ein Dünnschliffpräparat von einem Dinosaurierknochen. Im blassgelblichen einstigen Knochenmaterial sah ich deutlich einen feinen Blutgefäßkanal – und darin befanden sich die runden Strukturen, jedes mit einem dunklen Zentrum, das an einen Zellkern erinnerte.

Hätte ich nicht gewusst, dass das Präparat von einem Fossil stammte – ich wäre versucht gewesen, sie für rote Blutzellen zu halten. Mit Ausnahme der Säuger enthalten diese Zellen bei allen heutigen Wirbeltieren einen Zellkern, auch bei Vögeln und Reptilien. Aber hier handelte es sich um den versteinerten Knochen eines *Tyrannosaurus rex*, dessen 67 Millionen Jahre alte Überreste Mitarbeiter vom Museum of the Rockies in Bozeman (Montana) vor Kurzem geborgen hatten. Organische Substanz würde sich niemals über eine so lange Zeit halten – das stand damals fest.

Schon seit jeher galt unter Paläontologen als abgemacht: An fossilen Knochen lassen sich nur anhand von deren Größe

und Form Informationen über das Tier ablesen. Denn nach herkömmlicher Auffassung ersetzen bei der Versteinerung Mineralien aus der Umgebung allmählich sämtliche organischen Moleküle.

Zugegeben, ich fühlte mich an jenem Nachmittag im Museum reichlich verunsichert. Man schrieb das Jahr 1992, ich war frischgebackene Doktorandin an der Montana State University, also beileibe kein gewiefter Profi, und untersuchte die Feinstruktur von Dinosaurierknochen. Deswegen bat ich nun Lehrkräfte und Kommilitonen, wen immer ich erreichte, um ihre Einschätzung. Irgendwann kam die Sache dem Kurator für Paläontologie Jack Horner zu Ohren, einer anerkannten Koryphäe für Dinosaurier. Er erschien an meinem Platz, um sich selbst ein Bild zu machen, und blickte mit gerunzelter Stirn ewig lange schweigend ins Mikroskop. Als er endlich aufschaute, fragte er nur: »Und Sie selbst, wofür halten Sie das?« Ich sagte, ich wüsste es nicht. Aber die Dinger hätten für rote Blutzellen die richtige Größe, Form und Farbe. Und auch der Ort passte. Darauf grummelte Horner: »Dann be-



weisen Sie mir, dass es keine sind!« Wenn das keine Herausforderung war! Noch heute orientiere ich mich bei meiner Forschung gern an diesem Prinzip.

Damals vermochte ich meinen Verdacht allerdings nicht zu widerlegen. Vielmehr fand ich mehr und mehr Anzeichen dafür, dass in diesem Dinosaurierpräparat tatsächlich Reste von roten Blutkörperchen steckten. Und mittlerweile konnten meine Kollegen und ich die Palette von Bruchstücken organischer Substanzen und Strukturen in oder an Saurierfossilien noch erweitern. Sie umfasst inzwischen auch Blutgefäße, Knochenzellen, Material von Krallen und anscheinend selbst von Federn. In einem Fall offenbarte der innere Knochenbau sogar das Geschlecht des Tiers. Solche Funde mögen Ausnahmen darstellen – aber keineswegs Einzelfälle.

Unsere Schlussfolgerungen stießen in Fachkreisen auf jede Menge Widerstand und Skepsis. Aber das gehört zur Wis-

»Big Mike«, ein *Tyrannosaurus rex*, enthielt nach 67 Millionen Jahren noch organische Substanzen. Hier eine Nachbildung des Skeletts

DAVID LUTSCHWIGER

Wie ein Fossil entsteht

Das »klassische« Modell: Haut, Muskeln, Eingeweide und Sehnen zersetzen sich bald und lassen nur die Knochen übrig. Auch die darin enthaltenen Zellen, Proteine und Blutgefäße zerfallen. Mineralien aus der Umgebung sickern in die Lücken und bilden schließlich mit den Knochenmineralien Gestein.

Neue Erkenntnisse: Aus noch nicht genau verstandenen Gründen erhalten sich gelegentlich jedoch organische Reste – sogar über Jahrmillionen hinweg.

Tod

Der Kadaver kommt an einem Ort zu liegen, wo Aasfresser ihn mehr oder weniger verschonen.



MARYH SCHWETZER

DER ERSTE VERDACHT

Im Mikroskop sind in dem Knochen des *Tyrannosaurus* »Big Mike« Strukturen zu sehen, die an rote Blutzellen erinnern.

senschaft. Noch vor 20 Jahren hätte wohl niemand geglaubt, dass alte organische Moleküle überhaupt noch zugänglich sind – und man mit ihrer Hilfe die Dinosaurier und ihre Evolution erforschen kann. Gemäß Jack Horner's Auftrag habe ich in den letzten 20 Jahren auf jede nur erdenkliche Weise versucht zu widerlegen, dass viele Jahrmillionen alte Fossilien noch Komponenten von Weichgewebe enthalten können. Meine erste Überlegung war: Nur außergewöhnlich gut kon-

servierte Skelettelemente hätten etwas so Empfindliches wie rote Blutzellen oder deren Bestandteile überhaupt bewahren können, also etwa verklumpte Reste des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin. Bei diesem *Tyrannosaurus*-Exemplar war das offenbar tatsächlich der Fall.

»Big Mike«, für die Fachwelt als MOR 555 katalogisiert, wurde in Ostmontana gefunden. Sein Skelett ist fast vollständig erhalten, sogar mit vielen sonst selten vorhandenen Knochen, was für eine rasche Abdeckung und ungestörte Lagerung des Kadavers spricht. Auf eine schnelle, gute Konservierung deutet auch hin, was man im Mikroskop an Dünnschliffen der Arm- und Beinknochen erkennt. In den dichten Knochenbereichen waren die meisten Blutgefäßkanälchen leer, hatten sich also nicht später mit abgelagerten Mineralien gefüllt, wie man es bei Dinosaurierfossilien sonst gewöhnlich antrifft. Außerdem tauchten die ominösen, kleinen, roten Dinger immer nur in den Gefäßkanälen auf, nie im umgebenden Knochen selbst und auch nicht in den angrenzenden Sedimenten.

Als Nächstes ging ich an die chemische Analyse der vermeintlichen roten Blutkörperchen. Sie enthielten viel Eisen – das passte. Zudem war dessen hohe Konzentration auf diese winzigen Stellen begrenzt. Generell fand sich dort eine ande-

AUF EINEN BLICK

LEBENSSPUREN IN STEIN GEBANNT

1 Laut herkömmlicher Theorie verschwinden bei der **Fossilbildung** mit der Zeit alle organischen Anteile. Demnach bestehen Fossilien irgendwann ausschließlich aus Mineralien.

2 Doch in den letzten Jahren mehren sich Hinweise auf **Reste organischer Substanzen** selbst in und an viele Millionen Jahre alten Knochenfossilien. Unter günstigen Bedingungen haben sich so auch bei Dinosaurierüberresten Bestandteile von Blut, Knochenzellen oder Krallen erhalten.

3 Die **Analyse von Molekülen** urzeitlicher Tiere hilft, Evolutionsabläufe und Anpassungsprozesse besser zu verstehen.

EINBETTUNG

Der Kadaver wird von Sedimenten bedeckt, vielleicht vom Schlamm eines Flusses, die ihn vor weiteren Schäden etwa durch Tiere oder vor Wettereinflüssen bewahren.

Offenbar schützen insbesondere Sandsteinsedimente organische Überreste vor dem völligen Verfall – vielleicht weil die bei der Verwesung entstehenden aggressiven Flüssigkeiten schnell versickern.

TIEFERE EINBETTUNG UND VERSTEINERUNG

In Lauf von Jahrtausenden legen sich immer mehr Sedimente über das Skelett. Mineralien des Grundwassers dringen in die Knochen.

Tiefe Lagerung schützt empfindliche Substanzen vor UV-Strahlung, Oxidation, Temperatur- und pH-Wert-Schwankungen. Schließlich stellt sich ein chemisches Gleichgewicht mit der Umgebung ein, das etwaige noch erhaltene Substanzen konserviert.

ZURÜCK ANS TAGESLICHT

Erdkrustenbewegungen und Erosion bringen Fossilien zum Vorschein.

Die Chance, eventuelle organische Reste zu entdecken, steigt, wenn ein Fossil nach seiner Freilegung kaum Luft, Wind und Wetter ausgesetzt wird und die Analysen schnellstmöglich erfolgen.



re chemische Zusammensetzung als in den Knochenbereichen rund um die Kanälchen – und zudem war sie völlig verschieden von den umgebenden Sedimenten.

Da traute ich mich, nach dem Hämoglobinmolekül zu fahnden. Es stellt einen wesentlichen Bestandteil des roten Blutfarbstoffs Hämoglobin dar, denn es enthält in seiner Mitte ein Eisenion, das Sauerstoff bindet, und ist auch für die Farbe verantwortlich. Ein Hämoglobinmolekül enthält vier Häms. Bei Anregung durch Laserlicht zeigt Häm ein charakteristisches Resonanzmuster; wegen seines metallischen Zentrums absorbiert es Licht auf eine ganz eigene Art. Also unterzogen wir Knochenproben spektroskopischen Tests und maßen die Lichtemission, -absorption und -streuung. Tatsächlich: In den Knochen schien so etwas wie Häm zu stecken.

Noch deutlicher waren dann Ergebnisse von Immunexperimenten. Höhere Wirbeltiere produzieren zur Verteidigung gegen Fremdes in ihrem Innern Antikörper. Diese erkennen jeweils spezifisch die verdächtigen Substanzen und binden sich daran. Solch eine zielgerichtete Reaktion wollten wir provozieren. Dazu injizierten wir zunächst Mäusen Extrakte der Dinosaurierknochen. Damit gaben wir den Nagern Gele-

genheit, gegen möglicherweise darin enthaltene organische Komponenten Antikörper zu bilden. Im nächsten Schritt gaben wir die aus den Mäusen gewonnenen Antikörper zu Hämoglobin aus Truthühnern und Ratten. Und es geschah: Die Antikörper banden sich an das Hämoglobin. Demnach hatte das Immunsystem der Mäuse in den Knochenextrakten eine dem Hämoglobin ähnliche Substanz ausgemacht und dann spezifische Antikörper dagegen produziert. Auch diesem Test zufolge enthielten die Knochen von »Big Mike« etwas, was dem roten Blutfarbstoff heutiger Tiere ähnelt.

Mit keinem der vielen chemischen und immunologischen Versuche, die wir insgesamt durchführten, ließ sich die These widerlegen, dass die rötlichen, runden Gebilde in den Knochen dieses *T. rex* rote Blutkörperchen darstellten. Wirklich beweisen konnten wir unsere Vermutung damals allerdings auch nicht. Denn die uns verfügbaren Nachweismethoden waren nicht empfindlich genug, um die aufgespurte hämoglobinähnliche Substanz genau diesen Strukturen zuzuordnen. Entsprechend vorsichtig schrieben wir 1997 in der dazu veröffentlichten Publikation: Möglicherweise hätten sich

Hämoglobinproteine erhalten, und am wahrscheinlichsten sei, dass sie aus den Zellen des *Tyrannosaurus* stammten. Unser Artikel fand damals sehr wenig Beachtung.

Allmählich begriff ich während dieser Forschungen, was man an organischen Resten in Fossilien alles ablesen könnte. Falls es wirklich möglich wäre, Teile alter Proteine herauszufischen, ließe sich wohl ebenfalls die Abfolge ihrer Aminosäuren – ihrer Bausteine – bestimmen (»sequenzieren«), so wie man ja inzwischen auch alte DNA entziffert. Allerdings ist die »fossile« DNA etwa des Neandertalers mit nur Zehntausenden von Jahren beträchtlich jünger – die Dinosaurier starben vor rund 65 Millionen Jahren aus. Nicht nur am Erbgut, auch an Proteinen lesen Biologen die evolutionäre Entwicklung von Tieren ab. Unterschiede in Aminosäuresequenzen, die auf Mutationen beruhen, zeigen unter anderem Verwandtschaftsgrade von Arten und neue Anpassungen auf.

Reste von Vogelkrallen

Zunächst einmal musste ich aber klären, ob noch weitere Fossilien Proteinspuren enthalten. Dabei unterstützten mich Mark Marshall, der damals an der Indiana University arbeitete, sowie Seth Pinkus und John Watt von der Montana State University. Wir nahmen uns zwei gut erhaltene Fossilfunde vor, die viel versprechend erschienen.

Das eine stammte von einem frühen Vogel mit dem wissenschaftlichen Gattungsnamen *Rahonavis*. Paläontologen der Stony Brook University (New York) und des Macalester College in St. Paul (Minnesota) hatten das Fossil in 80 bis 70 Millionen Jahre alten Sedimenten der Oberkreide gefunden. Schon bei der Bergung war ihnen an den Zehen eine weiße, faserige Substanz aufgefallen. Da weder die anderen Knochen noch die benachbarten Sedimente Ähnliches aufwiesen, hielten die Forscher das nicht für eine nachträgliche Ablagerung, sondern für einen Bestandteil des Vogels. Handelte es sich etwa um Reste von Krallen, somit also um Keratin, dem Grundstoff von Hornsubstanz? Mit dieser Frage wandten sich die Forscher an mich.

Weil Keratine vielerlei Schutz- und Stützfunktionen erfüllen müssen, zersetzen sie sich nicht leicht, müssten sich also lange halten können. Alle Wirbeltiere bilden alpha-Keratine. Beim Menschen bestehen daraus unter anderem Haare und Nägel. Alpha-Keratine schützen auch unsere Haut und bewahren sie vor Austrocknung. Beta-Keratine dagegen bilden heutzutage nur Vögel und Reptilien.

Wir untersuchten die weiße Substanz am *Rahonavis*-Fossil zunächst mit weit gehend dem gleichen Testarsenal wie zuvor den *T. rex*-Knochen. Besonders das Ergebnis des Antikörpertests war bemerkenswert: Er zeigte sowohl alpha- als auch beta-Keratin an. Zusätzliche Analysen ergaben Aminosäuren genau im Bereich des rätselhaften Zehenbelags. Zudem entdeckten wir Stickstoff, der ganz ähnlich an andere Komponenten gebunden war wie normalerweise bei Proteinen, die sich aneinanderketten – nicht zuletzt auch bei Hornsubstanz. Anscheinend stammte der weißliche Belag wirklich von den Vogelkrallen.

Der zweite viel versprechende Fossilfund, den wir untersuchten, kam aus der Mongolei. Es handelte sich um einen kleinen Raubsaurier aus der späten Kreidezeit, den die Entdecker vom American Museum of Natural History in New York nicht ganz passend *Shuvuuia deserti* getauft hatten, »Wüstenvogel« (nach mongolisch *shuvuu* für »Vogel«). Die Art lebte vor 83 bis 70 Millionen Jahren. Als die Präparatorin Amy Davidson das Fossil säuberte, bemerkte sie im Nacken des Tiers kleine weiße Fasern (Bild rechts, rechts oben). Sie bat mich, zu prüfen, ob das Federüberreste waren. Paläontologen kannten bereits Dinosaurierfossilien mit Federabdrücken – die Vögel stammen von den Dinosauriern ab. Vielleicht trug *Shuvuuia* ja ein Daunenkleid.

Ich konnte mir nicht vorstellen, dass etwas so Zartes viele Jahrmillionen überstehen konnte. Eher glaubte ich an eine Struktur aus heutiger Zeit, die von Pflanzen oder Pilzen herrührt. Doch zu meiner großen Überraschung ergaben schon die ersten Tests, dass hier weder Pflanzen noch Pilze im Spiel waren. Stattdessen deuteten anschließende Analysen der Mikrostruktur auf Keratin. Nun bestehen die fertig ausgebildeten Federn moderner Vögel fast vollständig aus beta-Keratin. Sollten die weißen Fasern des mongolischen Raubsauriers von einer Art Federn herrühren, müssten sie ihnen eigentlich auch chemisch gleichen. Die Klauenreste von *Rahonavis* hatten dagegen außerdem alpha-Keratin enthalten. Und wirklich ergaben Antikörpertests: In den Fasern des »Wüstenvogels« fand sich reines beta-Keratin.

Ich selbst war jetzt endgültig davon überzeugt, dass in Fossilien unter glücklichen Umständen noch kleine Reste der ursprünglichen Proteine erhalten sind – und dass es gelingen kann, sie zu identifizieren. Doch ein Großteil der Fachkollegen hielt das alles für Humbug. Das verwundert nicht – stellten unsere Befunde doch alles in Frage, was man damals, 1999, über den Abbau von Molekülen und Zellen zu wissen glaubte. Laboruntersuchungen zufolge sollten Proteine bestenfalls vielleicht eine Million Jahre lang überdauern können, und DNA noch kürzer. Verkündungen von Forschern, sie hätten mehrere Millionen Jahre alte DNA gefunden, ließen sich damals nicht bestätigen. Allgemein anerkannt waren in Fachkreisen vor rund einem Jahrzehnt nur Studien, die organische Moleküle eines Alters von ein paar zehntausend Jahren nachwiesen. Als ich einmal bei einer wissenschaftlichen Zeitschrift eine Arbeit einreichte, kommentierte ein anonymer Gutachter, die vermutete lange Konservierung sei unmöglich, und ungeachtet unserer Daten würde ich den oder die Betreffende niemals vom Gegenteil überzeugen.

In dieser Situation riet mir ein Kollege, es zunächst mit einem etwas weniger ehrgeizigen Projekt zu versuchen. Dass man im Prinzip uralte Proteine aufspüren konnte, sollte sich auch an etwas jüngeren Fossilien beweisen lassen. Es mussten ja nicht gleich Dinosaurier sein. So gewann ich – zusammen mit dem analytischen Chemiker John Asara von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) – Proteine aus schätzungsweise 300 000 bis 600 000 Jahre alten Mammutfossilien. Diese Proteine sequenzierten wir anschließend

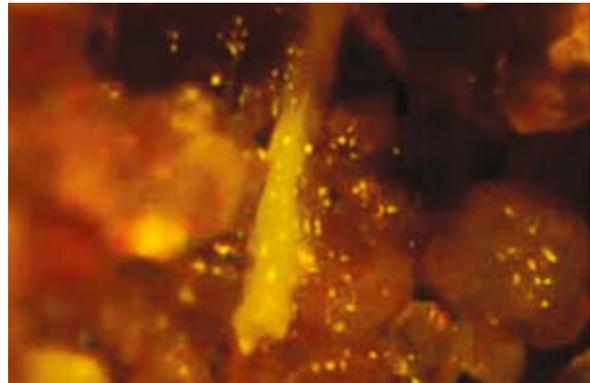
Überraschungen in Fossilien

Immer mehr organische Überreste entdecken Forscher in letzter Zeit in Knochenversteinerungen aus dem Erdmittelalter, das vor knapp 65 Millionen Jahren mit dem Untergang der Dinosaurier endete. Hier einige Beispiele:



Der weiße Belag auf dem Zehenknochen von *Rahonavis ostromi* aus Madagaskar enthält die Hornsubstanz Keratin. Wahrscheinlich stammt es von der Kralle des wehrhaften Urzeitvogels.

MARYLOU STEWART, STONY BROOK UNIVERSITY MEDIA SERVICES



Der kleine Raubsaurier *Shuvuuia deserti* aus der Mongolei trug vielleicht Daunen. Die längliche helle Hohlkammer könnte von einer Feder stammen.

MARY H. SCHWITZER

mittels Massenspektrometrie. Das Ergebnis war eindeutig: Es handelte sich um Kollagen, einen wesentlichen Baustein unter anderem von Knochen, Sehnen und Haut. Unsere Publikation darüber von 2002 brachte uns weder viel Widerspruch noch überhaupt größere Resonanz.

Was werdende Mütter auszeichnet

Im Jahr darauf schloss in Ostmontana ein Team des Museum of the Rockies die Bergung von »Brex« ab, dem mit 68 Millionen Jahren bisher ältesten *Tyrannosaurus-rex*-Skelett. Den Spitznamen erhielt MOR 1125 nach seinem Entdecker Bob Harmon. Wie schon bei »Big Mike« lagen die Knochen in der Hell-Creek-Formation genannten geologischen Schicht. Wegen des abgelegenen Fundorts musste ein Hubschrauber die Skeletteile zum Lager der Forscher bringen. Dafür wurden die Knochen bündelweise eingepackt. Doch ein Block mit Beinknochen erwies sich als zu schwer für den Transport. Die Leute brachen darum den Gips wieder auf, um den Inhalt auf mehrere Frachten zu verteilen. Von den brüchigen Fossilien bröckelten bei der Prozedur allerdings kleine Stücke ab – und die bekam ich.

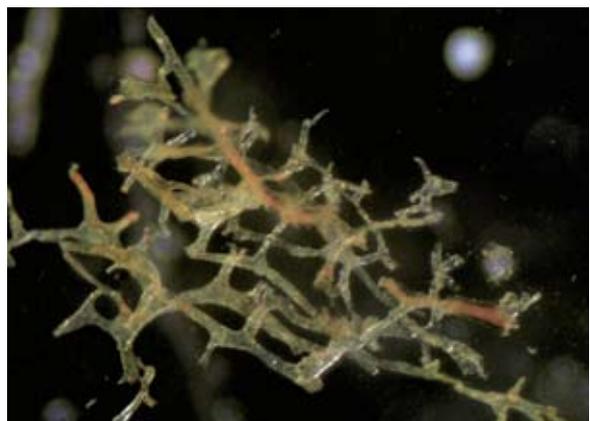
Gleich beim ersten Bröckchen, das ich aus der Kiste nahm (ein Fragment vom Oberschenkelknochen), wusste ich: Hier handelt es sich um etwas Besonderes. An der inneren Wand wies dieser Knochen eine dünne Schicht von einer speziellen Struktur auf, wie sie noch niemand bei einem Dinosaurier beschrieben hatte. Diese Schicht wirkte sehr faserig und war voller Blutgefäßkanälchen – in der Textur und Färbung völlig anders als die sonstige Knochensubstanz im Skelett.

»Herrjeh, das ist ja ein Weibchen – mit Eiern im Bauch!« Meine Assistentin Jennifer Wittmeyer quittierte meinen Ausruf mit einem Blick, als hätte ich den Verstand verloren. Doch



Das fossile Gebein eines *T. rex* aus Montana wies so genanntes medulläres Knochengewebe auf. Dergleichen bilden Vogelweibchen vorübergehend, wenn sie Eier legen.

AUS: SCHWITZER, W. H. ET AL.: SOFT-TISSUE VESSELS AND CELLULAR PRESERVATION IN TYRANNOSAURUS REKIN. SCIENCE 307.5, 1987-95, MÄRZ 2005; FIG. 1



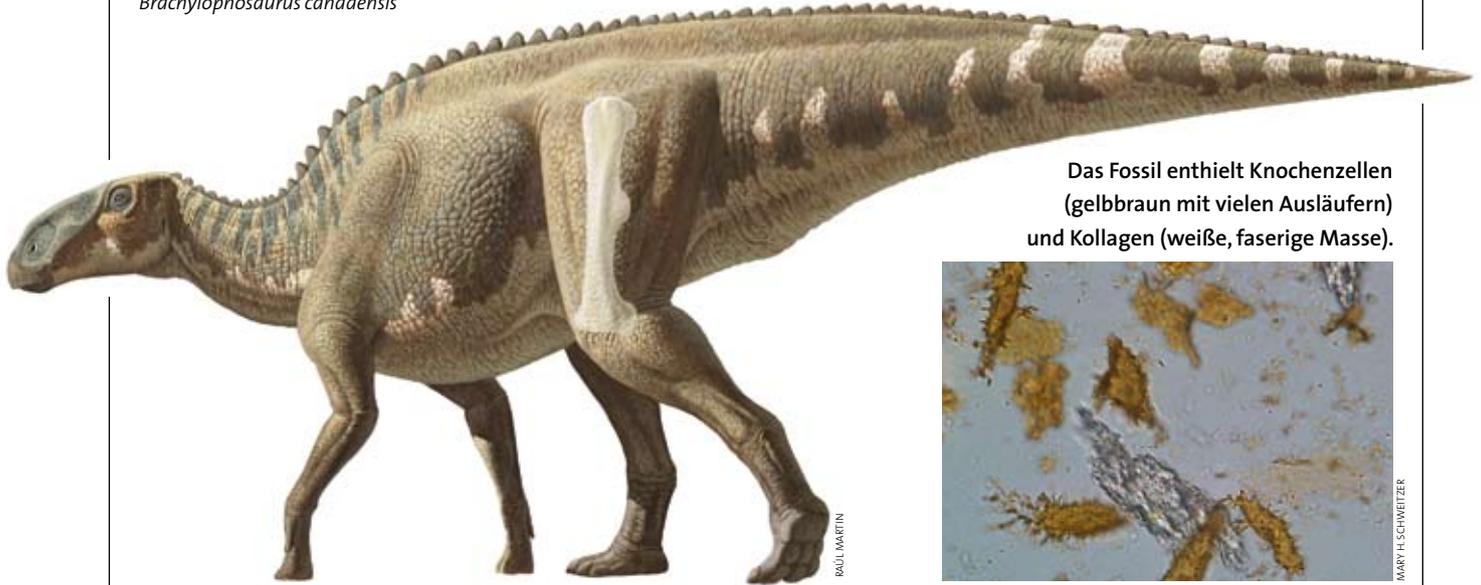
Aus festeren Knochen desselben *T. rex* kamen nach Entkalkung verästelte Strukturen zum Vorschein, die an Blutgefäße erinnern.

MARY H. SCHWITZER

Erfolg schneller Spurensicherung

Anatomische, molekulare und immunologische Analysen vom 2007 geborgenen Oberschenkelknochen eines Entenschnabeldinosauriers überzeugten viele zuvor skeptische Wissenschaftler. Das Fossil enthielt Reste von Knochenzellen und von der Kollagenmatrix.

Brachylophosaurus canadensis



Das Fossil enthielt Knochenzellen (gelbbraun mit vielen Ausläufern) und Kollagen (weiße, faserige Masse).

ich war mir praktisch sicher. Vogelweibchen bilden, wenn sie Eier produzieren, vorübergehend ein charakteristisches »medulläres Knochengewebe« aus, worin sie für die Eierschalen einen leicht mobilisierbaren Kalziumvorrat bereithalten. Genauso sah das hier aus (Bild S. 37, rechts Mitte).

Typisch für medulläres Knochengewebe und ein Zeichen für eine schnelle Neubildung ist eine wirre Anordnung der Kollagenfasern. Eine ähnlich ungeordnete Struktur tritt bei einem heilenden Knochenbruch auf – deswegen fühlt sich die Bruchstelle später verdickt an. Um bei heutigen Wirbeltieren die Orientierung der Kollagenfasern aufzuzeigen, kann man die Mineralien mit einer schwachen Säure herauslösen. Meine Assistentin und ich beschlossen, das auch in diesem Fall zu versuchen. Trotzdem mochte ich meinen Augen nicht trauen, als die Kollegin mir später einen weichen, faserigen Gewebeklumpen zeigte. Doch so oft sie den Versuch wiederholte: Immer kam wieder solch ein dehnbares, faseriges Material zum Vorschein – genau als hätten wir medulläres Knochengewebe von Vögeln so behandelt.

Nun entmineralisierten wir auch kleine Stücke aus dem kompakteren Rindenbereich des Knochens. Wieder blieb Weichgewebe übrig, aber diesmal erschienen durchsichtige, sich verzweigende Röhren. Sie waren hohl und biegsam – und sahen genauso aus wie feine Blutgefäße (Bild S. 37, ganz unten). Zu unserer Freude entdeckten wir in diesen Röhren teils kleine, runde, rote Gebilde, teils formlose Klumpen aus einer roten Substanz. Als wir den Versuch mehrfach wie-

derholten, erhielten wir sogar Knochenzellen – Osteozyten –, erkennbar an ihrer etwas bizarren Form. Sie scheiden Kollagen und weitere organische Knochenbestandteile ab. Offensichtlich steckte dieses weibliche Skelett voller Überraschungen: In ihm waren Materialien bewahrt, wie sie nie zuvor jemand bei Dinosauriern bemerkt hatte.

Unsere Publikation dazu erschien 2005 in der Fachzeitschrift »Science«. Diesmal erhielten wir zwar viel Aufmerksamkeit, doch blieb das Fachkollegium eher abwartend. Wir hatten in der Arbeit nicht geschrieben, dass wir bei dem *Tyrannosaurus*-Weibchen auf Kollagen, Blutgefäße und Knochenzellen gestoßen wären, sondern vorsichtiger formuliert, die gefundenen Strukturen würden an dergleichen erinnern. Es war ja sehr gut möglich, dass sich die organischen Substanzen nach so langer Zeit durch immer wieder andere geochemische Prozesse, denen sie ausgesetzt gewesen waren, chemisch stark verändert hatten. Klarheit konnten nur aufwändige Studien bringen.

Zusammen mit John Asara machte ich mich ans Werk. Zum Zuge kamen wieder sämtliche Verfahren, die meine Kollegen und ich beim ersten *T. rex* und den anderen erwähnten Fossilien angewandt und nach und nach verfeinert hatten. Auch die Reinigungs- und Sequenziermethodik für Proteine von der Mammutstudie hatte Asara inzwischen noch verbessert. Wir spürten in dem neuen Saurierfossil tatsächlich organische Reste auf, doch erwies sich ihre Analyse als besonders schwierig. Ihre Konzentration lag um einige Größen-

ordnungen unter der des untersuchten Mammuts, und die Proteine waren sehr stark zerfallen. Trotzdem gelang es uns schließlich, ein paar Proteinfragmente zu sequenzieren. Diese Aminosäureabfolgen verglich unser Kollege Chris Organ von der Harvard University mit denen einiger heutiger Wirbeltiere. Demnach glichen die Proteine des *T. rex*-Weibchens am meisten den entsprechenden Proteinen von Vögeln und etwas weniger denen von Krokodilen – also den beiden nächsten heutigen Verwandtschaftsgruppen der Dinosaurier.

Proteinsequenzen ähnlich denen von Vögeln

Als wir diese Ergebnisse 2007 und 2008 veröffentlichten, schlugen die Wogen hoch. Vor allem mit unserer Deutung der massenspektrometrischen Sequenzierungsdaten waren viele Kollegen nicht einverstanden. Manche von ihnen hielten die Anzahl der bestimmten Sequenzen für zu gering. Andere meinten, wir hätten die Strukturen mit Biofilmen mikrobieller Herkunft verwechselt, die später in die Knochen gelangt waren, und so weiter. Nun wusste ich zwar: Wissenschaftler sollen misstrauisch sein und gerade neue Ideen streng hinterfragen. Andererseits gilt das Prinzip, dass die einfachste Erklärung, zu der alle Daten passen, vermutlich die richtige ist. Und wir hatten unsere Hypothese unter vielen Aspekten getestet. Doch musste ich auch eingestehen, dass ein Einzelbeispiel in der Wissenschaft letztlich wenig zählt. Die Entdeckung würde glaubwürdiger, wenn es gelänge, Proteine weiterer Dinosaurier zu sequenzieren.

In jenen Jahren fand ein Mitarbeiter auf einer unserer Sommerexpeditionen einen Entenschnabeldinosaurier oder Hadrosaurier, und zwar einen 80 Millionen Jahre alten *Brachylophosaurus canadensis*. Schon bevor die Bergung von »Brachy« richtig anlief, mutmaßten wir, dass dieses Fossil alte Proteine enthalten könnte. Deswegen trafen wir alle erdenklichen Vorkehrungen, um die Knochen schleunigst aus dem Sandstein zu befreien und sogleich sauber zu verpacken. Es galt, die empfindlichen Moleküle – so vorhanden – vor Luftverschmutzung, Feuchtigkeitsschwankungen, Kontaminationen und anderen Unbilden möglichst zu schützen. Vielleicht trugen diese Maßnahmen sowie die unverzügliche Analyse dazu bei, dass uns »Brachy« noch besser erhaltene morphologische Strukturen und organische Moleküle lieferte als »Brex«. Wie erhofft fanden wir im Knochen in eine Matrix aus weißen Kollagenfasern eingebettete Zellen mit langen, dünnen, verzweigten Fortsätzen: ein Merkmal von Osteozyten. Sogar Verbindungen dieser Fortsätze zu anderen Knochenzellen ließen sich erahnen. Und ein paar wenige der Zellen schienen noch Überreste innerer Strukturen zu enthalten, möglicherweise auch von Zellkernen.

Bei Immuntests reagierten die Knochenextrakte von »Brachy« mit Antikörpern, die Kollagen erkennen sowie andere Proteine, die nicht in Mikroben vorkommen. Bakterieller Herkunft waren die Weichgewebestrukturen dieses Fossils somit sicherlich nicht. Auch gelang es wiederum, Proteinsequenzen zu bestimmen. Wie schon bei »Brex« zeigten sie am meisten Ähnlichkeit mit Sequenzen moderner Vögel.

Zur Kontrolle schickten wir mehreren anderen Forschungsteams Knochenproben des Hadrosauriers. Alle bestätigten unsere Daten. Die Veröffentlichung dazu erschien 2009 in »Science«. Dieses Mal kam mir keine heftige Kritik zu Ohren.

Im Grunde stehen unsere Forschungen noch am Anfang, denn es bleiben tausende ungeklärte Fragen. Zunächst gilt es zu verstehen, wie sich Weichstrukturen überhaupt so lange erhalten konnten – im völligen Widerspruch zu allen Fossilisationsmodellen. Die Molekülanalysen ihrerseits versprechen für die Zukunft ungeahnte Einblicke zum Beispiel in Verwandtschaftsbeziehungen längst verschwundener Arten und in die Geschwindigkeit von Evolutionsprozessen in einzelnen Entwicklungslinien. Solche Vergleiche erfordern aber zunächst größere Datenbanken mit Molekülsequenzen. Die Erkenntnisse daraus werden erklären helfen, wie die Dinosaurier oder auch andere ausgestorbene Tiere mit größeren Umweltveränderungen fertig wurden, wie sie sich von Naturkatastrophen erholten – und warum sie am Ende untergingen. ~

DIE AUTORIN



Mary H. Schweitzer ist außerordentliche Professorin an der North Carolina State University in Raleigh am Institut für Meeres-, Geo- und Atmosphärische Wissenschaften sowie außerordentliche Kuratorin am North Carolina Museum of Natural Sciences. Am Ende einer Ausbildung zur Highschool-Lehrerin erfüllte sie sich einen Kindheitstraum und nahm aus reinem

Spaß an einem Paläontologiekurs teil. Davon inspiriert, studierte sie Biologie und promovierte an der Montana State University in Bozeman.

QUELLEN

- Asara, J.M. et al.:** Protein Sequences from Mastodon and *Tyrannosaurus rex* Revealed by Mass Spectrometry. In: *Science* 316, S. 280–285, 13. April 2007
- Kaye, T.G. et al.:** Dinosaurian Soft Tissues Interpreted as Bacterial Biofilms. In *PLoS One* 3, e2808, Juli 2008
- Schweitzer, M.H. et al.:** Preservation of Biomolecules in Cancellous Bone of *Tyrannosaurus rex*. In: *Journal of Vertebrate Paleontology* 17, S. 349–359, Juni 1997
- Schweitzer, M.H. et al.:** Beta-Keratin Specific Immunological Reactivity in Feather-Like Structures of the Cretaceous Alvarezsaurid, *Shuvuuia deserti*. In: *Journal of Experimental Zoology* 285, S. 146–157, August 1999
- Schweitzer, M.H. et al.:** Biomolecular Characterization and Protein Sequences of the Campanian Hadrosaur *B. canadensis*. In: *Science* 324, S. 626–631, 1. Mai 2009

LITERATURTIPPS

- Naish, D.:** Die faszinierende Entdeckung der Dinosaurier. Konrad Theiss, Stuttgart 2010
Lebendige, reich bebilderte Darstellung durch einen Fachmann
- Richardson, H.:** Dinosaurier und andere Tiere der Urzeit. BLV, München 2004
Porträts von über 200 der wichtigsten ausgestorbenen Wirbeltiere

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1069965



TIEFTEMPERATURPHYSIK

KÄLTEREKORD

dank Maxwells Dämon

Auf einem Gedankenexperiment aus dem 19. Jahrhundert beruht ein neues Kühlverfahren, das Gasatome auf zuvor unerreicht tiefe Temperaturen bringt. Derart nahe dem absoluten Nullpunkt erwarten die Physiker überraschende Entdeckungen sowie nützliche Anwendungen.

Von Mark G. Raizen

Während Sie diese Worte lesen, schwirren Luftmoleküle mit mehr als 3000 Kilometer pro Stunde – schneller als Geschwindigkeitskugeln – um Sie herum und bombardieren Sie von allen Seiten. Zugleich vibrieren, taumeln und kollidieren die Atome und Moleküle Ihres Körpers unentwegt. In der Natur bleibt nichts jemals absolut ruhig, und je schneller sich die Dinge bewegen, desto größer ist ihre Energie. Die mittlere Energie von großen Atom- und Molekülmengen empfinden wir als Wärme.

Völlige Ruhe entspräche dem absoluten Nullpunkt der Temperatur. Diese Grenze ist zwar prinzipiell unerreichbar, aber Forscher haben sich ihr immer mehr genähert. Hier, in diesem Extrembereich, machen sich seltsame Quanteneffekte bemerkbar und erzeugen neuartige Materiezustände. Insbesondere verhalten sich die Atome einer Gaswolke, die auf winzige Bruchteile eines Grads über dem absoluten Nullpunkt gekühlt wurde, wie Wellen. Ihr Quantenverhalten ermöglicht den Bau präziser Messinstrumente und Atomuhren.

Es ist nicht leicht, Atome und Moleküle quasi festzunageln und zu manipulieren. Typischerweise erzeugen die Forscher dazu zunächst ein verdünntes Gas, indem sie einen Festkörper erhitzen oder mit einem Laser verdampfen. Dann muss das Gas verlangsamt, in eine Vakuumkammer gesperrt und von deren Wänden ferngehalten werden.

Leider lassen sich solche Kühlverfahren nur auf einige wenige Elemente im Periodensystem anwenden. Zum Beispiel ließ sich Wasserstoff, das einfachste Atom überhaupt, lange Zeit nur äußerst schwer kühlen. Doch jetzt hat meine Forschergruppe eine neue Methode entwickelt, die bei den meisten Elementen und bei vielen Molekültypen funktioniert. Auf die Idee brachte mich ein klassisches Gedankenexperiment des schottischen Physikers James Clerk Maxwell (1831–1879). Er ersann den berühmten nach ihm benannten »Dämon«, der ein Grundgesetz der Thermodynamik zu verletzen scheint, indem er einzelne Gasteilchen sortiert.

Ich begann mit einem bewährten Trick, den Physiker seit mehr als 40 Jahren nutzen: Ein Gas kühlt sich stark ab, wenn es mit mehreren Atmosphären Druck durch ein kleines Loch in ein Vakuum strömt. Solche Gasstrahlen haben eine praktisch einheitliche Energie. Das heißt, die Geschwindigkeiten der einzelnen Moleküle liegen nahe bei ihrem Mittelwert. Wenn ein Strahl beispielsweise mit 3000 Kilometer pro Stunde austritt, weichen seine Moleküle um höchstens 30 Stundenkilometer von diesem Mittelwert ab. Hingegen können die Luftmoleküle, deren mittlere Geschwindigkeit bei Raumtemperatur ebenfalls rund 3000 Kilometer pro Stunde beträgt, alle möglichen Werte zwischen 0 und 6000 aufweisen.

Thermodynamisch betrachtet bedeutet das: Obwohl ein solcher »Überschallstrahl« beträchtliche Energie hat, ist er extrem kalt. Stellen wir uns einen Beobachter vor, der mit 3000 Stundenkilometern neben dem Strahl dahinrast. Für ihn bewegen sich die Moleküle so langsam, dass die Temperatur des Strahls nur ein hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt liegt! Wenn es uns also gelingt, einen solchen Strahl bis zum Stillstand abzubremsen und dabei seine schmale Geschwindigkeitsverteilung zu bewahren, erhalten

AUF EINEN BLICK

KURZ VOR DEM ABSOLUTEN NULLPUNKT

1 Die herkömmlichen Verfahren, **Gase extrem tief zu kühlen**, funktionieren nur bei wenigen Elementen. Zwei neue Methoden schaffen dies nun mit praktisch allen Atomen – und sogar mit einigen Molekülen.

2 Eine der Methoden setzt den **maxwellischen Dämon** in die Realität um: ein klassisches Gedankenexperiment, das den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zu verletzen scheint.

3 Damit nähern sich Forscher dem absoluten Nullpunkt bis auf **wenige millionstel Grad**. Dies erlaubt neue Einblicke in ungelöste physikalische Fragen, etwa jene nach der Masse von Neutrinos.

wir ein ziemlich kaltes Atombündel, das wir dann einsperren und noch weiter kühlen können.

Um dieses Ziel zu erreichen, begann mein Team zusammen mit Uzi Even, einem Chemiker an der Tel Aviv University, mit Überschallstrahlen zu arbeiten. Zunächst bauten wir einen Rotor, dessen Blätter sich an ihren Enden mit der halben Geschwindigkeit des Überschallstrahls bewegten. Wir richteten die Strahlimpulse so auf die Rotorblätter, dass die Geschwindigkeit des Strahls durch das Auftreffen auf den langsameren Blättern auf null abgebremst wurde. Wenn die Gasatome vom Rotor abprallten, absorbierte dieser ihre gesamte kinetische Energie – genau wie ein geschickt zurückweichender Tennisspieler einen Ball zum Stillstand bringen kann.

Allerdings erforderte diese Anordnung eine allzu feine Steuerung. Darum schlug Robert Hebner, Leiter des Center for Electromechanics an der University of Texas in Austin, ein anderes Prinzip vor: Das Gas prallt von der Rückseite eines Projektils ab, das gerade durch ein so genanntes Gaußgewehr (englisch *coilgun*, Spulenkanone) jagt. Das Gaußgewehr – benannt nach dem Mathematiker und Physiker Carl Friedrich Gauß (1777–1855), der sich unter anderem auch mit Magnetismus befasste – treibt die magnetisierten Projektilen statt mit Schießpulver elektromagnetisch aus dem Gewehrlauf. Das Geschoss, im Wesentlichen ein Stabmagnet, passiert eine Reihe von Drahtspulen, in denen Strom fließt und Magnetfelder erzeugt. Wenn sich das Projektil einer Spule nähert, wird es von ihrem Zentrum angezogen und beschleunigt. Doch nach Durchqueren des Zentrums würde dieselbe Magnetkraft das Geschoss zurückziehen und auf die Anfangsgeschwindigkeit abbremsen. Darum wird der Strom in jeder Spule genau dann abgeschaltet, wenn das Geschoss das Zentrum passiert. Auf diese Weise treiben die Magnetkräfte das Projektil durch den Gewehrlauf vorwärts.

Rasch erkannte ich, dass Hebners Idee auch ganz ohne ein Geschoss funktionieren kann, wenn man das Prinzip auf den Strahl selbst anwendet und die Wirkung umkehrt: Statt ein Projektil zu beschleunigen, wirken die Spulen direkt auf die Gasmoleküle ein und bremsen sie bis zum Stillstand ab (siehe Kasten rechts). Das ist möglich, weil die meisten Atome und viele Moleküle ein wenig magnetisch sind. Zudem lassen sich sämtliche Atome in winzige Magneten verwandeln, indem man ihre Elektronen in einen angeregten Zustand versetzt.

Wir erprobten das neue Gerät zuerst an Neonatomen und dann an Sauerstoffmolekülen; beide ließen sich zum Stillstand bringen. Unabhängig von uns kam ein Team unter Frederic Merkt an der ETH Zürich auf dieselbe Idee und vollführte ungefähr gleichzeitig dasselbe Kunststück mit atomarem Wasserstoff. Seither haben mehrere Gruppen in aller Welt ihre eigenen atomaren Gaußkanonen konstruiert – im Grunde sehr einfache und robuste Apparate aus gewöhnlichem Kupferdraht, handelsüblichen Kondensatoren und Transistoren.

Nachdem wir Atome auf diese Weise erfolgreich gestoppt hatten, war es relativ einfach, sie in statischen Magnetfeldern einzufangen. Schwerer fiel es uns, sie noch weiter zu kühlen.

Zwar muten 0,01 Kelvin – ein hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt – frostig genug an, aber andere Methoden kommen noch viel tiefer. Dorthin wollten wir auch.

Lange Zeit sah ich keine generelle Lösung. Gut funktioniert grundsätzlich die in den 1980er Jahren erfundene Laserkühlung, bei der die Gasatome von mehreren gekreuzten Laserstrahlen gebremst werden. Die Methode führte zu den so genannten Bose-Einstein-Kondensaten sowie 1997 und 2001 zu zwei Nobelpreisen. Doch lässt sie sich fast ausschließlich auf Elemente in der ersten Spalte des Periodensystems wie Natrium und Kalium anwenden, weil diese Atome – wie für Laserkühlung erforderlich – leicht vom Grundzustand in einen bestimmten angeregten Zustand und wieder zurück versetzt werden können. Ein anderes Verfahren ist die Verdunstungskühlung, bei der die wärmeren Atome entfernt werden und die kälteren übrig bleiben; nach demselben Prinzip kühlt uns der Schweiß, der auf unserer Haut verdunstet. Doch ohne die Hilfe der Laserkühlung ist es sehr schwierig, so hohe Dichten zu erreichen, dass überhaupt Verdunstung einsetzt.

Einbahnstraßen für Gasatome

Im Februar 2004 besuchte ich die Princeton University im US-Bundesstaat New Jersey und sprach mit dem Plasmaphysiker Nathaniel J. Fisch. Er hatte gerade die Idee entwickelt, in einem Plasma – einem Gas aus Elektronen und positiv geladenen Ionen – einen Elektronenstrom zu erzeugen, also die Elektronen zu veranlassen, nur in eine Richtung und nicht in Gegenrichtung zu wandern. Ich fragte mich, ob uns etwas Ähnliches mit Atomen oder Molekülen gelingen könnte: ein »Gatter«, das die Teilchen nur in einer Richtung durchlässt.

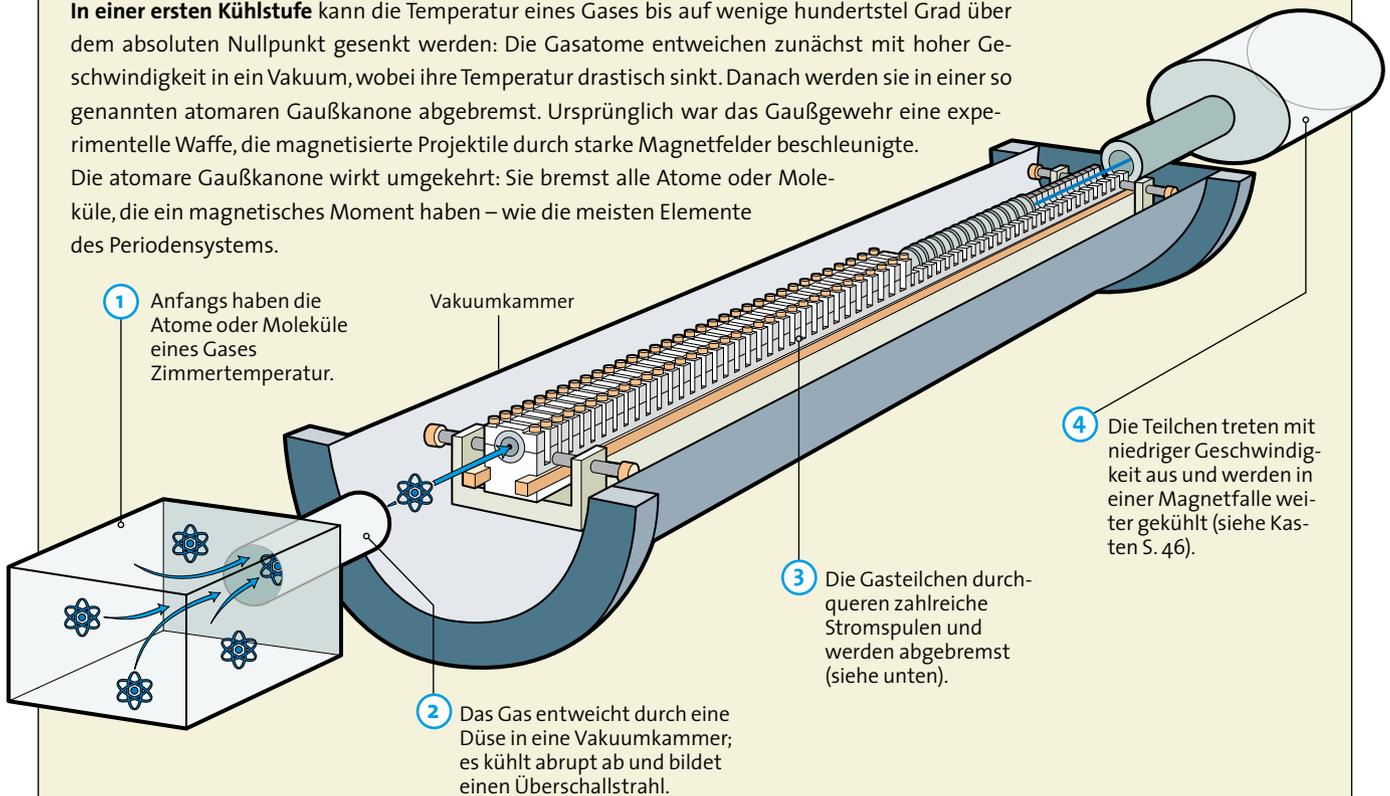
Wie kann ein Einweggatter zur Gaskühlung beitragen? Angenommen, es trennt einen Behälter in zwei Hälften, in dem Gasatome zufällig umherflitzen und sich dabei früher oder später auf das Gatter zubewegen. Wenn es sie nur in einer Richtung durchlässt, sagen wir von links nach rechts, werden sich mit der Zeit alle Atome in der rechten Hälfte des Behälters ansammeln. Entscheidend ist die Tatsache, dass die Geschwindigkeit der Atome sich dabei nicht ändert und das Gas somit seine Anfangstemperatur beibehält. Thermodynamisch betrachtet ist dieser Vorgang völlig verschieden vom Komprimieren des Gases auf die rechte Hälfte des Volumens: Das würde die Atome beschleunigen und die Temperatur erhöhen.

Nun lässt man das Gas sich wieder auf sein ursprüngliches Volumen ausdehnen. Bei der Expansion eines Gases sinkt seine Temperatur; darum werden Sprühdosen kalt, wenn man sie benutzt. Das Endergebnis ist somit ein Gas mit dem ursprünglichen Volumen, aber tieferer Temperatur.

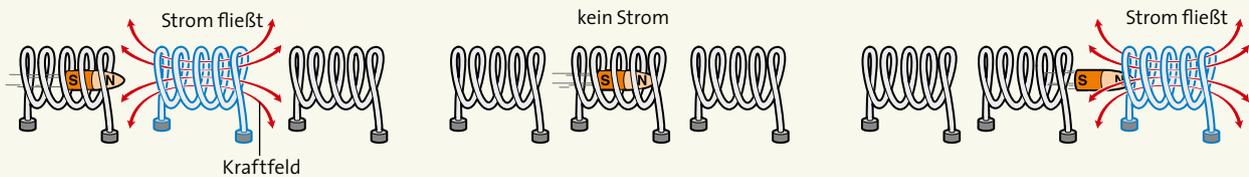
Allerdings scheint ein Gatter, das Atome mühelos zu sortieren vermag, ein Grundgesetz der Physik zu verletzen. Im komprimierten Zustand hat das Gas eine niedrigere Entropie – diese Größe ist ein Maß für die Unordnung des Systems. Nach dem Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist es unmöglich, die Entropie eines Systems zu senken, ohne Energie aufzuwenden und zugleich anderswo mehr Entropie zu erzeugen.

Die Gaußkanone als magnetische Bremse

In einer ersten Kühlstufe kann die Temperatur eines Gases bis auf wenige hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gesenkt werden: Die Gasatome entweichen zunächst mit hoher Geschwindigkeit in ein Vakuum, wobei ihre Temperatur drastisch sinkt. Danach werden sie in einer so genannten atomaren Gaußkanone abgebremst. Ursprünglich war das Gaußgewehr eine experimentelle Waffe, die magnetisierte Projektile durch starke Magnetfelder beschleunigte. Die atomare Gaußkanone wirkt umgekehrt: Sie bremst alle Atome oder Moleküle, die ein magnetisches Moment haben – wie die meisten Elemente des Periodensystems.



DAS PRINZIP DER MAGNETBREMSE



1 Eine stromdurchflossene Spule erzeugt Magnetkräfte, die ein magnetisch polarisiertes Teilchen (das »Projektile«) von der Spule abstoßen. Ein ankommendes Teilchen wird dadurch abgebremst.

2 Sobald das Teilchen die Mitte der Spule erreicht, wird der Strom abgeschaltet. Andernfalls würden die auf der Ausgangsseite wirkenden Kräfte das Teilchen wieder auf sein Anfangstempo beschleunigen.

3 Das Teilchen wandert zur nächsten Spule, wo sich der Vorgang wiederholt. Bei jedem Durchgang wird das Teilchen weiter gebremst.

BROWN BIRD DESIGN

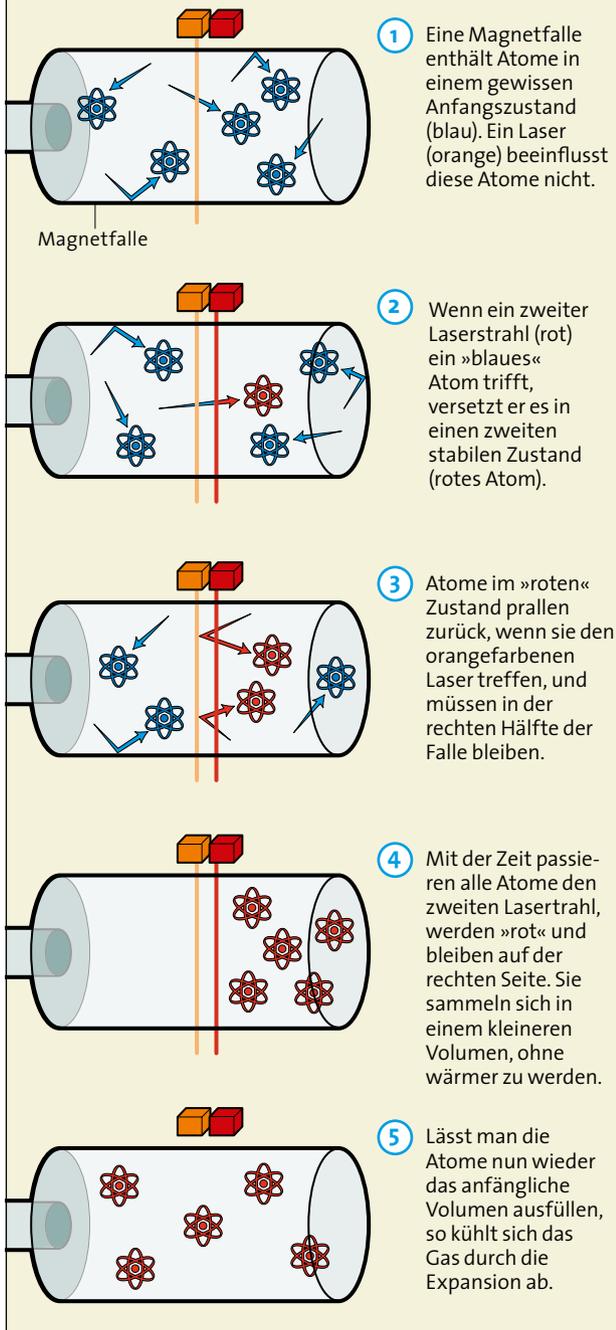
Über dieses Paradox wird kontrovers diskutiert, seit sich James Clerk Maxwell 1871 als Gedankenexperiment ein »intelligentes Wesen mit flinken Händen« vorstellte, welches das Kommen und Gehen einzelner Teilchen verfolgen kann und dementsprechend ein Gatter öffnet oder schließt. Dieses hypothetische Wesen wurde als maxwellischer Dämon bekannt; anscheinend verletzt es den Zweiten Hauptsatz, da es mit vernachlässigbarem Energieaufwand die Entropie des Gases zu senken vermag. 1929 schlug der ungarisch-amerikanische Physiker Leó Szilárd (1889–1964) eine Lösung des Paradoxons vor. Demnach sammelt der Dämon jedes Mal Information, wenn das Gatter offen ist. Diese Information ist

mit einem Entropiezuwachs verbunden, der die Entropieabnahme des Gases exakt ausgleicht und dadurch den Zweiten Hauptsatz »rettet«. Eine etwas andere Antwort gaben in den 1970er Jahren die IBM-Informatiker Rolf Landauer und Charles Bennett: Da der Dämon nur begrenzten Speicherplatz hat, muss er seinen Speicher immer wieder leeren. Nicht das Sammeln, sondern das Löschen der Information liefert den Entropieausgleich.

All das Grübeln über Maxwells Dilemma blieb viele Jahrzehnte lang bloße Spekulation – bis meine Kollegen und ich sein Gedankenexperiment erstmals in physikalische Praxis umsetzen, um Atome bis auf 15 millionstel Kelvin zu küh-

Dämonisches Laserlicht

Nachdem die atomare Gaußkanone oder ein anderer Apparat das Gas auf wenige hundertstel Grad über dem absoluten Nullpunkt gekühlt hat, kann es im zweiten Schritt bis auf millionstel Grad oder noch weniger gebracht werden. Ein neuartiges Verfahren namens Einzelphotonenkühlung nutzt im Prinzip das Einweggatter, das in Maxwells berühmtem Gedankenexperiment von dem nach ihm benannten Dämon betätigt wird. Zunächst versammelt das Gatter die Atome in einem kleineren Volumen, ohne dass dabei ihre Temperatur steigt. Dann expandieren sie in das ursprüngliche Volumen, wodurch ihre Temperatur sinkt.



len. Unser Gerät demonstriert, auf welche Weise der maxwellsche Dämon praktisch existieren kann und warum Szilárds Erkenntnis zutrifft, dass Information dabei eine entscheidende Rolle spielt.

Damit unser Einweggatter funktioniert, müssen die Gasatome zwei unterschiedliche Zustände – mögliche Konfigurationen der Hüllenelektronen – besitzen, die beide niederenergetisch und somit stabil sind. Nennen wir die zwei Zustände blau und rot. Die Atome schweben in einem Behälter, den ein Laserstrahl in der Mitte unterteilt. Der Strahl ist auf eine Wellenlänge abgestimmt, die selektiv rote Atome zurückprallen lässt, wenn sie sich ihm nähern; er wirkt auf sie wie ein geschlossenes Gatter. Anfangs sind alle Atome blau und können darum die Laserbarriere ungehindert passieren. Doch unmittelbar rechts vom Barrierenstrahl werden die Atome von einem zweiten Laser getroffen; er ist so eingestellt, dass die Atome von blau zu rot übergehen, wenn ein einzelnes Laserphoton an ihnen streut. Nun werden die rot gewordenen Atome vom Barrierenstrahl abgewiesen; sie können nicht mehr durch das Gatter zurück in die linke Hälfte gelangen. Mit der Zeit sammeln sich alle Atome auf der rechten Seite, und die linke Seite bleibt leer.

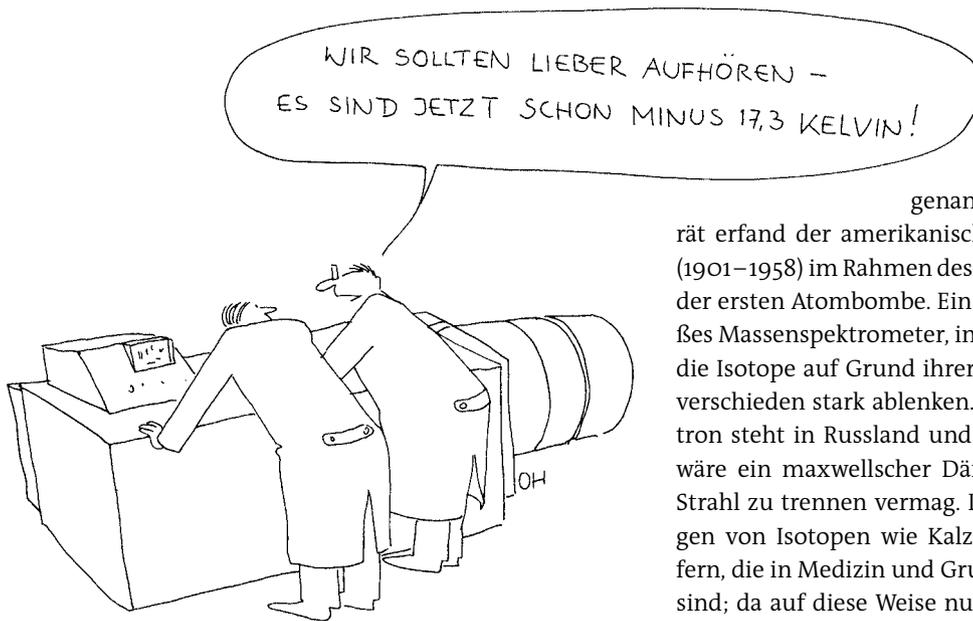
Anfang 2008 demonstrierten wir unser Gatter mit Rubidiumatomen. Wir nannten das Verfahren Einzelphotonenkühlung, um es von der älteren Laserkühlung zu unterscheiden, die viele Photonen pro Atom erfordert.

Physik am absoluten Limit

Unabhängig von mir entwickelte J. Gonzalo Muga von der Universidad del Pais Vasco in Bilbao (Spanien) zusammen mit Andreas Ruschhaupt, der jetzt an der Leibniz Universität Hannover arbeitet, ein ähnliches Konzept. Seither untersuchen Muga, Ruschhaupt und ich theoretische Aspekte des Gatters. In einer gemeinsamen Publikation zeigten wir 2006, dass ein Photon, das an einem Atom streut, Information über dieses Atom mitnimmt – und somit ein winziges Entropiequantum. Während das ursprüngliche Photon Teil des hochgradig geordneten Laserstrahls war, haben die gestreuten Photonen zufällige Richtungen und somit geringere Ordnung. Wie wir nachwiesen, gleicht der Entropiezuwachs der Strahlung exakt die Entropiesenkung der durch das Einweggatter eingesperrten Atome aus.

Darum wirkt die Einzelphotonenkühlung als maxwellscher Dämon – genau in dem von Szilárd 1929 gemeinten Sinn. In diesem Fall ist der Dämon besonders einfach und effizient: Ein Laserstrahl verursacht durch Streuung eines einzelnen Photons einen irreversiblen Prozess. Ein solcher Dämon ist gewiss weder ein intelligentes Wesen noch ein Computer; er braucht keine Entscheidungen auf Grund der von den Atomen gelieferten Information zu fällen. Es genügt schon, dass die Information zugänglich ist und im Prinzip gesammelt werden kann.

Ein großer Vorteil der Einzelphotonenkühlung ist, dass sie nicht nur für Wasserstoff funktioniert, sondern auch für seine Isotope Deuterium und Tritium, die zusätzlich zum



Proton ein Neutron beziehungsweise zwei Neutronen im Kern besitzen. Ende der 1990er Jahre vollbrachten Daniel Kleppner und Thomas J. Greytak am Massachusetts Institute of Technology zwar das Kunststück, Wasserstoff durch Verdunstungskühlung auf extrem tiefe Temperaturen zu bringen, aber mit den Isotopen gelang ihnen das nie. Hingegen eignet sich unser Verfahren perfekt für alle drei Wasserstoffisotope.

Durch Fixieren von Tritium hoffen Astrophysiker die winzige Masse von Neutrinos messen zu können, um die Gravitationswirkung dieser allgegenwärtigen Partikel auf die Entwicklung des Kosmos besser zu verstehen. Tritium ist radioaktiv; es verwandelt sich in Helium-3, wenn eines seiner Neutronen in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt. Aus der Energie des als Betastrahlung austretenden Elektrons lässt sich das Energiedefizit bestimmen, das mit dem Antineutrino unbemerkt aus dem Detektor entweicht – und somit die Masse des Antineutrinos, die vermutlich gleich der Neutrinomasse ist.

Unsere Methode müsste auch beim Antiwasserstoff funktionieren. Dieser aus Antiteilchen zusammengesetzte Zwilling des Wasserstoffs wurde erst kürzlich am CERN, der europäischen Organisation für Kernphysik bei Genf, erzeugt. Antiwasserstoff ist äußerst instabil, denn Antimaterie verwandelt sich in einen Blitz purer Energie, sobald sie mit Materie in Kontakt kommt. In diesem Fall kann die Überschallstrahlmethode nicht als Ausgangspunkt dienen. Stattdessen könnte man einen Antiwasserstoffstrahl erzeugen, indem man Antiprotonen durch eine Positronenwolke schießt und dann den Strahl mit unserem maxwellischen Dämon stoppt und kühlt. Experimente mit Antiwasserstoff können die Frage beantworten, ob Antimaterie genauso fällt wie Materie. Mit anderen Worten: Wirkt die Gravitation auf alle Objekte mit gleicher Masse genau gleich?

Das atomare Gaußgewehr und die Einzelphotonenkühlung versprechen zudem interessante praktische Anwendun-

gen. Die Isotope der meisten chemischen Elemente werden – neben anderen Verfahren – noch immer mit einem so genannten Calutron getrennt. Das Gerät

erfand der amerikanische Physiker Ernest O. Lawrence (1901–1958) im Rahmen des Manhattan-Projekts für den Bau der ersten Atombombe. Ein Calutron ist im Grunde ein großes Massenspektrometer, in dem elektromagnetische Felder die Isotope auf Grund ihrer etwas unterschiedlichen Masse verschieden stark ablenken. Das einzige derzeit aktive Calutron steht in Russland und arbeitet sehr ineffizient. Besser wäre ein maxwellischer Dämon, der die Isotope in einem Strahl zu trennen vermag. Das Verfahren kann kleine Mengen von Isotopen wie Kalzium-48 oder Ytterbium-168 liefern, die in Medizin und Grundlagenforschung sehr begehrt sind; da auf diese Weise nur winzige Isotopmengen entstehen, wird der Atomwaffensperrvertrag nicht tangiert.

Als weitere Anwendung versuchen wir Strukturen im Nanometerbereich – millionstel Millimetern – herzustellen. Magnetfelder können Atomstrahlen nicht nur abbremsen, sondern auch fokussieren, ähnlich wie eine optische Linse Licht bündelt. Dabei wird ein Auflösungsvermögen von einem Nanometer oder darunter erreicht. Solche Strahlen könnten Atome gezielt ablagern und viel kleinere Details erzeugen als die derzeit für die Produktion von Computerchips gängige optische Lithografie.

Der absolute Nullpunkt wird auch in Zukunft unerreichbar bleiben, dafür sorgen die physikalischen Gesetze. Aber so mühsam der Weg in seine unmittelbare Nähe auch sein mag – er hat schon viele neue Erkenntnisse mit sich gebracht und wird dies wohl auch in Zukunft tun. ~

DER AUTOR



Mark G. Raizen ist Physikprofessor an der University of Texas in Austin, wo er auch promovierte. Sein Interessengebiet umfasst das optische Einfangen und Kühlen von Gasatomen sowie exotische Quantenphänomene.

QUELLEN

- Bennett, C.H.:** Maxwells Dämon. In: Spektrum der Wissenschaft 1/1988, S. 48–55
Chu, S.: Einschluss neutraler Teilchen mit Laserstrahlen. In: Spektrum der Wissenschaft 4/1992, S. 68–75
Raizen, M.G.: Comprehensive Control of Atomic Motion. In: Science 324, S. 1403–1406, 2009

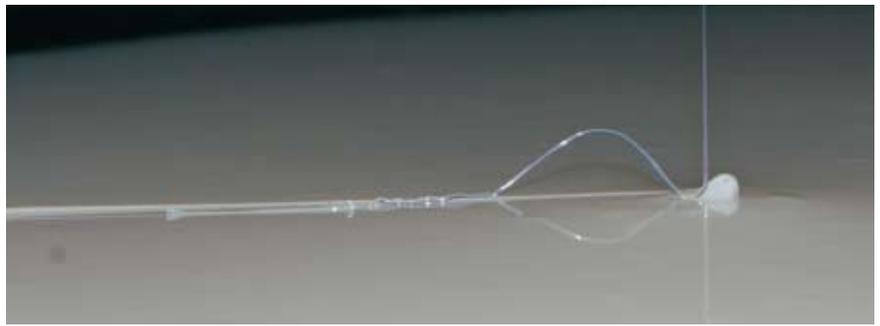
WEBLINKS

www.scientificamerican.com/mar2011/raizen
 Interaktive Darstellung des maxwellischen Dämons in der Version des Autors

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1069966

... etwas, das trotz aller Flüssigkeit
in der Substanz eine Solidität in
der Form erreicht.

Italo Calvino (1923–1985)



Wenn Shampoo Sprünge macht

Sobald bestimmte zähe Substanzen Scherkräften unterliegen, beginnen sie plötzlich, sich zu verflüssigen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Shampoo ist zum Haarewaschen da – denkt man zumindest. Doch kaum betrachtet man die Substanz mit ein wenig Neugier, beschert sie uns ein eindrucksvolles Phänomen, das sogar schon die physikalische Forschung auf den Plan gerufen hat. Ich selbst stieß zufällig darauf. Eines Tages drückte ich wieder einmal die zähflüssige Masse aus der Shampooflasche und ließ sie in einem dünnen Faden auf meinen Handteller fließen. Plötzlich schoss der Strahl in weitem Bogen von der Hand weg, obwohl es schien, dass er sich bereits mit dem entstandenen kleinen Haufen vereinigt hatte.

Zuvor hatte ich Shampoo für eine träge und zähe Substanz gehalten – ein solch agiles Verhalten hätte ich ihr nie zugetraut. Und doch lässt sich das Phänomen mit vielen Shampoos und flüssigen Seifen reproduzieren. Sorgen wir zuerst dafür, dass wir es in Ruhe beobachten können: Wir nehmen eine große Schale mit ebenem Boden und fixieren eine Spritze mit Shampoo etwa 20 Zen-

timeter darüber. Zu Beginn lässt das Haarwaschmittel ähnlich wie andere zähe Substanzen, Honig etwa oder Sirup, einen kleinen Flüssigkeits-»Berg« entstehen. Trifft der Strahl nicht genau die Spitze des Bergs, sondern seine Flanken, kommt es vor, dass er einen mehr oder weniger großen Sprung zur Seite macht und sich dabei sogar zu enormen Höhen aufzusteilen vermag. Offenbar bildet sich durch die Wucht des auftreffenden Strahls zunächst eine kleine Mulde in der vergleichsweise »festen« Substanz des ruhenden Shampoos.

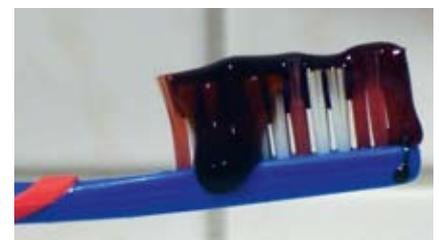
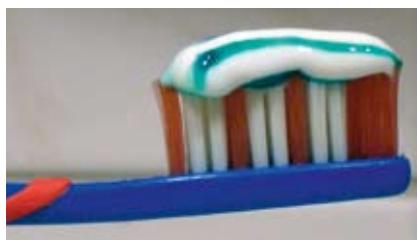
Mit dem fallenden Shampoo geht indessen Seltsames vor sich: Es lässt sich von den Muldenwänden umlenken und schießt als Flüssigkeitsjet scheinbar mühelos wieder in die Höhe. Dieser weist umso steiler nach oben, je tiefer die Mulde ist. Das Ergebnis erinnert an die unerwarteten Wasserfontänen beim Geschirrspülen, wenn ein starker Strahl aus dem Wasserhahn zufällig auf einen flachen Löffel oder auch in eine tiefe Kelle trifft.

Die Lebensdauer des Shampoojets ist jedoch nur kurz. Denn der viskose Haufen und damit die Rampe, von welcher der Jet abhebt, läuft binnen weniger Sekunden auseinander. Doch kaum ist der Jet unterbrochen, lässt das von oben nachfließende Shampoo einen neuen Haufen anwachsen, der wiederum als Abschussrampe fungieren kann, und so weiter.

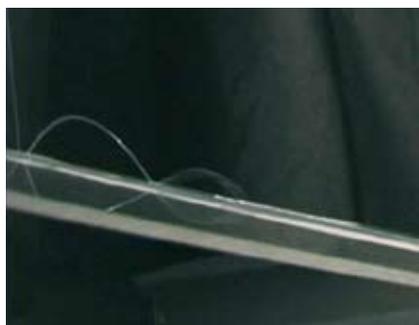
Ein genauer Blick zeigt, dass der Shampoostrahl beim Gang durch die Mulde dicker wird (oben). Weil er keine Substanz verloren hat, kann das nur bedeuten, dass er an Geschwindigkeit eingebüßt hat: Offenbar gibt er einen Teil seiner Bewegungsenergie als Reibungsenergie an die Muldenwand ab. Diese so genannte Energiedissipation ist auch der Grund dafür, dass Jets erst ab einer bestimmten Fallhöhe auftreten. Ist die Höhe geringer, wird die Bewegungsenergie vollständig dissipiert – für einen Jet bleibt dann nichts übrig.

Aus diesem Sachverhalt könnte man umgekehrt schließen, dass die Shampoojets umso höher werden, je größer die Höhe ist, aus der die Flüssigkeit fällt. Doch weil mit der Fallhöhe die Bewegungsenergie des Strahls zunimmt, vertieft er die Mulde entsprechend. Damit

Auf der Bürste sollte Zahnpasta fest sein (links), im Mund jedoch eher sirupartig. Um beide Anforderungen zu erfüllen, muss die Pasta im Zuge des Geschehens ihre Viskosität ändern. Sonst würde sie bereits auf der Bürste verlaufen (rechts).



Gießt man Haarshampoo in eine flache Schale, wächst dort zunächst ein Flüssigkeitsberg. Erfährt nachfließendes Shampoo an dessen Flanken Scherkräfte, ändert es seine Viskosität. Dadurch kann es sich eine Mulde schaffen, aus der es als Flüssigkeitsjet emporschießt (links). Auf einer schiefen Ebene führt dies zu regelrechten Jetkaskaden (rechts). Kurzvideos zum Kaye-effekt auf www.spektrum.de/youtube.



ALLE FOTOS: STEFANIE STOCKMANN, INSTITUT FÜR DIDAKTIK DER PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNSTER

wächst aber auch die dissipierte Energie, denn schließlich verlängert sich die Strecke, entlang welcher der Strahl in Kontakt mit der Muldenwand tritt. Die Dissipation nimmt dabei offensichtlich schneller zu als die Bewegungsenergie. Es gehört zu den Grundprinzipien unserer physikalischen Welt, dass bremsende Kräfte immer mit höherer Potenz als beschleunigende Kräfte wachsen – sonst würden die Dinge stets weiter beschleunigt und kämen nie zur Ruhe. Aus diesem Grund kann der Jet eine (von den Umständen abhängige) maximale Höhe nicht überschreiten.

Ganze Kaskaden von Jetbögen

Über kurz oder lang, so zeigen die Beobachtungen ebenfalls, kommt der immer steiler aus der Mulde herausschießende Jet dem fallenden Flüssigkeitsstrahl ins Gehege. Das kann man aber verhindern. Neigt man die flache Unterlage und damit die Oberfläche des – wegen seiner großen Viskosität nur langsam herabrutschenden – Shampoos, verkleinert sich der Abschusswinkel gegenüber der Horizontalen. Weil der Jet nun mehr zur Seite als in die Höhe schießt und auch flacher wieder auf der Flüssigkeit auftrifft, entsteht eine entsprechend flachere Mulde, so dass die Energie zu einem weiteren Start ausreicht. Im günstigsten Fall entstehen ganze Kaskaden von Jetbögen schnell abnehmender Höhe (Fotos oben).

Beim Auftreffen auf einem Shampoohaufen, der auf ebener Fläche ruht, ist es der Zufall, der die Flugrichtung der Jets bestimmt. Bei geneigter Schale ist die Symmetrie jedoch gebrochen. Die entstehende Mulde ist nun asym-

metrisch und besitzt auf ihrer »talwärts« gerichteten Seite geringere Höhe. Auf dieser Seite ist daher auch die Kontaktstrecke zwischen Flüssigkeitsstrahl und Wand minimal und damit die dissipierte Energie. Genau dies strebt die Natur an: die Rate zu minimieren, mit der Energie dissipiert wird. Und genau darum bewegen sich die Jets nun vorzugsweise talwärts.

Diese wie ein schönes Spiel erscheinenden Vorgänge sind auch Gegenstand ernsthafter physikalischer Forschung. Der britische Physiker Arthur Kaye war 1963 der Erste, der das nun nach ihm als Kayeeffekt benannte Phänomen beschrieb. 2006 klärte dann ein Team um Michel Versluis von der niederländischen Universität Twente die physikalischen Zusammenhänge genau auf.

Ursache des Kayeeffekts ist eine merkwürdige Eigenschaft des Shampoos: Anders als bei newtonschen Flüssigkeiten, die konstante Viskosität besitzen, ändert sich die Viskosität nicht-newtonscher Flüssigkeiten, sobald sie geschert werden, also eine seitliche Kraftwirkung erfahren. Im Fall des Shampoos wird die Viskosität durch die Scherung verringert. Die Flanken des Flüssigkeitsbergs verflüssigen den senkrecht fallenden Shampoostrahl also gewissermaßen, indem sie ihn seitlich beschleunigen. Der Haufen und damit die Muldenwandung behalten hingegen ihre »Härte«, sprich Viskosität, und lenken den flüssigen Strahl darum wirkungsvoll ab.

Dieses scherverdünnende Verhalten besitzen viele synthetische Flüssigkeiten: Sie sollen hohe Viskosität besitzen, solange man sie in Ruhe lässt, aber bei

Scherung niedrige Viskosität annehmen. So soll Shampoo nicht von der Hand laufen, bevor man es in die Haare transportiert hat – sich aber dort leicht verteilen lassen. Farben sollen zunächst auf dem Pinsel haften – sich dann aber leicht auf der Wand verstreichen lassen (und trotzdem nicht gleich wieder herunterlaufen). Ähnliches gilt für Zahnpasta: Auf der Bürste soll sie fest sein, geschert durch die Zähne dann eher sirupartig.

Natürlich kann man all dies schlicht mit Blick auf die Nützlichkeit des Phänomens betrachten. Oder aber man sieht es in einem umfassenderen Kontext wie der Strömungsforscher Theodor Schwenk (1910–1986), der »das Flüssige« erlebte »als das Universelle, das noch nicht festgelegte Element, das aber fähig ist, sich von außen bestimmen zu lassen, als das Unbestimmte, aber Bestimmbare, als das »sensible Chaos«.

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting

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

QUELLEN

Kaye, A.: A Bouncing Liquid Stream. In: Nature 197, S. 1001–1002, 1963

Versluis, M. et al.: Leaping Shampoo and the Stable Kaye Effect. In: Journal of Statistical Mechanics, S. 07007, 20. Juli 2006

GEZEITEN

Himmelsmechanik mit Reibung

In ferner Zukunft werden Erde und Mond eine gebundene Rotation vollführen. Dann wenden beide einander stets dieselbe Seite zu.

VON NORBERT TREITZ

Als die Königlich-Preußische Akademie der Wissenschaften 1754 der wissenschaftlichen Öffentlichkeit die Preisfrage unterbreitete, ob es im Sonnensystem langfristige Änderungen gebe, stellte sie damit zugleich das herrschende Weltbild an einem entscheidenden Punkt in Frage. Die korrekte Antwort auf diese Preisfrage (Kasten unten) kam ausgerechnet von einem jungen Physiker, der später als Philosoph mit Zuständigkeit für Weltbilder im Allgemeinen Weltruhm erlangte: Immanuel Kant (1724–1804).

Bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts galt die Welt im Großen als eine Art Uhrwerk, in dem sich die immer glei-

chen Bewegungen präzise wiederholen. In der Tat sind Sonnen- und Mondfinsternisse über Jahrtausende hinweg vorwärts und rückwärts in der Zeit berechenbar. Das gelingt aber nur deshalb, weil die Reibung *zwischen* astronomischen Objekten keine Rolle spielt.

Wohl aber im Inneren derselben, wie Kant herausfand. Da die Schwerkraft entfernungsabhängig ist, zieht der Mond an der ihm zugewandten Seite der Erde etwas stärker als im Mittel und hebt daher Kontinente, Meeresböden und Wasser einige Dezimeter an. Es bildet sich ein so genannter Flutberg. Das geschieht auch auf der dem Mond abgewandten Seite der Erde; denn hier ist die

Anziehungskraft des Mondes etwas zu schwach, um die Erdmaterie exakt auf die Kreisbahn um den gemeinsamen Schwerpunkt des Erde-Mond-Systems zu zwingen. Die Schwerkraft der Erde selbst sowie elastische Kräfte in ihren festen Komponenten verhindern, dass deren mondabgewandte Teile einfach tangential davonfliegen – nicht aber, dass die Oberfläche sich um ein paar Dezimeter anhebt. Viele Bücher nennen das dann »Zentrifugalkraft«, obwohl das bestenfalls in einem mitrotierenden Bezugssystem formal richtig ist.

Die festen und flüssigen Bestandteile der Erde setzen der Deformation durch die Gezeiten Reibungswiderstand entgegen. Dadurch werden sie ein bisschen erwärmt, und die zugehörige Energie geht der Bewegung von Mond und Erde verloren. Der Drehimpuls des Systems bleibt dagegen erhalten. Damit am Ende sowohl die Energie- als auch die Drehimpulsbilanz stimmt, müssen die Beteiligten von jeder Erhaltungsgröße eine gewisse Menge untereinander austauschen. Das Ergebnis ist auf den ersten Blick paradox: Dadurch, dass die Erde Bewegungsenergie an den Mond abgibt, wird nicht nur ihre Drehung langsamer, sondern auch sein Umlauf.

Zweierlei Drehbewegung

Gehen wir von der vereinfachenden, aber nicht allzu realitätsfernen Annahme aus, dass Erde und Mond auf Kreisbahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt laufen. Es ist hilfreich, ihre Bewegung gedanklich in zwei Anteile zu zerlegen: eine Eigendrehung (gegen den Rest der Welt) und eine dre-

Immanuel Kant zur Preisfrage der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften

»... Es ist wahr, wenn man die Langsamkeit dieser Bewegung mit der Schnelligkeit der Erde, die Geringschätzung der Quantität des Gewässers mit der Größe dieser Kugel, und die Leichtigkeit der ersten zu der Schwere der letzteren zusammenhält, so könnte es scheinen,



PUBLIC DOMAIN

dass ihre Wirkung für nichts könne gehalten werden. Wenn man aber dagegen erwägt, dass dieser Antrieb unablässig ist, von jeher gedauert hat und immer währen wird, dass die Drehung der Erde eine freie Bewegung ist, in welcher die geringste Quantität, die ihr benommen wird, ohne Ersetzung verloren bleibt, dagegen die verminderte Ursache unaufhörlich in gleicher Stärke wirksam bleibt, so wäre es ein einem Philosophen sehr unanständiges Vorurtheil, eine geringe Wirkung für nichtswürdig zu erklären, die durch eine beständige Summirung dennoch auch die grösste Quantität endlich erschöpfen muss.«



DREAMSTIME / PATRICK ANGERVALE



DREAMSTIME / SCP98

hungerfreie Kreisbewegung. Letztere ist so etwas wie die Bewegung Ihrer Hand, wenn Sie kreisförmig eine Tafel wischen und Ihre Finger dabei ständig nach oben zeigen. Jeder Punkt der Hand läuft auf einem gleich großen Kreis, aber mit einem eigenen Mittelpunkt (Bild S. 52). Würden Erde und Mond auf diese Weise umeinanderlaufen, müsste auf alle Punkte des Mondes eine gleich große Zentripetalbeschleunigung wirken, desgleichen auf alle Punkte der Erde; das ist aber nicht der Fall. Deswegen kommen die Gezeiten zu Stande.

Nun dreht sich der Mond mit derselben Winkelgeschwindigkeit um sich selbst, mit der er um die Erde läuft: Die (siderische) Umlaufzeit von Mond und Erde um ihren gemeinsamen Schwerpunkt ist gleich der Drehungsperiode des Mondes. Dieser wendet der Erde also stets dieselbe Seite zu, trägt daher seine Flutberge stets an den gleichen Stellen und kann ohne innere Reibung wie ein starrer Körper rotieren.

Das stimmt nicht ganz genau. Von der Erde aus gesehen scheint der Mond ein bisschen zu wackeln (die »Libration«), so dass wir auf die Dauer ungefähr 59 Prozent der Mondoberfläche sehen können. Aber davon abgesehen wusste man vom Aussehen der »Rückseite« überhaupt nichts, bevor die sowjetische Raumsonde Lunik 3 sie 1959 erstmals fotografierte.

Die Gleichheit der beiden Perioden könnte Zufall sein, so wie die Tatsache, dass Sonne und Mond uns Erdlingen unter fast gleichen Seh winkeln erscheinen. Sie ist aber eher zwangsläufig. Was der Mond bereits erreicht hat, kommt

auf die Erde auch noch zu, wenn auch erst im Lauf einiger Jahrtausende.

Noch vollführt sie allerdings erheblich mehr Pirouetten pro Zeiteinheit als Mondumläufe: Ein Tag ist deutlich kürzer als ein Monat. Sie rotiert sozusagen unter ihren Flutbergen hinweg und verliert dabei Energie durch Reibung, ähnlich wie ein Autoreifen am fahrenden Wagen dauernd verformt wird, während seine geometrische Gestalt in jedem Augenblick unten abgeflacht ist.

Ohne Meer und ohne GPS würden wir die Flutberge nicht bemerken, aber da das Meer in Trichtermündungen großer Flüsse hinein- und wieder zurückströmt, entsteht dort ein »Tidenhub« von mehreren Metern. Rund um die Nordsee ist das eindrucksvoll zu sehen, und das Wattenmeer ist abwechselnd Land und Teil des Meers. Knapp alle 25 Stunden überziehen je zwei Flutberge und zwei Ebbegürtel die Erdoberfläche. Das berechnet man bequem über die Differenz der Winkelgeschwindigkeiten, und diese erhält man aus den Umlaufzeiten: Ein Sterntag, das heißt eine Erddrehung relativ nicht zur Sonne, sondern zum Rest der Welt, dauert 86 164 Sekunden und ein siderischer Monat, also der Lauf des Mondes um die Erde, 27,32 Tage.

Außer dem Mond verursacht auch die Sonne auf der Erde Gezeiten, allerdings nur knapp halb so starke. Die Sonne zieht mit viel größerer Kraft an der Erde als der Mond, aber am fernen Ende der Erde nur geringfügig weniger als am nahen. Steht sie in etwa gleicher oder entgegengesetzter Richtung wie der Mond zur Erde, verstärkt sie die Gezei-

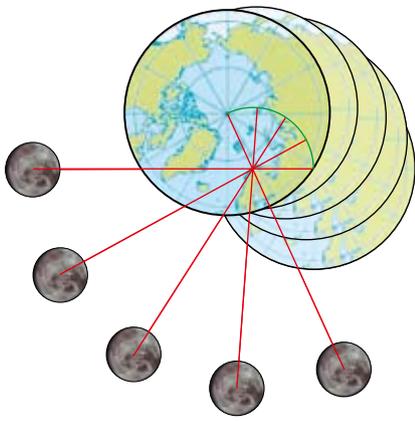
Da die Trichterform des Ärmelkanals die Gezeiteneffekte verstärkt, wird der Mont St. Michel vor der Küste der Normandie zweimal täglich zu einer Insel.

ten (»Springflut«); steht sie im rechten Winkel, so schwächen die von ihr verursachten Ebbegürtel die Flutberge vom Mond (»Nippflut«). Kommt zu einer Springflut noch schlechtes Wetter hinzu (»Sturmflut«), können katastrophale Überschwemmungen die Folge sein – so 1953 im Rheindelta, das danach durch gigantische Bauwerke gesichert wurde.

Im Prinzip verursacht die Sonne auch auf dem Mond Flutberge, aber viel schwächere als die Erde. Da der Mond sich nur mit einem Gezeitenverursacher synchronisieren kann, wählt er den stärkeren, und das ist die Erde. Also beschränkt sich die Sonne darauf, den Mond ein bisschen durchzuwalken (und dabei zu erwärmen), ohne ihn – was die Rotation angeht – nachhaltig an sich binden zu können.

Bilanz der Erhaltungsgrößen

Außer der Energie gibt es noch eine andere Erhaltungsgröße, nämlich den Drehimpuls (Kasten S. 52), und anders als die Energie kann der sich nicht in Form von Wärme verstecken. Wenn durch die Gezeitenreibung die Winkelgeschwindigkeit der Erddrehung abnimmt, muss die Erde Drehimpuls exportieren. Da die Flutberge etwas mit dem Mond zu tun haben, liegt der Verdacht nahe, dass er der Empfänger des Drehimpulses ist und dabei vielleicht auch etwas Energie abbekommt.



So würde sich unser Planet ohne Eigenrotation um den Erde-Mond-Schwerpunkt bewegen: Alle Punkte der Erde laufen auf gleich großen Kreisen mit der gleichen Zentripetalbeschleunigung.

Nun sind gerade bei diesen Größen die Besitzverhältnisse notorisch unklar, wie ich im August 2004 in dieser Rubrik erörtert habe. Bei einem Apfel, der vom Baum fällt, sprechen unsere Schulbücher von »seiner« potenziellen Energie, die er dann zum Teil in kinetische umtauscht. Die in einem gespannten Flitzbogen gespeicherte Energie würde man dagegen kaum als »potenzielle Energie des Pfeils« bezeichnen, obgleich hinterher der Pfeil als Inhaber der kinetischen Energie gilt. Einerlei – nach dieser Sprachregelung gewinnt der Mond potenzielle Energie hinzu.

Im Einzelnen geschieht Folgendes: Die Erde verliert Energie der Drehbewegung. Diese geht zu einem Teil in die Erwärmung der Erde, zum anderen in das Erde-Mond-Schwerefeld. Der Drehimpuls, welcher der Erde verloren geht, wandert nämlich in das Erde-Mond-System. Er kann jedoch nicht einfach nur dessen Umlauf beschleunigen; das

verbietet Keplers III. Gesetz, das die Entfernung eines Trabanten von seinem Zentralkörper und seine Umlaufzeit um denselben in Beziehung setzt (Kasten rechts). Vielmehr muss der »Hebelarm«, sprich die Entfernung zwischen Erde und Mond, länger werden. Wegen Kepler III verringern sich dabei sowohl die Bahn- als auch die Winkelgeschwindigkeit beider Beteiligten. Um den Drehimpuls von der Eigenrotation der Erde aufzunehmen, muss der Mond also noch etwas an eigener Bewegungsenergie »draufzahlen«. Alle Energieanteile zusammen – mit Ausnahme der Reibungswärme – wandern in das Schwerefeld von Erde und Mond.

Die Eigenrotation des Letzteren folgt dieser Verlangsamung der Umlaufgeschwindigkeit, so dass die Rotation »gebunden« bleibt, und zwar als Folge der vergleichsweise winzigen Gezeitenreibung im Inneren des Mondes.

Drei Zentimeter pro Jahr

Die ferne Zukunft des Erde-Mond-Systems ist dank Kepler III sogar mit Papier und Bleistift berechenbar. Da die Mondbahn trotz ihrer langen Geschichte immer noch ziemlich kreisförmig aussieht, nehmen wir vereinfachend an, dass zwei Objekte der Massen M und m (Erde und Mond) auf genauen Kreisbahnen um ihren gemeinsamen Schwerpunkt laufen. Ihre Bahnradien seien r und R mit $r/R = m/M$, der Abstand ihrer Mittelpunkte voneinander $R+r$. Die Schwerkraft zwischen beiden beträgt dann $mMG/(R+r)^2$ mit der Gravitationskonstante G . Sie dient beiden Objekten als Zentripetalkraft $mR\omega^2 = Mr\omega^2$ mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi/T$ und der Umlaufperiode T . Für T und R gilt nach Kepler III der Zusam-

menhang $R^3/T^2 = MG((M+m)/M)^2/(4\pi^2)$. In Büchern finden wir meistens den Spezialfall für m klein gegen M .

Wir nehmen nun die veröffentlichten Daten für die Massen von Erde und Mond sowie für ihre (siderische) Umlaufzeit und stellen fest, dass diese zu den Werten für den Mondbahnradius $R = 3,80 \cdot 10^8$ m und den Abstand der Mittelpunkte beider $R+r = 3,844 \cdot 10^8$ m passen. Hier und im Folgenden vereinfachen wir die kreisnahe Ellipsenbahn zur Kreisbahn, was auf unsere Abschätzungen keinen Einfluss hat.

Durch Messungen mit dem Laserinterferometer wissen wir, dass sich der Mond um ungefähr 3 Zentimeter pro Jahr von der Erde entfernt. Die relative Vergrößerung des Mondbahnradius ist damit $x = dR/R = 3 \text{ cm}/(3,80 \cdot 10^8 \text{ m}) = 7,89 \cdot 10^{-11}$, also ein knappes Zehnmilliardstel pro Jahr. Daraus schätzen wir nun ab, wie stark sich dazu passend andere Größen ändern. Dabei muss die Energie des Erde-Mond-Systems nicht gleich bleiben – denn die Erde kann ja liefern und tut es auch, aus ihrer Eigenrotation –, wohl aber der Drehimpuls.

Im Folgenden werden wir eine mathematische Näherungsformel ausgiebig nutzen, die an der Schwelle zur Differenzialrechnung steht. Da x klein gegen 1 ist, dürfen wir bei verschiedenen Potenzen von $(1+x)$ alle Potenzen von x bis auf die erste vernachlässigen: $(1+x)^2 \approx 1+2x$ und so weiter. So finden wir, dass ein Kehrwert um etwa 1 Prozent abnimmt, wenn der Ausgangswert um 1 Prozent zunimmt, oder dass die Fläche eines Quadrats um 2 Prozent wächst, wenn die Kanten um 1 Prozent länger werden. Ein bekanntes Beispiel ist das Verhältnis 3 aus dem kubischen und dem linearen Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturänderungen.

Auf den Mond mit den Bahnradien R und $R+dR$ und die zugehörigen Umlaufzeiten T und $T+dT$ kann man nun Kepler III so anwenden: Aus $((R+dR)/R)^3 = ((T+dT)/T)^2$ ergibt sich für dR klein gegen R der extrem einfache Zusammenhang $dT/T = (3/2) dR/R$ (»logarithmische Ableitung«). Wenn also der Bahnradius um 1 Prozent zunimmt, legt die Umlaufzeit 1,5 Prozent zu.

Die dritte mechanische Erhaltungsgröße

Der Drehimpuls eines Massenpunkts ist definiert als das Kreuzprodukt aus der Entfernung von der Drehachse und dem gewöhnlichen Impuls dieses Punkts.

Schiebt man also eine rotierende Masse bei unverändertem Impuls nach auswärts, so erhöht sich ihr Drehimpuls. Gleichzeitig verlängert sich die Umlaufzeit, da die Bahngeschwindigkeit gleich bleibt und die Bahn selbst länger wird. Der größere Drehimpuls geht also mit einer verringerten Winkelgeschwindigkeit einher.

Keplers III. Gesetz

Johannes Kepler hat es 1619 in seinem zweiten großen Buch »Harmonices Mundi« mehr versteckt als veröffentlicht: Die dritten Potenzen der Bahnradien verhalten sich wie die Quadrate der Umlaufzeiten, wenn sie um den gleichen Stern kreisen (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 11/2006, S. 104). Bei Ellipsenbahnen ist statt des Bahnradius der Mittelwert aus kleinstem und größtem Abstand vom Mittelpunkt zu nehmen; das ist die große Halbachse.

Mit unserem Wert für x errechnet sich daraus, dass die siderische Umlaufzeit des Monds von 27,32 Tagen jedes Jahr um 28 Millisekunden länger wird.

Wie verändert sich dann die Geschwindigkeit? Der Weg (Umfang) wird im Verhältnis $(1+x)$ länger, die (Umlauf-)Zeit mit $(1+3x/2)$. Dann wird die Geschwindigkeit (rund 1 Kilometer pro Sekunde) im Verhältnis $(1-x/2)$ kleiner und die Bewegungsenergie (quadratisch mit v , mehr müssen wir hier nicht wissen!) mit $(1-x)$. Von der Bewegungsenergie des Monds von $3,7 \cdot 10^{28}$ Joule gehen also in jedem Jahr $2,9 \cdot 10^{18}$ Joule weg. Mit ihr zusammen wandert eine etwa gleich große Menge aus der Erddrehung in das Schwerfeld, wo sie den Mond um 3 Zentimeter anhebt.

Da wir die Menge der Reibungsenergie nicht so einfach bestimmen können, machen wir mit dem Drehimpuls des Monds weiter – dem Bahndrehimpuls, denn den Anteil der Eigenrotation können wir vernachlässigen. Der Formel $L = mRv = mR^2 2\pi/T$ entnehmen wir, dass er mit $(1+2x)(1-3x/2) \approx (1+x/2)$ anwächst. Er nimmt also um das $x/2$ -Fache seines Werts von $2,9 \cdot 10^{34}$ Joulesekunden zu, das sind $1,04 \cdot 10^{24}$ Joulesekunden. Genau diese Menge gibt die Erde aus ihrer Rotation ab.

Nun müssen wir das Trägheitsmoment Θ der Erde wissen. Für homogene Kugeln vom Radius R_0 gilt die Formel $\Theta = (2/5)MR_0^2$. Die Erde ist allerdings innen wesentlich dichter als außen; wir merken uns dazu den Korrekturfaktor 0,8 und finden als Trägheitsmoment $7,8 \cdot 10^{37}$ kg m².

Wenn einem Objekt dieses Trägheitsmoments in einem Jahr $1,04 \cdot 10^{24}$ Joulesekunden an Drehimpuls abhandkommen, so nimmt seine Winkel-

geschwindigkeit um $1,33 \cdot 10^{-14}$ pro Sekunde ab. Da der aktuelle Wert $2\pi/(86\,164 \text{ Sekunden})$ ist, beträgt die relative jährliche Abnahme $1,82 \cdot 10^{-10}$, die relative jährliche Zunahme der Dauer des Sterntags ebenfalls, die absolute Tagesverlängerung also 16 Mikrosekunden pro Jahr.

Der Monat wird länger, dauert aber weniger Sekunden

Interessant ist nun, dass der Faktor $1,82 \cdot 10^{-10}$ deutlich größer ist als die relative Verlängerung $0,17 \cdot 10^{-10}$ der Umlaufdauer des Monds. Wenn nämlich die Sterntage permanent länger werden, so geht es den Sonnentagen kaum anders (da die Dauer des jährlichen Umlaufs ausgesprochen stabil ist), und die Sekunde wuchs gemäß der bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts gültigen Definition (als $1/86400$ des mittleren Sonnentags) mit. Misst man nun die zunehmende Länge des Monats in solchen Sekunden, so geht es einem wie jemandem, der das Wachstum eines Kindes dokumentiert, indem er dessen Größe an einem Baum markiert. Wenn der Baum schneller wächst als das Kind, kann er zu dem falschen Messergebnis kommen, das Kind schrumpfe. Die Monate nehmen zwar in der Länge zu, die Tage und Sekunden aber noch wesentlich schneller. So kann man auf die unzutreffende Idee kommen, die Monate würden kürzer.

Natürlich gelten unsere Abschätzungen nur für die gegenwärtigen Jahrtausende. Nach einigen Milliarden Jahren gerät der Prozess in ein Gleichgewicht: Tag und Monat treffen sich bei einer gemeinsamen Länge. Die ist erstaunlich einfach zu berechnen. Man braucht nur die Summe $L = 3,48 \cdot 10^{34}$ Joulesekunden

der Drehimpulse, die ja erhalten bleibt und im Wesentlichen auf Erddrehung und Mondumlauf beruht, und die beiden Massen von Erde und Mond. Wir nehmen nun an, dass im Endzustand nur noch der Bahndrehimpuls des Monds von Bedeutung bleibt. Dann ist $L = m R_\infty^2 2\pi / T_\infty$ mit neuen, sozusagen endgültigen Werten mit Index ∞ . Lösen wir das nach T_∞ auf und setzen es in Kepler III ein, so finden wir etwas vereinfacht $R_\infty = L^2 / (MGm^2) = 5,5 \cdot 10^8$ Meter, also das 1,4-Fache des heutigen Mondbahnradius. Die Monatslänge ändert sich dann auf das $1,4^{3/2}$ -Fache des jetzigen, also auf 46 Tage. Dann dreht sich die Erde in 46 (heutigen) Tagen einmal um sich selbst, der Mond steht als Synchronsatellit immer an der gleichen Stelle (oder pendelt ein bisschen), und wenn man auf der abgewandten Erdhälfte wohnt, sieht man ihn gar nicht. Vielleicht sind die Grundstücke auf dieser Seite der Erde dann ja billiger. Auf dem Mond hat man (theoretisch) heute schon die Auswahl, ob man mit oder ohne Erdblick wohnen möchte. Der Sonnentag wird sogar rund 53 jetzige Tage dauern, was sich wieder aus der Differenz der Winkelgeschwindigkeiten von Erddrehung und Erdumlauf berechnen lässt. \approx

DER AUTOR



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

QUELLEN

Kant, I.: Untersuchung der Frage, ob die Erde in ihrer Umdrehung um die Achse, wodurch sie die Abwechslung des Tages und der Nacht hervorbringt, einige Veränderung seit den ersten Zeiten ihres Ursprungs erlitten habe und woraus man sich ihrer versichern könne, welche von der Königl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin zum Preise für das jetztlaufende Jahr aufgegeben worden. 1754. Online unter <http://www.korpora.org/kant/aa01/183.html>

Treitz, N.: Kant und die Gezeitenreibung. Kapitel 2.2.8. In: Brücke zur Physik. Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 3. Auflage 2003

Das Wesen der Natur

Was ist Realität? Warum läuft Zeit immer nur in eine Richtung?

Was bedeutet Kausalität? Antworten auf diese Fragen der modernen Naturphilosophie liefert die Quantenphysik.

Von Michael Esfeld

Die Naturphilosophie versucht, die natürliche Welt als Ganzes zu ergründen. Ihre Wurzeln hat sie bereits in der griechischen Antike bei den Vorsokratikern. Seit dem Beginn der Neuzeit stützen sich Naturphilosophen auf die empirischen Naturwissenschaften – vor allem auf die Physik.

Heute gelten folgende Fragen als zentral für die Naturphilosophie: Was sind Objekte? Was sind Raum und Zeit? Was bestimmt die Richtung des Zeitpfeils? Was sind die Grundlagen von Kausalität und Naturgesetzen? Die Quantenphysik wirft eine Reihe von traditionellen philosophischen Antworten auf diese Fragen über den Haufen.

Im Alltag wie auch in der klassischen Physik geht man von einzelnen Objekten aus. Diese »Teilchen« sollen stets einen klar definierten Ort einnehmen und eine eindeutig bestimmte Bahn in Raum und Zeit haben – sie sind »wohlbestimmt«.

Die Quantenphysik, die sich in erster Linie mit dem Mikrokosmos beschäftigt, erlaubt hingegen Zustände von Objekten, in denen diese keinen »definiten« Ort und damit auch keine solche Bahn in Raum und Zeit haben. Allgemein gesagt sind wohlbestimmte numerische Werte von Eigenschaften in der Quantenphysik die Ausnahme. Stattdessen besteht der Zustand eines Quantenobjekts in der Regel in einer Überlagerung oder Superposition aller möglichen Werte der betreffenden Eigenschaften. Ferner sind die Werte beziehungsweise Werteverteilungen gewisser Eigenschaften miteinander korreliert, das heißt, sie sind nicht unabhängig voneinander bestimmbar. Das berühmteste Beispiel bilden Ort und Geschwindigkeit (genauer: der Impuls) eines Quantenobjekts: Je mehr sich die Werteverteilung des Orts einem definiten numerischen Wert annähert, desto breiter streuen die Werte seiner Geschwindigkeit. Das ist eine Konsequenz von Heisenbergs berühmter Unbestimmtheitsrelation.

Doch damit nicht genug: Nicht nur sind manche Eigenschaften eines Quantenobjekts voneinander abhängig. Vielmehr ist es, wenn man ein Quantensystem betrachtet, das aus mehreren Teilobjekten besteht, in der Regel so, dass den Teilobjekten gar nicht je für sich Zustände zukommen. Dieser Sachverhalt wurde erstmals von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen 1935 in einem Gedankenexperiment aufgezeigt und wird heute als Verschränkung bezeichnet, von Einstein auch »spukhafte Fernwirkung« genannt.

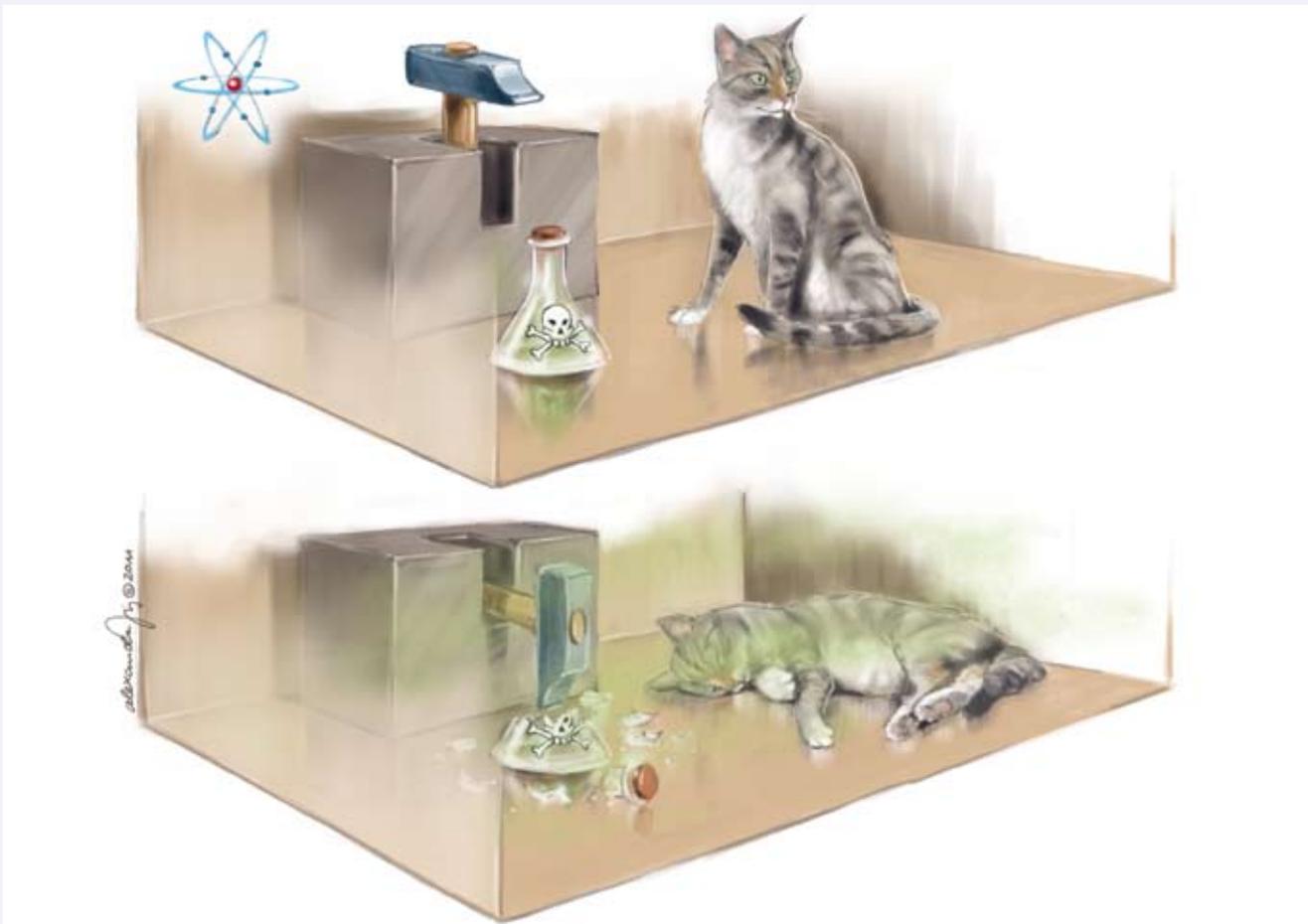
Betrachten wir das einfachste Beispiel, die Verschränkung der Spinzustände zweier Elektronen (oder Photonen), die zusammen von einer Quelle ausgesandt werden und sich dann in entgegengesetzte Richtungen voneinander entfernen. Der Spin mikrophysikalischer Objekte ist eine Art Eigendrehimpuls. Der Spin der Elektronen kann prinzipiell nur zwei Werte annehmen, »Spin plus« und »Spin minus«. Im verschränkten System der zwei Elektronen hat jedoch keines der beiden

SPEKTRUM-SERIE

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

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

FOTOLIA / DAVISALES



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

Elektronen für sich einen bestimmten Spinwert. Der Gesamtzustand des Zwei-Elektronen-Systems ist eine Superposition der Korrelationen »erstes Objekt Spin plus und zweites Objekt Spin minus« mit »erstes Objekt Spin minus und zweites Objekt Spin plus« in jeder Richtung.

Daraus folgt: Sobald eines der beiden Objekte einen definiten Wert des Spins in einer Raumrichtung annimmt – etwa bei einer Messung, deren Ergebnis entweder »Spin plus« oder »Spin minus« ergibt –, erhält das andere Objekt augenblicklich den entgegengesetzten Spinwert in dieser Raumrichtung, und zwar unabhängig davon, wie weit die beiden Objekte voneinander entfernt sind. Diese inzwischen vielfach gemessenen Beziehungen sind als Einstein-Podolsky-Rosen- oder EPR-Korrelationen bekannt.

Ein Theorem mit großen Auswirkungen

Zustandsverschränkungen sind nicht auf zwei Teilchen beschränkt, es können im Prinzip beliebig viele Objekte beteiligt sein. Sie betreffen alle Eigenschaften, deren Werte oder Werteverteilungen sich in der Zeit ändern. Sie sind vor allem unabhängig vom räumlichen oder raumzeitlichen Abstand der betreffenden Objekte. Unter geeigneten Bedingungen könnte sich die Verschränkung selbst über astronomische Distanzen erstrecken.

Superpositionen und Zustandsverschränkungen haben nichts mit einem Mangel an Wissen unsererseits zu tun. In

Lebendig oder tot? In der Quantenphysik ist Realität vieldeutig, beide Zustände sind überlagert – bis zum Zeitpunkt der Messung.

dem oben genannten Beispiel ist es nicht so, dass wir den Wert des Spins von jedem der beiden Quantenobjekte nicht kennen und deshalb von einer Zustandsverschränkung sprechen, sondern solche Spinwerte gibt es objektiv gar nicht.

Das zeigt das berühmte Theorem von John Bell. Der nordirische Physiker konnte 1964 folgende fundamentale Aussage beweisen: Wenn die Eigenschaften von Quantenobjekten

AUF EINEN BLICK

FUNDAMENTALFRAGEN DER WIRKLICHKEIT

1 Naturphilosophie versucht, die **Grundlagen der Natur** zu klären: Was Objekte, Raum und Zeit, Kausalität, Zeitrichtung und Naturgesetze sind.

2 Die Quantenphysik erfordert es, die klassische atomistische Sicht der Natur durch eine **holistische Perspektive** zu ersetzen. Wie der Übergang von quantenmechanischen Superpositionen und Zustandsverschränkungen zu klassischen Eigenschaften genau abläuft, ist dabei eine offene Frage.

3 Karl Poppers Begriff der Propensität liefert eine Interpretation quantenmechanischer Wahrscheinlichkeiten als ein Maß für die Tendenz eines Objekts, bestimmte Wirkungen zu produzieren.

unabhängig voneinander bestimmte Werte hätten, dann könnte es nicht die Korrelationen geben, welche aus dem Formalismus der Quantenmechanik folgen. Mit anderen Worten, die Quantenmechanik wäre in diesem Fall schlicht und einfach falsch. Die Korrelationen, die die Quantenmechanik vorhersagt, wurden jedoch experimentell bestätigt. Daraus folgt: Wir müssen davon ausgehen, dass Superpositionen und Verschränkungen objektiv in der Natur bestehen.

Der experimentelle Nachweis dieser Korrelationen wurde erstmals 1982 durch den französischen Physiker Alain Aspect und seine Mitarbeiter erbracht. Die entsprechenden Experimente sind so aufgebaut, dass die Spinrichtung, die an jedem der beiden Objekte gemessen wird, erst dann festgelegt wird, wenn der Abstand zwischen beiden so groß ist, dass kein Signal, das sich maximal mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, den Messwert von dem einen Objekt an das andere übermitteln könnte; und dennoch sind, wie von der Quantentheorie vorausgesagt, die Messergebnisse miteinander korreliert.

Wir können diese Korrelationen jedoch nicht nutzen, um Signale mit Überlichtgeschwindigkeit zu senden, weil wir die Messergebnisse nicht kontrollieren können; insofern liegt kein experimenteller Widerspruch zur speziellen Relativitätstheorie vor. Dennoch widersprechen die Korrelationen der Grundannahme der speziellen Relativitätstheorie, nach der Ereignisse nur durch Faktoren bestimmt sind, die in deren so genanntem Vergangenheitslichtkegel liegen, also kausal abhängig sind. Insbesondere der amerikanische Philosoph Tim Maudlin von der Rutgers University (New Brunswick, US-Bundesstaat New Jersey) hat den Konflikt zwischen der Nichtlokalität der quantenmechanischen EPR-Korrelationen und den Lokalitätsbedingungen der speziellen Relativitätstheorie untersucht.

Wie diese Korrelationen zu verstehen sind, ist eine harte Nuss für Quantenphysiker ebenso wie für Naturphilosophen. Ein wichtiger Schlüssel zum Verständnis solcher Beziehungen ist die Suche nach der Antwort auf die Frage, was für eine Art von Objekten die Quantensysteme sind. Sobald die Zustände mehrerer Quantenobjekte der gleichen Art miteinander verschränkt sind, lassen sie sich durch nichts unterscheiden. Alle Elektronen beispielsweise haben die gleichen zustandsunabhängigen Eigenschaften wie Ladung oder Ruhemasse, so dass sie sich nicht durch solche Eigenschaften individualisieren ließen.

Was ihre zustandsabhängigen Eigenschaften betrifft – wie Ort, Impuls oder Spin in jeder Raumrichtung –, so gibt es im Fall von Verschränkungen gar keine solchen Eigenschaften, die man jedem der betroffenen Quantenobjekte für sich genommen zuschreiben könnte. Im Gegensatz zu den Objekten der klassischen Physik, die sich immer durch ihren Ort und damit durch ihre Bahn in Raum und Zeit voneinander trennen lassen, sind Quantensysteme folglich keine Objekte, die über eine »intrinsische Identität« verfügen: Bei Zustands-

verschränkungen unterscheiden sich die betroffenen Quantenobjekte durch nichts voneinander; man kann dementsprechend nicht ein einzelnes dieser Objekte kennzeichnen und es später wiedererkennen.

Im Fall der oben genannten Experimente ergibt es beispielsweise keinen Sinn zu fragen, ob Objekt 1 auf der linken oder der rechten Seite der experimentellen Anordnung gemessen wurde. Man steckt zwei Quantenobjekte hinein, und es kommen zwei Quantenobjekte heraus. Das ist alles, was man sagen kann. Diese Objekte besitzen keinerlei individuelle Identität.

Naturphilosophen sprechen hier von Strukturenrealismus statt von individuellen Objekten. Man kann eine physikalische Struktur als ein Netz konkreter physikalischer Relationen zwischen Objekten verstehen, wie zum Beispiel der Relationen der Zustandsverschränkung. Für diese Objekte ist es allein wesentlich, in solchen Relationen zu stehen, statt über eine intrinsische Identität zu verfügen. Deshalb stützt die Quantenphysik einen naturphilosophischen Holismus statt – wie die klassische Physik – einen naturphilosophischen Atomismus.

In der klassischen Mechanik ist jeder Prozess zeitlich umkehrbar. Jeder Prozess ist wie ein Film, der vorwärts oder auch rückwärts laufen könnte. Irreversibilität und damit die Auszeichnung einer Zeitrichtung wird gemeinhin mit makroskopischen Phänomenen in Verbindung gebracht. Das Leben beispielsweise ist ein Prozess, der von der Geburt hin zum Tod verläuft und nicht umgekehrt.

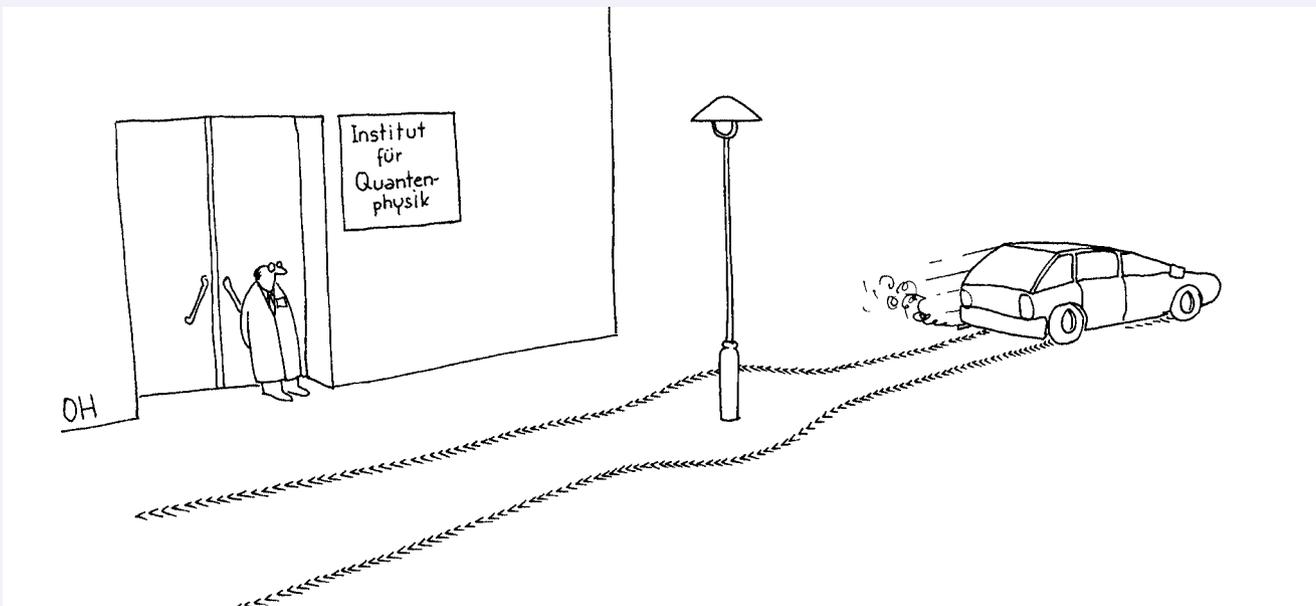
In der klassischen Physik tritt die Zeitrichtung explizit allein in der Thermodynamik auf: Die Entropie eines abgeschlossenen Systems bleibt gleich oder wächst, sie kann aber niemals abnehmen. Führt man die Thermodynamik auf die statistische Mechanik als fundamentalere Theorie zurück, dann erklärt man die Entropiezunahme letztlich mit

den Anfangsbedingungen des Universums: Das Universum habe seinen Ausgang von einem Zustand extrem niedriger Entropie genommen. Vom Urknall an wächst also die Entropie und prägt über den kosmologischen Zeitpfeil allen makroskopischen Prozessen ihre Richtung auf.

Auch in der Quantenphysik tritt Irreversibilität und damit eine Zeitrichtung im Übergang zu makroskopischen Phänomenen auf, jedoch mit anderem Stellenwert. Das liegt am so genannten quantenmechanischen Messprozess. Angenommen, in einem abgeschlossenen Behälter seien eine Katze, ein Hammer, eine mit Gift gefüllte Phiole sowie eine kleine Menge einer radioaktiven Substanz. Sobald ein radioaktives Atom zerfällt, löst es einen Mechanismus aus, durch den der Hammer den Glasbehälter mit Gift zerschlägt. Daraufhin stirbt die Katze durch Einatmen des Giftes.

Das ist der berühmte Gedankenversuch mit »Schrödingers Katze«, den sich der österreichische Physiker 1935 ausdachte. Er entspricht dem oben beschriebenen von Einstein, Podolsky und Rosen aus dem gleichen Jahr – mit dem Un-

Wir können keine Signale mit Überlichtgeschwindigkeit senden



terschied, dass bei Schrödinger eine Katze und damit ein makroskopisches System die Stelle des zweiten Quantenobjekts einnimmt. Wenn wir den Formalismus der Quantentheorie auf diese Situation anwenden, kommen wir wiederum zu dem Schluss einer Zustandsverschränkung: Nach kurzer Zeit ist der Zustand des Gesamtsystems eine Superposition der Korrelation »Kein Atom zerfallen, Phiole intakt und Katze lebendig« mit der Korrelation »Ein Atom zerfallen, Phiole zerbrochen und Katze tot«.

Die Pointe von Schrödingers Gedankenexperiment ist nun diese: Während Zustandsverschränkungen auf dem Niveau mikrophysikalischer Quantenobjekte akzeptabel sein mögen (diese sind eben keine Individuen) und inzwischen sogar experimentell nachgewiesen sind, so ist es offensichtlich absurd anzunehmen, dass Zustandsverschränkungen auch makroskopische Objekte betreffen können. Eine Katze wäre dann in einer Superposition aus lebendig und tot. Das ist das so genannte Messproblem der Quantenmechanik: Schon der Hammermechanismus und spätestens die Katze sind Vorrichtungen, welche messen, ob das Atom zerfallen ist oder nicht.

Wie lassen sich Verschränkungen durch Messprozesse auflösen?

Wie kann man aber von der Quantenmechanik ausgehend verstehen, dass solche makroskopischen Systeme wohldefinierte numerische Werte ihrer Eigenschaften haben? Und wie können mikrophysikalische Objekte in Interaktion mit solchen makroskopischen Objekten definite numerische Werte ihrer Eigenschaften annehmen, so dass die quantenphysikalischen Superpositionen und Zustandsverschränkungen durch Messprozesse aufgelöst werden?

Was Johann von Neumann schon 1932 postulierte und was seitdem in den meisten Lehrbüchern der Quantenmechanik steht, bietet leider keine Antwort auf diese Frage: Wenn eine Messung stattfände, so seine damals geäußerte und seitdem

weithin übernommene Lehrmeinung, ändere sich die Zeitentwicklung der Quantenobjekte abrupt. Statt weiterer Verschränkung fände in diesem Augenblick eine Reduktion des Gesamtzustands auf genau einen Teilzustand statt, der bis dahin noch mit anderen Zuständen überlagert war. Der Akt der Messung beende den Zustand der Superposition. Danach sei das System entweder im Zustand »Kein Atom zerfallen, Phiole intakt und Katze lebendig« oder im Zustand »Ein Atom zerfallen, Phiole zerbrochen und Katze tot«.

Eine präzise Definition von »Messung« wird dabei jedoch nicht gegeben. Das ist auch nicht möglich. Denn physikalisch gibt es keinen Unterschied zwischen einem Messprozess und einer beliebigen Interaktion. Ferner sind Messgeräte keine natürliche Art von Gegenständen, die in der Natur unabhängig von unseren Interessen vorkommen – wie Elektronen, Sauerstoffatome, DNA-Sequenzen oder Katzen. Vielmehr können beliebige Dinge von Experimentatoren entsprechend ihren Absichten als Messgeräte verwendet werden.

Wenn man definite numerische Werte von Eigenschaften für makroskopische Objekte anerkennt – wie entweder lebendig oder tot zu sein für Katzen – und wenn man die Quantenmechanik als vollständige Beschreibung der mikrophysikalischen Wirklichkeit anerkennt, dann muss man die Möglichkeit des Übergangs zu wohlbestimmten numerischen Werten in die Dynamik einbauen, die man für die Zeitentwicklung von Quantensystemen ansetzt. Ein entsprechender Vorschlag wurde 1986 von den italienischen Physikern Gian Carlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber vorgelegt, ist aber mit einer Reihe von offenen physikalischen Fragen behaftet. Deshalb steht das so genannte Messproblem bis heute im Zentrum der Diskussion um die Interpretation der Quantenphysik.

Der Übergang zu definiten numerischen Werten ist, und das ist für den Zeitpfeil bedeutsam, irreversibel: Sobald bei Schrödingers Katze ein Atom zerfallen ist, kann zwar wieder eine erneute Zustandsverschränkung eintreten. Aber um-

kehren lässt sich der Prozess nicht mehr. Wie der Physiker und Philosoph David Albert von der Columbia University in New York gezeigt hat, kann die quantenphysikalische Reduktion einer Verschränkung als Basis aller zeitlich irreversiblen Prozesse im Universum verstanden werden. Im Unterschied zur klassischen Physik verankern hier Zustandsreduktionen die Zeitrichtung in der Dynamik der grundlegenden physikalischen Theorie und nicht lediglich in Anfangsbedingungen des Universums.

Welcher definite numerische Wert das Ergebnis einer Zustandsreduktion ist, dafür gibt es lediglich Wahrscheinlichkeiten. Bisweilen wird deshalb gesagt, dass die Quantenphysik im Widerspruch zu einer – deterministisch verstandenen – kausalen Sicht der Welt steht. Unter Wissenschaftsphilosophen herrscht jedoch Einverständnis darüber, dass Kausalität ebenso probabilistisch wie deterministisch sein kann. Folglich lassen sich in der Quantenphysik genauso wie in allen anderen Wissenschaften Kausalerklärungen suchen.

Radioaktiver Zerfall als Disposition der Natur

Seit den 1950er Jahren gibt es in der Interpretation der Quantentheorie die Idee, Superpositionen einschließlich verschränkter Zustände als so genannte Dispositionen anzusehen, die unter bestimmten Umständen – zum Beispiel in einem Messprozess – klassische Eigenschaften mit definiten numerischen Werten hervorbringen. Im Unterschied zu makroskopischen Dispositionen – wie zum Beispiel der Wasserlöslichkeit von Zucker – sind quantenphysikalische Dispositionen fundamentale physikalische Eigenschaften. Ihnen liegen mithin nicht noch weitere Eigenschaften zu Grunde. Es handelt sich hierbei um Eigenschaften, deren Wesen darin besteht, bestimmte Wirkungen hervorzubringen.

Diese Eigenschaften benötigen keine weiteren äußeren Bedingungen (Stimuli), um sich zu manifestieren – so wie man etwa Zucker in Wasser werfen müsste, damit sich dessen Wasserlöslichkeit manifestiert. Quantenphysikalische Superpositionen und Verschränkungen als Dispositionen bringen ihre Wirkungen von selbst hervor. Man denke an den spontanen Zerfall radioaktiver Atome. Der ereignet sich in der Natur ohne äußere Stimuli und insbesondere unabhängig davon, ob er von Messgeräten registriert wird.

Eine weitere Begriffsbildung hat sich hier als nützlich erwiesen, die auf Karl Popper (1902–1994) zurückgeht. Die quantenphysikalischen Dispositionen seien laut dem österreichisch-britischen Wissenschaftsphilosophen so genannte Propensitäten (»Neigungen«). Popper geht es dabei um die Interpretation von objektiven Wahrscheinlichkeiten, die in der Natur unabhängig von unserem Wissen bestehen. In der Propensitätsdeutung liefert die Wahrscheinlichkeit ein Maß für die Tendenz eines Objekts, bestimmte Wirkungen zu produzieren. Jeder der möglichen Wirkungen kommt ein bestimmtes Gewicht zu, das in Form einer bestimmten Wahrscheinlichkeit ausgedrückt wird.

Die Frage nach den Grundlagen von Kausalität und Naturgesetzen kann man in diesem Zusammenhang so beantworten: Die fundamentalen physikalischen Eigenschaften, sofern sie von der Quantentheorie behandelt werden, sind kausale Eigenschaften, die sich spontan manifestieren. Genauer gesagt sind es Dispositionen im Sinn von Propensitäten. Statt um intrinsische Eigenschaften handelt es sich um Strukturen der Zustandsverschränkung.

Das sind kausale Strukturen, die sich in Form miteinander korrelierter klassischer Eigenschaften manifestieren, wie zum Beispiel in den oben erwähnten EPR-Experimenten. Damit lässt sich auch erklären, wieso solche Prozesse eine Zeitrichtung auszeichnet: Dispositionen und ihre Manifestation sind ein Fall von Ursache und Wirkung. Das Verursachungsverhältnis lässt sich aber nicht umkehren. Die Naturgesetze drücken aus, was die fundamentalen physikalischen Eigenschaften bewirken können. Generell beschreiben sie, was die Eigenschaften bewirken können, die es in der Natur gibt. ∞

DER AUTOR



Michael Esfeld, geboren 1966, ist seit 2002 Professor für Wissenschaftsphilosophie an der Universität de Lausanne und leitet zugleich das Studienprogramm »Wissenschaftsphilosophie und -geschichte« an der ETH Lausanne. 2008 erhielt er den Cogito-Preis für seine Arbeiten zur Philosophie der Physik. Zuvor war er 2001 bis 2002 Professor für Logik, Erkenntnistheorie und Wissenschaftsphilosophie an der Universität zu Köln und 2000 bis 2001 Heisenberg-Stipendiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

QUELLEN

- Albert, D. Z.:** Time and Chance. Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts) 2000
- Aspect, A. et al.:** Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers. In: Physical Review Letters 49, S. 1804–1807, 1982
- Bell, J. S.:** On the Einstein-Podolsky-Rosen-Paradox. In: Physics 1, S. 195–200, 1964
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N.:** Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? In: Physical Review 47, S. 777–780, 1935
- Esfeld, M.:** Einführung in die Naturphilosophie. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2. Auflage 2011
- Ghirardi, G. et al.:** Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems. In: Physical Review D 34, S. 470–491, 1986
- Maudlin, T.:** Quantum Non-Locality and Relativity. Blackwell, Oxford 1994
- von Neumann, J.:** Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik. Springer, Berlin 1932
- Popper, K. R.:** The Propensity Interpretation of Probability. In: British Journal for the Philosophy of Science 10, S. 25–43, 1959
- Schrödinger, E.:** Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. In: Naturwissenschaften 23, S. 807–812, 1935

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1069971

Nobelpreisträger im Gespräch

Prof. Dr. Eric Kandel
Columbia University, New York
Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 2000 (USA)

Prof. Dr. Erwin Neher
Direktor am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie, Göttingen
Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 1991

Prof. Dr. Christiane Nüsslein-Volhard
Direktorin am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie, Tübingen
Nobelpreis für Physiologie oder Medizin 1995

Moderation
Gert Scobel, *Journalist, ZDF/3sat*

Schöne heile Welt?

Wie Wissenschaftler
die Zukunft sehen.

Mittwoch

1. Juni 2011

18 Uhr, Paulskirche

Frankfurt am Main

Im Rahmen der feierlichen Verleihung der

Hertie-
SENIOR-FORSCHUNGSPROFESSUR
Neurowissenschaften

und des

Eric Kandel
YOUNG NEUROSCIENTISTS PRIZE

Der Eintritt ist frei.
Einlasskarte nach Voranmeldung unter

Gemeinnützige Hertie-Stiftung
Telefon: 069.9717 61 73
nobelpreistraeger@ghst.de

Da wir die Einlasskarten per Post versenden,
bitten wir um Angabe der vollständigen
Adresse.

Gemeinnützige

Hertie-Stiftung 

In Kooperation mit

SENCKENBERG
world of biodiversity

Medienpartner

Spektrum *Frankfurter Allgemeine*
DER WISSENSCHAFT ZEITUNG FÜR DEUTSCHLAND

Ursache und Wirkung – am Beispiel der Gene

Das Kausalitätsprinzip – die eindeutige Zuordnung von Ursache und Wirkung – spielt in der Naturwissenschaft eine zentrale Rolle.

Allerdings wirft es Fragen auf, die sich nur philosophisch beantworten lassen. In der Biologie fand ein hartnäckiges Problem, das die Rolle der Gene im Organismus betrifft, erst kürzlich eine befriedigende Lösung.

Von Marcel Weber

Kaum ein Tag vergeht, in dem nicht irgendwo in den Medien von Genen die Rede ist. Man hat sie schon für alles Erdenkliche verantwortlich gemacht: Intelligenz, sozialen Status und Einkommen, religiöse Gefühle, Fremdenfeindlichkeit, Drogenmissbrauch, Promiskuität, sexuelle Orientierung und vieles mehr. Kritiker wenden gegen solche Befunde ein, dass all diese Eigenschaften ebenso stark – wenn nicht noch stärker – durch die Umwelt beeinflusst würden. Eine kleine Gruppe von Philosophen geht sogar so weit, den Genen jegliche besondere Rolle in der Entwicklung eines Organismus abzuspochen. Entscheidend sei stattdessen ein komplexes Sortiment verschiedenster Biomoleküle, die das neue Lebewesen von seinen biologischen Eltern erbt. Wer hat Recht? Rein empirisch lässt sich das Problem nicht lösen. Hier ist daher die Philosophie gefragt. Sie kann einen entscheidenden Beitrag zu der Debatte leisten, indem sie den Begriff der Ursache exakt analysiert.

Welche tief reichenden Probleme der Kausalitätsbegriff aufwirft, hat als Erster wohl David Hume (1711–1776) erkannt. Der schottische Philosoph, Ökonom und Historiker fragte sich, von welcher Erfahrung der Begriff der Ursache herstamme. Seiner Ansicht nach könne die Antwort nur lauten: Aus der wiederholten Abfolge zweier Ereignisse schließen wir, dass das frühere das spätere herbeiführe. Allerdings würden damit auch bloße Korrelationen als Ursache-Wirkungs-Be-

ziehungen gelten. Deshalb müssen weitere Bedingungen für Kausalität hinzukommen, beispielsweise die, dass die Wirkung ohne das als Ursache bezeichnete Ereignis nicht eingetreten wäre. Das ist die bereits von Hume angedeutete Lösung, welche heute die meisten Philosophen bevorzugen. Allerdings gilt es genauer zu spezifizieren, unter welchen Bedingungen ein kontrafaktischer (irrealer) Satz der Form »ohne A wäre B nicht passiert« wahr oder behauptbar ist. Sie anzugeben, hat sich als überraschend schwierig erwiesen, aber immerhin existieren einige ausgeklügelte Lösungsvorschläge.

Außer der Unterscheidung zwischen kausalen und nicht-kausalen Beziehungen von Ereignissen, auf die sich die philosophische Forschung in den letzten Jahrzehnten hauptsächlich konzentriert hat, sind aber noch andere Probleme mit dem Begriff der Ursache verknüpft – etwa jenes, dass die meisten Ereignisse nur auftreten, wenn mehrere Bedingungen erfüllt sind. Das hat schon der englische Philosoph John Stuart Mill (1806–1873) erkannt. So benötigt eine Explosion an einer Tankstelle außer dem zündenden Funken noch Benzindämpfe und Sauerstoff als notwendige Kausalfaktoren. Trotzdem würden wir diejenige Person als Schuldige zur Verantwortung ziehen, deren brennende Zigarette das Gasgemisch zur Reaktion gebracht hat. Laut Mill und vielen anderen Philosophen seither ist es jedoch nicht gerechtfertigt,



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

unter mehreren Kausalfaktoren einen einzelnen als maßgebliche Ursache eines Ereignisses zu bezeichnen – offenbar nur deshalb, weil er uns besonders interessiert. Sogar Juristen wie die einflussreichen britischen Rechtsphilosophen Herbert L. A. Hart (1907–1992) und der 1921 geborene Tony Honoré vertraten eine solche paradox anmutende Position.

An diesem Punkt hat sich eine aktuelle Debatte in der Philosophie der Kausalität entzündet. Sie ist nicht nur für das Problem der Zuschreibung von Verantwortung bei der Rechtsprechung von großer Bedeutung, sondern auch für die Biologie. Die entscheidende Frage lautet, ob es Kriterien gibt, wonach bestimmte Kausalfaktoren für ein Ereignis oder eine Klasse davon in dem Sinn ausschlaggebend sind, dass man sagen kann: »Klar, es brauchte auch brennbares Gas und Sauerstoff, damit es zu der Explosion an der Tankstelle kommen konnte; doch den Ausschlag gab eine brennende Zigarette.« Dabei soll die Betrachtung nicht auf solche Fälle beschränkt sein, wo nur ein einzelner Kausalfaktor einen Ereignischarakter hat (wie das Anzünden einer Zigarette), während alle anderen konstante Bedingungen sind (wie die Anwesenheit von leicht entzündlichen Dämpfen oder von Sauerstoff). Vielmehr wollen wir zulassen, dass mehrere – oder auch gar keine – Kausalfaktoren einen Ereignischarakter haben. Existiert dann noch irgendein Grund, einzelne davon als ausschlaggebend zu privilegieren?

Nach landläufiger Ansicht sind es die Gene, die das äußere Erscheinungsbild eines Menschen bestimmen – etwa welche Farbe seine Haare haben, ob sie glatt oder gelockt sind und ob sie bei einem Mann im reifen Alter ausfallen. Manche Philosophen bezweifeln diese Kausalbeziehung aus prinzipiellen Erwägungen: weil sich die besondere Rolle der Gene für die Ausprägung bestimmter Merkmale logisch nicht sauber begründen lässt.

Das Problem ist für die Biologie von besonders großer Bedeutung, weil dort einzelne Kausalfaktoren gern als ausschlaggebend dargestellt werden, obwohl Lebewesen doch höchst komplexe Gebilde sind. So beschreiben Vertreter des Fachs vielfach Merkmale von Organismen als genetisch bedingt, die mindestens genauso stark von der Umwelt oder von anderen nichtgenetischen Faktoren beeinflusst werden.

Zum Beispiel gilt die Krankheit Phenylketonurie als erbliche Stoffwechselstörung. Allerdings macht sie sich nur unter bestimmten Umweltbedingungen bemerkbar. Mit einer Diät, die nur geringe Mengen der Aminosäure Phenylalanin enthält, bleiben betroffene Kleinkinder völlig gesund. Warum reden Biomediziner also von einer Erbkrankheit und nicht von einer Phenylalanin-Vergiftung, für die manche Menschen einfach anfälliger sind?

KAUSALITÄT IN DER ZELLBIOLOGIE

- 1 **Gene** gelten als **Informationsträger**, die den Aufbau der **Proteine** in einem Organismus bestimmen. Zur Herstellung von Eiweißstoffen bedarf es jedoch einer äußerst komplexen **biochemischen Maschinerie**, zu der auch Ribosomen, Hunderte von Enzymen und die so genannten tRNAs gehören.
- 2 Deshalb schreibt die **Entwicklungssystemtheorie** allen Bestandteilen einer lebenden Zelle die gleiche kausale Rolle zu. Diese Ansicht lässt sich rein empirisch nicht widerlegen, sondern nur durch **philosophische Überlegungen**.
- 3 Die Lösung des Problems gelang durch **Unterscheidung zwischen aktuellen und potenziellen Einflussgrößen**: Die einen variieren tatsächlich, die anderen könnten es zwar, tun es aber nicht.
- 4 Zusätzlich ist es nötig, den Begriff der **kausalen Spezifität** einzuführen. Sie ist erfüllt, wenn jede Ursache eine eindeutige Wirkung hat und jede Wirkung nicht zu viele verschiedene Ursachen.
- 5 Mit diesen beiden Begriffen lässt sich die besondere **kausale Rolle** der Gene bei der **Proteinsynthese** begründen.

Ein anderes Beispiel betrifft die Ontogenese: die Entwicklung vom Embryo zum ausgewachsenen Organismus. Als Hauptkontrollgene dafür gelten die Homöobox-Gene, die Forscher zuerst bei der Taufeliege und später bei vielen anderen Organismen einschließlich des Menschen identifiziert haben. Dabei sind an der Embryonalentwicklung eines Tiers Tausende verschiedener Faktoren beteiligt. Sie beginnt in einer befruchteten Eizelle, die nicht bloß aus Genen besteht, sondern ein chemisch äußerst komplexes Gemisch von diversen Nukleinsäuren, Proteinen, kleineren Molekülen und Fetten ist. Der Einwand »Aber die Gene steuern die Entwicklung« ist aus streng kausaltheoretischer Sicht nicht zulässig; denn »steuern« setzt einen Steuermann voraus – ein absichtlich handelndes Wesen, das es offensichtlich nicht gibt.

Auch bei der Herstellung von Proteinen in der Zelle schreiben Biologen den Genen eine besondere Rolle zu. Diese enthalten demnach die »Information« zum Aufbau von Eiweißstoffen. Gemeint ist, dass die Abfolge der Basen in der Erbsubstanz DNA die Reihenfolge der Aminosäuren in den Proteinen bestimmt. In Verbindung damit formulierte Francis H. Crick (1916–2004) im Jahr 1957 das berühmte »zentrale Dogma der Molekularbiologie«: Information fließt ausschließlich von der DNA zur RNA und von der RNA zum Protein, niemals in umgekehrter Richtung.

Diese Behauptung wirft sowohl philosophische als auch biologische Fragen auf. Biologen interessiert vor allem, wie allgemein gültig das Dogma wirklich ist. Tatsächlich gilt es, wie man heute weiß, nicht uneingeschränkt. So kann das Enzym Reverse Transkriptase, das in Retroviren wie dem Aids-erreger HIV vorkommt, DNA-Kopien von RNA-Molekülen herstellen.

Die philosophischen Fragen betreffen vor allem den Begriff »Information«. Er wird im Alltag, in der Computerwissenschaft, in der Physik und in der Biologie auf unterschiedliche Weise verwendet. In Cricks zentralem Dogma bezieht er sich nur auf die kausale Beziehung zwischen linearen Biomolekülen. Oft wird er von Biologen jedoch weiter gefasst. Demnach bestimmt die Information in der DNA nicht nur den Aufbau von Proteinen, sondern ganz allgemein das Erscheinungsbild eines Organismus – seine phänotypischen Merkmale. In diesem Zusammenhang sprechen Biologen gern von »genetischer Information« oder – wie Cricks Kollege James D. Watson – auch etwas pathetisch vom »Buch des Lebens«.

Ist die DNA der einzige Informationsträger in Zellen?

Beide Verwendungsweisen sind in der Philosophie der Biologie umstritten. Kritik daran übte zum Beispiel schon 1985 die New Yorker Psychologin und Wissenschaftsphilosophin Susan Oyama. In ihrem Buch »The Ontogeny of Information« bezeichnete sie es als unberechtigt, Gene und DNA als einzige Informationsträger in einem Lebewesen anzusehen. Selbst die Behauptung, sie würden den Aufbau von Proteinen diktieren, träfe nicht zu. Tatsächlich bedarf es zur Herstellung von Eiweißstoffen einer äußerst komplexen biochemischen Maschinerie, zu der außer DNA auch Ribosomen, Hunderte von Enzymen und die so genannten tRNAs gehören. Eine Zelle muss diese gesamte Maschinerie von ihrer Mutterzelle »erben«, um auch nur ein einziges Proteinkomplex aufbauen zu können.

Nicht einmal die Aminosäuresequenz der Proteine wird allein durch die Gene bestimmt: Wenn die Zelle andere Enzyme oder tRNAs enthielte, ergäben die gleichen Gene völlig andere Aminosäuresequenzen. »Information« darf also nicht ausschließlich den Genen und vielleicht noch gewissen RNAs wie den mRNAs zugeschrieben werden, während alle anderen Zellbestandteile nur als ausführende oder ableisende Instanzen gelten.

Einige Philosophen der Biologie schlossen sich diesem Grundpostulat von Oyamass Entwicklungssystemtheorie (Developmental Systems Theory) an, das auch als »kausale Paritätsthese« bekannt ist; denn es fordert eine Parität (Gleichheit, Gleichwertigkeit) aller Bestandteile einer lebenden Zelle oder eines lebenden Organismus während seiner

Entwicklung. Gelegentlich ist auch von »kausaler Demokratie« die Rede. Gene sind darin nur eine Klasse von Akteuren unter vielen anderen, die in einem äußerst komplexen Geschehen zusammenwirken.

Die Entwicklungssystemtheorie (im Folgenden EST abgekürzt) hat auch zu einer neuen Vorstellung von Vererbung geführt. Als deren Träger gelten traditionell die Gene sowie neuerdings in begrenztem Maß auch so genannte epigenetische Veränderungen an den Chromosomen durch angeheftete chemische Gruppen, die von einer Generation an die

Der Aufbau der Proteine wird nicht allein durch Gene bestimmt

nächste weitergegeben werden. Dieser klassischen Auffassung hält die EST entgegen, dass bei der Entstehung eines neuen Organismus – sei es ein primitives Bakterium, eine Pflanze oder ein Tier, der Mensch eingeschlossen – stets eine komplette »Entwicklungsmatrix« weitergereicht wird. Sie umfasst die Gesamtheit aller Faktoren, die es braucht, um neues Leben in Gang zu setzen. Neben der DNA gehören dazu also Tausende von Proteinen, Zellmembranen und kleineren Molekülen. Vielen Bestandteilen dieser Entwicklungsmatrix könnte man eine Art »genetischer Information« zuschreiben. Beispielsweise bilden manche Moleküle im Embryo einen Konzentrationsgradienten aus, der den Zellen oder Zellkernen Auskunft über ihre relative Position innerhalb des Embryos gibt, so dass sie sich dem Entwicklungsprogramm entsprechend verhalten können.

Natürlich verdanken wir all diese Erkenntnisse nicht der EST. Sie sind vielmehr das Resultat von Untersuchungen, in

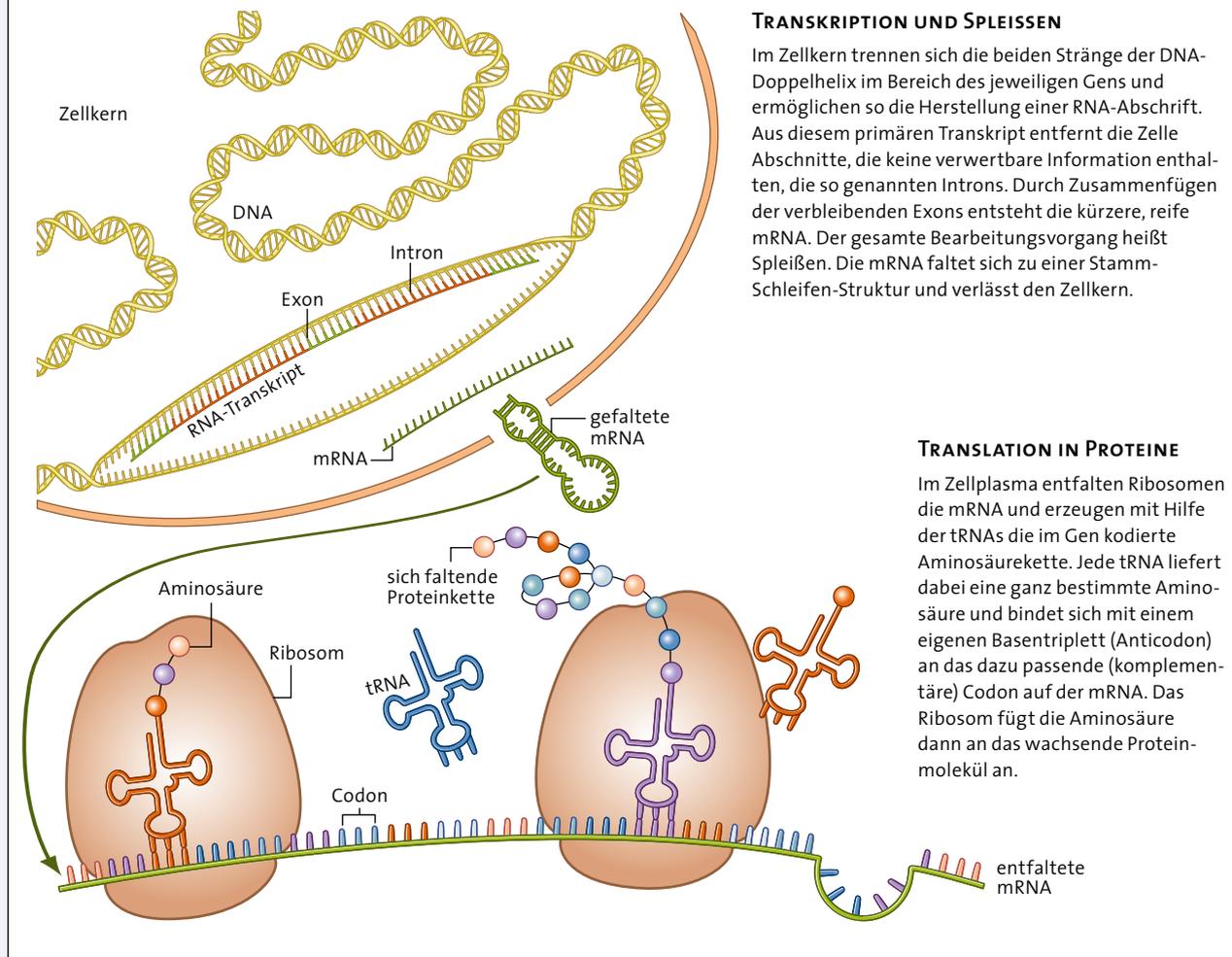
denen Gene und gentechnische Methoden eine entscheidende Rolle spielen. Der heuristische Nutzen genzentrierter Forschung kann schwerlich bestritten werden. Manche sehen allein schon in dieser Tatsache ein schlagendes Argument gegen die EST. Schließlich ist sie (bisher) nicht einmal im neuen Zweig der Systembiologie von Bedeutung: Die meisten Systembiologen haben wohl noch nie etwas von ihr gehört.

Dennoch wäre es falsch, die EST als gänzlich nutzlose metaphysische Spekulation zu verwerfen. Ihr Wert liegt darin, dass sie eine ebenso schwierige wie interessante philosophische Herausforderung enthält. Wer die kausale Paritätsthese ablehnt, muss klar und einleuchtend darlegen können, worin denn die spezielle Rolle von Genen und DNA besteht, die ihnen die Biologie seit rund 100 Jahren einräumt.

Dieses Problem hat sich als unerwartet hartnäckig erwiesen. Zum Teil liegt das daran, dass die Philosophie einige kau-

Von der DNA zum Protein

Wichtig für das Verständnis der kausalen Rolle der Gene im Organismus ist die Kenntnis der Proteinsynthese. Dabei entstehen zunächst RNA-Abschriften eines Gens, die im Fall höherer Organismen (Eukaryoten) bearbeitet und dann an Ribosomen in den Eiweißstoff übersetzt werden.



saltheoretische Fragen wie die eingangs erwähnte nach dem Wesen ausschlaggebender Ursachen bisher nicht befriedigend lösen konnte. Doch ein Teil der Schwierigkeiten rührt auch daher, dass sich Befürworter und Gegner der EST im Grunde über die grundlegenden Fakten einig sind: Sowohl Gene als auch andere Zellbestandteile spielen eine Rolle bei der Entwicklung eines Lebewesens. Umstritten ist nur die jeweilige Bedeutung der verschiedenen Komponenten

Entscheidend sind die nicht realisierten Möglichkeiten

Einen interessanten Vorschlag, wie sich die besondere Rolle von Genen kausaltheoretisch beschreiben ließe, machte vor einiger Zeit C. Kenneth Waters von der University of Minnesota in Minneapolis. Er betrachtet Ursachen als so genannte Differenzfaktoren: Einflussgrößen, deren An- oder Abwesenheit einen Unterschied in den untersuchten Systemen ausmacht. An einer Tankstelle entscheidet etwa die An- oder Abwesenheit einer brennenden Zigarette darüber, ob eine Explosion stattfindet oder nicht. Dabei werden alle anderen Faktoren – also Sauerstoff, brennbare Gase und so weiter – konstant gehalten. Als Nächstes unterscheidet Waters zwischen potenziellen und aktuellen Differenzfaktoren. Letztere zeichnen sich dadurch aus, dass sie in der jeweiligen Situation tatsächlich variieren. Die potenziellen Differenzfaktoren hätten dagegen nur prinzipiell die Möglichkeit zu variieren. Wenn sie es täten, würden sie ebenfalls einen Unterschied ausmachen; aber sie tun es eben nicht.

Waters behauptet, viele Elemente der biochemischen Maschinerie für das Ablesen der Gene und die Herstellung von Proteinen seien keine aktuellen, sondern lediglich potenzielle Differenzfaktoren, weil sie in praktisch unveränderlicher Konzentration in der Zelle vorlägen. Variabel seien ausschließlich die DNA- und RNA-Sequenzen, mit denen diese Maschinerie gefüttert werde. Nur bei ihnen handle es sich deshalb um aktuelle Differenzfaktoren.

Reicht diese Idee aus, um die besondere Rolle von Genen zu beschreiben? Waters bejaht das für die primitivsten Zellen, also Bakterien. Bei ihnen ist der Prozess der Genexpression von der DNA über die RNA zu den Proteinen relativ direkt und einfach. Doch bei höheren Zellen mit echtem Kern, den Eukaryoten, liegen die Dinge wesentlich komplizierter. Dort werden zum Beispiel die mRNA-Moleküle nach der Synthese noch verändert. Dabei entfernen Enzyme Abschnitte, die keine Information für den Aufbau des betreffenden Proteins enthalten. Das Herausschneiden dieser so genannten Introns und das Zusammenfügen der verbliebenen RNA-Stücke nennen Biologen Spleißen. Nicht immer werden dieselben Introns herausgeschnitten, weshalb eine Zelle von demselben Gen verschiedene Proteine herstellen kann. Dadurch sind die Gene nicht mehr die einzigen aktuellen Differenzfaktoren bei der Proteinsynthese. Die für das Spleißen verantwortlichen Enzyme erfüllen diese Definition ebenfalls.

Um solche Mechanismen auszuschließen, hat Waters einen weiteren kausalen Begriff vorgeschlagen, den James Woodward von der University of Pittsburgh (Pennsylvania) anschließend logisch präzise ausarbeitete: kausale Spezifität. Bei einer spezifischen Kausalbeziehung hat im Idealfall jede Ursache eine eindeutige Wirkung und umgekehrt, was mathematisch einer bijektiven Abbildung entspricht. Woodward stellt aber nicht ganz so hohe Ansprüche. Demnach besteht auch dann noch kausale Spezifität, wenn zwar jede Ursache eine eindeutige Wirkung hat, aber für einzelne Wirkungen mehrere Ursachen existieren – mathematisch eine surjektive Abbildung –, solange es nicht zu viele sind.

Die intuitive Idee dahinter ist: Wenn zwischen zwei Variablen eine spezifische Kausalrelation besteht, lässt sich durch Manipulation der einen die andere auf feinfühlig Weise kontrollieren – ähnlich der Lautstärke eines Radios durch einen Drehknopf.

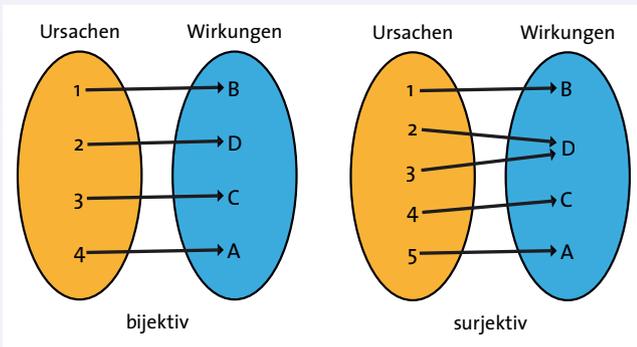
Eine solche spezifische Kausalrelation existiert zwischen der DNA und der mRNA, bevor diese durch Spleißen oder ähnliche Vorgänge modifiziert wird. Die verschiedenen Zustände sind hier die möglichen Basensequenzen der DNA- und RNA-Moleküle. Außerdem besteht eine solche Beziehung zwischen der fertig modifizierten mRNA und dem zugehörigen Protein. In diesem Fall sind die verschiedenen Zustände die möglichen Aminosäuresequenzen des Eiweißstoffs. Wegen der Redundanz des genetischen Codes (verschiedene Basentriplets stehen für dieselbe Aminosäure) ist diese Beziehung allerdings nicht streng bijektiv, sondern bloß surjektiv. Doch Woodwards Definition der kausalen Spezifität lässt das zu.

Der rudundante genetische Kode

Die vier RNA Basen Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Uracil (U) können insgesamt 64 verschiedene Dreiergruppen (Tripletts) bilden. Es gibt jedoch nur 20 essenzielle Aminosäuren. Deshalb sind viele Tripletts synonym: Sie stehen für dieselbe Aminosäure. Durch Modifikation der tRNAs ließe sich der genetische Kode ändern. Aus dem gleichen Gen entstünde dann ein anderes Protein. Bestimmen die tRNAs also im gleichen Maß den Aufbau von Eiweißstoffen wie die Gene?

		zweite Nukleotidposition			
		U	C	A	G
erste Nukleotidposition	U	UUU Phenylalanin	UCU Serin	UAU Tyrosin	UGU Cystein
		UUC Phenylalanin	UCC Serin	UAC Tyrosin	UGC Cystein
		UUA Leucin	UCA Serin	UAA STOP	UGA STOP
		UUG Leucin	UCG Serin	UAG STOP	UGG Tryptophan
	C	CUU Leucin	CCU Prolin	CAU Histidin	CGU Arginin
		CUC Leucin	CCC Prolin	CAC Histidin	CGC Arginin
		CUA Leucin	CCA Prolin	CAA Glutamin	CGA Arginin
		CUG Leucin	CCG Prolin	CAG Glutamin	CGG Arginin
	A	AUU Isoleucin	ACU Threonin	AAU Asparagin	AGU Serin
		AUC Isoleucin	ACC Threonin	AAC Asparagin	AGC Serin
		AUA Isoleucin	ACA Threonin	AAA Lysin	AGA Arginin
		AUG Methionin	ACG Threonin	AAG Lysin	AGG Arginin
	G	GUU Valin	GCU Alanin	GAU Aspartat	GGU Glycin
		GUC Valin	GCC Alanin	GAC Aspartat	GGC Glycin
		GUA Valin	GCA Alanin	GAA Glutamat	GGA Glycin
		GUG Valin	GCG Alanin	GAG Glutamat	GGG Glycin

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Kausale Spezifität liegt vor, wenn die Ursache-Wirkungs-Relation einer bijektiven oder zumindest surjektiven Abbildung entspricht. Im ersten Fall besteht eine 1:1-Beziehung zwischen Ursachen und Wirkungen. Im zweiten Fall hat zwar jede Ursache eine eindeutige Wirkung, aber eine Wirkung kann mehrere Ursachen haben.

Es handelt sich um eine quantitative Relation, da sie verschiedene Grade annehmen kann: Je mehr unterschiedliche Zustände umkehrbar eindeutig miteinander verknüpft sind, desto spezifischer ist die Verknüpfung. Diese Eigenschaft bietet eine Möglichkeit, die Rolle von Genen von der anderer Kausalfaktoren zu unterscheiden. So kann man mit einiger Berechtigung behaupten, Nucleinsäuren wie DNA oder RNA seien unter den aktuellen Differenzfaktoren die kausal spezifischsten und insbesondere kausal spezifischer als die erwähnten Spleiß-Enzyme.

Allerdings ist Vorsicht geboten. Der Begriff des aktuellen Differenzfaktors bezieht sich stets auf eine ganz bestimmte Menge von Dingen. Dabei kann es sich zum Beispiel um die Gesamtheit aller Gene einer Zelle handeln, aber auch um alle Genvarianten an einem bestimmten Genort in einer Population von Organismen (also etwa alle Hämoglobingene in der deutschen Bevölkerung). So kommt es – etwa in einem Experiment – unter Umständen vor, dass in einer bestimmten Population von Zellen die Gene gerade nicht die kausal spezifischsten aktuellen Differenzfaktoren sind, sondern zum Beispiel die Spleiß-Enzyme.

Die hier angestellten Überlegungen zeigen, dass sich die spezielle Rolle der Erbsubstanz zumindest bei der Herstellung von Proteinen nur mit Hilfe kontrafaktischer (irrealer) Szenarien verstehen lässt. Die Gene sind diejenigen Kausalfaktoren, bei denen man durch eine einzige Intervention – wie eine gezielte Mutation – alle erdenklichen Proteine herstellen könnte. Natürlich wird es nie möglich sein, alle diese Mutationen tatsächlich vorzunehmen. Aber man könnte jede beliebige durchführen und so jedes erdenkliche Protein erzeugen.

Andere Kausalfaktoren bei der Proteinsynthese haben diese Eigenschaft nicht. So könnte man zwar auch verschiedene Proteine herstellen, indem man – etwa über eine Änderung der tRNA-Moleküle – den genetischen Code abwandelt. Aber auf diese Weise lässt sich nicht durch die Manipulation eines einzigen Moleküls jeder beliebige Eiweißstoff hervorbringen.

So verdanken die Gene ihre Sonderstellung einer Eigenschaft, die nie realisiert wird, sondern stets nur als Möglichkeit besteht. Das haben die Verfechter der EST übersehen. Sie suchten immer nach einer speziellen Eigenschaft der Gene, die auch realisiert ist. Als sie nichts dergleichen fanden, zogen sie den Schluss, dass es keine besondere kausale Rolle für die DNA gebe.

Doch Möglichkeiten oder mögliche Welten sind manchmal genauso wichtig wie die Realität selbst. So schließt jede Kausalbeziehung, wie anfangs erwähnt, eine Aussage über ein fiktives Szenario ein, in dem das ursächliche Ereignis und damit auch die Wirkung nicht eingetreten ist. Im Gegensatz zu den Behauptungen der EST und mancher radikaler Kritiker der modernen Genetik spielen Gene also sehr wohl eine besondere Rolle in Lebewesen. Diese bleibt jedoch auf die Proteinsynthese beschränkt und lässt sich am besten anhand des Begriffs der möglichen Welten philosophisch präzise erläutern. Eine Verallgemeinerung auf die phänotypischen Merkmale eines Organismus ist keinesfalls zulässig. Das Verhältnis zwischen Genen und Phänotyp ist so komplex, dass jedes Merkmal einzeln untersucht werden muss. Die Umwelt spielt immer auch eine Rolle. Inwieweit einzelne Merkmale von genetischen Faktoren beeinflusst sind, lässt sich nur durch sehr sorgfältige experimentelle Untersuchungen in Verbindung mit statistischen Analysen ermitteln – wenn dies denn überhaupt sinnvoll erscheint, was in vielen Fällen zu bezweifeln ist. ∞

DER AUTOR



Marcel Weber ist Professor für Philosophie an der Universität Konstanz. Dort hat er nach dem Studium der Molekularbiologie und der Philosophie 1996 in Philosophie promoviert. Danach forschte und lehrte er an mehreren Universitäten in den USA, Deutschland und der Schweiz sowie am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin. Seine wissenschaftlichen

Schwerpunkte sind die Philosophie der Biologie sowie die allgemeine Wissenschaftsphilosophie.

QUELLEN

Knell, S., Weber, M.: Grundthemen Philosophie: Menschliches Leben. Walter de Gruyter 2009

Krohs, U., Toepfer, G. (Hg.): Philosophie der Biologie: Eine Einführung. suhrkamp taschenbuch wissenschaft 2005

Lübbe, W.: Kausalität und Zurechnung. Über Verantwortung in komplexen kulturellen Prozessen. Walter de Gruyter 1994

Sterelny, K., Griffiths, P.E.: Sex and Death. An Introduction to the Philosophy of Biology. The University of Chicago Press 1999

Weber, M.: Philosophy of Experimental Biology. Cambridge University Press 2005 (Taschenbuch-Ausgabe 2010)

WEBLINKS

www.ruhr-uni-bochum.de/philosophy/mam/ethik/content/artikel_genetisches_programm_kassel.pdf

Ausführliche Darstellung der Entwicklungssystemtheorie

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie online unter: www.spektrum.de/artikel/1069972

Naturwissenschaft in der Sackgasse?

Trotz massiver Förderung der Grundlagenforschung scheinen einige fest versprochene Ergebnisse auszubleiben. Viele fundamentale Fragen bleiben daher ungelöst. Woran liegt das – und gibt es berechtigte Hoffnung auf Besserung?

Von Gerhard Börner

Auf meinem Schreibtisch landen immer wieder Briefe von Nichtnaturwissenschaftlern, die ein Weltmodell präsentieren, das scheinbar alle Fragen löst. Nicht selten lese ich dann den Zusatz, es sei doch übrigens eine Schande, dass in der etablierten Naturwissenschaft zu Beginn des 21. Jahrhunderts noch so viele Probleme ungelöst seien. Als Naturwissenschaftler gerate ich da in die Klemme: Denn einerseits finde ich es ja gut, dass es noch einiges zu tun gibt. Andererseits wüsste ich auf so manche grundlegende Frage selbst gerne die Antwort.

So oder so – die Zusatzbemerkung der Briefschreiber erscheint berechtigt. Denn schließlich leben wir in der Zeit von »Big Science«, in der so viel Geld und Wissenschaftler für die Grundlagenforschung zur Verfügung stehen wie nie zuvor. Wieso gibt es also überhaupt noch ungelöste Probleme? Ist womöglich der Fortschritt der Wissenschaft eben doch nicht

so rasant, wie man es bei so viel Mitteleinsatz von den zahlreichen Forschern erwarten dürfte?

Wenn wir jetzt, in der zweiten Dekade des 21. Jahrhunderts, versuchen, eine Bilanz zu ziehen, so stellen wir fest, dass diese im Vergleich mit dem Beginn des 20. Jahrhunderts schon etwas mager ausfällt. Damals begannen die großen Umwälzungen in der Physik: Plancks Quantentheorie des Lichts, Einsteins spezielle Relativitätstheorie, seine Erklärung des photokinetischen Effekts, Rutherfords Experimente zum Aufbau der Atome.

Damals brach ein goldenes Zeitalter der Physik an. Ein tiefes Verständnis der materiellen Welt wurde erreicht, von den kleinsten Bausteinen, den Elementarteilchen, bis hin zu den größten Strukturen im Universum. Es ist eine großartige intellektuelle Errungenschaft des 20. Jahrhunderts, dass wir den Kosmos heute als ein System verstehen, das eine Entwicklungszeit von ziemlich genau 13,75 Milliarden Jahren durchlaufen hat.

Nach dem Beginn in einem heißen, strukturlosen Urzustand – dem so genannten Urknall – bildeten sich in den ersten Sekundenbruchteilen verschiedene Elementarteilchen, darunter Protonen und Neutronen, während sich zugleich das heiße kosmische Urgas rasch weiter ausdehnte. Mit der Expansion kühlte sich das Gas ab, so dass in den ersten Minuten nun aus den Protonen und Neutronen die leichtesten Atomkerne entstanden. Rund 400 000 Jahre nach dem Beginn des Universums war die Temperatur schließlich so weit abgesunken, dass sich Elektronen und Protonen zu den ersten Wasserstoffatomen verbanden.

In diesem Moment konnte sich die Strahlung von ihrer engen Kopplung an die Materie lösen und ungehindert ausbreiten: Das Weltall wurde durchsichtig. Die kosmische Strahlung, deren Eigenschaften die Messungen der Satelliten Cobe, WMAP oder Planck sehr präzise erfassten, brachte uns Kunde

AUF EINEN BLICK

GROSSE PROJEKTE, KLEINER ERTRAG?

1 In Physik und Kosmologie scheint es, als hätte **die Theoriebildung** einen gewissen Abschluss erreicht. Niemand sollte erwarten, dass auf diesem Gebiet noch einmal revolutionäre Durchbrüche erzielt werden. Offen ist immerhin noch das Rätsel der Dunklen Energie und der Dunklen Materie.

2 Bei der Veröffentlichung der DNA-Sequenz des menschlichen Genoms im Jahr 2000 prophezeiten Forscher, das würde in den folgenden zehn Jahren einer **personalisierten Medizin** den Weg ebnet. Diese Revolution steht noch immer aus.

3 Manche Experten halten es sogar mittlerweile für fruchtlos, Ursachen von weit verbreiteten Krankheiten wie Diabetes oder Krebs dadurch aufzuklären zu wollen, dass man **häufige Genvarianten** bei Betroffenen identifiziert. Sie erforschen umgekehrt gerade seltene Varianten.

vom Universum zu dieser kosmischen Frühzeit. Kleine Unterschiede in der Intensität der Strahlung aus verschiedenen Richtungen weisen auf geringfügige Schwankungen der Gasverteilung hin, wie sie zu dieser frühen Phase herrschten. Aus diesen Ungleichmäßigkeiten haben sich im Lauf der Zeit die Galaxien gebildet – und in ihnen Sterne, Planeten und schließlich das Leben auf der Erde einschließlich uns selbst.

Dabei handelt es sich nicht etwa um eine unverbindlich dahinerzählte Geschichte, sondern um ein durch Beobachtungen und theoretische Überlegungen gewonnenes quantitatives Weltmodell. »So ist die Welt entstanden«, können Kosmologen heute mit großer Sicherheit behaupten. Und wenn einmal ein solcher Durchbruch gelungen ist, scheint ein gewisser Abschluss der Erkenntnis erreicht, auch wenn man gerne stets noch etwas mehr wissen möchte.

Kann man denn nicht fragen, was vor dem Urknall war? Warum es etwas gibt und nicht nichts? Warum die Welt gerade so beschaffen ist, wie wir sie vorfinden, und nicht anders, wie sie nach den physikalischen Gesetzen auch sein könnte? Ja,

man kann, aber nicht unbedingt als Physiker. Denn diese häufig gestellten Fragen stoßen zwar auf viel Interesse, aber mit physikalischen Methoden allein lassen sie sich nicht untersuchen. Sie führen unweigerlich in metaphysische Bereiche.

Im Rahmen der Physik wird dagegen nach einer abschließenden, allumfassenden Theorie gesucht. Ein Versuch hierzu ist die so genannte Stringtheorie. Sie behandelt alle Naturkräfte und Elementarteilchen unter einem mathematischen Dach. In ihr wird alles durch die Schwingungen einer kleinsten Einheit, des *string*, erklärt. Der Ansatz hat bereits zu hochinteressanten mathematischen Konstruktionen geführt. Allerdings scheitert die Anbindung an die wirkliche Welt bisher in zweifacher Hinsicht: Zum einen fehlen Experimente, die zumindest einen Hinweis darauf geben könnten, in welcher Richtung die Physiker die Fülle mathematisch möglicher Konfigurationen durchforsten sollten. Zum anderen verweigern enorme mathematische Probleme einen eindeutigen Fortschritt der Theorie, wie zum Beispiel die Herleitung eines »niederenergetischen« Grenzfalls, der zu experimentell



ANTONIO SABA / CERN

Der Large Hadron Collider am CERN in Genf ist eines jener Großgeräte, mit denen Wissenschaftler den grundlegenden Fragen der Natur nachspüren.

zugänglichen Aussagen führen könnte. Die Gegner der Stringtheorie zögern deshalb nicht, sie als Irrweg zu brandmarken. Ihre Anhänger zitieren dagegen die 10^{500} möglichen Welten, die demnach prinzipiell möglich wären. Jede dieser »Landschaften« ist durch ihre eigene besondere Stringtheorie bestimmt und enthält vielleicht sogar auch die »richtige« Welt – nämlich unsere. Doch bis jetzt haben die Experten kein physikalisches Prinzip oder Experiment gefunden, mit dem aus der Myriade von Möglichkeiten eine ganz bestimmte ausgewählt werden könnte.

Tatsächlich befinden wir uns nach diesem Argument der Stringtheorie mit unserem Kosmos nur deswegen innerhalb einer speziellen der zahllosen Konfigurationen, weil sie eben günstige Bedingungen für unsere Evolution bietet. Dies ist aber in meinen Augen keine physikalische Aussage mehr, sondern eher ein Ausdruck der Verzweiflung – zumindest aber ein Indiz dafür, dass sich die Physiker mit ihrer »Theorie von Allem« in einer Sackgasse befinden. Auswege sind offensichtlich nur schwer zu finden. Es ist ja klar, dass in diesen Grundsatzfragen der Physik entscheidende Fortschritte, wenn überhaupt, dann überraschend kommen. Ganz sicher können sie nicht geplant werden. Wir müssen uns wohl in Geduld fassen.

Exponentielle Wissenszunahme?

Nach allgemeiner Überzeugung ist nun aber inzwischen das Zeitalter der Biologie und der Neurowissenschaften angebrochen. Tatsächlich herrschen für Biowissenschaftler goldene Zeiten, wie letztes Jahr der britische Mediziner und Wissenschaftsautor James Le Fanu in der Zeitschrift »Prospect« ausführte. Das jährliche Forschungsbudget der USA, das kurz vor dem Zweiten Weltkrieg noch insgesamt 230 Millionen Dollar betrug, überstieg in den letzten Jahren allein für die Biowissenschaften den Betrag von 100 Milliarden Dollar. In neue Forschungseinrichtungen wurden in den USA in letzter Zeit 15 Milliarden Dollar investiert. Dieser Anstieg in der Forschungsförderung hat sich auch in der Anzahl der Publikationen niedergeschlagen. Der Publikationsausstoß allein des »Journal of Biochemistry« wuchs von 12 000 Seiten im Jahr 1980 auf 97 000 Seiten 2009! Das Wissen auf dem Gebiet der Lebenswissenschaften hat offenbar exponentiell zugenommen.

Der Wissenschaftskritiker James Le Fanu spricht von der jetzigen Zeit als »der besten und der schlechtesten für die Wissenschaft«. Es ist natürlich die beste, weil noch nie so viele Gelder in die Forschungsförderung geflossen sind. Seiner Meinung nach ist sie aber auch die schlechteste, weil durch das viele Geld leider keine neuen Meilensteine der Erkenntnis gesetzt worden sind. Die Bioforscher hatten nämlich hohe Erwartungen geweckt, dass die letzten großen Hindernisse bald beseitigt sein könnten, die noch einem wahren Verständnis der Stellung des Menschen im Universum entgegenstehen. Wie können die Instruktionen im genetischen Kode, die in der Doppelhelix der DNA stecken, die beträcht-

liche Vielfalt der Lebewesen hervorbringen? Wie werden genetisch die Eigenschaften festgelegt, die eine Art von einer anderen so deutlich unterscheiden? Wie können die elektrischen Ströme in den Neuronen des Gehirns übersetzt werden in unsere subjektiven Erfahrungen, Erinnerungen und unser Selbstbewusstsein?

Solche Erwartungen gründeten sich auf die Fortschritte in der Technik der Genanalyse und der bildgebenden Verfahren.

Heute ist es möglich, die komplette Sequenz der Erbmoleküle verschiedener Spezies zu erfassen, vom Röhrenwurm bis zum Menschen. Und die Neuroforscher können mit trickreich gewonnenen Bildern das Gehirn bei der Arbeit beobachten: wie es denkt, Entscheidungen trifft oder einfach in die Welt hinausschaut. Diese beiden neuen Methoden

erzeugen Datenmengen im Petabytebereich (einer Million Gigabyte), deren Analyse und Interpretation die Hilfe von Supercomputern erfordert. Ohne Zweifel rechtfertigt der gewaltige Ertrag der Forschung den Einsatz der finanziellen Mittel. Allerdings bleibt die schwierige Aufgabe, aus diesem enormen Zuwachs an Wissen entsprechend vertiefte Einsichten herauszufiltern. Deutlich wird die radikale Abkehr von der althergebrachten Laborforschung, die mit Hilfe von wenigen Messpunkten eine theoretische Kurve oder mathematische Gleichung überprüft. Ausgangspunkt ist heute nicht mehr eine bestimmte Fragestellung, sondern eine Datenflut. Ohne eine bestimmte Modellvorstellung sammeln Forscher also riesige Mengen von Einzelfällen und durchforsten sie nach allgemein gültigen Eigenschaften oder statistischen Gesetzmäßigkeiten. Die Datenanalysen sollen einen erst zu den Fragen führen, die man dann beantworten möchte. Zweifellos hat die Datenexplosion in der Wissenschaft unser Wissen in Genetik und Neurowissenschaften erheblich erweitert. Aber im Hinblick auf die erwarteten grundsätzlichen Erkenntnisse brachte sie eher eine gewisse Ernüchterung.

Die Genomprojekte begannen mit der plausiblen Annahme, dass das Auslesen der vollständigen Gensequenzen auch enthüllen würde, wie die verschiedenen Formen von Lebewesen genetisch bestimmt werden. Biologen sind erwartungsgemäß enttäuscht, dass genau das Gegenteil der Fall ist. So gibt es an die 20 000 Gene, die völlig äquivalent in den verschiedenen komplexen Organismen vorkommen, vom winzigen Wurm bis zu uns selbst. Das menschliche Genom ist mehr oder weniger austauschbar mit dem der Maus, ganz zu schweigen von dem unserer Primatenverwandten. Kurz gesagt fand man im Erbgut von Fliege und Mensch keinen Hinweis, der erklären würde, warum die Fliege sechs Beine, ein Paar Flügel und ein winziges Gehirn hat und wir zwei Arme, zwei Beine sowie ein Hirn, das fähig ist, die Entwicklung des Universums zu begreifen.

Zweifellos müssen die genetischen Instruktionen irgendwo gespeichert sein, denn nur so können sich verschiedene Lebewesen immer wieder mit großer Exaktheit ausbilden. Aber die Forscher haben in der jüngsten Vergangenheit von der Vor-

Die »Theorie von Allem« scheint in einer Sackgasse zu stecken



STEVE JURVETSON, CC-BY 2.0

Modernste Sequenzierautomaten entziffern die Genome von immer mehr Lebewesen – mit wachsender Geschwindigkeit.

stellung Abschied nehmen müssen, sie wüssten über die Prinzipien der genetischen Vererbung Bescheid. Tatsächlich wurde immer deutlicher, dass diese nach wie vor rätselhaft sind (siehe auch den Beitrag zur Philosophie der Biologie, S. 60).

Etwas ganz Ähnliches passiert bei den bildgebenden Verfahren, die Daten für das arbeitende Gehirn liefern. Es ist den Neurobiologen inzwischen klar geworden, dass unser Gehirn offenbar völlig anders arbeitet, als man zunächst vermutet hat. Selbst einfachste Aufgaben führen dazu, dass weite Areale im Gehirn simultan »aufblinken«, was zeigt, wie verblüffend komplex die Gehirnvorgänge dabei sein müssen. Unsere Sinneseindrücke werden im Gehirn, wie sich herausstellte, in Unmengen getrennter Komponenten zerlegt – ohne die leiseste Andeutung eines integrierenden Mechanismus, der dazu dienen könnte, die persönliche Erfahrung klarer Sinneseindrücke einer wohlbestimmten Außenwelt herzustellen. Diese Tendenz des Gehirns, alle Sinnesdaten wie Form, Farbe oder Bewegung aufzufasern und in verschiedenen lokalisierten Arealen zu verarbeiten, führt natürlich zu der Frage: Wie werden all diese Informationen wieder zusammengeführt?

So bleibt, wie James Le Fanu meint, eine enttäuschende Bilanz: In der Gentechnik haben wir ein geklontes Schaf kennen gelernt, aber Dolly steht jetzt ausgestopft als Ausstellungsstück in einem schottischen Museum. Über das Klonen von Hunden und Katzen haben wir daraus nichts gelernt. Im Mai 2010 verkündete Craig Venter, in seinem Labor sei »künstliches Leben« geschaffen worden. Das führte zu einiger Aufregung in den Medien. Der Akt des Pioniers der Genomanalyse war sicher technisch genial: einen einfachen Baukasten für Gene herzustellen und diesen in ein Bakterium einzuschleusen – übrigens mit einer Investition von 40 Millionen Dollar und zehn Jahren Arbeit. Doch Venters Laborcoup ist weniger als das, was einfachste Lebensformen auf der Erde seit drei Milliarden Jahren umsonst und in wenigen Sekunden zu Stande bringen.

In den Neurowissenschaften ist man in den grundlegenden Fragen nach der Natur des Bewusstseins, nach dem Zu-

sammenhang zwischen Empfindungen und Neuronenaktivität, ebenfalls noch nicht sehr weit gekommen. Schon 1880 hat der Berliner Physiologe Emil du Bois-Reymond in seiner Rede »Die sieben Welträtsel« darauf hingewiesen, »dass es ebenso unmöglich ist zu verstehen, warum Zwickeln des Trigemiusnervs Höllenschmerz verursacht, wie warum die Erregung gewisser anderer Nerven wohl tut«. Erstaunlicherweise entwickelten sich in den letzten Jahren heftigste Diskussionen um Willensfreiheit und Verantwortung der Persönlichkeit auf der Basis von simplen Experimenten, in denen jemand willkürlich einen Daumen hob. Bei diesen Versuchen von Benjamin Libet begannen Hirnströme offenbar schon zu fließen, noch bevor die Versuchsperson nach eigener Aussage beschlossen hatte, den Daumen zu bewegen. Das ist nicht gerade das, was einen vom Stuhl reißt – außer man hat eine falsche Vorstellung von Willensfreiheit.

Die praktischen Auswirkungen der gentechnischen Forschung, so Le Fanu weiter im Magazin »Prospect«, seien kaum zu entdecken. Das Biotechnologiegewerbe mit dem Anspruch, Medizin und Landwirtschaft grundlegend zu verbessern, bleibt für den Moment nur ein Versprechen.

Sinken Erträge in der Forschung zwangsläufig?

Kein Wunder, dass bisweilen eine neue Bescheidenheit einkehrt. Sogar eine Besinnung auf mögliche Grenzen der Wissenschaft scheint auf einmal wieder hoffähig, wie der britische Teilchenphysiker Russell Stannard in seinem im letzten Herbst erschienenen Buch »The End of Discovery« darzulegen versuchte. Er war nicht der Erste mit dieser Idee. Ich entsinne mich früherer Beispiele: So hatte schon 1996 John Horgan einmal das Ende der Wissenschaft vorhergesehen (»The End of Science«). Der amerikanische Wissenschaftsjournalist hatte aber vor allem darauf hingewiesen, dass sinkende Erträge in der Forschung nahezu zwangsläufig seien, gerade wenn zuvor so großartige Erkenntnisse gewonnen wurden, etwa über das Universum oder die DNA-Doppelhelix. Ähnliches gelte, so Horgan, etwa auch für die Archäologie, die mit spektakulären Funden unserer prähistorischen Vorfahren die evolutionäre Verwandlung bis zum modernen *Homo sapiens* ein gutes Stück weit enträtselte.

Es scheint klar: Die Dinge sind eben komplexer als zunächst vermutet. Genetiker und Neurowissenschaftler können zwar viele weitere Petabytes an Daten anhäufen. Doch scheint sich abzuzeichnen, dass dies nicht zum gewünschten Erfolg führt. Denn selbst wenn wir schon das Genom jeder biologischen Spezies auf diesem Planeten entschlüsselt hätten, sähen wir, dass alle Lebewesen aus Tausenden einander ziemlich ähnlicher Gene bestehen, dem Kode, nach dem die Zellen aller lebenden Organismen aufgebaut sind. Zweifellos eine faszinierende Entdeckung, aber die Frage, wie die Besonderheiten all der verschiedenen Kreaturen genetisch bestimmt werden, bliebe dennoch unbeantwortet. Ebenso könnte es den Neurowissenschaftlern ergehen, die mit weiteren Datenfluten über die Gehirne von Personen dem Rätsel wohl nicht auf die Spur kommen dürften, wie das elektrische

Feuern der Neurone einmal Schmerz und ein andermal wohlige Gefühle hervorruft.

Dies könnte natürlich zum einen daran liegen, dass das »Leben« nicht einfach auf wenige Grundeigenschaften zu reduzieren ist wie die Materie. Das Geschehen im Urknall ist extrem einfach verglichen mit dem Phänomen des Lebens. Dass wir den Urknall verstehen können, bietet daher noch keine Garantie dafür, dass wir eines Tages auch das Leben verstehen werden.

Ein zweiter Grund, warum die jüngsten Erkenntnisse in Hirnforschung und Genetik so anders ausfielen als erwartet, liegt vielleicht in der Annahme, die Phänomene von »Leben« und »Geist« seien erklärbar, wenn man nur die materielle Basis, die Funktionsweise der Gene und des Gehirns, erforscht. Diese Überlegung ist durchaus plausibel; sie entspricht einem Prinzip der naturwissenschaftlichen Methode, die wir schon einige Jahrhunderte lang erfolgreich praktizieren. Doch die Sprache, in der wir uns über Form und Struktur des Lebens ebenso wie über unsere Gedanken, unseren Glauben und unsere Ideen verständigen, kann nicht ohne Weiteres in naturwissenschaftlich präzise Aussagen über messbare, wägbare oder quantifizierbare Prozesse übersetzt werden.

Scheinmeldungen zeigen nur die Sehnsucht der Forscher nach fundamental Neuem

Trotz der exponentiell wachsenden Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen und der Heerscharen eifrig tätiger Forscher scheint es in den Grundfragen also nicht recht voranzugehen. Im harten Wettbewerb wächst aber laufend der Druck auf die Forscher, regelmäßig spektakuläre Resultate vorzuweisen. Dies treibt manchmal kuriose Blüten. Ein Beispiel lieferte im letzten Jahr die mit großem Medienecho verkündete Entdeckung eines »arsenfreundlichen« Bakteriums. Der Einzeller gedeiht offenbar in einer Arsenumgebung und verwendet statt Phosphor Arsen in seinem Lebenszyklus, das er dann wohl auch in seine DNA an Stelle von Phosphor einbaut. Dies wäre zweifellos eine sensationelle Entdeckung gewesen. Allerdings hatten es die NASA-Forscher versäumt, sozusagen zur Gegenprobe ihr Bakterium einmal auch in einer phosphorfreien Umgebung zu züchten. So aber hatten sie es zugelassen, dass der Einzeller nicht nur vom Arsen, sondern gleichzeitig auch vom stets attraktiveren Phosphor naschen konnte. Mittlerweile wurde die Meldung von der NASA zurückgezogen. Denn der angeblich epochale Arsen-Einzeller entpuppte sich inzwischen als ganz normales Bakterium.

In die gleiche Rubrik gehört wohl die Aufregung diesen März über ungewöhnliche Daten vom Teilchenbeschleuniger Tevatron am Fermilab in Chicago. Sie wurde von manchen sofort als Entdeckung eines neuen Elementarteilchens oder wahlweise als Hinweis auf eine neue »fünfte Kraft« ausgerufen. Wahrscheinlich handelt es sich aber, so der bisherige Stand, nur um ein statistisch nicht signifikantes Signal, wie sie bei derartigen Experimenten häufiger auftreten und leider zu oft, am besten zuerst in der »New York Times«, als Sensation bejubelt werden. Das geschieht gerne, wenn, wie



Supercomputer, wie hier im Rechenzentrum der NASA im Kalifornien, erzeugen Datengebirge – aber auch neue Einsichten?

auch beim Tevatron im September 2011, die Stilllegung droht. An diesen Beispielen zeigte sich immerhin, wie stark das Interesse der Öffentlichkeit an derartigen grundlegenden Entdeckungen ist. Über das Arsen-Bakterium wurde in den Medien schon einige Zeit vor der regulären wissenschaftlichen Veröffentlichung berichtet. Ähnlich steht es mit diversen kosmologischen Modellen, die entweder den Urknall erklären oder abschaffen – auch solche Arbeiten erscheinen häufiger zuerst (oder nur) in Zeitungen oder im Fernsehen.

Das sind Erscheinungen an den etwas ausgefransten spekulativen Rändern der exakten Naturwissenschaften. Aber sie drücken die Sehnsucht der Forscher aus, endlich mal wieder etwas wirklich Fundamentales und Neues herauszufinden. An dieser Stelle muss man sich fragen, ob nicht vielleicht heute schon die Grenzen des für uns Erkennbaren erreicht sind. Die großen Erfolge der Physik haben zu dem bisher vergeblichen Versuch geführt, eine allumfassende Theorie aller physikalischen Phänomene zu formulieren. Die Lebenswissenschaften stehen derzeit vor der Aufgabe, der Komplexität ihres Gegenstandes und ihren Ansprüchen, Unmessbares und Unwägbares zu quantifizieren, gerecht zu werden.

Forscher wie der britische Kernphysiker Russell Stannard sehen ein Ende der naturwissenschaftlichen Entdeckungen heraufziehen. Andere, wie der britische Astronom Martin Rees, verweisen darauf, dass sich unser Gehirn im Lauf der Evolution herausgebildet hat, um die Überlebenschancen der Spezies in der Savanne zu verbessern. Er bezweifelt, ob ein für solche Aufgaben optimiertes Gehirn überhaupt in der Lage ist, die Komplexität von Kosmos, Leben und Geist vollständig zu erfassen.

Ich stimme beiden nicht zu. Tatsächlich ist es unglaublich, welche Leistungen unser Gehirn vollbringt. Unsere schöpferischen Fähigkeiten, etwa auf dem Gebiet der Musik oder Mathematik, wirken so enorm, dass sicher mehr dahintersteckt als nur eine simple Überlebensstrategie für die Savanne. Natürlich unterliegt unser Gehirn Einschränkungen, schließlich handelt es sich dabei um ein Produkt der biologischen

Evolution. Aber es scheint doch, als wären Struktur und Fähigkeit des menschlichen Geistes zu mehr in der Lage, als wir im Augenblick erkennen. Freilich ist nicht klar, wie viel weiter die Grenzen des für uns Erkennbaren noch hinausgeschoben werden können.

Es scheint mir, als hätten Physik und Kosmologie derzeit einen gewissen Abschluss erreicht. Deshalb sollte man auch nicht erwarten, dass auf diesem Gebiet weiterhin neue »Kontinente« entdeckt werden, wie einst die Quantenmechanik. Es gibt aber noch viel zu tun, wie etwa die Natur der Dunklen Materie im Universum aufzudecken oder das Rätsel der Dunklen Energie zu lösen – wenn sie denn überhaupt etwas ist. Man kann zwar hoffen, Elementarteilchen der Dunklen Materie bald in Experimenten aufzuspüren. Falls die große Unbekannte aber nur der gravitativen und keiner anderen Wechselwirkung folgt, wird man nach ihr auch im neuen Teilchenbeschleuniger LHC am CERN vergeblich suchen.

Experimenteller Zugang nicht in Sicht

Die Suche nach der allumfassenden Theorie aller Naturkräfte verzögert sich, weil sich ein experimenteller Zugang bisher nicht abzeichnet. Wenn die Natur uns freundlich gesinnt ist, dann werden die Experimentatoren am CERN Hinweise auf Effekte dieser Theorie bei den Energien entdecken, wie sie mit dem LHC erreicht werden. Das könnte Hinweise liefern, wie es mit der vereinheitlichten Theorie weitergehen wird.

Die Hirnforschung muss sich, scheint mir, vorläufig darauf besinnen, dass die Welträtsel unseres Menschenbildes nicht einfach durch neuronale Schaltkreise gelöst werden können. Das schließt Fortschritte in der Neuromedizin keineswegs aus. Schreckliche Krankheiten des Gehirns wie Alzheimer oder andere neurodegenerative Erkrankungen lassen sich mit bildgebenden Verfahren sehr genau untersuchen. Auch elektrophysiologische Methoden und Tierexperimente dürften langfristig Fortschritte in Richtung neuer Therapien bringen.

In den Lebenswissenschaften stecken die Forscher noch im Gewirr unüberschaubarer Datenmengen. Doch es bleibt natürlich die Hoffnung, dass irgendwann einmal allgemeinere Gesetzmäßigkeiten erkannt werden, die auch bei den Grundfragen weiterhelfen. Vielleicht werden Molekularbiologen nicht nur die vielfältigen Erscheinungsformen von Krebserkrankungen aufklären, sondern in der Folge auch effektive Heilmethoden finden. Hoffnungen sind in der Medizin allerdings schon oft enttäuscht worden, gerade beim Thema Krebs. Es könnte also genauso gut auf einen endlosen Wettlauf hinauslaufen: zwischen immer neuen entdeckten Krankheitsmechanismen auf zellulärer und molekularer Ebene einerseits und andererseits Therapien, die diesen immerzu hinterherhinken, wie der Hase im Wettlauf mit dem Igel.

Wir wissen nicht, was die Zukunft bringen wird, aber wir sollten dennoch optimistisch bleiben. Die Sackgasse, in der die Naturwissenschaft steckt, können wir zum Anlass neh-

men, nach Wegen zu suchen, die aus der gefühlten Ausweglosigkeit herausführen. Bereits einmal zum Ende des 19. Jahrhunderts erschien die Physik abgeschlossen und uninteressant, nur mehr als ein Herumbasteln an der Messung weiterer Dezimalstellen nach dem Komma, bis dann die großen Umwälzungen des 20. Jahrhunderts kamen. So ist nicht auszuschließen, dass dieser scheinbare Stillstand auch jetzt wieder zu einem neuen Aufbruch in unerwartete Richtungen führt.

Eine andere, jedoch noch weniger begründbare Hoffnung ist, dass eines Tages zusätzliche Petabytes an Daten doch mit ihrer datengetriebenen statt fragegesteuerten Forschung wie eine Planierraupe einen Weg aus der Sackgasse frei räumen. Riesenprojekte, die mit viel Geld vorangetrieben werden, sind naturgegeben konservativ. Ihre quasi-industrielle Organisation sowie die strikten Evaluationsverfahren garantieren zwar Resultate, deren Interpretation folgt aber lediglich dem gängigen Verständnis der Dinge. Forschungsvorhaben, die gegen den Strom schwimmen, dürfen von solcher Förderung aber nicht ausgeschlossen werden.

Neben der Großforschung muss es Raum geben für Querdenker, für unabhängige und eigensinnige Wissenschaftler, die mit den allgemein akzeptierten Theorien unzufrieden sind. Das ist sicher nicht immer bequem, weder für die Querdenker noch für die forschungsfördernden Organisationen. Sicher wird dabei auch mancher Irrweg beschritten. Aber eine Forschung ohne Risiko wäre keine mehr. Kreative Wege zu neuen Erkenntnissen werden nur gefunden, wenn eine Vielfalt von Strategien und Ansätzen gefördert wird. ~

Neben der Großforschung muss es Platz für Querdenker geben

DER AUTOR



Gerhard Börner promovierte an der Ludwig-Maximilians-Universität München mit einer Arbeit über Teilchenphysik. Nach Auslandsaufenthalten in Japan und den USA habilitierte er sich an der LMU für das Fach Physik und forschte als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Kosmologie, speziell die Entstehung und Entwicklung der Galaxien.

QUELLEN

- Börner, G.:** Das neue Bild des Universums. Pantheon, München 2009
Horgan, J.: The End of Science. Facing the Limit of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age. Addison-Wesley, New York 1996
Le Fanu, J.: Science's Dead End. In: Prospect 173, 21. Juli 2010. Online unter: www.prospectmagazine.co.uk/2010/07/sciences-dead-end/
Smolin, L.: The Trouble with Physics. The Rise of String Theory, the Fall of a Science and What Comes Next. Houghton Mifflin, Harcourt 2006
Stannard, R.: The End of Discovery. Oxford University Press, Oxford 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1069974

Kann das Tote Meer überleben?

Das Anzapfen des Jordans für Bewässerungszwecke und die Mineralgewinnung in Verdunstungsbecken lassen den Salzsee austrocknen. Als einzige Chance zu seiner Rettung erscheint derzeit eine Pipeline, die Wasser vom Roten Meer heranhführt.

Von Eitan Haddok (Text und Fotos)

Eine Aura des Geheimnisvollen umgibt das Tote Meer: Es ist mit derzeit 424 Metern unter dem Meeresspiegel die tiefste Stelle der Erdoberfläche, der Standort der berühmten biblischen Städte Sodom und Gomorrha, eine Quelle heilsamer Minerale und trotz seines Namens eine Fundgrube für exotische Kleinstlebewesen. Mit einem Salzgehalt von bis zu 33 Prozent hat es eine so hohe Dichte, dass Badende nicht untergehen können. Es selbst ist allerdings vom Untergang bedroht. Nach Jahrtausenden der Stabilität dank einer präkären Balance zwischen Süßwassernachschub aus dem Jordan und Verdunstung unter der sengenden nahöstlichen Sonne ist der tiefblaue See nun dabei zu verschwin-

den: Seit den 1980er Jahren sinkt sein Wasserspiegel um jährlich etwa einen Meter.

Jordanier im Osten, Israelis im Westen und Syrer sowie Libanesen im Norden entnehmen so viel Wasser aus dem Jordan und seinen Zuflüssen, dass so gut wie keines mehr den See erreicht. Jordanien und Israel leiten außerdem Seewasser ab, um in Salinen wertvolle Minerale daraus zu gewinnen. Vor der zurückweichenden Wasserlinie haben sich schon mehr als 3000 Einsturztrichter gebildet – zum Schaden für den Tourismus und die wirtschaftliche Entwicklung der Uferregion, weil niemand vorhersagen kann, wo sich urplötzlich das nächste klaffende Loch auftun und Gebäude, Straßen oder Menschen verschlingen wird.

Besorgt über den drohenden Verlust eines wertvollen Natur- und Kulturraums, haben Vertreter Israels, Jordaniens und der palästinensischen Verwaltung den Bau einer riesigen Pipeline vorgeschlagen, um Wasser vom Roten Meer im Süden in den See zu leiten und ihn so kontinuierlich aufzufüllen. Wissenschaftler erforschen bereits, wie das den Lebensraum in chemischer und biologischer Hinsicht beeinflussen würde. Zu befürchten ist, dass große Mengen Gips ausfallen oder der tiefblaue See sich durch Algenblüten rot färbt. Politiker suchen nach Finanzierungsmöglichkeiten für das zehn Milliarden Dollar teure Projekt, während Umweltschützer es als pharaonische Gigantomanie bekämpfen. Die folgenden Seiten geben einen Überblick über die verzweifelte Lage des Toten Meers und die Bemühungen, sein Überleben zu sichern.

AUF EINEN BLICK

BEDROHTES NATURWUNDER

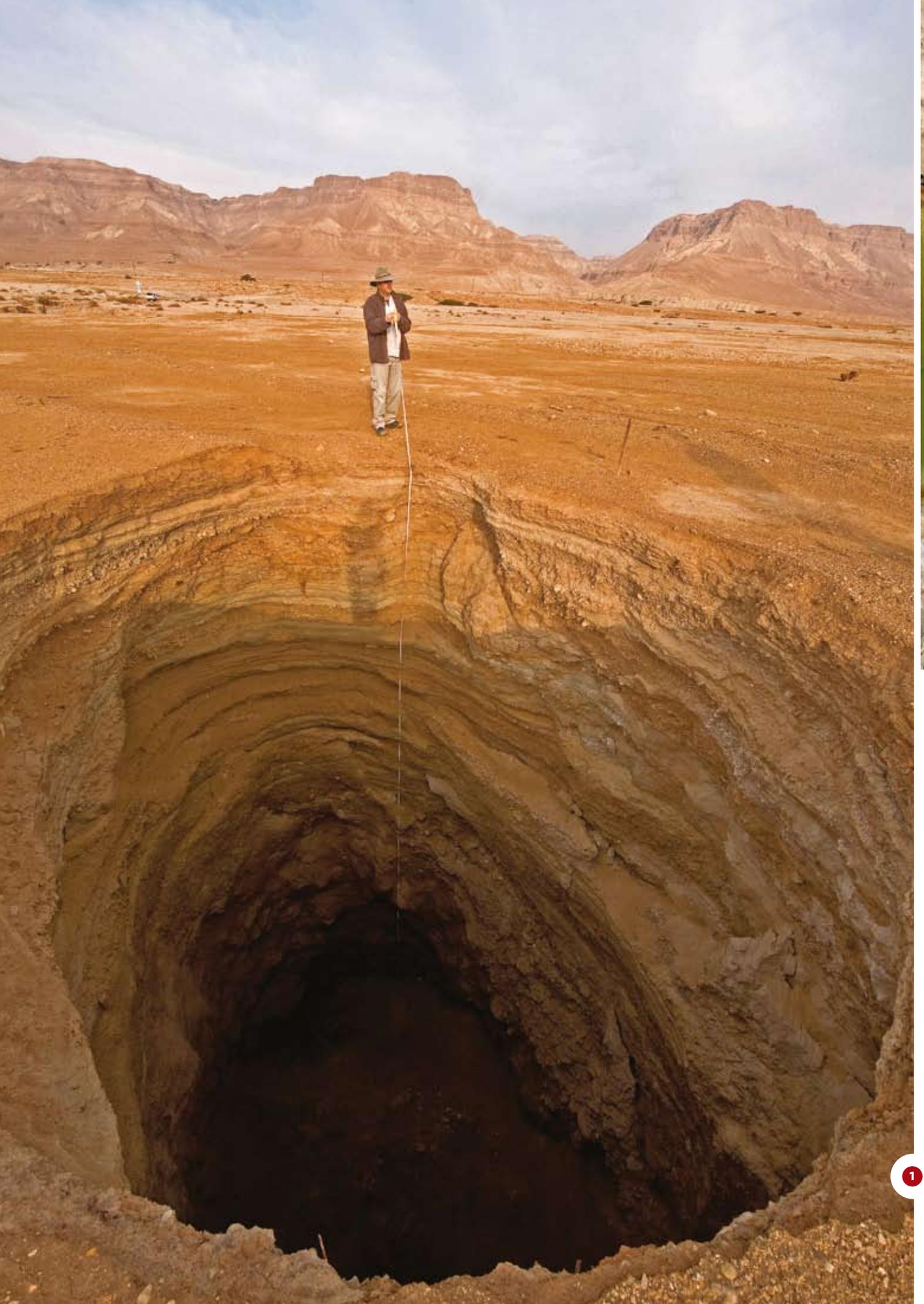
1 Das Tote Meer liegt aktuell 424 Meter unter Normalnull. Sein **Wasserspiegel** sinkt pro Jahr um einen Meter, weil seine Zuflüsse für **Bewässerungszwecke** angezapft werden und das Seewasser zur **Gewinnung von Mineralen** dient.

2 Beim Abfließen salziger Lauge im Untergrund der Uferregion bricht der Boden darüber ein. Dadurch haben sich schon **Tausende von Einsturztrichtern** gebildet.

3 Eine 180 Kilometer lange **Pipeline** könnte **Salzwasser vom Roten Meer** heranhführen. Doch das Projekt ist unter **Umweltaspekten** fragwürdig – und scheitert bisher an den **hohen Kosten**.

An einigen Stellen des Toten Meers ist das Wasser bereits um einen Kilometer von der einstigen Uferlinie zurückgewichen. Im Randbereich des Sees bilden sich Einsturztrichter, aktuell im Mittel einer pro Tag. Teils füllen sie sich mit Salzlake.







3



2



4

Todgeweiht durch übermäßige Wassernutzung

Einsturztrichter am Toten Meer 1 können bis zu 25 Meter breit und 15 Meter tief sein. Meist öffnen sie sich plötzlich und verschlucken Gebäude und Straßen samt Menschen und Tieren 2.

Die gängige Erklärung lautet, beim Zurückweichen des Sees fließe auch Salzwasser im Untergrund ab. Nachrückendes Grundwasser löst unterirdisch abgelagerte Salzsichten auf, so dass Hohlräume entstehen, über denen der Boden einbricht. Teils füllen sich die Trichter mit Salzlake. Einige reihen sich längs geologischer Bruchzonen auf 3. Hier kann fossiles Süßwasser aus großen Tiefen aufsteigen und den Platz der abfließenden Salzlake einnehmen.

Der See schrumpft vor allem deshalb, weil der Zustrom von Jordanwasser in den vergangenen Jahrzehnten drastisch zurückgegangen ist: von 1300 auf nur noch 30 Millionen Kubikmeter pro Jahr. Dadurch übertrifft die Verdunstung den Nachschub an Süßwasser bei Weitem; der südliche Teil des Sees ist bereits verschwunden.

Verantwortlich für den niedrigen Pegel des Jordans sind Pumpen, die Wasser für die Landwirtschaft entnehmen. Bei einigen liegt das Zuführungsrohr inzwischen trocken, weil der Wasserstand noch darunter gesunken ist 4.



NASA / USGS





Chancen zur Wiederbelebung

Das Tote Meer schrumpft auch, weil die israelische Firma Dead Sea Works und die Arab Potash Company in Jordanien Wasser aus dem Nordteil durch einen Kanal in riesige kaskadenartig abgestufte Becken leiten, die den Platz der ehemaligen Südhälfte des Sees einnehmen. Die Satellitenaufnahme **1** und das Luftbild **2** vermitteln einen Eindruck von der Situation. Bei der schrittweisen Verdunstung bleiben brom- und magnesiumhaltige Minerale sowie Salze zurück **3**, welche die Firmen gewinnen und vermarkten.

Noch vor 40 Jahren lag der Wasserspiegel des Sees bei 395 Metern unter Normalnull. Unter den heutigen Bedingungen dürfte er bis zum Jahr 2200 auf 550 Meter sinken. Davor bewahren könnte ihn wohl nur ein 180 Kilometer langes System aus Kanälen und Pipelines, das Wasser vom Roten Meer heranführt. Daran angeschlossene Entsalzungsanlagen würden 900 Millionen Kubikmeter Süßwasser im Jahr liefern, wovon das meiste nach Jordanien ginge. Die verbleibenden 1,1 Milliarden Kubikmeter an hochkonzentrierter Salzlauge flößen ins Tote Meer. Wasserkraftwerke könnten das Gefälle zur Stromerzeugung ausnutzen. Eine 17 Millionen Dollar teure Machbarkeitsstudie der Weltbank sollte demnächst vorliegen. Würde das Projekt verwirklicht, ließe sich der Wasserspiegel des Sees bis zum Jahr 2050 bei 420 bis 410 Metern unter Normalnull stabilisieren.

Die Lauge aus den Entsalzungsanlagen wäre allerdings kein adäquater Ersatz für Jordanwasser. Sie würde sich nicht mit dem Seewasser vermischen, sondern eine eigene Schicht bilden. Womöglich käme es zu einer Algenblüte, durch die der azurblaue See eine rötliche Färbung annähme. Von Mikrobiologen in kleinen Tanks durchgeführte Experimente sprechen dafür **4**. Doch die Ergebnisse sind noch nicht von anderen Forschern bestätigt.

Die Rettung des Toten Meers könnte sich in vieler Hinsicht auszahlen. So haben Forscher um Ivan A. Berg von der Universität Freiburg gerade erst bei Bakterien aus dem See eine neue Form von Stoffwechsel entdeckt, die eine Alternative zum bekannten Zitronensäurezyklus darstellt. Anderen Wissenschaftlern ist es gelungen, Gene eines nur im Toten Meer lebenden Pilzes auf einen Hefestamm zu übertragen, der sich daraufhin als äußerst widerstandsfähig gegen hohen Salzgehalt, Hitze und oxidativen Stress erwies. Die gleichen Gene könnten auch Nutzpflanzen in versalzten Böden gedeihen lassen. Das käme Millionen von Menschen in Regionen mit salzbelastetem Untergrund zugute.



2

4

DER AUTOR

AMOTZ ACHON



Eitan Haddock ist gebürtiger Franzose mit israelischen Wurzeln. Er hat Geophysik sowie Planetologie studiert und ist Fotograf und Reporter mit Wohnsitz in Paris.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1069975

Die Kunst, auf zwei Beinen zu laufen

Mit numerischer Optimierung können Forscher heute verschiedenste Bewegungen des Menschen bis in die Details der Muskelsteuerung durchschauen. So gewinnen sie wertvolle Erkenntnisse für das Gehen mit Hilfsmitteln, für Trickfilmsequenzen, sportliche Höchstleistungen und für die Konstruktion zweibeiniger Roboter.

Von Katja Mombaur

Wie geht der Mensch? Eine erste Antwort auf diese Frage lautet: »ohne nachzudenken«. Seit wir uns im Alter von ungefähr einem Jahr auf die Füße gestellt haben, bewegen wir uns im Wesentlichen unfallfrei auf ebenem wie unebenem Gelände, treppauf und treppab, ohne dass wir dafür erst in die Schule hätten gehen müssen.

Diese Leichtigkeit hat eine Kehrseite: Wir wissen nicht wirklich, was wir da im Einzelnen tun. Es gibt jedoch zahlreiche Situationen, in denen diese Kenntnis hilfreich wäre. Mediziner wollen das krankhafte Gangmuster ihrer Patienten verstehen, um dem mit Training, orthopädischen Hilfsmitteln oder operativen Eingriffen abzuhelpfen. Besonders wertvoll ist solches Wissen für die Fertigung und Regelung von Prothesen oder die Neurostimulation, also die Erregung gelähmter Muskeln durch elektrische Impulse. Sprinter und ihre Trainer wollen die Lauftechnik verbessern, Tänzerinnen und Tänzer möglichst anmutige Bewegungen erzielen. Roboterkonstrukteure wollen ihre Maschinen so auslegen und

programmieren, dass sie auf zwei Beinen gehen können, und müssen dafür verstehen, wie schnelles Laufen stabil geregelt wird. Wer ein Computerspiel oder einen Zeichentrickfilm programmiert, bemüht sich, die handelnden Figuren mit glaubwürdigen, »natürlichen« Bewegungen auszustatten.

Schon früh haben Wissenschaftler begonnen, Gehbewegungen von Menschen zu beobachten und aufzuzeichnen. Bereits die um 1870 in Kalifornien entstandenen Fotosequenzen des britischen Pioniers Eadweard Muybridge (1830–1904) oder die »Chronofotografie« von Étienne-Jules Marey (1830–1904) aus Paris lieferten Medizinern, Biologen und Künstlern wertvolle Eindrücke. Heute vermessen Forscher in Ganglaboren von Kliniken und Universitäten menschliche Bewegungen weitaus präziser, zum Beispiel indem sie reflektierende Aufkleber an geeigneten Körperstellen der Versuchsperson anbringen und deren Bewegung mit Infrarotkameras filmen (*motion capture*). Oder sie erfassen die von den Füßen ausgeübte Kraft durch Messplatten im Boden und Beschleunigungen durch so genannte Inertialsensoren an den Körpersegmenten. Doch auch diese modernen Messtechniken reichen nicht aus, die Rätsel des menschlichen Gangs vollständig zu entschlüsseln. Hier kann das wissenschaftliche Rechnen Entscheidendes leisten. Mit Hilfe von mathematischer Modellierung, Simulation und Optimierung gewinnen wir Einblicke, die reine Experimente oder die klassische Ganganalyse nicht hergeben würden.

AUF EINEN BLICK

SIMULATION UND OPTIMIERUNG VON KÖRPERBEWEGUNGEN

1 Der Gang eines Menschen ist gut zu beobachten und zu messen, nicht aber die **Muskelkräfte**, die den Körper in Bewegung setzen. Diese müssen durch **numerische Verfahren** erschlossen werden.

2 Dabei geht an entscheidender Stelle die Annahme ein, dass unter allen im Prinzip möglichen Bewegungsformen **die in der Natur realisierten optimal** sind – zum Beispiel in Bezug auf Energieverbrauch oder Geschwindigkeit.

3 Die gewonnenen Erkenntnisse helfen, **sportliche Leistungen** zu verbessern, **neue Hilfsmittel** für Gehbehinderte zu entwickeln sowie **gefähige Roboter** zu konstruieren.

Aus Menschen und Robotern werden Differenzialgleichungen

Mathematische Modellierung bedeutet, die »Maschine« zu rekonstruieren, die einen Menschen – oder auch einen Roboter – gehen lässt, und zwar im Prinzip mit allen Einzelteilen. Diese Maschine ist ungeheuer kompliziert und nur zu verstehen, indem man sie auf verschiedenen Ebenen betrachtet. Auf der obersten Ebene steht das Ziel, das wir erreichen wol-

len. Zu diesem Zweck müssen wir unsere Umgebung wahrnehmen und uns – im Gedränge und möglicherweise sehr schnell und immer wieder neu – für einen Weg entscheiden. Eine Ebene tiefer setzt unser Gehirn diese Entscheidung in eine Folge von Nervenimpulsen um; daraufhin kontrahieren sich unsere Muskeln. Interne Regelungsmechanismen sorgen dafür, dass unsere Kraftanstrengung auch die beabsichtigte Wirkung hat und wir nicht umfallen.

Der erste Schritt zur mathematischen Erfassung menschlicher Bewegungen setzt auf der untersten Ebene an: der Mechanik. Man ersetzt in radikaler Vereinfachung den menschlichen Körper mit seinen mehr als 200 Knochen und mehr als 650 Muskeln durch ein »Mehrkörpersystem« mit starren Komponenten. Zum Beispiel wird aus einem Oberschenkel eine Stange, die an beiden Enden durch Gelenke mit weiteren Stangen verbunden ist. Im mathematischen Modell bleiben am Ende von dem Körperteil nur wenige Zahlen übrig: unveränderliche Parameter wie die Stangenlänge, die Masse,

die Position des Schwerpunkts und die Trägheitsmomente, die über die Massenverteilung Auskunft geben, sowie die veränderlichen »Zustandsvariablen«; das sind Position und Orientierung im Raum zusammen mit den zugehörigen Geschwindigkeiten.

Je nach der Art der Bewegung, die man modellieren will, wird man mehrere Körperteile zu einem zusammenfassen, damit sich die Anzahl der Variablen in Grenzen hält. So muss man bei Laufbewegungen die Füße detailliert beschreiben, kann aber die Einzelheiten der Hände vernachlässigen; beim Fingerhakeln wäre es genau umgekehrt. Obgleich sich die Wirbelsäule auf viele Weisen krümmen kann, genügen für

Radikale Vereinfachung: Einige wenige Massen, verbunden durch Gelenke, genügen, um die Bewegung etwa einer Sprinterin zu simulieren – sofern die von den Muskeln ausgeübten Drehmomente in ihrem zeitlichen Verlauf korrekt beschrieben werden.

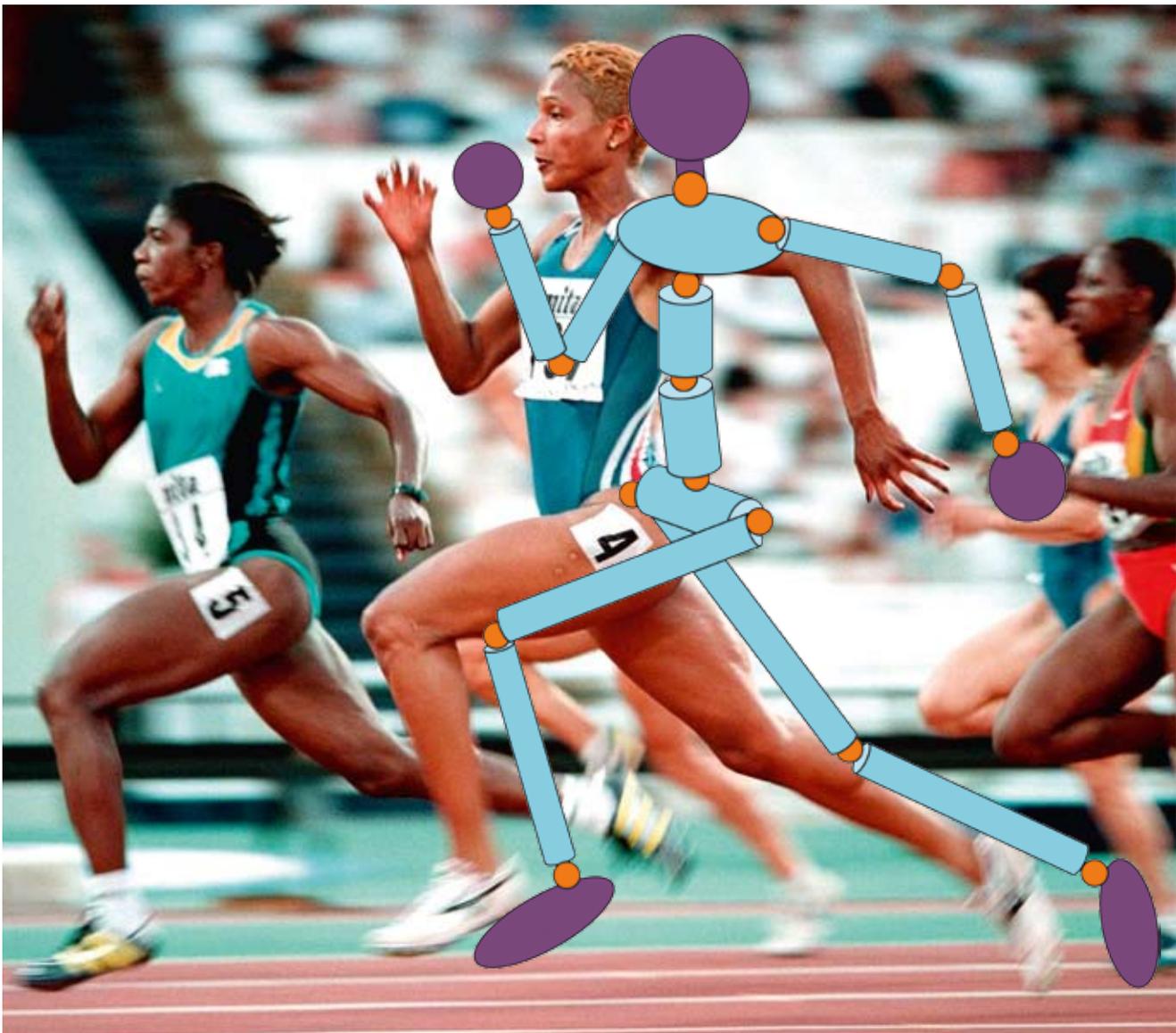


FOTO: DPA / AFP; GRAFIK: KATJA MOMBALD

Wozu sollen Roboter laufen lernen?

Die meisten Roboter sind in der industriellen Fertigung eingesetzt, vor allem im Autobau. Sie haben äußerst bewegliche Arme, um mit dem Schraubenschlüssel oder der Lackspritzpistole überall hinzukommen, sind aber in der Regel an ihrem Arbeitsplatz festgeschraubt.

Maschinen, die sich bei ihrer Arbeit bewegen müssen, etwa beim Staubsaugen, Laubaufsammeln oder Schwimmbadputzen, tun das heute noch vorwiegend rollend. Damit sind sie auf einen ebenen oder zumindest hindernisarmen Untergrund beschränkt.

Gehende Roboter nach biologischem Vorbild mit zwei bis acht Beinen sind jedoch im Wortsinn auf dem Vormarsch, bieten doch Beine einen großen Vorteil auf unebenem Boden oder beim Überwinden von Hindernissen. Das ist von entscheidender Bedeutung auf Arbeitsfeldern, die für den Menschen gefährlich, schwer zugänglich oder auch nur sehr weit weg sind: Brandbekämpfung, Rettung nach Unfällen oder Naturkatastrophen, Minensuche, Exkursionen zum Mars.



Der Roboter »Asimo« geht zweibeinig.

den Rumpf zwei bis vier starre Segmente mit Gelenken dazwischen – wenn es nicht gerade um einen Purzelbaum oder das Turmspringen geht. Ein »Standardmodell«, das alle Knochen und Muskeln enthält und daher jede Bewegung getreulich wiedergibt, wäre zwar wünschenswert, würde aber einen unverhältnismäßig hohen Rechenaufwand erfordern.

Zur aussagekräftigen Beschreibung von Bewegungen unter Beteiligung des ganzen Körpers reichen in der Regel 50 bis 80 Zustandsvariable aus.

Eine Bewegung wird dadurch ausgedrückt, dass die Zustandsvariablen Funktionen der Zeit sind. Insgesamt führt diese Modellierung auf ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen. Wenn man die Positionen und Geschwindigkeiten aller Glieder zu einem bestimmten Anfangszeitpunkt sowie die Kräfte für einen gewissen Zeitraum danach vorgibt, so ist die Bewegung des Systems für diesen Zeitraum eindeutig bestimmt und berechenbar (Kasten rechts).

Das heißt aber auch: Wir können über die Kräfte – in der Realität wie im Modell – zwar unmittelbar verfügen (daher der Name »Steuerungsvariable«), während sich die Bewegung selbst daraus indirekt ergibt. Nur müssen wir diese Kräfte auch vorgeben, damit überhaupt irgendeine Bewegung zu Stande kommt.

Statt mit den Kräften arbeiten wir mit den Drehmomenten, weil durch sie die Rotationsbewegung um die Gelenke

viel einfacher auszudrücken ist. Wir haben also die Aufgabe, den Verlauf aller Gelenkdrehmomente während der Bewegung vorzugeben, entweder direkt oder indirekt, indem wir das von einem Muskel ausgeübte Drehmoment als Funktion seiner aktuellen Länge, seiner Kontraktionsgeschwindigkeit und seines Aktivierungszustands beschreiben. Auf diese Weise erhalten wir zwar realitätsnähere Drehmomentenverläufe, haben aber das eigentliche Problem nur verschoben: Die Steuerungsvariablen – Kräfte, Drehmomente oder Muskelaktivierungen – sind im Allgemeinen unbekannt und auch nicht aus den Bewegungen erschließbar.

Denn erstens ist es aussichtslos, einen Kraftverlauf, der eine vorgegebene Bewegung erzeugt, durch Probieren herauszufinden, selbst wenn man das mit Hilfe von Software sehr systematisch tut. Mit irgendwie ausgedachten Kräften fällt der simulierte Mensch in den allermeisten Fällen um; das hilft beim Probieren nicht weiter. Unter den Bewegungsverläufen, zu denen der Mensch fähig ist, sind die sinnvollen eben relativ selten – wer je den Sketch »Das Ministerium der albernen Gangarten« (»The Ministry of Silly Walks«) von Monty Python gesehen hat, wird das bestätigen.

Zweitens ist der Bewegungsapparat des Menschen redundant, das heißt, er kann ein gegebenes Ziel (»Gehe möglichst schnell von A nach B«) mit sehr vielen verschiedenen Mitteln erreichen (und nicht nur das – selbst bei vorgeschriebenem Bewegungsverlauf sind die Muskelkräfte noch nicht eindeutig festgelegt). Welches wird er wählen?

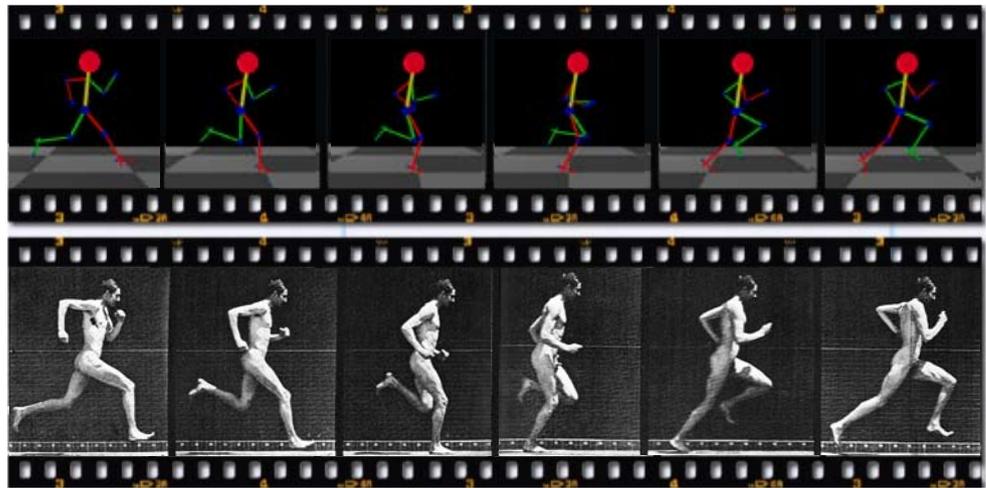
Optimieren nach dem Vorbild der Natur

Ein geeignetes Auswahlkriterium liefert die Biologie. Lebende Organismen realisieren sehr häufig optimale Lösungen für die verschiedensten Aufgaben: Bienen bauen ihre Waben mit der geringstmöglichen Menge an Bienenwachs. Die Bälkchenstruktur im Inneren eines Knochens erreicht die geforderte Festigkeit mit minimalem Materialaufwand. Ein Vogelflügel kann seine Form und seine Bewegung optimal an verschiedene Flugsituationen wie Segelflug, Start oder Landung anpassen und erzeugt den nötigen Auftrieb und Vortrieb mit sehr geringem Energieaufwand. Auch Bewegungen von Menschen und Tieren haben sich während der Evolution und im Lauf der individuellen Entwicklung vom Kleinkind zum erwachsenen Menschen stetig optimiert.

Die Evolutionstheorie bietet dafür eine einleuchtende Erklärung. Wer seine Ziele mit geringerem Energieeinsatz, höherer Geschwindigkeit oder größerer Sicherheit erreicht als seine Artgenossen, hat ihnen gegenüber einen Selektionsvorteil. Das Optimierungskriterium ist dabei von Situation zu Situation verschieden: Für einen Zugvogel kommt es vor allem darauf an, auf der langen Flugstrecke möglichst wenig Energie zu verbrauchen; für den Hasen auf der Flucht ist statt minimaler Energie eher maximale Geschwindigkeit das wesentliche Kriterium.

Was die Evolution an den natürlichen Organismen geleistet hat, gilt es nun im Computer nachzuahmen. Unter allen möglichen Bewegungen suchen wir die schnellste, effizien-

Der simulierte Läufer, dessen Bewegung auf minimalen und gleichmäßigen Kräfteinsatz bei vorgegebener Durchschnittsgeschwindigkeit optimiert ist, läuft im Wesentlichen genau so wie der rennende Mann, den Eadweard Muybridge schon in den 1870er Jahren gefilmt hat.



OBERN: KATIA MOMBALU; UNTERN: EADWEARD MUYBRIDGE

teste, stabilste oder naturgetreueste. In der Mathematik nennt man das ein Problem der optimalen Steuerung (siehe Kasten S. 88). Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass wir nichts an der Bewegung im Voraus festlegen müssen (und dabei auch nichts falsch machen können). Das Programm bestimmt Zustands- und Steuerungsvariable zugleich so, dass sie in Bezug auf das gewählte Kriterium optimal sind.

Der simulierte Sprinter

Mit dieser Technik ist es uns unter anderem gelungen, einen numerisch modellierten Menschen rennen zu lassen. Seine körperlichen Eigenschaften entnahmen wir Tabellen. Darüber hinaus haben wir nichts weiter vorgegeben als die – weltre-

kordverdächtige – Geschwindigkeit von 10 Metern pro Sekunde und folgendes Optimierungskriterium: Die zu minimierende Zielfunktion ist die Summe der Quadrate der Drehmomente in allen Gelenken, aufsummiert (genauer: integriert) über die Zeit. Dieses Kriterium zielt nicht nur auf möglichst geringen Kraftaufwand (die Drehmomente sind den Kräften proportional), sondern auch auf einen möglichst gleichmäßigen Kräfteinsatz: Wer ständig ungefähr die gleiche Energie pro Zeiteinheit in das System einbringt, erreicht einen günstigeren (niedrigeren) Wert der Zielfunktion als derjenige, der dieselbe Gesamtenergie im Hauruckverfahren einsetzt.

Ansonsten haben wir keinerlei Information über die Bewegung, zum Beispiel aus der experimentellen Ganganalyse,

Wie bestimmt man aus Kräften die Bewegung?

Verschiedene Teile eines Systems üben Kräfte aufeinander aus, die von der Position dieser Teile, ihren Geschwindigkeiten sowie von der Zeit abhängen. Wie werden die Teile sich bewegen?

Das ist im Prinzip dieselbe Frage, die Isaac Newton (1643–1727) zu beantworten hatte, als er aus der Fallbewegung des sprichwörtlich gewordenen Apfels und der Bewegung der Planeten um die Sonne die Gravitationsgesetze herleitete. Zu der Kenntnis der Kräfte muss noch ein einziges Gesetz hinzutreten: »Kraft gleich Masse mal Beschleunigung«. Aus der Summe aller Kräfte, die auf einen Punkt wirken, und den beteiligten Massen können wir so die Beschleunigung berechnen. Damit haben wir das aufgestellt, was die Mathematiker ein System gewöhnlicher Differenzialgleichungen nennen.

Dieses Gleichungssystem zu lösen bedeutet, aus der Änderungsrate der Geschwindigkeit – nichts anderes ist die Beschleunigung – die Geschwindigkeit selbst zu errechnen und aus ihr die Position der Glieder, denn die Geschwindigkeit ist die Änderungsrate der Position.

Bei dem System aus Massen und Gelenken, das einen bewegten Menschen simuliert, sind die Kraftgesetze und damit die Bewegungsgleichungen sehr kompliziert, weil die Massen

nicht einfach den angreifenden Kräften folgen, sondern durch die Gelenke miteinander verkoppelt sind. Ausgeschrieben würden die Differenzialgleichungen mehrere Quadratmeter bedecken – aber man schreibt sie natürlich nicht auf Papier, sondern drückt sie durch ein Computerprogramm aus.

An eine schöne, geschlossene Lösungsformel ist unter diesen Umständen nicht zu denken (jedenfalls wenn es um mehr geht, als nur im Sitzen die Unterschenkel baumeln zu lassen). Gleichwohl gibt es im Prinzip immer eine eindeutige Lösung des Anfangswertproblems, und der Computer findet sie auch mit hinreichender Genauigkeit.

Das gilt selbst dann, wenn sich unterwegs das Kraftgesetz ändert. Das kommt bei Bewegungen wie Gehen und Rennen häufig vor; denn in dem Moment, in dem ein Fuß auf den Boden auftritt, erfährt er dessen Gegenkraft, wird abrupt abgebremst und am Einsinken gehindert – bis zu dem Moment, wo der Fuß wieder abhebt und die Bodenkraft ebenso abrupt auf null abfällt. Das Computerprogramm muss also diese Schaltzeitpunkte, die ja nicht vorab bekannt sind, sondern sich erst aus der Lösung ergeben, bestimmen und daraufhin das jeweils aktuelle Kraftgesetz anwenden.

hineingesteckt. Gleichwohl liefert die Optimierung bemerkenswert realistische Bewegungen (Bild S. 87).

Was kann man mit solchen Ergebnissen anfangen? Biomechaniker und Sportler bekommen zunächst Bewegungsdaten von der Art, wie sie auch bei einer Vermessung im Ganglabor anfallen. Das sind insbesondere der Verlauf der Gelenkwinkel und der Geschwindigkeiten, die Bodenreaktionskräfte und somit auch die Belastung der Knochen und Gelenke durch das Auftreten. Allerdings sind die berechneten Daten wesentlich vollständiger und besser analysierbar als die gemessenen. So geben sie Aufschluss über charakteristische Größen der optimalen Bewegung wie Schrittlänge, Schrittfrequenz und Bahn des Schwerpunkts. Darüber hinaus liefert die Simulation auch Größen, die man nicht sehen kann, vor allem die Verläufe von Kräften, Drehmomenten und Belastungen.

Noch interessanter wird es, wenn man nicht mit Durchschnittsdaten rechnet, sondern mit den körperlichen Eigenschaften eines konkreten Sportlers. Dazu muss man nicht nur dessen Körpermaße einschließlich der Massen und Trägheitsmomente der einzelnen Segmente erfassen, sondern nach Möglichkeit auch seine persönlichen Kraftgrenzen. Mit

dem so individualisierten Modell kann man genau diesem Sportler wertvolle Auskünfte geben, zum Beispiel welcher Laufstil für ihn optimal ist, welche Geschwindigkeit er damit aktuell erreichen kann und welche Muskeln er im Fitnessstudio noch wie weit aufbauen muss, wenn er die 10-Sekunden-Marke beim 100-Meter-Lauf knacken will.

Die Individualisierung lässt sich noch weitertreiben. Nicht jeder Sprinter hat die gleichen Körpersegmente; man denke nur an den beidseitig unterschenkelamputierten südafrikanischen Sprinter Oscar Pistorius, der mit zwei federähnlichen Füßen aus Kohlenstofffaser rennt und durch seine spektakulären Geschwindigkeiten berühmt wurde. Wenn man in einem für ihn gerechneten Modell die beiden Unterschenkel und Füße durch entsprechende Modelle der Prothesen ersetzt, könnte man die für ihn optimalen Bewegungen, seinen Energieverbrauch und Ähnliches berechnen.

Mit denselben Verfahren kann man auch die Bewegungen eines humanoiden Roboters verbessern. Seit Jahren messen Konstrukteure und Programmierer ihre Kräfte an der Aufgabe, ihre Roboter möglichst schnell gehen und im Idealfall sogar rennen zu lassen. Dies ist sehr schwierig: Rennen erfor-

Optimierung und optimale Steuerung

Die einfachsten Optimierungsprobleme sind die Maximums- oder Minimumsaufgaben, die kurz vor dem Abitur im Mathematikunterricht vorkommen: Finde den Punkt, an dem eine Funktion ein Maximum oder Minimum annimmt. Dazu gilt es auszurechnen, wo die erste Ableitung dieser Funktion den Wert null annimmt, und sich dann durch die zweite Ableitung zu vergewissern, dass die gefundene Stelle auch wirklich ein Minimum ist.

Das Problem ist nicht grundsätzlich anders, wenn die zu minimierende Funktion (die »Zielfunktion«) nicht nur von einer, sondern von mehreren reellen Variablen abhängt. Sind es zwei Variable, so kann man sich die Funktion als eine Hügellandschaft veranschaulichen. Dort sucht man einen höchsten Punkt, und wieder ist die Bedingung, dass dort die Ableitung gleich null ist, das heißt, die Tangentialebene waagrecht liegt. Insbesondere muss die Funktion differenzierbar sein, damit das klassische Verfahren anwendbar ist, das heißt, die Hügellandschaft darf keine scharfen Kanten und schon gar nicht senkrecht abfallende Wände haben.

Wenn wir aber eine optimale Bewegung suchen, etwa das energieeffizienteste Laufen oder den schönsten Turmsprung, dann sind die Unbekannten ganze Funktionen, also sozusagen unendlich viele Variable. Ein solches Problem – das dann nicht mehr Optimierungs-, sondern Optimalsteuerungsproblem heißt – ist zwar mathematisch, mit Hilfe der Variationsrechnung, auch noch zu erfassen, aber nicht ohne Weiteres mit Computern zu lösen, da diese mit dem Unendlichen nicht umgehen können. Hier muss diskretisiert werden: Man ersetzt die unbekanntesten Steuerungsfunktionen durch endlich viele, mög-

lichst repräsentative Stellvertreter, also zum Beispiel einen Kraftverlauf durch die Werte der Kräfte zu gewissen markanten Zeitpunkten. Für die Zeiten dazwischen wird interpoliert.

Aus einem vermuteten Kraftverlauf berechnet ein Programm (der »Integrator«) die zugehörige Bewegung durch Lösung der Bewegungsgleichungen (Kasten S. 87). Daraus ergibt sich zum Beispiel auch die über den gesamten Zeitverlauf aufgewendete Energie, allgemein der Wert der Zielfunktion mitsamt deren Ableitungen, die man fürs Minimieren braucht.

Im Computer herrscht eine strikte Arbeitsteilung zwischen dem Programm zur Minimumssuche (dem »Optimierer«) und dem Integrator. Der Optimierer wandert gewissermaßen in der abstrakten, vieldimensionalen Hügellandschaft herum, bis er das Minimum gefunden hat, fragt bei jedem Schritt den Integrator nach dem Wert der Zielfunktion an dieser Stelle und schert sich nicht darum, wie der diesen Wert ausrechnet. Am Ende interessiert einen allerdings nicht in erster Linie der minimale Wert der Energie, sondern die Bewegung, die diesen Wert erzielt.

Schwierig wird die Aufgabe unter anderem dadurch, dass die Variablen nur Werte in gewissen Bereichen annehmen dürfen. Gelenkwinkel sind beschränkt: Man kann ein Knie weder überstrecken noch so stark beugen, dass Ober- und Unterschenkel zusammenfallen. Kräfte sind ebenfalls beschränkt, denn ein Muskel kann nicht mehr als eine gewisse Maximalkraft ausüben und Kräfte mit negativem Vorzeichen schon gar nicht. Das läuft darauf hinaus, dass die abstrakte Hügellandschaft verbotene Zonen enthält. Die darf der Optimierer zwar betreten und durchwandern, muss jedoch Sorge dafür tragen, dass das schließlich erreichte Minimum in einer erlaubten Zone liegt.



KATJA MOMBAUR

»Geh an den Punkt zwei Meter links von deinem derzeitigen Standort, und zwar so, dass deine Vorderseite zur Tür weist.« Eine derartige Anweisung kann man auf viele verschiedene Weisen ausführen: eine Kurve laufen, sich am Zielpunkt auf der Stelle drehen oder seitwärts schreiten. Die hier abgebildete Simulation des japanischen Roboters HRP-2 findet unter allen diesen Möglichkeiten diejenige, die auch ein Mensch wählen würde.

der einerseits schnelle Reaktionen und damit ein schnelles Regelsystem, andererseits Stellmotoren (»Aktuatoren«), welche die notwendigen hohen Drehmomente erzeugen können. Optimierungsrechnungen wie unsere holen aus einem vorgegebenen Robotertyp das Maximum an Leistung heraus. Besser noch: Wir können den Körperbau eines Roboters optimieren, bevor er gebaut wird, und damit auch in dieser Hinsicht das Wirken der biologischen Evolution nachvollziehen. Dazu müssen wir allerdings die bislang konstanten Parameter wie Schenkellängen zu Variablen erklären und mit in die Optimierung einbeziehen.

Salti und Schrauben

Eine andere, exotischere Sportart bietet uns ein reichhaltiges Betätigungsfeld: Turmspringen. Hier geht es nicht um alltägliche Fortbewegungsformen, sondern um sehr komplizierte und artistische Sprünge.

Das umfangreiche Regelwerk des internationalen Schwimmverbands FINA stellt eine große Palette an Sprüngen vom 10-Meter-Brett bereit, aus der sich jeder Springer einen auswählt: ein-, zwei- oder dreifacher Salto, vorwärts, rückwärts oder aus dem Handstand abgesprungen, zum Brett oder vom Brett weggedreht, in hockender, geheckteter oder gestreckter Körperhaltung, mit oder ohne Schrauben (Drehungen um die Längsachse). Wieder bietet die Redundanz des menschlichen Körpers viele verschiedene Möglichkeiten, einen gewählten Sprung auszuführen.

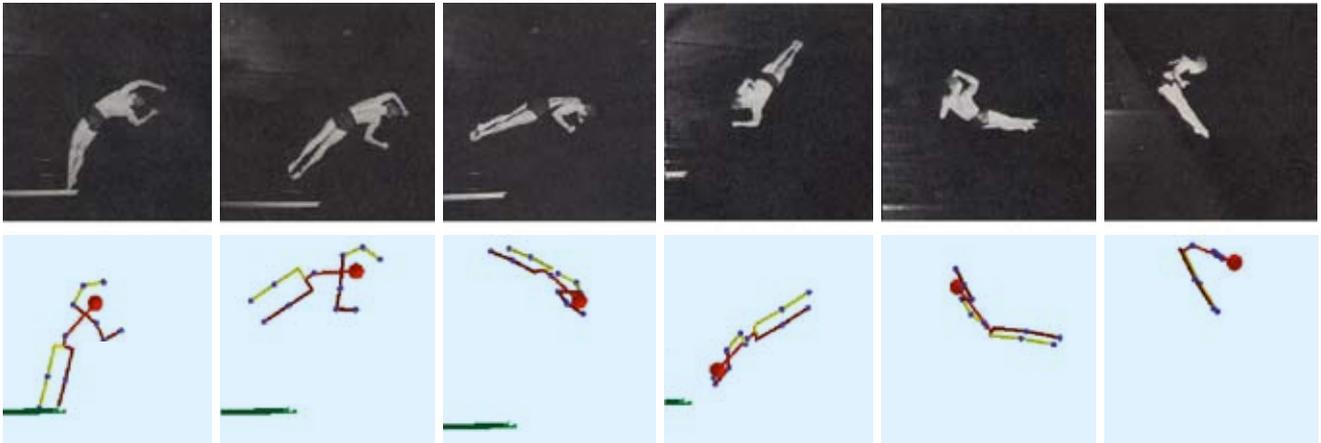
Auch hier führt die Zielfunktion »Summe der quadrierten Gelenkdrehmomente« zu sehr realistischen Bewegungen (Bild S. 90). Wir haben dazu ein ähnliches dynamisches Modell des menschlichen Körpers zu Grunde gelegt wie bei der Rennbewegung; nur die Arme und die Wirbelsäule mussten wir mit etwas mehr Gelenken ausstatten. Für die Kontaktpphase auf dem Sprungbrett und die Flugphase gelten verschiedene Kraftgesetze. Hinzu kommen alle Nebenbedingungen, die den gewählten Sprung definieren, sowie weitere, die ein gerades und spritzfreies Eintauchen produzieren.

Bemerkenswerterweise ergibt sich die hockende Position während des Sprungs automatisch aus der Optimierung. Das ist leicht zu erklären: In der zusammengekauerten Haltung ist das Trägheitsmoment des Springers bezüglich der Transversal-(Rechts-links-)achse und damit der Energieaufwand für einen Salto am geringsten. Andere Körperhaltungen – gehecktet oder gestreckt – müssen in der Optimierung durch Nebenbedingungen erzwungen werden. Sie kosten den Springer also mehr Energie als die Hocke, bringen aber bei einem vergleichbaren Sprung auch mehr Wertungspunkte.

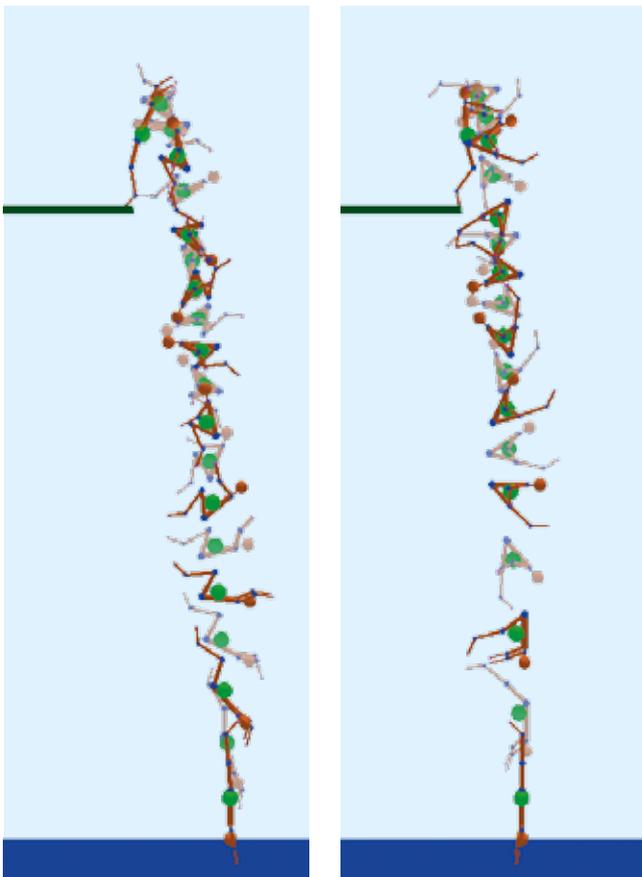
Gegen die Gesetze der Physik hilft natürlich keine Optimierung. Einerlei welche Verrenkungen der Springer durchführt, sein Schwerpunkt bewegt sich auf der Parabelbahn, auf die er sich durch seinen Absprung gebracht hat. Auch der Gesamtdrehimpuls um den Schwerpunkt bleibt erhalten, da keine äußeren Momente angreifen können.

Bei Schrauben hat die FINA den Springern zusätzlich Steine in den Weg gelegt, indem sie fordert, dass die Schraubendrehung beim Absprung nicht erkennbar ist. Nach dem Drehimpulserhaltungssatz ist es aber völlig unmöglich, in der Luft plötzlich eine Drehung aus dem Nichts zu zaubern. Was tut der Springer also? Er zerlegt die erlaubte, von Anfang an vorhandene Drehung um seine Transversalachse in eine Saltodrehung und eine Schraubendrehung, indem er durch eine ruckartige asymmetrische Armbewegung kurz nach dem Absprung seine Körperachse kippt. Auch diesen Trick findet unser Programm.

Optimierungslösungen wie die beschriebenen finden außerdem Einsatz in der Computergrafik und in Animationsfilmen. Während bislang die Programme nur die mit *motion capture* aufgezeichneten Bewegungen echter Menschen in verarbeiteter Form abspielen, können wir mit demselben Differenzialgleichungsmodell und unveränderter Zielfunktion realistische Bewegungen erzeugen, die einer neuen Umgebung – Stolpersteine, abschüssiger oder glitschiger Boden – angepasst sind.



Der simulierte Turmspringer vollführt Bewegungen, die denen eines echten Sportlers zum Verwechseln ähnlich sind, wenn man ihm die richtigen Bedingungen vorgibt: Wähle die Bahn mit dem geringsten Kraftaufwand unter Einhaltung der Wettkampffregeln und weiterer Vorschriften wie »gerades Eintauchen« und »kein Kontakt mit dem Sprungbrett nach dem Absprung«. Da der einprogrammierte Sicherheitsabstand zum Brett gering ist, führt der virtuelle Springer waghalsigere Sprünge aus als ein echter. Oben ein anderthalbfacher Vorwärtssalto, gehechtet, mit einfacher Schraube (FINA-Kürzel 5132 D), links unten ein zweieinhalbfacher Rückwärtssalto, gehockt (205 C), rechts unten ein zweieinhalbfacher Vorwärtssalto, gehechtet (105 B).



Außerdem ist es interessant, die Zielfunktion zu variieren. Ein Projekt dieser Art führen wir zurzeit für Gehbewegungen durch. Es stellt sich heraus, dass Emotionen die Körpersprache beim Gehen beeinflussen, indem sie verschiedene Zielfunktionen hervorrufen. So können wir nicht nur irgendeinen neutralen Gang berechnen, sondern gezielt den eines wütenden, traurigen oder auch übermütigen Menschen.

Zur Antwort die richtige Frage suchen

Damit gelangen wir unversehens zu einem neuen Problemtyp. Dessen klassische Beschreibung steht in dem Kultroman »Per Anhalter durch die Galaxis« von Douglas Adams: Die Antwort auf die »Frage nach dem Sinn des Lebens, dem Universum und dem ganzen Rest« ist bekanntlich 42, aber was genau war die Frage? In unserem Kontext ist die optimale Lösung bekannt, nämlich eine bestimmte Gehbewegung; aber was genau ist die Zielfunktion?

Beim Rennen haben wir eine Zielfunktion gefunden, die eine qualitativ gute Lösung liefert. Ob es tatsächlich diejenige ist, die unser Körper minimiert, oder ob es unter allen theoretisch denkbaren Zielfunktionen noch bessere gibt, erforschen wir derzeit.

Was optimiert ein Läufer tatsächlich? Mathematisch läuft diese Frage auf ein so genanntes inverses Optimalsteuerungsproblem hinaus. Man nimmt ein Sortiment plausibler Zielfunktionen, multipliziert jede mit einem noch unbekanntem Faktor (einem »Gewicht«) und addiert sie alle auf. Das ist die allgemeine Form für unsere unbekanntem Zielfunktion. Wieder definieren wir einen abstrakten Raum; diesmal entspricht jeder Punkt des Raums einem bestimmten Satz von Gewichten und damit einer bestimmten Zielfunktion. Wir lösen dann ein neues Optimierungsproblem: Gesucht ist ein Punkt des Raums mit der Eigenschaft, dass der Unterschied zwischen der Bewegung, die in Bezug auf die zu dem Punkt gehörige Zielfunktion optimal ist, und dem natürlichen Vorbild minimal wird.

Insgesamt haben wir jetzt drei Probleme aufeinandergeräumt: Problem A ist die Aufgabe, zu gegebenen Kräften die Bewegung zu berechnen. Ihm übergeordnet ist das Problem B, die Bewegung zu bestimmen, die eine gegebene Zielfunktion (zum Beispiel die Energie) minimiert. Darüber wieder-

um liegt das Problem C, zu einer gegebenen echten, beobachteten Bewegung diejenige Zielfunktion zu finden, deren zugehörige Bewegung den Unterschied zu der gegebenen Bewegung minimiert. Um Problem C zu lösen, muss man viele Lösungen von Problem B ausrechnen, bis man die im Sinn von C optimale gefunden hat. Um eine Lösung von Problem B zu finden, muss man viele Lösungen von A ausrechnen. Das ergibt insgesamt sehr viel Arbeit für den Computer.

Einige Ergebnisse zum inversen Optimalsteuerungsproblem haben wir schon vorzuweisen. So können wir simulieren, wie ein Mensch seinen Weg von einem vorgeschriebenen Punkt zu einem anderen wählt, wenn zusätzlich seine Orientierung am Endpunkt vorgeschrieben ist (Bild S. 89), oder – überraschend schwierig – einem Roboter das Jo-Jo-Spielen beibringen. Aber ausgerechnet für das Rennen müssen wir erst ein detaillierteres Modell erarbeiten, bevor wir zufrieden stellende Ergebnisse erwarten können.

Stabilität trotz Steinen im Weg

Mittlerweile beherrschen wir das Optimieren von vielen verschiedenen Bewegungen. Aber zum erfolgreichen Gehen – allgemein zu jeder gelingenden Bewegung – gehört mehr, als einen Kraftverlauf zu finden, der einen auf den Beinen hält und möglichst günstig ans Ziel befördert. Das gehende System muss auch stabil sein, das heißt kleine Störungen ohne größere Schwierigkeiten kompensieren können. Der Stein,



BEIDE FOTOS: KATJA MOMBÄUR

Passive Stabilität, statisch beim Stehaufhäschen (rechts) und dynamisch beim Pinguin: Der läuft eine schiefe Ebene bergab; die Energie bezieht er aus dem Höhenunterschied. Das Spielzeug ist so gebaut, dass es sich nach einer kleinen Störung von selbst wieder aufrichtet.

der mir überraschend im Weg liegt, darf mich zwar zu einer nicht optimalen Bewegungsform, aber nicht zu Fall bringen.

In diesem Punkt hinken Roboter noch sehr hinterher – im Wortsinn. Ein Roboter läuft viel langsamer als ein Mensch. Wenn man ihm eine schnellere Bewegung aufzwingt, fällt er ziemlich bald um, und das, obgleich er die Daten, die für seine Bewegung relevant sind, mit weitaus höherer Geschwindigkeit transportiert und verarbeitet als ein Mensch. Dieser dagegen bleibt selbst dann noch eine ganze Weile aufrecht,

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



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

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

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

▶ Vergünstigte Sonderhefte und das Produkt des Monats zum Spezialpreis



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus



Nicht ganz passiv, aber mit primitiver Steuerung: Zweibeinige Roboter aus der Universität Delft (links), aus der Cornell University (Mitte) und aus dem MIT



wenn die zentrale Datenverarbeitung im Gehirn etwa durch Alkohol erheblich gestört ist.

Ein Mensch muss nicht so rasch und präzise auf Störungen reagieren, weil seine mechanischen Eigenschaften seine Stabilität unterstützen. Er neigt gewissermaßen ganz ohne bewusste Anstrengung dazu, die aufrechte Haltung nach einer Störung wieder einzunehmen.

Das klassische Beispiel für diese passive Stabilität ist das Stehaufmännchen. Dieses einfache Kinderspielzeug kann seine Position weder in irgendeinem Sinn messen noch aktiv verändern. Trotzdem kehrt es aus jeder noch so schiefen Lage automatisch wieder in die Senkrechte zurück. Warum? Sein Schwerpunkt liegt so tief, nämlich unterhalb des Mittelpunkts des »Fußes« (genauer: der die Unterseite bildenden Halbkugel), dass ganz von allein rücktreibende Kräfte entstehen. Die Stabilität ist »systeminhärent«, das heißt, sie muss nicht durch gezielte Steuerung herbeigeführt werden, sondern ist bereits durch geeignete Anordnung der Massen und Bewegungsmöglichkeiten in das System hineinkonstruiert.

Diese Grundidee – das System kompensiert automatisch eine Störung, ohne sie zu messen – gilt es nun auf Laufbewegungen zu übertragen. Auch dafür gibt es Lösungen in Spielzeugform (Bild S. 91), die ganz ohne Aktuatoren und Sensoren stabil eine schiefe Ebene herunterwackeln können, sowie deren Weiterentwicklungen, welche die Energie zum Laufen in der Ebene selbst aufbringen (Bild oben). Aber die lassen das Problem einfacher erscheinen, als es ist. Man muss nämlich die aktiven Stellglieder – Muskeln beim Menschen, Aktuatoren beim Roboter – mit in die Berechnung einbeziehen. Entsprechend sind die selbststabilisierenden Effekte viel komplexer und lassen sich nicht mehr so intuitiv verstehen wie ein Kugelfuß mit großem Radius und ein tief liegender Schwerpunkt. Deshalb wurde das Prinzip der passiv-dynamischen Stabilität bisher auch nur auf Roboter mit sehr wenigen (höchstens zwei) Aktuatoren angewandt, bei denen die Intuition noch weiterhalf – nicht auf menschenähnliche Strukturen.

Auch für die Stabilität lässt sich eine Zielfunktion angeben mit der Eigenschaft, dass das System umso stabiler ist, je kleiner der Wert dieser Zielfunktion ist. Also gilt es wieder zu

optimieren: Man versucht ein Optimum der Stabilitätsfunktion zu finden, indem man alles variiert, worüber man verfügen kann, insbesondere die geometrischen Eigenschaften des Systems und die Drehmomentenverläufe seiner Stellglieder.

Leider hat diese spezielle Zielfunktion äußerst ungünstige mathematische Eigenschaften; insbesondere ist sie an vielen Stellen nicht differenzierbar, so dass die üblichen Verfahren scheitern und wir eigens für dieses Problem neue entwickeln mussten. Immerhin ist es uns gelungen, Computermodelle von Robotern zu entwickeln, die sich unter vorher festgelegten periodischen Kräfteinwirkungen bewegen und alle auftretenden kleinen Störungen automatisch kompensieren.

Damit ist es auch möglich, die Grundidee der passiven Stabilität auf so komplexe Systeme wie humanoide Roboter zu übertragen und ihren Körperbau und ihre Bewegungen stabilitätsoptimal zu wählen. Das bedeutet natürlich nicht, dass humanoide Roboter in Zukunft ohne Regelsysteme auskommen können; aber die Ausnutzung der passiven Stabilität könnte deren Aufgabe bedeutend vereinfachen. ~

DIE AUTORIN



Katja Mombaur hat Luft- und Raumfahrttechnik studiert und 2001 in Mathematik promoviert. Seit 2010 ist sie Professorin am Interdisziplinären Zentrum für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg, wo sie die Arbeitsgruppe »Optimierung in Robotik und Biomechanik« leitet. Sie arbeitet vorrangig an der Modellierung, Simulation und Optimierung anthropomorpher Systeme, also von Menschen, humanoiden Robotern und virtuellen Charakteren.

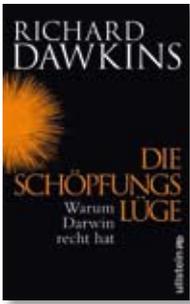
QUELLEN

- Alexander, R.M.:** The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals. In: International Journal of Robotics Research 3, S. 49–59, 1984
- Collins, S.H. et al.:** Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers. In: Science 307, S. 1082–1085, 2005
- Koschorreck, J., Mombaur, K.:** Optimization of Somersaults and Twists in Platform Diving. In: Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering 12, S. 157–159, 2009
- Mombaur, K. et al.:** Self-Stabilizing Somersaults. In: IEEE Transactions on Robotics 21, S. 1148–1157, 2005
- Mombaur, K.:** Using Optimization to Create Self-stable Human-Like Running. In: Robotica 27, S. 321–330, 2009
- Mombaur, K. et al.:** From Human to Humanoid Locomotion – An Inverse Optimal Control Approach. In: Autonomous Robots 28, S. 369–383, April 2010
- Schultz, G., Mombaur, K.:** Modeling and Optimal Control of Human-Like Running. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 15, S. 783–792, 2010

WEBLINKS

www.orb.uni-hd.de
Webpage der Arbeitsgruppe Optimierung in Robotik und Biomechanik

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1069978



Richard Dawkins

Die Schöpfungslüge

Warum Darwin recht hat

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.

Ullstein, Berlin 2010. 528 S., € 24,95

BIOLOGIE

Die Evolutionstheorie als spannender Krimi

Richard Dawkins trägt für die ewigen Zweifler aktuelle Beweise für die zentrale These der Biologie nach.

Bei dem Namen Richard Dawkins und dem Titel »Die Schöpfungslüge« erwartet man – wieder einmal – ein hitziges Pamphlet gegen Gott, Religion und Kirche. Weit gefehlt: Bereits im ersten Kapitel betont der britische Evolutionsbiologe und vielfache Buchautor, dass sich sein neues Werk keinesfalls gegen Religion und Glaube richte – zumal er ein solches bereits geschrieben habe (»Der Gotteswahn«, Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 118). Im Interesse der Sache hat er sich sogar zum Schulterchluss mit dem Klerus durchgerungen: Gemeinsam mit Richard Harries, dem Bischof von Oxford, verfasste er 2002 einen Brief an Premierminister Tony Blair, in dem beide für einen wissenschaftlich korrekten Schulunterricht zur Evolution eintreten. Bei diesem Thema gehe es nicht um Glaubensinhalte, sondern um wissenschaftliche Fakten. Und auf sie will sich der Autor diesmal beschränken.

Dawkins scheint ruhiger geworden zu sein. Dennoch kann er sich die eine oder andere Spitze nicht verkneifen, zum Beispiel gegen den islamischen Kreationisten Harun Yahya und andere betonköpfige Evolutionsleugner, die selbst im Angesicht einer Fülle von Fossilien stur behaupten, es gebe keine Bindeglieder zwischen den Arten und die Evolution sei daher eine unbewiesene und unhaltbar falsche Theorie.

Wer mag es einem derart glühenden Streiter für sein Fach verdenken?

Der Frage nach den fehlenden Bindegliedern widmet Dawkins denn auch ein ganzes Kapitel. Schritt für Schritt belegt er, was uns die fossilen Überreste von Lebewesen, die vor Millionen von Jahren auf unserem Planeten ihr Dasein fristeten, über die Entstehung von Tieren und Pflanzen erzählen und weshalb das schichtweise Auftreten bestimmter Vertreter ein klarer Beweis für die Evolution ist. Die Entstehung unserer eigenen Spezies behandelt er im Anschluss in einem gesonderten Kapitel.

Doch bevor sich Dawkins mit versteinerten Beweisen auseinandersetzt, legt er seinen Lesern zunächst dar, dass sich die Entwicklung von Arten auch direkt vor unseren Augen abspielt, nämlich bei der gezielten Kreuzung von Nutzpflanzen und -tieren. Brokkoli, Blumenkohl, Milchkühe und die vielfältigen Hunderassen sind das Ergebnis von Evolution, forciert durch Züchtung. Faszinierend sind die Beobachtungen des russischen Genetikers Dmitri Beljajew, der in den 1950er Jahren für einen Zuchtversuch ausschließlich besonders zahme Silberfüchse auswählte. Bereits nach sechs Generationen erhielt er »domestizierte« Tiere, nach 20 verfügte die Füchse nicht nur über einen zahmen Charakter, sondern ähnelten mit schwarz-weiß geschecktem Fell und

Schlappohren auch äußerlich eher Hunden denn Silberfüchsen.

Selbst in freier Natur können wir unter bestimmten Bedingungen rapide Veränderungen beobachten, zum Beispiel wenn eine Art – verursacht durch Menschenhand oder durch Umweltveränderungen – von ihrem angestammten Lebensraum in einen neuen übersiedelt. So geschehen auf der kroatischen Insel Pod Mrčaru, auf der Wissenschaftler 1971 eine Eidechsenart ansiedelten, die ursprünglich auf der Nachbarinsel Pod Kopače heimisch war. Als eine andere Forschergruppe im Jahr 2008 diesen Tieren nachspürte, stellten sie fest, dass sich die Reptilien massiv verändert hatten – im Aussehen, im Verhalten und bei ihrer Ernährung, die sie von Insekten auf vorwiegend pflanzliche Nahrung umgestellt hatten.

Wem derartig offensichtliche Belege für eine fortschreitende und vom Selektionsdruck gesteuerte Entwicklung nicht reichen, der darf sich in den weiteren Kapiteln über eine Beweisführung per Molekular- und Entwicklungsbiologie freuen.

Dawkins argumentiert von Anfang bis Ende seines Buchs leicht verständlich, geistreich, ja brilliant. Dabei schreibt er mit einer Leidenschaft und so persönlich, dass sich das durch und durch wissenschaftliche Buch so spannend liest wie ein Krimi.



Ein Taubenschwänzchen (oben) und ein Kolibri liefern ein eindrucksvolles Beispiel für konvergente Evolution.

Hartgesottene Kreationisten wird wohl auch dieses Meisterstück nicht überzeugen. Alle anderen dürfen sich auf eine spannende und farbenfrohe Expedition durch die Entstehungsgeschichte unserer Spezies und aller anderen Lebewesen der Erde freuen. Der eng-

lische Titel des Buchs »The Greatest Show on Earth« (»Die tollste Show der Welt«) wird Dawkins' jüngstem Werk viel gerechter als die reißerische deutsche Version – und hätte bestimmt nicht weniger Leser angezogen.

Stefanie Reinberger

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln. »Die Schöpfungslüge« hat sie bei einer Reise durch Westafrika gelesen – fasziniert davon, welche erstaunlichen Tiere und Pflanzen die Evolution hervorgebracht hat.



Harald Zaun

SETI – Die wissenschaftliche Suche nach außerirdischen Zivilisationen **Chancen – Perspektiven – Risiken**

Heise, Hannover 2010. 302 S., € 19,90

ASTRONOMIE

Abschreckende Begeisterung

Wer Harald Zauns Stil erträgt, erfährt die spannende Geschichte von der Suche nach außerirdischer Intelligenz.

Mit Verschwörungstheorien und mesoterischen Fantastereien hat Harald Zaun nichts im Sinn. Vielmehr behandelt er die Suche nach außerirdischer Intelligenz historisch und wissenschaftlich seriös. Man merkt seinem Buch an, dass er vor seiner Laufbahn als Wissenschaftsjournalist in Geschichte promoviert hat.

Mit den Bedingungen, die für die Entwicklung intelligenten Lebens nötig sind, hält sich Zaun nicht lange auf; da bietet Hansjürg Geigers Buch »Astrobiologie« einen tieferen Einblick. Vielmehr setzt er als selbstverständlich voraus, dass außerirdische Zivilisationen existieren müssen: Das Universum sei »zu kreativ und groß«, als dass wir darin die einzige intelligente Lebensform sein könnten.

Der historische Rückblick zu Beginn des Buchs – von der Antike bis zur Neuzeit – ist ein Leckerbissen für philosophisch Interessierte. Dabei kommt so manche Kuriosität zu Tage: So äußerte der Mathematiker Carl Friedrich Gauß (1777–1855) den wenig umweltfreundlichen Vorschlag, die sibirische Taiga

großflächig in geometrischen Mustern zu entwalden. So wollte er die Mond- und Marsbewohner darauf aufmerksam machen, dass auf der Erde intelligentes Leben existiert, und sie zu einer Kontaktaufnahme bewegen.

Die Folgekapitel beleuchten Entwicklungen und Höhepunkte des Programms SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*) seit 1960. Durch Zauns persönliche Kontakte zu diversen Forschern ist die Darstellung bereichert worden. Nebenbei vermittelt er das nötige astrophysikalische Hintergrundwissen. Für absolute Laien wäre das Buch jedoch schwere Kost, wozu auch das völlige Fehlen von Abbildungen beitragen mag.

Bisher untersuchen SETI-Wissenschaftler größtenteils Radiowellen aus dem All auf ungewöhnliche Signale, die künstlichen Ursprungs sein könnten. Noch hat niemand eine Botschaft empfangen, die eindeutig von einer intelligenten Zivilisation stammt – auch das so genannte Wow-Signal von 1977, das viele Spekulationen auslöste, hat höchstwahrscheinlich eine natürliche

Ursache. Überhaupt ist die Chance sehr gering, eine an uns gerichtete außerirdische Botschaft aufzufangen, selbst wenn sie in diesem Moment einträte – denn dazu müsste ein Teleskop genau zum richtigen Zeitpunkt die richtige Raumregion auf der richtigen Wellenlänge »abhören«.

Um die Wahrscheinlichkeit eines Treffers zu erhöhen, wäre es also sinnvoll, neben Radiowellen vermehrt andere Bereiche des elektromagnetischen Spektrums zu durchsuchen. Ein ganzes Kapitel ist dem Programm OSETI (*Optical SETI*) gewidmet, bei dem nach Laserpulsen aus dem All gefahndet wird.

In den letzten Kapiteln schildert der Autor die Zukunftspläne von SETI sowie einige spekulative Ideen: ein Teleskop auf der Rückseite des Mondes, die Suche nach außerirdischen Artefakten, die Möglichkeit, dass Außerirdische vor langer Zeit eine Botschaft in unserem genetischen Code hinterlegt haben könnten, und etliches mehr. Und was wäre, sollten wir eines Tages wirklich Kontakt mit einer fremden Zivilisation aufnehmen? Unvorstellbare Umwälzungen wären die Folge, so Zaun. Bei allen Spekulationen macht der Autor allerdings stets deutlich, wo sie die Grenzen der Wissenschaft einhalten und wo die Fantasterei anfängt.

Insgesamt liefert Harald Zaun ein leidenschaftliches Plädoyer für Grundlagenforschungsprojekte wie SETI sowie für mehr internationale Zusammenarbeit: Nicht nur die Suche nach fremden Signalen sollte koordinierter ablaufen, sondern auch das Senden von Botschaften ins All, denn die Suche nach außerirdischer Intelligenz sei die »höchstmögliche Form der Forschung«.

Zuweilen lenkt der weitschweifige Stil vom ansonsten faszinierenden Inhalt

>> FORTSETZUNG AUF S. 98



22 SEPTEMBER 2011

BUSINESS DESIGN CENTRE, LONDON

www.naturejobs.com/careerexpo

The *Naturejobs* Career Expo in London is the UK's largest fair and conference focused exclusively on the scientific world.

Why Attend?

- Attending the exhibition is **FREE**
- Meet an expected **50 employers** looking to fill hundreds of vacancies
- Build your **professional network** with other attendees
- Attend the conference and hear **high-profile speakers** sharing their career experiences
- Visit the **workshops** for the in-depth view from companies and other organisations

For more information visit:

www.naturejobs.com/careerexpo 

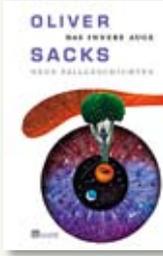


Event partner

Contact
Singapore 
contactsingapore.sg

naturejobs

nature publishing group 



Oliver Sacks

Das innere Auge. Neue Fallgeschichten

Aus dem Amerikanischen von Hainer Kober. Rowohlt, Reinbek 2011. 288 S., € 19,95

In seinem neuen Buch schildert der Neurologe Oliver Sacks die verschlungenen Pfade des Sehens. Besser gesagt, er zeigt in sieben Fallgeschichten, was dabei alles schiefgehen kann. So kann die Pianistin Lilian auf Grund einer Zelldegeneration in höheren Arealen ihres visuellen Kortex die Bausteine der Welt nicht mehr zusammensetzen; der Geschäftsmann Oscar verliert plötzlich die Fähigkeit zu lesen. Zur Kompensation dieser »Blindheit« springen beispielsweise das Tastempfinden oder das Vorstellungsvermögen mit gesteigerten Leistungen ein. Der mit rund 60 Seiten längste Bericht ist der von Sacks' eigenem Leiden. Im Dezember 2005 bringt ein Tumor im rechten Auge die geordnete Welt des prominenten Autors ins Wanken. Die geglückte Operation markiert nicht nur einen Neubeginn im Leben des 78-Jährigen; sie hat wohl auch den eigentlichen Anlass für dieses Buch geliefert. Nicht unbedingt sein bestes, aber sein persönlichstes.

STEVE AYAN



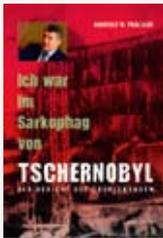
Leo Bormans (Hg.)

Glück. The World Book of Happiness

Aus dem Englischen von Sofia Blind. DuMont, Köln 2011. 164 S., € 25,-

Wer wäre nicht gern glücklich? Da kommt ein Buch wie gerufen, auf dem in Riesenlettern das Wort »Glück« prangt. Doch ein allgemein gültiges Rezept hat es leider auch nicht zu bieten – nur eine Unmenge an Ratschlägen von Glücksforschern aus der ganzen Welt. Im Plauderton berichten sie über ihre Ergebnisse ebenso wie über ihre eigenen Erfahrungen auf Fortunas Spuren vor ihrem jeweiligen kulturellen Hintergrund. Manche Aussage ist banal, aber es gibt auch bedenkenswerte Merksätze wie: »Glück kann man kaufen – wenn man sein Geld für andere ausgibt.« Wem das nicht hilft, weil er vielleicht kein Geld hat, der kann immer noch auswandern: nach Costa Rica, wo die glücklichsten Menschen leben, oder wenigstens nach Dänemark, dem Zweitplatzierten in der Rangliste.

GERHARD TRAGESER



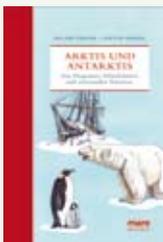
Anatoly N. Tkachuk

Ich war im Sarkophag von Tschernobyl. Der Bericht des Überlebenden

Übersetzt und bearbeitet von Reinhard Deutsch. Styria, Wien 2011. 320 S., € 24,95

Wer entdeckt, dass er für die falsche Sache sein Leben eingesetzt hat, neigt dazu, sich auf rechtfertigende Fakten – ersatzweise wilde Vermutungen –, unanfechtbare Motive wie die Liebe zum Vaterland und die eigenen Heldentaten zurückzuziehen. Hier lesen wir eine sowjetische Version. Ein hoher Geheimdienststoffizier, der einen Erkundungstrupp in das tödlich radioaktive Innere des Unglücksreaktors von Tschernobyl geführt hat, bläst diese Heldentat zu einem ganzen Buch auf, mit pathetisch zur Schau gestellter Vaterlandsliebe und gewaltiger Selbstbeweihräucherung. Dass Tkachuk von sich in der dritten Person und unter einem anderen Namen redet, hilft da nur wenig. Als er 25 Jahre danach seinem ehemaligen amerikanischen Gegenspieler die wilde Vermutung vorträgt, die Katastrophe von Tschernobyl sei durch eine feindliche Macht fernausgelöst worden, bricht der in Gelächter aus – und stirbt unmittelbar darauf an den Spätfolgen der Verstrahlung, die er sich beim Entwenden von Material aus Tschernobyl zugezogen hat. Ein makabrer Schluss.

CHRISTOPH PÖPPE



Roland Knauer und Kerstin Viering

Arktis und Antarktis. Von Pinguinen, Polarlichtern und stürzenden Stürmen

mare, Hamburg 2011. 336 S., € 26,-

Nur einfache Zeichnungen (von Jürgen Willbarth) statt Fotos und eine Erzählweise im Stil alter Abenteuerromane: Das Buch ist auf eine äußerst reizvolle Weise altmodisch – ein echter Schmöker. Und es bietet eine ziemlich umfassende Mischung: Geschichte der Polarpioniere, heutige Forschung, Einfluss von Arktis und Antarktis auf das Weltklima und nicht zuletzt alles, was in den Polargebieten wächst, kriecht und flucht. Dazu zählen auch die Menschen, die sich diesen faszinierenden Gefilden als Touristen nähern. Immer wieder flechten die Wissenschaftsjournalisten Roland Knauer und Kerstin Viering Anekdoten und persönliche Eindrücke von Pionieren und Forschern ein. Ein Sachbuch, das Genuss und Wissen auf beste Weise verbindet.

EIKE REINECKE

Naturwissenschaft und Technik in Schulen

Die **Robert Bosch Stiftung** unterstützte mit dem NaT-Working-Programm Kooperationsprojekte von Schülern, Lehrern und Wissenschaftlern. Die aus dem NaT-Working-Programm entstandenen Projekte und Unterrichtsmaterialien sind jetzt bei **Wissenschaft in die Schulen!** verfügbar:

- Freier Zugang zu über 100 interessanten und praxisnahen Projekten
- Kostenloser Download von zahlreichen Unterrichtsmaterialien aus den Fachgebieten Chemie, Mathematik, Biologie, NWT, Physik und Astronomie

www.wissenschaft-schulen.de –
das Onlineportal für Lehrer, die ihre Schüler für die
Naturwissenschaften begeistern wollen.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Robert Bosch **Stiftung**



NaT-Working
Naturwissenschaften und Technik:
Schüler, Lehrer und
Wissenschaftler vernetzen sich

ab. Blumige Umschreibungen und teils schiefe Metaphern, die sich im Lauf des Buchs zimal wiederholen, strapazieren die Geduld des Lesers. So hängen große Mengen an »Damoklesschwertern« über dem Haupt der Menschheit oder auch nur dem Programm SETI, dessen weitere Finanzierung nach der jüngsten Kürzung staatlicher Gelder mehr als unsicher ist. Und die überschwängliche Be-

geisterung der leidenschaftlichen, eifrig werkelnden Wissenschaftler, die mutig und unermüdlich nach dem lang ersehnten Außerirdischensignal suchen, wirkt eher abschreckend als ansteckend.

Doch wer über den gewöhnungsbedürftigen Stil hinwegsieht und über ein paar astronomische Grundkenntnisse verfügt, wird mit einer spannenden, unterhaltsamen und fundierten Ein-

führung in die Suche nach außerirdischem Leben belohnt. Viele Quellenangaben belegen die Recherchen und ermutigen zum Weiterlesen.

Manuela Kuhar

Die Rezensentin ist Diplomphysikerin und arbeitet an der Universität Würzburg beim »Netzwerk Teilchenwelt«, das die Öffentlichkeit in Kontakt mit der Teilchenphysik bringen will.



Elisabeth Vaupel, Stefan L. Wolff (Hg.)

**Das Deutsche Museum
in der Zeit des Nationalsozialismus
Eine Bestandsaufnahme**

Wallstein, Göttingen 2010. 710 S., € 39,90

ZEITGESCHICHTE

Keine Rechtfertigung, keine wohlfeile Empörung

Das Deutsche Museum in München passte sich den Ansprüchen des Nationalsozialismus bereitwillig an. Dass es bei der NS-Führung unbeliebt gewesen sei, ist eine Nachkriegslegende.

Man dringt schnell zur Grundaussage dieses Sammelbands vor, wenn man sich die einfache Frage stellt, was am Deutschen Museum eigentlich »deutsch« ist. Die Sammlung der »Meisterwerke der Naturwissenschaft und Technik« (so der offizielle Name des Museums) ist ja nicht von Natur aus an eine Nation gebunden; Wissenschaft und Technik haben ihre Wirkung stets über Grenzen hinweg entfaltet. Seit der Gründung in der Kaiserzeit war die Sammlung allerdings immer auch eine nationale Leistungsschau: ein Ort, der besonders den Erfindungsreichtum

deutscher Wissenschaftler und Ingenieure zur Geltung bringen sollte.

Die Autoren des vorliegenden Werks sind sich offenbar darin einig, dass sich an diesem Selbstverständnis nach der Machtübernahme der Nationalsozialisten nichts änderte und auch nichts ändern musste. Das ermöglichte somit die relativ reibungslose Anpassung der Institution an die neuen Verhältnisse nach 1933.

In 17 gut zu lesenden und in vielerlei Hinsicht aufschlussreichen Einzeldarstellungen nähern sich die Autoren, allesamt ausgewiesene Experten zur Wissenschafts- und Technikgeschichte oder zum Nationalsozialismus, diesem Befund aus verschiedenen Blickrichtungen. Dabei wird vor allem eines deutlich: Die Mitarbeiter dieser Institution hätten sich gegen die kulturpolitischen Vorgaben des Nationalsozialis-

mus nur dann überhaupt zur Wehr setzen können, wenn ihr – vermeintlich unpolitischer – Raum gleichsam von hohen Mauern geschützt gewesen wäre. Das entsprach aber gar nicht dem damaligen Charakter des Museums, welches eher als Schnittstelle der Selbstdarstellungsinteressen von Industrieunternehmen, Fachverbänden und Kulturfunktionären diente. Das Deutsche Museum arrangierte sich daher in demselben Maß mit den neuen Machthabern oder arbeitete eben auch mit ihnen zusammen, wie das die deutsche technisch-wissenschaftliche Elite in ihrer Gesamtheit zwischen 1933 und 1945 tat.

Es ist eine besondere Stärke dieser Publikation, dass die Autoren herausarbeiten, wie stark die Entscheidungs- und Leitungsgremien des Museums mit dieser Elite vernetzt waren. Das erklärt auch den Befund, dass sich die Interessen des nationalsozialistischen Staats gelegentlich in der Ausstellungspolitik widerspiegeln, wie am Beispiel der Kraftfahrzeughalle überzeugend dargelegt wird.

Entscheidend war immer ein guter Draht zur politischen Führung. Die unvermeidlichen Rangeleien und Kompetenzstreitigkeiten, die typisch für das Herrschaftssystem des Nationalsozialismus überhaupt waren, sind erst im Nachhinein und auf durchschaubar apologetische Weise als absichtsvolle Distanz gedeutet worden. Wenn Besitz- und Kontrollansprüche seitens der NS-Führung zu Konflikten führten, wie etwa im Fall des Generalinspektors für das Deutsche Straßenwesen Fritz Todt, dann eher aus einer Logik institutionellen

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

Handelns heraus und nicht etwa auf Grund ideologischer Bedenken.

So wäre zu fragen: Was war eigentlich spezifisch nationalsozialistisch am Deutschen Museum zur Zeit des Nationalsozialismus? Zwar gehörte dem dreiköpfigen Vorstand mit dem Verleger Hugo Bruckmann ein Förderer Hitlers und Nationalsozialist der ersten Stunde an, aber der Physiker Jonathan Zenneck und der Ingenieur Conrad Matschoß waren der Studie zufolge keine eifernen Nationalsozialisten (nicht einmal Mitglieder der NSDAP). Nach 1933 war es jedoch prinzipiell schwierig, zwischen Systemloyalität und Staatsloyalität zu unterscheiden. So wurden denn auch 1934 die jüdischen Mitglieder des Museumsausschusses bei dessen Umbildung nicht mehr um ihre Mitwirkung gebeten. Darüber hinaus ist die Bereitschaft zu beobachten, die Leistungen jüdischer Wissenschaftler und Ingenieure herabzuwürdigen, wie an

einzelnen Ausstellungsstücken gezeigt werden kann.

Inhaltlich näherte sich die Ausstellungskonzeption der Autarkiepolitik des NS-Regimes an, so zum Beispiel bei der Präsentation neuer Werkstoffe. In der Leitung hatte sich durch die starke Persönlichkeit des Gründers Oskar von Miller (1855–1934) ohnehin bereits eine Form des »Führerprinzips« etabliert, da brachte der Nationalsozialismus nichts Neues.

Schließlich waren die Räume des Deutschen Museums Schauplatz zweier berühmter Propagandaausstellungen: »Die große antibolschewistische Schau« und »Der ewige Jude«. Daraus lässt sich schließen, dass das Museum vor allem ein Resonanzraum des Zeitgeistes war, womit natürlich nichts entschuldigt ist. Als bedeutsame kulturelle Institution in der »Hauptstadt der Bewegung« ließ sich das Museum bereitwillig instrumentalisieren und trug

dabei nicht unerheblich zum Prestige der nationalsozialistischen Machthaber bei.

Das alles schildern die Autoren kenntnisreich und ohne Gesten wohlfeiler Empörung. Der Untertitel »Bestandsaufnahme« mutet angesichts des Umfangs des Bands und seines Detailreichtums allzu bescheiden an. Es mag noch viele unbearbeitete Aspekte geben, aber das Buch gibt doch schon einen gründlichen und tiefen Einblick. Offensichtlich ist das Werk zumindest in Richtung einer Gesamtdarstellung angelegt; so verfügt es über einen Index, was bei Sammelbänden eher unüblich ist.

Michael Schüring

Der Rezensent war bis Ende Mai Adjunct Assistant Professor am Fachbereich Geschichte der University of California in Berkeley. Er arbeitet unter anderem über die Geschichte der Wissenschaft im Nationalsozialismus.

ANZEIGE

PROFESSIONELL GESTRICKT: DAS **NEUE** ONLINE-KARRIEREPORTAL DER **duz**.



Profitieren Sie dreifach:

- neue Anzeigenprodukte und Suchfunktionen
- Hervorhebungen und Sonderplatzierungen
- Tipps rund um Ihre Wissenschaftskarriere

Mit dem neuen Karriereportal der **duz** www.duz-wissenschaftskarriere.de bieten wir Ihnen einen exzellenten Rekrutierungsservice für Fach- und Führungskräfte im Bereich Wissenschaft und Forschung.

Einfach eine runde Sache:

duzwissenschaftskarriere

5000 Jahre alter Abfluss

»Bei Ausgrabungen in Lothal, der südlichsten zur Indus-Tal-Kultur gehörenden Stadt aus dem 4. Jahrtausend vor Christus, wurden erstaunlich perfekte Einrichtungen freigelegt. Bei einer Kanalisationsanlage ist die Einstiegöffnung mit Schmutzfiltern und Mündung der Ablaufrinne erhalten geblieben. Ein Brennofen, der offenbar zur Anfertigung von Goldketten diente, wurde freigelegt.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Juni 1961, S. 240

Schmerzfrei schneiden und bohren

»Der Chirurg des 21. Jahrhunderts wird kein Operationsmesser mehr benötigen. An seiner Stelle bedient er sich eines Stiftes mit Ultraschallwellen, die zugleich auch das Blut zum Gerinnen bringen und die Umgebung anästhesieren. Ultraschallgeräte werden Gallen- und Nierensteine ganz unblutig zerstören und Zähne völlig schmerzlos durchbohren.« *Neuheiten und Erfindungen* 310, Juni 1961, S. 103 – 104



Der Geist sitzt links

»Es ist bekannt, dass die rechte Grosshirnhälfte die linke Körperseite und die linke Grosshirnhälfte die rechte Körperseite beeinflusst. Die linke Grosshirnhälfte hat die Aufgabe, die Trägerin der hauptsächlich geistigen Funktionen zu sein, welche durch die rechte Körperseite, vor allem durch die rechte Hand, bei der Mehrzahl der Menschen ihren Ausdruck finden. In der linken Hirnhälfte haben wir die Zentren

der Sprache und Schrift zu suchen. Auch äusserlich ist bei den meisten Menschen die geistige Bevorzugung der linken Hirn- und dadurch der linken Gesichtseite kenntlich. Hallervorden hat diese Tatsache als erster mit Hilfe der Photographie nachgewiesen. In bezug auf die Dimensionen und auf den Gesichtsausdruck kann man gut wahrnehmbare Differenzen konstatieren, und es lässt sich unschwer erkennen, dass das aus linken Gesichtshälften bestehende Bild einen geistig höherstehenden Eindruck macht als das aus rechten Gesichtshälften zusammengesetzte Porträt.« *Prometheus* 1127, Juni 1911, S. 559



Einkauf bei jedem Wetter

»Tief unter den gigantischen Wolkenkratzern New Yorks herrscht reges Leben in einer Katakomben-Stadt, die in den gewachsenen Felsen gesprengt ist und von deren Ausmaßen der Laie sich kaum eine Vorstellung macht. Hier gibt es Drogerien und



Restaurants, Blumen- und Metzgerläden, in denen man ohne Rücksicht auf das Wetter über der Erde sein Geld loswerden kann.« *Populäre Mechanik* 69, Juni 1961, S. 14–19



Realisierte Utopie:
Shoppern unter Tage

Medikamente in der Milch

»Wiederholt ist der Vorschlag gemacht worden, durch die Milch stillender Mütter Säuglingen Arzneimittel zuzuführen. Mehrmals hat man auch angeregt, durch die Verfütterung kleiner Mengen Jodkalium eine jodhaltige Kuhmilch herzustellen, von deren Genuss man sich bei der Behandlung gewisser Krankheiten gute Dienste versprach. Andererseits ist nicht zu verkennen, dass der leichte Übergang solcher fremden Stoffe in die Milch zu einer Quelle von Gefahren werden kann. So ist allerdings zu bemerken, dass die Untersuchungen hierüber in ihren Ergebnissen einander nicht selten widersprechen.« *Prometheus* 1127, Juni 1911, S. 560

Ortsschilder für Zeppeline

»Nach Rittmeister v. Frankenberg dürften die Turmuhren geeignet sein, den Luftschiffern bei der Orientierung zu helfen. Das ganze Deutsche Reich soll in Bezirke geteilt werden, deren jeder eine bestimmte Nummer erhält. Der Luftschiffer, der diese Zeichen wahrgenommen hat, braucht nur auf einer Tafel nachzusehen, um zu erfahren, welchen Ort er gesichtet hat. Es ist anzunehmen, daß mit einem guten Feldstecher die Uhren von einem Luftschiff aus in der Regel wahrzunehmen sein werden.« *Die Umschau*, Juni 1911, S. 498

Spiel mit Gesichtshälften:
Rechts-rechts-Kombination (links),
normales Bild (Mitte),
Links-links-Kombination (rechts)

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

100

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT · JUNI 2011



Das überraschende Innenleben des Genoms

Dank neuartiger Bildgebungsverfahren haben Forscher ein unerwartet dynamisches »Ökosystem« im Zellkern entdeckt: Chromosomen wechselwirken miteinander, Gene wandern von einem Ort zum anderen, und es bilden sich betriebsame Zentren der Genregulation. Diese Entdeckungen ermöglichen neue Einsichten in die Entstehung von Krankheiten wie Krebs

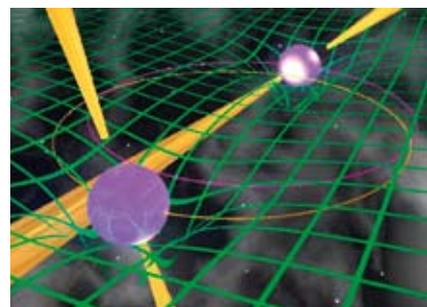
ANASTASIA WITTE

Vorboten von Schizophrenie in der Pubertät?

Irreguläre Umbaumaßnahmen in den Gehirnen Jugendlicher könnten später psychiatrische Störungen nach sich ziehen. Forscher diskutieren verschiedene Hintergründe für die Fehlsteuerung

Leben und Werk des Cornelis Jacobszoon Drebbel

Fallstudie über einen Pionier der Moderne: Um 1600 baute ein junger Niederländer sowohl das erste Mikroskop als auch das erste Unterseeboot. Zu Lebzeiten in ganz Europa berühmt, geriet er zu Unrecht in Vergessenheit



MICHAEL KRAMER

Was Pulsare über Gravitationswellen verraten

Schnell rotierende Pulsare dienen Radioastronomen als hochpräzise kosmische Uhren. Jetzt fahnden die Forscher mit ihrer Hilfe sogar nach Gravitationswellen



DREAMSTIME / LINDA VIN

Bewölkung und Klimawandel

Wann immer Klimaforscher Prognosen zur globalen Erwärmung abgeben, sind Wolken der größte Unsicherheitsfaktor. Neue Satelliten und spezielle Labors sollen die Wissenslücken schließen helfen

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