

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

HORIZONT-
GEOMETRIE

Unendliche
Räume endlich
machen

JULI 2012

KERNFUSION

Gefrorene Wasserstoff-
kugeln unter Laserbeschuss

KÜNSTLICHES RIECHEN

Sensoren detektieren
winzige Gasspuren

HÖHLENBÄREN

Der Untergang der
Eiszeitriesen

Länger jung bleiben

So wollen Forscher
das Altern ausbremsen

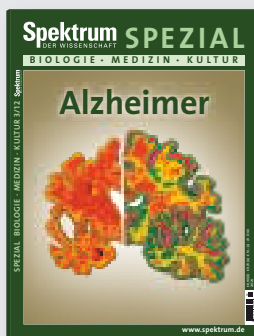


7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E



Unsere Neuerscheinungen

Spektrum Spezial – Biologie · Medizin · Kultur 3/2012



ALZHEIMER

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

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

Das **Spezial Biologie-Medizin-Kultur 3/2012 »Alzheimer«** erscheint am 20.07.2012 und kostet € 8,90. Die **Spezial-Reihen** können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.



SdW-Highlights 2/2012

KOSMISCHE URSPRÜNGE

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

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

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



Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 2/2012

MATHEMATISCHE SPIELE UND STRATEGIEN

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

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

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



GEHIRN&GEIST 7-8/2012

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

- >> Werkzeuggebrauch: Wie das Gehirn den Hammer schwingt
- >> Literatur: Was Märchen so reizvoll macht
- >> Psychotherapie: Seelische Leiden von Migranten
- >> Geist und Gene: Welche Rolle spielt unser Erbgut?

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

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Das TOR zu längerem Leben

*Kein Wesen kann zu Nichts zerfallen!
Das Ew'ge regt sich fort in allen,
Am Sein erhalte dich beglückt!
Das Sein ist ewig; denn Gesetze
Bewahren die lebend'gen Schätze,
Aus welchen sich das All geschmückt.*

Als Goethe im Februar 1829 diese ersten Zeilen seines Gedichts »Vermächtnis« schrieb, war er 79 Jahre alt. In den weiteren Strophen entwickelte er sein Kredo, das Erkennen der zeitlosen Gesetze von Natur und Moral stelle die zentrale Aufgabe des Menschen dar. Anteil am Ewigen zu suchen, so kann man Goethes lyrisches Testament vielleicht am treffendsten umschreiben, sei die beste Antwort des Menschen auf die Frage der eigenen Endlichkeit.

In der abschließenden siebten Strophe wies Goethe die Auseinandersetzung mit den ersten und letzten Dingen den Philosophen und Dichtern zu. Heute versuchen Gerontologen, die Grenze des Lebens ganz pragmatisch nach hinten zu verschieben. Und hier bahnt sich Erstaunliches an. Womöglich können Mediziner in absehbarer Zeit den Menschheitstraum von der Verlängerung gesunden Lebens dem Reich der Fiktion entreißen. In den letzten Jahren stießen sie auf ein fein austariertes Zusammenspiel von Genen und Proteinen bei kalorienreduzierter Diät, welches möglicherweise den Schlüssel für das Geheimnis darstellt, altersbedingte Erkrankungen wie Morbus Alzheimer, Krebs oder Herz-Kreislauf-Insuffizienz deutlich hinauszuzögern oder gar abzuwenden. Im Zentrum des weltweiten Interesses steht ein Eiweiß namens TOR. Was die Bezeichnung bedeutet und was sie mit einer historischen Expedition zu der berühmten Osterinsel zu tun hat, erklärt David Stipp in seinem Übersichtsartikel ab S. 22. Ich bin sicher, diese Geschichte hätte Goethe elektrisiert!

W I S wissenschaft
in die schulen!

Spektrum geht neue Wege. Ab diesem Heft finden Sie in ausgewählten Artikeln Hinweiskästen zu der Initiative »Wissenschaft in die Schulen!«.

Dort weisen wir Lehrerinnen und Lehrer auf Unterrichtsmaterial zur Vertiefung eines Themas hin. Die von Redakteuren und Fachdidaktikern erstellten Dokumente sind auf dem vom Verlag Spektrum der Wissenschaft betriebenen Portal www.wissenschaft-schulen.de kostenfrei herunterzuladen. Im vorliegenden Heft finden Sie Übungsunterlagen für die Fächer Biologie und Mathematik (siehe die Hinweise auf S. 32 beziehungsweise S. 66).

Eine anregende Lektüre wünscht
Ihr

Caro Mönzel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



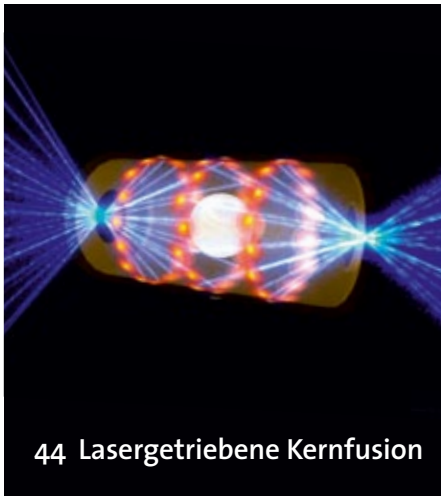
Matthias W. Hentze vom EMBL Heidelberg und **Andreas E. Kulozik** von der Universitätsklinik Heidelberg entdeckten einen komplizierten molekularen Mechanismus in Zellen, der reguliert, wie viel von einem bestimmten Protein entsteht – und brachten an den Tag, auf welche Weise Blutgerinnungsstörungen und Krebs miteinander zusammenhängen (S. 30).



Der junge deutsche Physiker **Andreas J. Kemp** arbeitet in Kalifornien, am größten Laser der Welt. Ziel des Großexperiments: Energieerzeugung durch Trägheitsfusion (S. 44).



Françoise Dal'Bo-Milonet ist Professorin für Mathematik an der Université Rennes 1. Ab S. 60 erklärt sie uns, wie man durch einen »künstlichen Horizont« das Unendliche eines Raums einfängt und der Analyse zugänglich macht.



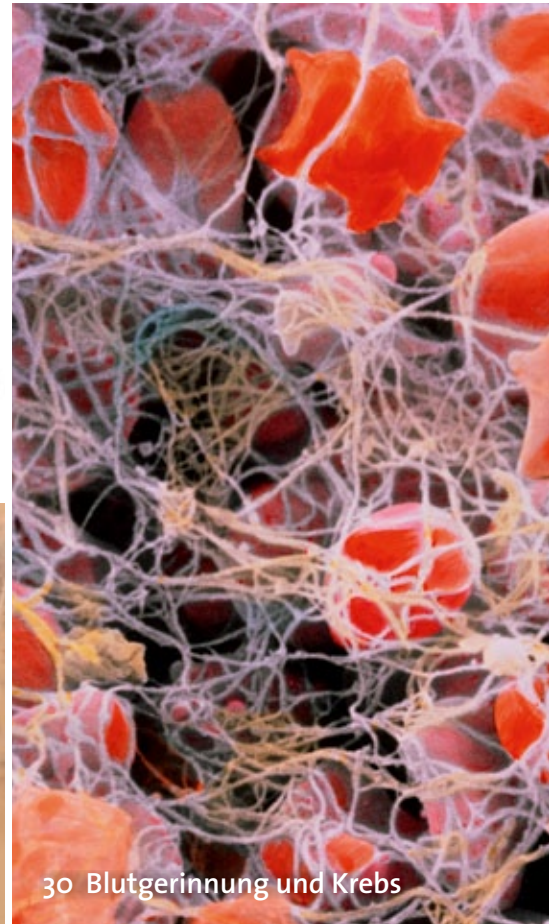
44 Lasergetriebene Kernfusion



78 Bedrohte Kakaopflanze



72 Interkontinentale Staubdrift



30 Blutgerinnung und Krebs

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

TITELTHEMA

► 22 Ein neuer Weg zu längerem Leben

David Stipp

Forscher haben einen biochemischen Mechanismus entdeckt, der das Altern hinauszögert und zugleich altersbedingte Krankheiten in Schach hält.

30 Krebs, Blutgerinnung und Stress – eine Ménage-à-trois

Matthias Hentze, Andreas Kulozik

Ein Blutgerinnungsfaktor verquickt Belastung, Thromboseneigung und manche Tumorarten.

► 36 Untergang der Höhlenbären

J.-M. Elalouf, V. Féruglio

Höhlenbilder sowie Knochen, Aufenthalts Spuren und DNA beleuchten die Geschichte dieser Riesen.

► 44 Schnelle Zündung für die Trägheitsfusion

Andreas J. Kemp

Physiker entwickeln immer stärkere Laser, mit denen sie winzige Wasserstoffkügelchen zur Implosion bringen. Das Ziel: mittels Kernfusion Energie zu gewinnen.

SCHLICHTING!

54 Von wegen 3-D!

H. Joachim Schlichting

Ein verdunkeltes Auge genügt, damit unser Sehsystem 2-D-Bilder räumlich wahrnimmt.

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

56 Spiele mit Dimensionen

Norbert Treitz

Hätten Sie gedacht, dass die gesamte Erdbevölkerung zugleich im Victoriasee planschen könnte?

► 60 Die Geometrie der Horizonte

Françoise Dal'Bo-Milonet

Mathematiker versehen abstrakte geometrische Räume mit einem Rand, der wie die Fluchtpunkte in der perspektivischen Malerei das Unendliche einfängt. Dieses neue theoretische Werkzeug findet Anwendungen weit über die Geometrie dieser Räume hinaus.

Titelmotiv: Ag. Focus / SPL / Coneyl Jay; Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

Länger jung bleiben

So wollen Forscher
das Altern ausbremsen



ERDE & UMWELT

72 Von Afrika zum Amazonas

Jeffrey Barthelet

Jedes Jahr werden etwa zwei Milliarden Tonnen Staub aufgewirbelt. Er weht von Kontinent zu Kontinent, düngt Ozeane und hält gewaltige Ökosysteme am Leben. Überdies beeinflusst er das Klima.

78 Die Zukunft der Schokolade

Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro

Den Maya galten Kakaobohnen als Geschenk der Götter, heute begründen sie ein Milliarden-geschäft. Doch dessen Zukunft ist ungewiss, denn Klimawandel, Krankheiten und andere Widrigkeiten setzen dem empfindlichen Kakaobaum zu.

TECHNIK & COMPUTER

► 84 Schnüffelnde Transistoren

David R. Walt, Shannon E. Stitzel und Matthew J. Aernecke

Bei der Entwicklung eines verlässlichen elektronischen Geruchsinns sind Forscher ein gutes Stück vorangekommen. Aber noch bleibt manches Problem zu lösen.

Nach S. 92 folgt eine 36-seitige Sonderpublikation des Schweizerischen Nationalfonds

SPEKTROGRAMM

- 8 Kambrische Explosion • Kleinwuchs der Pygmäen • Riesensee auf Titan • Netzhautimplantat für Blinde • Parasiten leben von Parasiten u. a.

BILD DES MONATS

- 11 Modernes Goldwaschen

FORSCHUNG AKTUELL

- 12 Dreiatomiger Wasserstoff
Das Molekül – im Weltall häufig, im Labor nur schwer zu erzeugen – gibt nun seine Geheimnisse preis.
- 15 Die Geburt der Paarbeziehung
Die Evolution verlief umgekehrt als bisher angenommen.
- 18 Ein Versteck im Fluss der Zeit
Forscher tarnten ein Ereignis so, als hätte es nie stattgefunden.

SPRINGER'S EINWÜRFE

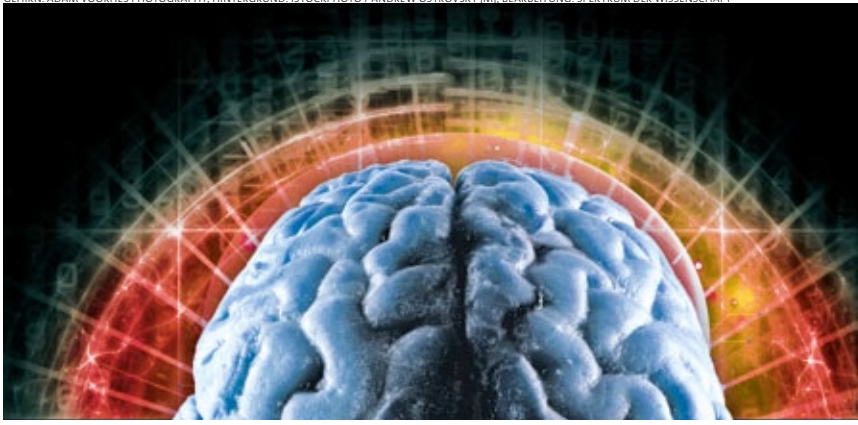
20 Was Drohnen anrichten

Unklare Folgen des Roboterkriegs.

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial
- 6 Leserbrief/Impressum
- 93 Rezensionen
Lisa Randall:
Die Vermessung des Universums
Werner Bartens: Glücksmedizin
Matthias Bloechle:
Vom Recht auf ein gesundes Kind
Dirk Eidemüller:
Das nukleare Zeitalter
u. a.
- 100 Wissenschaft im Rückblick
Vom Vogelgesang zu Wackelsteinen
- 101 Exponat des Monats
Die Ozonsonde OSE
- 102 Vorschau

GEHIRN: ADAM VOORHES PHOTOGRAPHY; HINTERGRUND: ISTOCKPHOTO / ANDREW OSTROVSKY (M); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Intelligenz und Hirngröße

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

Hayo Siemsen, Wadgassen: Intelligenz, insbesondere wie sie in Intelligenztests abgefragt wird, ist teleologisch definiert. Der Begründer der Intelligenztests, Alfred Binet, hat sich dafür einen idealen Logiker vorgestellt. Tatsächlich sind auch die Entwickler von Intelligenztests momentan auf der Suche, wie man Phänomene, welche unter das Thema Intelligenz fallen, beispielsweise emotionale Intelligenz oder in-

tuitive Denkweisen, theoretisch und praktisch erfassen kann. Der Intelligenzbegriff so wie auch der damit zusammenhängende Logikbegriff sind aus unserer westlichen Kultur heraus definiert; in anderen Kulturen weicht er davon zum Teil deutlich ab. Diese Definition wird sich vermutlich in Zukunft stark verändern.

Betrachtet man langfristige biologische Prozesse von einer unsicheren Basis aus, ist das Resultat ziemlich ungewiss. Zudem ist, wie Fox selbst feststellt, die Korrelation zwischen Neuronenzahl und Intelligenz eher gering. Einsteins Gehirn war beispielsweise recht klein. In unserer Kindheit gibt es Phasen, in denen massiv Neurone abge-

Die menschliche Intelligenz scheint gemäß Forschungsergebnissen der letzten Jahre bereits am evolutionär möglichen Maximum angelangt zu sein.

baut werden. Man braucht sie offenbar nicht. Wie die Neurone vernetzt sind, also welche Ideen man produziert, scheint im Beispiel Einstein viel entscheidender zu sein.

Roland Maier, Riemerling: Die Gehirnvolumina der europäischen Frauen/Männer sanken von 1502/1593 Millilitern in der Mittelsteinzeit auf 1241/1436 Milliliter am Ende des 20. Jahrhunderts. Man müsste die verbreitete Denkweise hinterfragen, nach der eine Vergrößerung des menschlichen Gehirns immer mit einer Zunahme der Intelligenz zu verbinden ist, wogegen aber eine Abnahme dieser grauen Substanz alles bedeuten kann, nur keine Abnahme der Intelligenz. Die zentrale Aussage des Artikels von Douglas Fox, dass unser Denkorgan an einer maximalen Größe angekommen sei, kann auf keinen Fall stimmen. Es wird Zeit, dass unsere Vorstellungen von dem Organ, auf das wir so stolz sind, realistischer werden.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (vi.S.d.P)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau
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. Werner Gans, Christine Kemmet, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Ursula Loos, Dierk Schleicher.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 33 vom 01.01.2012.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugäng-

lichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

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



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



Tollwut statt Porphyrie

Der Botaniker Frank E. Dayan und seine Tochter Emilie beschrieben die vielfältigen Funktionen der Porphyrie in verschiedenen Organismen. (»Ein Ring für die Farben des Lebens«, Juni 2012, S. 30)

Dieter Böning, Berlin: Die Autoren vermuten, dass sich hinter den Symptomen des Vampirismus, die etwa Bram Stoker in seinem Roman »Dracula« beschreibt, die Stoffwechselkrankheit Porphyrie verbirgt. Viel naheliegender ist jedoch, dass die Infektionskrankheit Tollwut das Vorbild für die Vampirsagen liefert. Das Tollwutvirus befällt unter anderem das Gehirn und wird im Speichel ausgeschieden. Tollwütige Tiere und Menschen sind aggressiv und beißen, wobei sie die fast immer tödliche Krankheit weitergeben.

Als Überträger werden in Lehrbüchern der Inneren Medizin neben Fleisch fressenden Säugetieren auch »Blut saugende Fledermäuse« (Vampire!) genannt, die nachts mit ihren scharfen Zähnen die Haut ihrer Opfer ritzen und das Blut als Nahrung lecken. Offensichtlich sind alle diese Beobachtungen in die Vampirsage eingeflossen. Auch das Bespritzen mit Weihwasser als Abwehrmittel gegen Vampire lässt sich sehr einfach deuten: Tollwutkranke sind extrem wasserscheu.

Platon und die Elemente

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

Peter Schmitz, Soest: Interessant an dem Artikel von Claus Kiefer fand ich, dass einige der neuesten Theorien vom Aufbau des Universums immer mehr Ähnlichkeiten zur eigentlich überholten altgriechisch-platonischen Anschauung der materiellen Struktur der Elemente zeigen. So ähnelt etwa das Modell der »dynamischen Triangulation« von Ambjorn, Jurkiewicz und Loll letztlich sehr der Idee von der geometri-

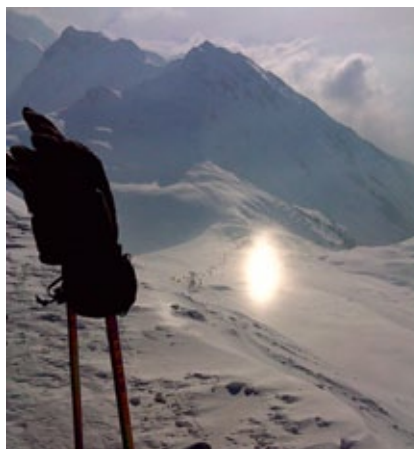
schen Struktur der Materie, wie sie bereits Platon (428–348 v. Chr.) und Aristoteles (384–322 v. Chr.) im antiken Griechenland als Gegenentwurf zum Atomismusmodell von Demokrit beschrieben. Für Platon war die Welt noch aus den vier Grundelementen Erde, Luft, Feuer und Wasser aufgebaut. Er verglich die kleinsten Teile der Elemente mit geometrischen Grundformen: Erde = Kubus, Luft = Oktaeder, Feuer = Tetraeder und Wasser = Ikosaeder.

Platons reguläre mathematische Körper, die seine vier Elemente darstellen, unterscheiden sich von den Atomen, die Demokrit beschrieb, übrigens darin, dass sie nicht unteilbar sind. Immerhin hat Platon es in seinem Modell als Erster versucht, den Aufbau der (damals bekannten) Materie rein mathematisch darzustellen. Auch die (heute so bezeichnete) Energie, bei ihm als das Element Feuer dargestellt, passte er in dieses Denkmodell ein – ein schon recht weit gedachter Denkschritt für heutige physikalische Versuche einer einheitlichen »Weltformel«.

Ähnlicher Lichteffekt

Glorien liegt der optische Tunneleffekt zu Grunde – so die Erklärung des Physikers H. Moysés Nussenzweig für das Phänomen. (»Das Leuchten des Heiligenscheins«, Mai 2012, S. 52)

Klaus Hagemeyer, Leverkusen: Wir hatten bei unserem letzten Skiurlaub in den Alpen einen optisch ähnlichen,



Vom Leser beobachtete »Untersonne«

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

aber sicher ganz anders zu erklärenden Effekt beobachtet, der eher einem Ufo als einem Heiligenschein gleicht (siehe Bild). Die Sonne befand sich nicht hinter dem Beobachter, sondern in gleicher Richtung wie das »Ufo«, nur um einiges höher. Die Lufttemperatur war zirka -25°C und die Luft voller winziger Eisnadeln, die sich zeitweise als blitzende Punkte bemerkbar machten.

Antwort der Redaktion: Wahrscheinlich handelt es sich bei dem hier beobachteten Effekt um eine so genannte Untersonne, eine Spiegelung der Sonnenstrahlen an den von Ihnen erwähnten Eisnadeln in der Luft (Eisnebel). Der Effekt ist vergleichbar mit der Spiegelung der Sonne an einer glatten Wasseroberfläche.

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

GEOLOGIE

Verwitterung an Land ließ Skelette entstehen

Während des Kambriums, dem Zeitraum vor etwa 542 bis 488 Millionen Jahren, entstanden in den Meeren binnen weniger Jahrtausende fast alle heutigen Tierstämme – und zum ersten Mal auch solche mit mineralisierten Skeletten. Was Paläontologen als »kambrische Explosion« bezeichnen, könnte von einer starken

Erosion der Kontinente ausgelöst worden sein.

Forscher um Shanan Peters von der University of Wisconsin (USA) haben den Schichtensprung der »Great Unconformity« untersucht. Hier lagern kambrische Sedimente direkt auf Milliarden Jahre alten Gesteinen des Präkambriums; ursprünglich dazwi-

schen abgelagerte Schichten fehlen. Diese geologische Lücke findet sich in vielen Regionen der Erde und zeugt davon, dass die Meere jener Zeit mehrfach große Teile des Festlands bedeckten und dabei Material abtrugen.

Anhand chemischer Analysen tausender Gesteinsproben aus ganz Nordamerika wiesen die Forscher nach, dass die kambrischen Sedimente oberhalb der Schichtlücke besonders viel Kalzium enthalten. Dieses stammte aus der Verwitterung kontinentaler Gesteine und gelangte bei steigendem Meeresspiegel in die Ozeane. Die daraufhin steigenden Kalziumkonzentrationen im Meerwasser dürften nach Ansicht der Forscher die evolutionäre Entwicklung von Kalkschalen angestoßen haben. Wie Fossilien belegen, kamen damals Kalziumkarbonate und andere wichtige Biomminerale wie Hydroxylapatit fast gleichzeitig in verschiedenen Organismengruppen auf. Demnach entstanden die ersten Skelette wohl im Zuge der Anpassung an chemische Veränderungen im Wasser.

Nature 484, S. 363–366, 2012



SHANAN E. PETERS, UNIVERSITY OF WISCONSIN UND ROBERT F. CAINES, POMONA COLLEGE

Beispiel für die »Great Unconformity«: Im Wind River Canyon, USA, liegt 510 Millionen Jahre altes Gestein (obere Bildhälfte) auf 2900 Millionen Jahre altem (unten). Die Zehn-Cent-Münze rechts im Bild dient zum Größenvergleich.

GENETIK

Starkes Immunsystem führt zu Kleinwuchs der Pygmäen

Die afrikanischen Pygmäen fallen durch ihre geringe Körpergröße auf, die im Mittel unter 1,50 Meter liegt. Schon seit langer Zeit rätseln Wissenschaftler über die Gründe für diesen Kleinwuchs. Vermutlich ist er die Begleiterscheinung einer starken Immunität gegenüber ansteckenden Krankheiten, so Sarah Tishkoff von der University of Pennsylvania (USA) und ihre Kollegen.

Das Team suchte in den Genomen von 57 Pygmäen aus Kamerun nach charakteristischen Merkmalen, die mit der Körpergröße zusammenhängen. Fündig wurden die Forscher in einer Region von Chromosom 3. Dort liegen Gene, die mit der Funktion des Im-

munsystems und der Fortpflanzung, aber auch mit dem Körperwuchs zu tun haben. Eines dieser Gene – *CISH* – ist bekannt dafür, dass sein Produkt bestimmte menschliche Wachstumshormone hemmt. Zugleich spielt es eine wichtige Rolle bei der Regulation des Immunsystems und bestimmt darüber mit, wie empfänglich sein Träger gegenüber Krankheiten wie Malaria oder Tuberkulose ist, die in Afrika grassieren.

Damit sei der Kleinwuchs möglicherweise die Folge eines starken Selektionsdrucks, der auf eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen Infektionen hinwirke, schreiben die Autoren. Tatsächlich sind Pygmäen fortlaufend

intensiven Attacken durch Krankheitserreger ausgesetzt. Ihre durchschnittliche Lebenserwartung zählt mit 16 bis 24 Jahren zu den kürzesten bei Menschen überhaupt.

PLoS Genetics 8, e1002641, 2012



EVAN LEACH

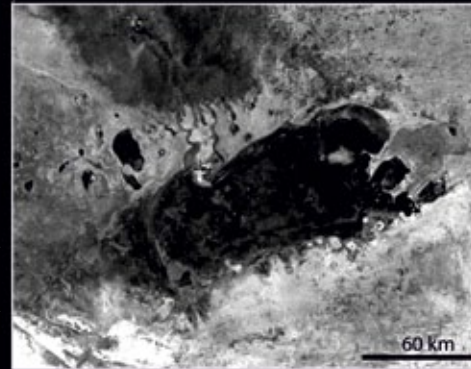
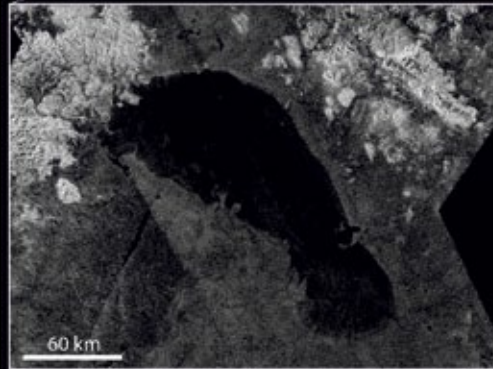
Eine Gruppe von Pygmäen zusammen mit einem der beteiligten Forscher.

Riesensee auf Titan fällt zeitweise trocken

Der Saturnmond Titan gilt als erdähnlichster Himmelskörper im Sonnensystem. Auf ihm finden sich Phänomene, die an den irdischen Wasserkreislauf erinnern. So gibt es dort Wolken, Regen, Flüsse und Seen – allerdings nicht aus Wasser, sondern aus Kohlenwasserstoffen wie Methan, Ethan und Propan. Der größte See auf dem südlichen Titan, »Ontario Lacus«, hat eine Fläche von rund 15 000 Quadratkilometern. Wie nun Forscher um Thomas Cornet von der Universität de Nantes in Frankreich berichten, gleicht dieser See den zeitweise trockenfallenden Salzgewässern, die etwa in Afrika zu finden sind.

Auf Radar-, Spektrometer- und Infrarotaufnahmen, welche die Saturnsonde Cassini zwischen 2007 und 2010 eingefangen hatte, sind durchgängig Kanäle auf dem Grund des Ontario Lacus erkennbar. Die französischen Forscher gehen davon aus, dass der Boden dort in dieser Zeit trockenlag. Zudem fanden sie Sedimente in der Umgebung des Sees – dessen Oberfläche muss also früher einmal höher gelegen haben als zum Zeitpunkt der Aufnahmen.

Bereits aus der Satellitenperspektive ähnelt der Ontario Lacus auf Titan (links) der Etosha-Pfanne auf der Erde (rechts).



TITAN: NASA, JPL / CASSINI; ERDE: ESA / ENVISAT

Ein solch wechselnder Pegelstand ist auch von irdischen Gewässern bekannt. So füllt sich die Etosha-Pfanne in Namibia immer nur vorübergehend mit Wasser, das aus dem Untergrund aufsteigt. Verdunstet es später wieder, bleibt eine so genannte Salztonnebene zurück. Die Forscher vermuten, dass im Ontario Lacus der gleiche Vorgang abläuft, jedoch mit Kohlenwasserstoffen.

ESA-Pressemitteilung, 19. 4. 2012

Neues Netzhautimplantat für Blinde

Bei Patienten, die wegen einer Netzhautdegeneration erblinden, gehen die lichtempfindlichen Sinneszellen zu Grunde; andere Neurone der inneren Netzhautschichten bleiben jedoch oft intakt. Das ermöglicht es, das Sehvermögen mit Netzhautimplantaten wiederherzustellen. Diese künstlichen Fotorezeptoren schicken Signale an die noch funktionierenden Zellen und produzieren so zumindest schemenhafte Abbilder der Umwelt. Ein neuer Ansatz verspricht nun, die Leistung solcher Implantate deutlich zu verbessern.

Daniel Palanker von der Stanford University und sein Team wollen

winzige Fotodioden in die Netzhaut einpflanzen, die Licht in elektrischen Strom umwandeln. Eine spezielle Brille nimmt dann die Umgebung mit einer eingebauten Kamera auf und projiziert die Bilder über gepulstes Nahinfrarot-(NIR-)Licht ins Auge. Dort fällt es auf die implantierten Fotodioden und erzeugt in ihnen elektrische Impulse, die an die inneren Netzhautschichten weitergegeben werden.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass die NIR-Pulse sowohl die Bildinformationen als auch die benötigte Energie für die Fotodioden übermitteln. Dadurch entfallen Spulen und Kabel wie bei bisherigen Implantaten, die viel

Platz beanspruchten. Beim neuen System lassen sich die Fotorezeptoren stärker miniaturisieren und dadurch mehr von ihnen einpflanzen – die Zahl künstlicher Pixel steigt und somit die erreichbare Bildauflösung.

Bei ersten Experimenten mit Netzhaut-Gewebekulturen von Ratten hat sich das System bereits bewährt. Die Stanforder Forscher planen weitere Verbesserungen, etwa flexible Implantate, die sich an die Rundung des Augapfels anpassen. Diese könnten eine größere Fläche abdecken und das Gesichtsfeld erweitern.

Nature Photonics 10.1038/nphoton.2012.104, 2012

BIOLOGIE

Pilzparasit hält Ameisenparasit in Schach

Der Pilz *Ophiocordyceps camponoti-rufipedis* nutzt eine perfide Taktik zur Fortpflanzung: Er veranlasst befallene Ameisen dazu, ihre Kolonien zu verlassen und zu regelrechten Massengräbern zu pilgern. Dort erliegen die Tiere dem Parasiten, der sich anschließend weiter verbreitet. Trotz dieser ausgeklügelten Strategie löscht der Pilz jedoch nur selten ganze Kolonien aus – offenbar, weil er seiner-

seits von »hyperparasitären« Pilzen dezimiert wird.

Dies zeigte sich, als David P. Hughes von der Penn State University (USA) und seine Kollegen den Reproduktionszyklus von *O. camponoti-rufipedis* untersuchten. Dabei stützten sie sich auf Feldstudien in Thailand und Brasilien. Ist eine infizierte Ameise gestorben, wächst der Pilz aus dem Kopf des Insekts heraus und bildet

Aus dem Kopf einer toten Ameise, die ihrer Infektion erlegen ist, wächst der Ameisenpilz heraus. Auf ihm wiederum gedeiht ein weiterer Pilz, der den Ameisenpilz sterilisiert. Nach den Befunden der Forscher kommen solche »Hyperparasiten« häufig vor: Sie lassen sich bei mehr als der Hälfte der Insektenkadaver nachweisen.



DAVID P. HUGHES, PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter

www.spektrum.de/spektrogramm

einen Fruchtkörper. Dieser sondert nach etwa vier Wochen Sporen ab, die weitere Tiere infizieren. Allerdings produzieren nur wenige Prozent der Fruchtkörper Sporen, wie die Forscher herausfanden. Daran sind vor allem die Hyperparasiten schuld – andere Pilzarten, die *O. camponoti-rufipedis* befallen und unfruchtbar machen.

Besonders anfällig dafür scheint der Ameisenparasit zu sein, bevor seine Fruchtkörper ausgereift sind. Jeder funktionierende Fruchtkörper jedoch bringt bei den von ihm infizierten Ameisen im Schnitt wieder einen hervor. Dadurch bleibe die Pilzpopulation langfristig stabil, so die Forscher.

PLoS One 7, e36352, 2012

ARCHÄOLOGIE

Südeuropäer brachten Ackerbau nach Skandinavien

Vor etwa 6000 Jahren begannen Menschen in Nordeuropa damit, Ackerbau und Viehzucht zu treiben. Laut neuen Untersuchungen handelte es sich bei ihnen möglicherweise um Einwanderer aus dem Süden, wo die Landwirtschaft bereits zuvor Fuß gefasst hatte. Diese zugezogenen Bauern scheinen mehr als 1000 Jahre lang neben einheimischen Jägern und Sammlern gelebt zu haben, bis sie sich mit ihnen zu vermischen begannen.

Pontus Skoglund von der Universität Uppsala (Schweden) und seine Kollegen untersuchten DNA aus 5000 Jahre alten menschlichen Überresten. Das Material stammt von drei Individuen der so genannten Grübchenkeramischen Kultur (Jäger und Sammler) und einem Angehörigen der Trichterbecherkultur (Bauern). Alle vier lebten in Skandinavien. Beim Vergleich ihrer DNA-Sequenzen mit dem Erbgut

heutiger Europäer zeigte sich, dass die Jäger und Sammler am ehesten den heutigen Nordeuropäern ähnelten, speziell Finnen und Russen. Der Bauer hingegen wies davon deutlich abweichende Sequenzen auf; er glich genetisch den heutigen Südeuropäern, insbesondere Italienern.

Beide Kulturen hatten sich vor 5000 Jahren offenbar kaum durchmischt, obwohl die Überreste der Individuen nur etwa 400 Kilometer voneinander entfernt gefunden wurden. Jedoch scheint diese Isolation später aufgebrochen zu sein: Heutige Europäer sind genetisch sowohl von Bauern als auch

Skandinavische Forscher präparieren das Skelett eines jungsteinzeitlichen Jägers und Sammlers an einer Ausgrabungsstätte auf Gotland. Genetisch ähnelte er am ehesten den heutigen Finnen und Russen.

von Jägern und Sammlern der Jungsteinzeit geprägt, wie die Ergebnisse zeigen. Zusammengefasst sprechen die Befunde laut den Forschern dafür, dass Wanderbewegungen, die von Südeuropa ausgingen, die Landwirtschaft in den Norden brachten.

Science 336, S. 466–469, 2012



CORAN BURENHULT, GOTLAND UNIVERSITY COLLEGE



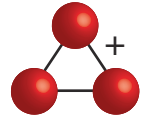
MODERNES GOLDWASCHEN

Nur stecknadelkopfgroß und 300 Millionen Jahre alt: der winzige Zahn eines ausgestorbenen Urzeittiers (Conodonten). Der aufgedampfte Goldfilm sorgt dafür, dass feinste Oberflächendetails im Rasterelektronenmikroskop sichtbar werden. Um den Metallüberzug wieder zu entfernen, ohne das wertvolle Objekt zu beschädigen, werden bislang meist giftige Zyanide eingesetzt. Forscher um Mark Purnell von der University of Leicester haben nun eine kostengünstige, ungiftige und einfache Alternative gefunden: ionische Flüssigkeiten. Ein Tauchbad aus einer Mischung von Cholinchlorid, Ethylenglykol und darin gelöstem Jod entfernt die Goldhülle rückstandsfrei und ohne Folgen für die Proben.

Palaeo. Electronica 15, 15.2.4T, 2012

Dreiatomiger Wasserstoff in interstellaren Wolken und auf der Erde

Im Weltall bildet das Molekül H_3^+ den Ausgangspunkt vielfältiger chemischer Reaktionen. Doch auf der Erde ist dreiatomiger Wasserstoff ein Exot, der sich nur mit raffinierten Tricks im Labor fabrizieren lässt. Seine Eigenschaften werden erst allmählich in allen Details entschlüsselt.



VON ANDREAS WOLF

Wasserstoff ist das bei Weitem häufigste Element im Universum, gefolgt von Helium, Sauerstoff und Kohlenstoff. Deshalb beginnt die Chemie des Kosmos mit der Bildung von Wasserstoffmolekülen. Sie sammeln sich in interstellaren Molekülwolken, den chemischen Kinderstuben für Sterne und Planeten. Woher wissen wir das? Mit irdischen und satellitengestützten Observatorien erschließen Astronomen die Zusammensetzung der interstellaren Materie aus der Intensität und Wellenlänge der ausgesandten Strahlung. Das Spektrum vieler Atome und Moleküle ist so gut bekannt, dass es sie verrät wie ein Fingerabdruck. Die zum Teil

kompliziert gebauten Moleküle in interstellaren Wolken machen sich im Strahlungsspektrum durch ihre Schwingungen und Rotationen bemerkbar.

Molekülwolken arbeiten als chemische Fabriken, obwohl sie zu den kältesten Orten im Universum gehören und um viele Größenordnungen weniger dicht sind als die Erdatmosphäre. Unter solchen Bedingungen können Reaktionsketten nur in Gang kommen, wenn die kosmische Strahlung – oder die Strahlung naher Sterne – zunächst einige der üblichen zweiatomigen Wasserstoffmoleküle H_2 ionisiert, indem sie ein Elektron abtrennt. In einer ersten Reaktion verwandelt sich dann das io-

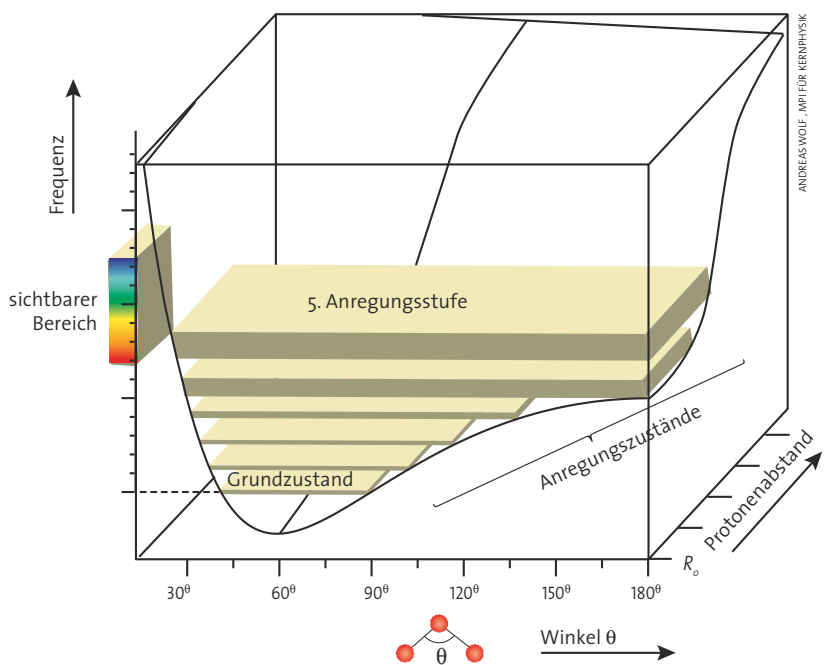
nisierte Molekül H_2^+ in das dreiatomige Wasserstoffion H_3^+ – den Hauptakteur der nachfolgenden Reaktionsketten. Dessen spektroskopischer Fingerabdruck konnten vor Kurzem mehrere Teams aus experimentellen und theoretischen Physikern mit bisher unerreichter Genauigkeit identifizieren.

Drei Protonen in ihrer Potenziallandschaft

Das dreiatomige Wasserstoffion ist eines der einfachsten Moleküle. Es enthält wie neutraler Wasserstoff H_2 zwei Elektronen, aber drei Protonen. Die fünf Teilchen sind durch ihre elektrischen Anziehungskräfte stabil anein-

Wie das Molekül schwingt

Die Potenzialfläche des dreiatomigen Wasserstoffions H_3^+ – hier stark vereinfacht dargestellt – hängt vom mittleren Abstand der Protonen und vom Winkel zwischen ihnen ab. Die horizontalen Ebenen zeigen die Energiebereiche, in denen angeregte Schwingungszustände der Protonen liegen. Im tiefsten Zustand mit Protonenabstand R_0 bilden die Wasserstoffatome annähernd ein gleichseitiges Dreieck. Die Anregungsenergie und die zugehörige Strahlungsfrequenz nehmen nach oben zu. Ab der vierten Anregungsstufe wird der Winkel zwischen den Protonen durch das Potenzial nicht mehr begrenzt – das H_3^+ -Molekül verformt sich beim Schwingen teils stark. Die Übergänge in die fünfte Anregungsstufe erreichen den sichtbaren Teil des Spektrums.



Diese molekulare Wolke in der Nähe des Zentrums der Milchstraße wurde mit dem 2009 von der Europäischen Weltraumbehörde ESA gestarteten Satellitenteleskop Herschel aufgenommen.

können nur gezielte Experimente weiterhelfen.

Im Labor lassen sich derartige Molekülonen mit Gasentladungen erzeugen. Zahlreiche Messungen an H_3^+ sind dem Chemiker und Astronomen Takeshi Oka von der University of Chicago zu verdanken, der solche Entladungen mittels hochempfindlicher Laserspektroskopie untersucht hat. Seine Forschungsgruppe wies 1980 das Spektrum von H_3^+ im Labor nach, entdeckte das H_3^+ -Ion 1996 im interstellaren Raum und fand es 2005 in großen Mengen nahe dem Zentrum unserer Milchstraße.

Kalt wie im Weltall

Okas Laborspektren von H_3^+ enthalten lange Serien von Spektrallinien, in denen sich Schwingung und Rotation der Moleküle überlagern. Das ist eine Folge der relativ hohen Temperatur in der Gasentladung und schwächt die Intensität der einzelnen Linien. Daher überstrichen die Messungen zwar den Infrarotbereich bis nahe an die Grenze des sichtbaren Lichts, aber Spektrallinien höherer Frequenz waren nicht mehr nachweisbar. Seit einiger Zeit haben Forscher erkannt, dass tiefe Temperaturen – wie sie auch in den meisten interstellaren Wolken herrschen – hier den entscheidenden Fortschritt bringen. Kalte Molekülonen besetzen nur die tiefsten Energiezustände der Rotation und zeigen daher wenige, aber dafür intensivere Spektrallinien.

Ionenfallen und Speicherringe sind ideale Werkzeuge, um ionisierte Moleküle mit Hilfe ihrer Ladung in elektrischen oder magnetischen Feldern fest-



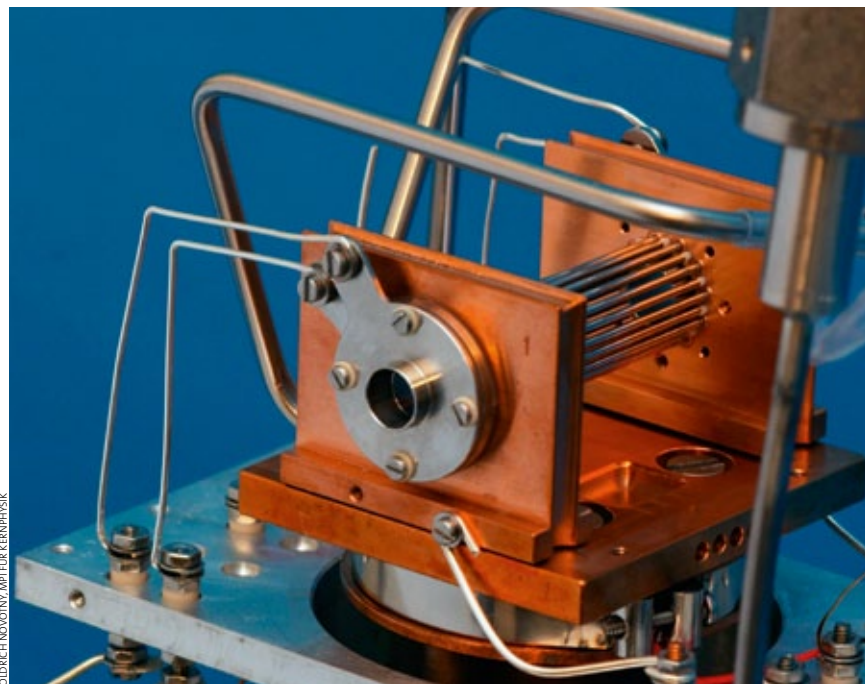
ESA/NASA/JPL/CALTECH/Herschel

ander gebunden, wobei die Protonen ein gleichseitiges Dreieck bilden. Alle Komponenten bewegen sich nach den Gesetzen der Quantenmechanik. Allerdings zählt H_3^+ bereits zu den Vielteilchensystemen, die sich nicht einmal mit Supercomputern in allen Details erfassen lassen. Darum sind die Quantenchemiker auf Näherungsmethoden angewiesen, deren Zuverlässigkeit sie letztlich durch genaue Messungen bestätigen müssen.

In der Sichtweise der Quantenchemie bewegen sich die Protonen auf einer Potenzialfläche; diese beschreibt die bindende Wirkung der Elektronenhülle und gleicht einer hügeligen Landschaft. Die Protonen schwingen um ihre Gleichgewichtslagen und können sich bei zunehmender Anregungsenergie weit davon entfernen, ohne ganz aus dem Molekülverband zu entweichen. Ähnlich wie bei den Eigenfrequenzen einer schwingenden Saite er-

laubt die Quantenmechanik für angeregte Molekülzustände nur bestimmte Schwingungen, die von der Form der Potenziallandschaft abhängen. Wird zusätzlich die Rotationsbewegung des Moleküls einbezogen, so ergeben sich die Frequenzen, bei denen es Strahlung aussenden und absorbieren kann – das charakteristische Molekülspektrum.

Im Infrarotbereich, der energieweichen Schwingungen in der Nähe des Gleichgewichts entspricht, ist das Spektrum seit längerem präzise vermessen und auch theoretisch gut verstanden. Anders bei höheren Anregungsfrequenzen, die in den Bereich sichtbaren Lichts hineinreichen: Hier durchstreifen die Protonen weniger bekannte Bereiche der Potenziallandschaft und ordnen sich in praktisch jeder denkbaren Form an – etwa als flaches oder spitzes Dreieck oder nahezu linear. Da hier große Unsicherheit bezüglich der Schwingungen herrscht,



DURCH NOVOTNY, AMPI FÜR KERNPHYSIK

Die erste Multipol-Ionenfalle zur Speicherung von kalten Molekülionen mit Hilfe von elektromagnetischen Hochfrequenzfeldern baute Dieter Gerlich an der Universität Freiburg. Das Bild zeigt die am Max-Planck-Institut für Kernphysik weiterentwickelte Anordnung, die für die Messungen an H_3^+ verwendet wurde.

zuhalten. Werden sie bei tiefer Temperatur betrieben, verringert sich die innere Energie der Molekülionen bis auf Werte wie in den Tiefen des Welt-raums. Die Arbeitsgruppe »Atomare und molekulare Quantendynamik« am Heidelberger Max-Planck-Institut (MPI) für Kernphysik untersucht in einem bis zu zehn Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt) kalten Ionenkäfig die chemischen Reaktionen und das Strahlungsspektrum der H_3^+ -Ionen. Rund 10 000 Ionen werden dort gekühlt und anschließend mit Lasern unterschiedlicher Frequenz bestrahlt. Wenn die Laserfrequenz zu einer Anregungsfrequenz des Ions passt, wird es in Schwingung versetzt.

Astrophysik im Labor

Um dies nachzuweisen, mischen die Physiker der stark verdünnten Heliumatmosphäre in der Falle etwas Argon bei. Wie Forscher um Dieter Gerlich und Stephan Schlemmer 1999 an der Universität Chemnitz gezeigt haben, können gewisse chemische Reaktionen von Ionen nur dann ablaufen, wenn

vorher ihre Schwingungen angeregt wurden – etwa durch Laser. Im Heidelberger Experiment bilden solche laserinduzierten Reaktionen von H_3^+ mit Argon einige wenige Argonhydridionen, die dann sorgfältig gezählt werden. Der Heidelberger Physiker Holger Kreckel machte das Verfahren 2008 konkurrenzfähig mit Okas hochempfindlicher Spektroskopie von H_3^+ .

Bei einem Forschungsaufenthalt am MPI für Kernphysik konnte die niederländische Experimentalphysikerin Anemieke Petrigani zusammen mit ihrem Heidelberger Doktoranden Max Berg diese Technik kürzlich weiterentwickeln, um erstmals sichtbare Spektrallinien von H_3^+ aufzufinden. Obwohl die entsprechenden Molekülschwingungen weit in kaum bekanntes Terrain der H_3^+ -Potenzialfläche reichen und daher nur ungenau vorhergesagt werden konnten, entdeckten die Forscher in monatelangen Messungen sechs dieser extrem schwachen Linien.

Davon angespornt taten sich theoretische Physiker weltweit zusammen, um die Berechnungen in diesem unsi-

cheren Bereich der H_3^+ -Potenzialfläche zu verbessern. Forscher der University of Arizona in Tucson optimierten ihre Rechenverfahren und bestimmten mit Supercomputern eine viel präzisere Potenzialfläche, während Kollegen am University College London und in anderen europäischen Teams die kollektive Bewegung von Elektronen und Protonen in H_3^+ modellierten. Die berechneten Schwingungen – der spektroskopische Fingerabdruck des H_3^+ – passen zu den neuen Labormessungen bis fast auf eine Linienbreite genau. Damit liefern die von den experimentellen und theoretischen Physikern kürzlich gemeinsam berichteten Ergebnisse Erkennungsmarken des Moleküls bei Frequenzen bis weit in den sichtbaren Spektralbereich hinein (*Physical Review Letters* 108, 023002, 2012).

Neben Ionenfallen verwenden Forscher am Heidelberger MPI für Kernphysik auch Speicherringe, um Reaktionen der Molekülionen mit geladenen oder neutralen Partnern zu untersuchen. Sie weisen die Produkte dieser Prozesse dabei als Teilchen nach und analysieren sie nach ihren Impulsen und Massen, um so eine Vielzahl interstellarer Reaktionen zu charakterisieren.

Die geschilderten Resultate sind ein schönes Beispiel für das Zusammenwirken von astronomischer Beobachtung und Laborversuch. Im ionisierten interstellaren Medium steht das Schlüsselion H_3^+ am Anfang langer Reaktionsketten hin zu Wasser, Kohlenwasserstoffen und zu Verbindungen mit Stickstoff und anderen Elementen. Deren Bedeutung für die Stern- und Planetenentstehung untersuchen Astronomen mit neuesten Observatorien und Satelliten. Die Analyse dieser Beobachtungen ist aber auf theoretische Modelle der molekularen Spektren und Reaktionen angewiesen, die im Labor an kalten Molekülen und ihren Ionen getestet werden.

Andreas Wolf leitet den Forschungsbereich »Molekulare Quantendynamik und gespeicherte Ionenstrahlen« in der Abteilung »Gespeicherte und gekühlte Ionen« am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.

Die Geburt der Paarbeziehung

Vor rund 50 Millionen Jahren fanden sich die ersten Primaten zu lockeren Gruppen zusammen. Bald kamen größere feste Verbände auf. Erst aus diesen entstanden Haremsstrukturen und Paare.

VON JOAN B. SILK

Neue Thesen zur Menschenevolution finden stets ein Medienecho, sei es über Fossilien oder Genomanalysen. Noch mehr dürfte aber interessieren, wie unsere Vorfahren einst lebten und miteinander umgingen. Nun gewannen drei Forscher der University of Oxford unerwartete Erkenntnisse über die Evolution der sozialen Strukturen bei Primaten (*Nature* 479, S. 219–222, 2011). Die Anthropologen Susanne Shultz, Christopher Opie und Quentin D. Atkinson liefern damit zugleich Hinweise auf den Ursprung der Paarungssysteme der Hominiden.

Über die Sozialstrukturen von heutigen Primatenarten ist bereits eine Menge bekannt: Es gibt nur wenige Spezies, darunter einige Lemuren, bei denen die erwachsenen Tiere zeitlebens weitgehend Einzelgänger bleiben und Artgenossen hauptsächlich zur Paarung treffen – sowie an den Grenzen ihrer Reviere, die sie mit lauten Rufen markieren. Die anderen Arten leben in kleineren oder größeren, oft festen Verbänden: Gorillagruppen etwa bestehen aus einem erwachsenen Männchen, mehreren Weibchen und deren Nachwuchs; Paviane treten in größeren Gruppen

auf, denen jeweils mehrere bis viele Erwachsene beider Geschlechter angehören. Gibbons leben monogam in dauerhaften Paaren mit ihrem Nachwuchs.

Shultz und ihre Kollegen wollten herausfinden, inwieweit sich die einzelnen sozialen Organisationen von den Evolutionslinien her erklären lassen und ob sich bestimmte Entwicklungsmuster finden. Zu dem Zweck haben sie Angaben zu Sozialstrukturen von 217 heutigen Primatenarten mit deren evolutionären Verwandtschaftsbeziehungen in Verbindung gebracht, die Systematiker aus genetischen Verglei-

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



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

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



Produkt des Monats

chen erschlossen haben. Was dabei herauskam, spricht nach Ansicht der Forscher durchaus für eine starke Verbindung von sozialer Organisation und Phylogenie. Denn offenbar ähneln sich die gesellschaftlichen Strukturen von enger miteinander verwandten Primatenarten mehr, als es zu erwarten wäre, wenn die Abstammung hierfür keine wesentliche Rolle spielte.

Bei ihrer Studie ermittelten die Forscher zudem, in welcher Reihenfolge sich die unterschiedlichen Lebensformen bildeten. Dabei fanden sie Überraschendes: Naheliegender wäre, dass auf Einzelgängertum zunächst paarweises Leben folgte – indem Männchen und Weibchen ihre Zusammenkünfte immer mehr zeitlich ausdehnten. Auch könnte man meinen, dass aus kleinen Gruppen nach und nach größere Verbände mit komplexeren Strukturen wurden.

Aber Shultz und ihre Kollegen entdeckten einen ganz anderen Verlauf – und den in ähnlicher Abfolge gleich mehrmals, also bei verschiedenen Abstammungslinien. Demnach formten vor ungefähr 52 Millionen Jahren ursprünglich einzelgängerische Primaten zunächst lockere Verbände, denen eine Anzahl Männchen und Weibchen angehörten. Hieraus entstanden festere Gruppierungen mit mehreren erwach-

senen Mitgliedern beider Geschlechter. Und erst dann entwickelten sich vor rund 16 Millionen Jahren Arten, die in festen Paaren oder in Harems lebten. Letzteres bezeichnet Gruppen aus einem erwachsenen Männchen und mehreren Weibchen.

Phylogenie statt Ökologie

Dieser Befund stellt bisherige Modelle in Frage, welche die einzelnen sozialen Organisationsformen der Primaten vorrangig mit ökologischen Zwängen erklären. Nach jener Auffassung erzeugt das jeweilige Nahrungsangebot einen auf die Situation abgestimmten Wettbewerb. Das wiederum bedingt die Muster, wie sich die Tiere räumlich verteilen – und somit, wie sie sich sozial strukturieren. Der phylogenetischen Herkunft messen diese Modelle im Allgemeinen wenig Gewicht bei. Allerdings erkennen die Forscher zunehmend, dass die Evolutionsgeschichte für soziale Strukturen doch einige Bedeutung hat. Die neue Studie bestärkt diese Sichtweise.

Bei ihrer Analyse fragten die Oxford-Wissenschaftler nicht nach den Selektionskräften, die auf die Organisationsformen einwirkten. Immerhin zeigen sie aber auf, dass der anfängliche Wechsel vom Einzelgängertum zum Leben in Verbänden zu der Zeit stattfand,

als Primaten vom Nachtleben zur Tagaktivität übergingen. Bei Dunkelheit können sich Tiere gut mit unauffälligem Verhalten vor Fressfeinden schützen – also insbesondere, indem sie allein umherstreifen. Im Tageslicht gewährt womöglich ein Zusammenschluss zu mehreren oder vielen eher Sicherheit.

Die neue Studie erhellt auch, welche Vorteile es bringen kann, dass bei vielen Primatenarten nur Heranwachsende eines Geschlechts ihre Herkunftsgruppe verlassen – bei Schimpansen zum Beispiel Weibchen –, während das andere Geschlecht lebenslang im Ursprungsverband bleibt. Abwanderung ist generell ein Schutzmechanismus gegen Inzucht. Nun kommt hinzu: Die in der alten Gruppe verweilenden Tiere bauen gern untereinander kleine kooperierende Einheiten auf, die etwa bei Rangausinandersetzungen dienlich sind. Bevorzugt kooperieren sehr nah verwandte Affen. Laut Shultz und ihren Kollegen entstanden die geschlechtsspezifischen Muster bei den Primaten erst, nachdem es bei ihnen schon soziale Einheiten mit jeweils mehreren Männchen und Weibchen gab – nicht vorher. Anzunehmen ist also, dass es nicht die aus Kooperationen erwachsenden Vorteile waren, die ihre Sozialevolution vorantrieben. Vielmehr boten wohl erst die schon vorhandenen stabilen, auch ortsstabilen Strukturen Gelegenheit für solche hilfreichen Freundschaften vor allem mit nah verwandten Geschlechtsgenossen.

Besonderes Interesse erregt der Befund, dass Paare aus größeren stabilen Verbänden mit jeweils mehreren Vertretern beider Geschlechter hervorgingen und nicht umgekehrt – und zwar aus zwei Gründen. Erstens stellt das einige Annahmen zur Verzahnung von sozialer Komplexität und sozialer Intelligenz in Frage, die in der Primatologie in den letzten Jahrzehnten aufkamen. Demnach verlangt das Leben in großen Gruppen wegen der vielen verschiedenen Beziehungen, vor allem dem Umgang mit möglichen Rivalen, dem Verlust einer Menge ab und fördert darum die Evolution des kognitiven Leistungsvermögens. Forscher glaubten bisher, je größer der Verband, desto kompli-



FOTOLIA / STEPHEN MEISE

Bei Primaten waren die komplexen Sozialstrukturen größerer Gruppen die Basis für die Evolution von Paarbeziehungen – nicht umgekehrt.



**JA ZU NEUEN
TECHNOLOGIEN.
DAMIT WIR MORGEN NICHT VON GESTERN SIND.**



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

WIRTSCHAFT.
WACHSTUM.
WOHLSTAND.

www.bmwi.de/go/innovation



zierter sei das soziale Umfeld und desto mehr käme es auf intellektuelle Raffinesse an. Aber der neuen Arbeit zufolge wächst die soziale Komplexität nicht einfach mit der Gruppengröße.

Zweitens verraten die Ergebnisse auch einiges über unsere eigene Evolution. Vor fünf bis sieben Millionen Jahren dürfte der letzte gemeinsame Vorfahre von Menschen und Schimpansen gelebt haben. Über dessen soziales Verhalten weiß man praktisch nichts, doch

es könnte aufschlussreich sein, dass heutige Schimpansen größere feste Gemeinschaften mit jeweils mehreren Erwachsenen beider Geschlechter bilden. Nach den neuen Analysen ist wenig wahrscheinlich, dass die gemeinsamen Ahnen in kleinen Verbänden mit lediglich einem erwachsenen Paar lebten – denn dann hätten sich die Schimpansenverbände aus festen Paarstrukturen entwickelt, was im Widerspruch zu den entdeckten Entwicklungsmus-

tern stünde. Somit trat das Paarleben in der menschlichen Entwicklungslinie erst nach der Trennung der beiden Evolutionszweige auf.

Joan B. Silk ist Anthropologin und hat eine Professur an der University of California in Los Angeles im Department of Anthropology.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 479, S. 182–183, 10. November 2011

NICHTLINEARE OPTIK

Ein Versteck im Fluss der Zeit

Räumliche Tarnkappen haben Physiker schon mehrfach entwickelt. Nun präsentieren sie ein System, das ein Ereignis in der Zeit verbirgt.

VON ROBERT W. BOYD UND ZHIMIN SHI

Siegfried, der viel besungene Held des Nibelungenlieds, verfügte dem Mythos zufolge über ein ganz besonderes Kleidungsstück: eine Tarnkappe, die er einem Zwerg namens Alberich abgeklopft hatte. Mit Hilfe dieser »Kappe«, die eigentlich ein mantelartiger Umhang war, wurde der Sagenheld unsichtbar, so oft er es wünschte. Das Konzept fasziniert bis heute. Seit einigen Jahren experimentieren Physiker darum mit Vorrichtungen, die Gegenstände unsichtbar machen.

Wie kann man sich eine solche Tarnkappe vorstellen? Sie umhüllt das zu verbergende Objekt, wobei ihr Material besondere optische Eigenschaften besitzt. Wichtig ist vor allem der Brechungsindex. Er sorgt dafür, dass ein Lichtstrahl an der Grenzfläche zwischen zwei Medien eine mehr oder weniger starke Richtungsveränderung erfährt. Insbesondere muss der Brechungsindex innerhalb des Kappenmaterials so variieren, dass ein auf die Kappe fallender Lichtstrahl um sie herumgeleitet wird. Der Beobachter soll den Eindruck erhalten, der Strahl wäre durch die Kappe hindurchgedrungen, ohne dabei auf ein Hindernis zu treffen.

Längst sind solche Tarnkappen nicht nur dem Reich der Mythen, sondern auch der Theorie entwachsen. Ihre experimentelle Realisierung ist eng mit optischen Metamaterialien verknüpft. Das sind künstlich hergestellte Werkstoffe, deren optische Eigenschaften sich in einem weiten Bereich relativ frei wählen lassen. Beispielsweise können sie, anders als so gut wie alle natürlich vorkommenden Materialien, negative Brechungsindizes aufweisen. Schon mehrfach stellten Forscher funktionsfähige Tarnkappen auf Basis von Metamaterialien vor, wenn auch jeweils nur für Spezialfälle – sie funktionieren beispielsweise im sichtbaren Licht, bei infraroten Wellenlängen sowie im Mikrowellenbereich (siehe unter anderem »Moderne Tarnkappe« in *SdW* 3/2007, S. 16).

Im vergangenen Jahr wurde das Tarnkonzept nun auch auf die Dimension der Zeit ausgedehnt, und zwar zunächst durch eine theoretische Arbeit. Britische Forscher um Martin McCall vom Londoner Imperial College zeigten, dass in einer Lichtwelle eine »zeitliche Lücke« entstehen kann. Dazu müssen die Forscher einen Lichtstrahl trickreich manipulieren. Sie schneiden ihn an ei-

ner Stelle gewissermaßen durch und beschleunigen den vorderen Teil, den hinteren bremsen sie ab. Verändert wird hierbei allerdings nur die so genannte Gruppengeschwindigkeit des Lichts (siehe »Der Licht-Turbo«, *Spektrum der Wissenschaft* 2/2012, S. 48); die von Einstein postulierte Obergrenze für die Lichtgeschwindigkeit wird nicht verletzt. So entsteht eine Lücke im Lichtstrahl. Jedes Ereignis, das innerhalb dieser Lücke geschieht, wirkt sich nicht auf den Strahl aus und ist für den, der ihn registriert, »verschwunden«.

Die Lücke würde aufmerksame Beobachter allerdings argwöhnen lassen, dass jemand am zeitlichen Verlauf des Systems herumgedoktert haben könnte. Doch sie lässt sich auch wieder schließen: Das zuvor beschleunigte Licht wird wieder verlangsamt und das verlangsamte Licht wieder beschleunigt. Sobald die derart »reparierte« Wellenfront einen Beobachter erreicht, nimmt er ein kontinuierliches, gleichmäßiges Lichtfeld wahr; jeder Hinweis auf die Manipulation ist getilgt.

Dieser Grundgedanke ergibt sich zumindest aus einer Reihe mathematischer Überlegungen im Rahmen der

nichtlinearen Optik. Dass er mehr als blanke Theorie ist, demonstrierten nun Moti Fridman und seine Kollegen von der Cornell University im US-Bundesstaat New York. Für ihr Experiment verwenden die Forscher so genannte Zeitlinsen, die Lichtstrahlen zeitlich stauchen oder dehnen können. Genauer gesagt benutzen die Cornell-Physiker geteilte Zeitlinsen. In den zwei »Hälften« einer geteilten Zeitlinse erfährt Licht jeweils entgegengesetzte Farbverschiebungen: Aus der einen Hälfte tritt also blauverschobenes, aus der anderen Hälfte rotverschobenes Licht aus. Ersteres besitzt eine kleinere, letzteres eine größere Wellenlänge als das ursprüngliche grüne Licht.

Anschließend lassen die Forscher das Licht durch eine spezielle optische Faser laufen, in der sich die Gruppengeschwindigkeit abhängig von der Wellenlänge verändert. Durch diese so genannte Dispersion wird das blauere

Licht gegenüber dem ursprünglichen beschleunigt, das rötere verlangsamt. So öffnet sich für einen sehr kurzen Zeitraum von rund 50 Pikosekunden (50 milliardstel Sekunden) eine Zeitlücke. Diese schließen die Forscher anschließend wieder nahtlos, indem sie ein zweites, nun entgegengesetzt wirkendes Dispersionsmedium und eine weitere geteilte Zeitlinse einsetzen. Ein- und ausschalten lässt sich die Tarnkappe mit Hilfe von Lasern, die auf die Linsen gerichtet werden und deren Funktion beeinflussen.

Präzise durch die Zeitlücke

Zum Nachweis, dass ihre zeitliche Tarnkappe funktioniert, schickte das Physiker-Team einen Lichtpuls durch ihren Versuchsaufbau – genau in der Mitte der Zeitlücke. Bei ausgeschalteter Tarnkappe erzeugte dieser durch Wechselwirkung mit dem manipulierten Lichtfeld ein Signal mit einer Wellenlänge

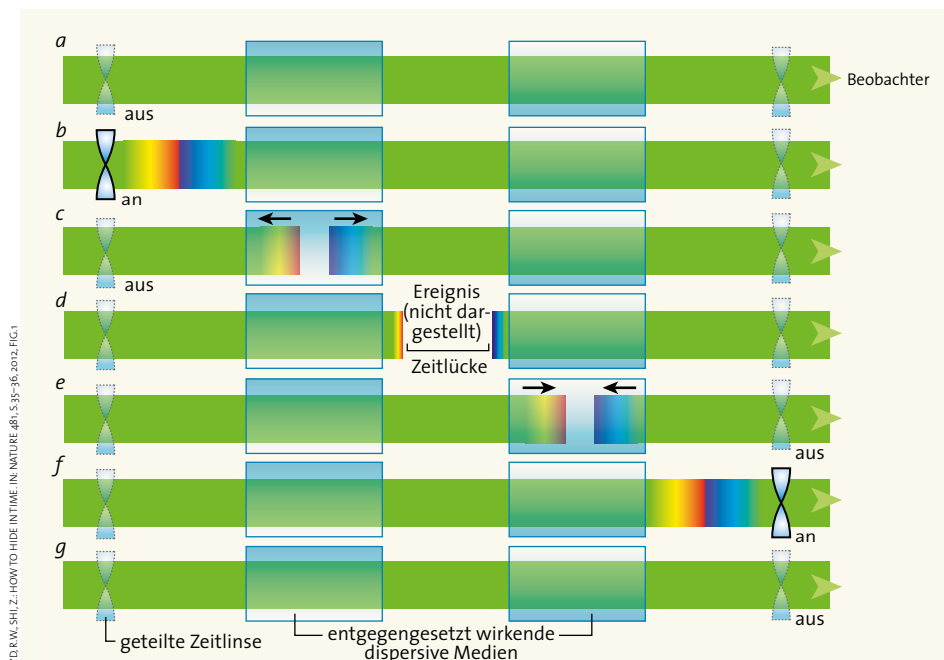
von exakt 1,539 milliardstel Meter. Schalteten die Forscher die Kappe jedoch ein, konnten sie dieses Signal weitgehend zum Verschwinden bringen: Seine Stärke fiel auf weniger als ein Zehntel des Ursprungswerts ab, das Signal war praktisch verhüllt. Der die Tarnkappe durchquerende Lichtstrahl, so zeigten die Physiker ebenfalls, trat anschließend nahezu unverändert aus dem System aus.

Den Unterschied zwischen zeitlichen und räumlichen Tarnkappen verdeutlichen zwei Analogien aus dem Verkehr. Das Prinzip der zeitlichen Kappe erinnert an einen Bahnübergang: Nähert sich der Zug und schließen sich deshalb die Schranken, wird der Verkehrsfluss auf der Straße gestoppt – eine Lücke im Strom der Autos ist die Folge. Wenn sich später die Schranken wieder öffnen, beschleunigen die Fahrer und setzen ihre Fahrt fort. Sobald sie zu den Autos vor ihnen aufgeschlossen

So funktioniert die zeitliche Tarnkappe

Ein kontinuierlicher grüner Lichtstrahl durchquert das System von links nach rechts (a). Die erste Zeitlinse wird eingeschaltet. Bei einem Teil des ursprünglichen Lichts vergrößert sie die Wellenlänge (Farbe) und verringert sie beim anderen Teil (b). Das modifizierte Licht bewegt sich durch ein dispersives Medium, das die Lichtgeschwindigkeit je nach Farbe beeinflusst (c). Das zum Blauen verschobene Licht wird schneller, das zum Roten verschobene Licht langsamer als das ursprüngliche Grün. Die Folge: Es öffnet sich allmählich eine Zeitlücke. Nun ist die Zeitlücke maximal geöffnet (d). Innerhalb der Lücke wird ein »Ereignis« erzeugt (nicht gezeigt). Bei ausgeschalteten Zeitlinsen würde es mit dem grünen Strahl wechselwirken und ein Signal bei einer bestimmten Wellenlänge entstehen lassen. Sind die Linsen eingeschaltet, kommt es nicht zu einer Wechselwirkung; das Signal lässt sich nicht nachweisen, ist also »verhüllt«. Die Zeitlücke beginnt sich dank eines umgekehrt wirkenden Dispersionsmediums wieder zu schließen (e). Nachdem die

Zeitlücke vollständig geschlossen ist, verwandelt eine zweite Zeitlinse alle Farben wieder in Grün (f). Ein Beobachter sieht nur durchgehend grünes Licht (g), ganz so, als ob das Ereignis in d nie stattgefunden hätte.



BOYD, R.W., SHILZ, J.: HOW TO HIDE IN TIME. IN: NATURE 481, S. 35–36, 2012, FIG. 1

Nebeneffekte der Killerdrohnen

Welche psychologische Wirkung haben fliegende Kriegerroboter?

In Krisenregionen werden immer öfter ferngesteuerte Flugkörper eingesetzt. Solche Drohnen können Gegner nicht nur aufspüren, sondern auch mehr oder weniger gezielt umbringen. Nach Schätzungen der New America Foundation, einer regierungsnahen US-Denkfabrik, haben allein in Pakistan rund 300 Drohneneinsätze seit 2004 zwischen 1785 und 2771 Menschen getötet. Die meisten seien militante Aufständische gewesen, heißt es. Wie die »Kollateralschäden« erfasst wurden, bleibt allerdings zweifelhaft (*Science* 336, S. 842–843, 2012).

Für die angreifende Seite hat die ferngesteuerte Kriegführung nichts als Vorteile. Die Piloten sitzen ungefährdet in der Nähe ihres Wohnorts, lenken eine tausende Kilometer entfernt operierende Drohne per Satellit vom bodengestützten Cockpit aus und kehren nach getaner Arbeit heim zu Frau und Kindern. Militärpsychologen zufolge leiden sie – ganz anders als Veteranen des Afghanistan- und Irakkriegs – nicht häufiger an posttraumatischem Stress als die Zivilbevölkerung.

Doch wie erlebt die andere Seite den Drohnenkrieg? Offenbar gibt es darüber noch keinerlei Forschung. Das scheint mir – ganz abgesehen von den humanitären Aspekten – schon unter rein konflikttheoretischen Gesichtspunkten ein Manko zu sein, das den Sinn solcher Robotereinsätze in Zweifel zieht.

Für die Vermutung, dass Drohnenangriffe nicht befrieden, sondern Öl ins Feuer gießen, spricht die sozialpsychologische Studie eines kleinen Teams um den Politologen Nicholas Sambanis von der Yale University in New Haven (Connecticut). Die drei Forscher untersuchten die Frage, wie – ganz allgemein – Aufstandsbekämpfung die soziale Einstellung der betroffenen Bevölkerung beeinflusst (*Science* 336, S. 805–808, 2012). Sind die Menschen froh, die militanten Mitbürger los zu sein, empfangen sie dankbar die Hilfe der Invasoren und leben zukünftig friedlich zusammen?

Weit gefehlt. Der Studie zufolge erhöht Aufstandsbekämpfung die gesellschaftliche Spaltung. Die Autoren verwenden dafür den in der angelsächsischen Sozialforschung gebräuchlichen Begriff Parochialismus, der sich von Parochie für Pfarrei herleitet. Gemeint ist eine enge Kirchturmperspektive, das misstrauische Zusammenrücken in kleinen Gruppen.

Aus den Zuständen in Irak, Afghanistan und Pakistan sowie aus sozialen Spielen im Labor gewannen die Forscher zahlreiche Indizien dafür, dass ein Land, das von außen befriedet werden soll, in ein konfliktreiches Mosaik aus ethnisch und religiös definierten Gruppen zerfällt. So stehen sich zum Beispiel im Irak heute Kurden, Sunniten und Schiiten feindselig gegenüber.

Wenn schon herkömmliche Aufstandsbekämpfung Unfrieden schürt – bei der immerhin Bodentruppen der einheimischen Bevölkerung von Angesicht zu Angesicht begegnen, Gespräche suchen und Hilfe anbieten können –, wie müssen dann erst unsichtbare Luftschläge wirken, die buchstäblich als Blitze aus heiterem Himmel niedergehen?

Wie gesagt: Mangels einschlägiger Untersuchungen ist die psychologische Wirkung von Drohnenangriffen vorerst noch unbekannt. Ich vermute, sie erzeugen ein Unmaß an Angst und ohnmächtigem Hass. Dies wiederum dürfte die Betroffenen erst recht in die Arme ethnischer und religiöser Führer treiben, bei denen sie persönlichen Schutz vor der anonymen Bedrohung suchen. Solange der Zusammenhang zwischen Drohnenkrieg und Parochialismus nicht erforscht ist, spricht für fliegende Roboter nichts als die Unverwundbarkeit ihrer Piloten.



Michael Springer

haben, die Lücke also wieder geschlossen ist, kann ein Beobachter des Verkehrsflusses keinerlei Hinweis auf den die Strecke kreuzenden Zug entdecken: Es ist, als habe dieses Ereignis nie stattgefunden.

Im Gegensatz dazu ähnelt die Wirkungsweise einer räumlichen Kappe einem viel befahrenen Autobahnkreuz vom Typ Kleeblatt. Linksabbieger müssen an einer Kreuzung normalerweise warten, bis sich eine Lücke im entgegenkommenden Verkehr auftut. Diese Raumregion können sie aber meiden, indem sie nach rechts auf eine schleifenförmige Abfahrt abbiegen, die sie in einem Dreiviertelkreis in die gewünschte Richtung leitet. Auf diese Weise fließen die Verkehrsströme, als würde die Kreuzung gar nicht existieren.

Räumliche und zeitliche Tarnkappe wirken in jeweils verschiedenen Dimensionen. Es gibt deshalb keinen prinzipiellen Grund, warum beide nicht auch zu einer vollständigen Raum-Zeit-Tarnkappe kombiniert werden könnten. Die Pioniertat der Cornell-Forscher, wenngleich sie bislang nur für eine einzige Frequenz und auch noch nicht perfekt funktioniert, könnte zudem Anwendungen außerhalb des Labors zeitigen, beispielsweise dabei helfen, die Abhörsicherheit faseroptischer Kommunikationstechniken zu erhöhen. Nächste logische Schritte wären die Verlängerung der Wirkungsdauer der Tarnkappe bis hin zu Mikro- oder gar Millisekunden und die Erweiterung ihrer Wirkung auch für den Fall, dass Licht aus unterschiedlichen Raumrichtungen einfällt. Ob den Physikern damit allerdings je Heldentaten gelingen werden, wie sie dem Drachentöter Siegfried nachgesagt werden, bleibt erst einmal abzuwarten.

Robert W. Boyd forscht am Institut für Optik der University of Rochester (Bundesstaat New York) vor allem auf dem Gebiet der nicht-linearen Optik. **Zhimin Shi** gehört als Postdoc zu seinem Team.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 481, S. 35–36, 5. Januar 2012

Es gibt 502.749 Krankenhausbetten.
In welchem liegen Sie richtig?

FOCUS Alle Tipps für: **Aufnahme** | **Aufenthalt** | **Entlassung**

GESUNDHEIT

++ Das beste Krankenhaus in Ihrer Nähe ++

Qualität, Pflege, Hygiene
So wählen Sie das richtige Krankenhaus

Deutschlands große
Klinikliste

Mehr als 800 Top-Krankenhäuser für Geburten, Krebs, Psyche, Rücken & Gelenke, Nerven, Herz & Lunge

In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten. Die aktuelle Ausgabe stellt die besten Kliniken zur Behandlung von psychischen Erkrankungen, Krebs, Herz-, Gelenk- und Nervenleiden sowie für Geburtshilfe vor: Hier finden Sie die Top 100 der besten Krankenhäuser Deutschlands.

Außerdem in diesem Heft:

- **Ratgeber:** Wie finde ich die geeignete Klinik für mich?
- **Service:** So kommt man gesund durchs Krankenhaus.
- **Regionalliste:** Die Top-Kliniken in Ihrer Nähe.
- **Reportage:** Unterwegs in Deutschlands bester Klinik.

Jetzt am Kiosk.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter: Tel. 0180 5 480 1000*, Fax 0180 5 480 1001*, www.focus-gesundheit.de

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

TITELTHEMA: GERONTOLOGIE

Ein neuer Weg zu längerem Leben

Forscher haben einen molekularen Mechanismus entdeckt, der das Altern verlangsamt. Medikamente, die ihn aktivieren, könnten zudem Krebs, Diabetes und andere altersbedingte Krankheiten in Schach halten.

Von David Stipp



Jugendlich und gesund ein
hohes Alter erreichen – diesen
Traum könnte die Medizin
in absehbarer Zeit erfüllen.

AG. FOCUS / SPL / CONEY, JAY, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

An einem klaren Novembermorgen des Jahres 1964 stach die »HMCS Cape Scott« der Royal Canadian Navy von Halifax (Nova Scotia) in See. Für das 38-köpfige Wissenschaftlerteam an Bord war es der Auftakt zu einer 14-monatigen Expedition zur Osterinsel, die als Spitze eines gewaltigen Vulkans 2200 Meilen westlich von Chile aus dem Pazifik ragt und berühmt für ihre kolossalen Steinstatuen ist. Aufgeschreckt von Plänen zum Bau eines Flughafens, wollten die Forscher unter Leitung des inzwischen verstorbenen Stanley Skoryna, eines unternehmungslustigen Professors von der McGill University in Montreal, die Einheimischen sowie die Flora und Fauna studieren, solange das abgelegene Eiland noch weitgehend unberührt von der modernen Zivilisation war.

Von den Inselbewohnern freundlich empfangen, sammelte Skorynas Team Exemplare von mehreren hundert ungewöhnlichen Pflanzen- und Tierarten und entnahm allen 949 Eingeborenen Blut- und Speichelproben. Doch der größte Schatz schlummerte in einer unscheinbaren Bodenprobe, die Skoryna mit nach Kanada brachte. Darin fand sich ein Bakterium, das eine Substanz mit einer einzigartigen Eigenschaft produziert: Sie erhöht die Lebensdauer.

Hersteller von Anti-Aging-Mitteln führen als angeblichen Beweis für die lebensverlängernde Wirkung ihrer Produkte gerne Daten an, die eine höhere durchschnittliche Lebenserwartung belegen. Doch das ist ein Trugschluss. Die durchschnittliche Lebenserwartung erhöhen nämlich auch Antibiotika oder andere Medikamente, die einen frühzeitigen Tod durch Krankheit verhindern. Mit dem Altern hat das nichts zu tun. Rapamycin hingegen, wie die Substanz von der Osterinsel genannt wurde, dehnt nicht nur die durchschnittliche, sondern auch die maximale Lebensspanne von Labormäusen über die von unbehandelten Tieren aus. Nur das beweist, dass sich tatsächlich der Alterungsprozess bei den Nagern verlangsamt. Bisher hat keine andere Substanz so etwas je bei Säugetieren vermocht. Der Erfolg von Rapamycin bei Labormäusen ist für Gerontologen deshalb vergleichbar mit dem erstmaligen Durchbrechen der Schallmauer in der Luftfahrt. Schon lange wünschen sie nichts sehnlicher als eine einfache Möglichkeit, das Altern hinauszuschieben und nicht nur die Langlebigkeit zu erhöhen; denn damit verzögern sich auf einen Schlag auch all die Gebrechen, unter denen wir mit zunehmendem Alter zu leiden haben, vom grauen Star bis zum Krebs.

Viele Jahre lang glich das Hoffen auf die Entdeckung eines solchen Anti-Aging-Mittels einer Achterbahnfahrt. Als Forscher Ende der 1980er Jahre Genmutationen aufspürten, die bei Tieren die maximale Lebensspanne verlängern, weckte das zunächst hohe Erwartungen. Anlass zu Optimismus gaben auch neue Einblicke in die Wirkungsweise einer Hungerdiät, die denselben lebensverlängernden Effekt hat. Doch trotz dieser viel versprechenden Fortschritte in der Grundla-

genforschung blieb die Fahndung nach Substanzen, welche die Grenzen der Lebenszeit von Säugetieren hinausschieben, ohne Erfolg. Zwar verlängerte das Drosseln der Kalorienzufuhr auf ein Niveau, das die Versuchstiere an den Rand des Hungertods brachte, bei Mäusen die Lebenszeit und zögerte zugleich Krebs, Neurodegeneration, Diabetes und andere altersbedingte Krankheiten hinaus. Doch eine derart strenge Diät kommt bei Menschen nicht in Frage.

Vom geheimnisvollen Stoff aus dem Rotwein zum ersten echten Anti-Aging-Mittel

Noch vor wenigen Jahren ruhten die Hoffnungen der Gerontologen auf Resveratrol, dem viel gepriesenen Inhaltsstoff von Rotwein, der teilweise dieselben positiven Wirkungen hat wie eine Kalorienrestriktion. So unterbindet er bei Nagern die lebensverkürzenden Folgen einer sehr fettreichen Diät. Doch spätere Versuche mit normal gefütterten Mäusen machten alle Hoffnungen zunichte. Bei ihnen ließ die Substanz, die vermutlich auf Enzyme aus der Klasse der Sirtuine wirkt, die maximale Lebensspanne nicht steigen.

Diese herbe Enttäuschung wich neuem Optimismus, als 2009 die Ergebnisse der Rapamycin-Studie publik wurden. In drei parallelen Versuchen, finanziert vom National Institute on Aging in Bethesda (Maryland), hatte der bis dahin nur als Zellwachstumshemmer bekannte Wirkstoff die maximale Lebensspanne von Mäusen um durchschnittlich zwölf Prozent verlängert. Tatsächlich waren die Versuchstiere, weil sich die vorbereitenden Untersuchungen verzögerten, zu Beginn des Experiments schon 20 Monate alt, was beim Menschen etwa 60 Jahren entspricht. Deshalb rechneten die Forscher gar nicht mehr mit einem Erfolg. Doch zu ihrem gro-

AUF EINEN BLICK

DEN VERFALL DES KÖRPERS HINAUSZÖGERN

1 Eine Substanz namens **Rapamycin** verlängert die **Lebensspanne** von Mäusen deutlich, indem sie in einen biochemischen Regelkreis eingreift. Wegen erheblicher **Nebenwirkungen** ist sie für gesunde Menschen zur vorsorglichen Einnahme allerdings kaum geeignet.

2 Dennoch beweist sie, dass sich der **Alterungsprozess** bei Säugtieren im Prinzip medikamentös hinauszögern lässt. Den gleichen **lebensverlängernden Effekt** hat übrigens auch dauerhaftes **extremes Fasten**.

3 Beides hemmt das **Wachstum** und die **Teilungsaktivität** von Zellen. Dass sich ausgerechnet dadurch die Lebensspanne erhöht, erscheint zunächst paradox. Doch inzwischen gibt es mehrere Erklärungsansätze dafür.

4 Die weitere Erforschung dieser Frage könnte zur Entwicklung von Medikamenten führen, die **altersbedingte Krankheiten** – von Morbus Alzheimer über Krebs bis hin zu Herzversagen – hinauszögern oder mildern und damit auch uns Menschen zu einem längeren Leben verhelfen.

ßen Erstaunen erhöhte Rapamycin die durchschnittliche Überlebenszeit der betagten Mäuse sogar um ein Drittel.

Leider sind die Nebenwirkungen der Substanz zu gravierend, um sie selbst als Anti-Aging-Mittel beim Menschen einzusetzen. Die Suche nach den Gründen für ihren lebensverlängernden Effekt lenkte den Blick der Wissenschaftler jedoch auf einen uralten Mechanismus, der das Altern bei Mäusen sowie anderen Säugetieren und vermutlich auch beim Menschen reguliert. Seine Haupttriebfeder ist ein Protein namens TOR (Abkürzung für target of Rapamycin; Ziel von Rapamycin). Dieser Eiweißstoff und das zugehörige Gen stehen derzeit im Zentrum intensiver Untersuchungen in der Gerontologie wie auch der angewandten Medizin.

Die bisherigen Ergebnisse sind ermutigend. Demnach verringern Maßnahmen, welche die Aktivität der Säugetierversion des Proteins – genannt mTOR, von englisch mammalian TOR – in Körperzellen senken, das Risiko der wichtigsten altersbedingten Leiden. Dazu zählen Krebs, Alzheimer-syndrom, Parkinsonkrankheit, Herzmuskelschwäche, Typ-2-Diabetes, Osteoporose und Makuladegeneration. Diese ersten positiven Befunde elektrisieren die Forscher; denn damit zeichnet sich die Möglichkeit ab, mit Medikamenten, die mTOR gezielt und sicher hemmen, das Altern bei Menschen genauso hinauszuzögern, wie das mit Rapamycin bei Mäusen gelungen ist.

Universeller Wachstumshemmer

Es war ein langer Weg bis zur Entdeckung von TORs Einfluss auf die Lebensspanne. Zunächst einmal übergab die Skoryna-Expedition ihre Bodenproben an die damaligen Ayerst Laboratories in Montreal. Pharmakologen hatten schon in den 1940er Jahren Spuren von Antibiotika in Bakterien entdeckt, die im Erdreich hausen. Deshalb untersuchten die Ayerst-Forscher auch diese Proben auf antimikrobielle Substanzen.

Im Jahr 1972 gelang es ihnen, einen Hemmstoff für Pilze daraus zu isolieren. Nach Rapa Nui, dem Namen der Einheimischen für die Osterinsel, nannten sie ihn Rapamycin. Doch die ursprüngliche Hoffnung, die Substanz gegen Hefepilzinfektionen einsetzen zu können, zerschlug sich. Als die Wissenschaftler die Eigenschaften von Rapamycin an Zellkulturen und den Immunsystemen von Tieren untersuchten, entdeckten sie allerdings, dass es die Proliferation von Abwehrzellen verhindern kann. Deshalb prüften sie es nun auf seine Eignung als Immunsuppressivum nach der Übertragung von Organen – mit Erfolg: 1999 erteilte die US-Arzneimittelbehörde Rapamycin die Zulassung für Patienten mit Nierentransplantation. Schon den 1980er Jahren hatte sich außerdem herausgestellt, dass die Substanz das Wachstum von Tumoren unterdrückt. Seit 2007 dienen deshalb zwei von ihm abgeleitete Verbindungen – Temsirolimus von Pfizer und Everolimus von Novartis – zur Behandlung verschiedener Krebsarten.

Biologen fanden es faszinierend, dass Rapamycin das Wachstum sowohl von menschlichen als auch von Hefezellen zu hemmen vermag. Demnach sollte es die Wirkung eines Gens unterdrücken, das für die Zellteilung wichtig ist

und sich in der Jahrmilliarde, welche die Evolution von den Hefepilzen bis zum Menschen brauchte, fast nicht verändert hat. 1991 gelang es Michael N. Hall und seinen Kollegen an der Universität Basel, diesen uralten Erbfaktor aufzuspüren. Sie entdeckten, dass Rapamycin zwei Gene blockiert, die das Wachstum der Hefe regulieren, und nannten sie TOR1 und TOR2. Drei Jahre später identifizierten mehrere Forscher, darunter Stuart Schreiber von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und David Sabatini, inzwischen am Whitehead Institute for Biomedical Research in Cambridge, unabhängig voneinander das menschliche Gegenstück. Auch bei vielen anderen Arten – darunter Würmern, Insekten und Pflanzen – wurden seither TOR-Gene nachgewiesen.

Im Lauf der 1990er Jahre lernten die Forscher immer mehr darüber, welche Rolle das zugehörige Protein in den einzelnen Zellen und im Körper insgesamt spielt. Wie sich zeigte, hängen viele seiner Funktionen letztlich mit dem Altern zusammen. Insbesondere stellte sich heraus, dass TOR als Enzym fungiert, das sich im Zytoplasma mit mehreren anderen Proteinen zu einem Komplex namens TORC1 verbindet. Dieser überwacht eine ganze Reihe von Zellaktivitäten, die mit Wachstum zu tun haben. Daneben gibt es einen zweiten Komplex namens TORC2, dessen Funktion noch relativ unklar ist. Rapamycin beeinflusst vor allem TORC1.

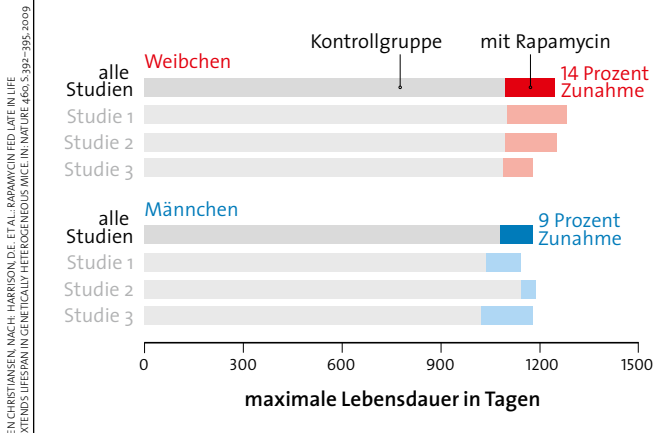
In erster Linie dient TOR als Nährstoffsensoren. Bei ausreichend Nahrung verstärkt sich seine Aktivität, woraufhin die Zelle die Proteinproduktion ankurbelt und sich zu teilen beginnt. Unter schlechteren Bedingungen erlahmt TOR. Als Folge davon entstehen weniger neue Proteine, und die Zellteilung kommt zum Stillstand. Gleichzeitig beginnt die Zelle, sich teilweise selbst zu verdauen – ein als Autophagie bezeichnet Vorgang: Sie zerlegt nicht unbedingt benötigte oder defekte Komponenten wie etwa missgestaltete Proteine und nicht richtig funktionierende Mitochondrien, die zell-eigenen Kraftwerke. Die Abbauprodukte dienen als Brennstoffe oder Baumaterialien. Neugeborene Mäuse beziehen ihre Energie vor dem ersten Saugen bei der Mutter ausschließlich aus Autophagie.

Forscher machten eine weitere interessante Entdeckung: Bei Tieren sind die Signalwege von TOR und Insulin miteinander gekoppelt. Insulin ist das von der Bauchspeicheldrüse nach Mahlzeiten freigesetzte Hormon, das Muskel- und andere Zellen veranlasst, Glukose aus dem Blut als Energieträger aufzunehmen. Zugleich wirkt es aber auch als Wachstumsfaktor; es selbst und verwandte Proteine tragen dazu dabei, den TOR-Signalweg in Schwung zu bringen, was die Zellen im gesamten Körper als Reaktion auf die Nahrungsaufnahme zu Wachstum und Vermehrung anregt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Verschränkung zwischen den beiden Signalwegen ist eine negative Rückkopplungsschleife: Die Stimulation von TOR bewirkt, dass Zellen weniger stark auf Insulin ansprechen. Chronisches »Überfressen« führt also zu einer exzessiven TOR-Aktivierung und macht die Zellen so immer unempfindlicher für das Hormon der Bauchspeicheldrüse. Diese »Insulinresistenz« kann ih-

Geschenkte Lebenszeit

Wie 2009 drei parallele Studien an Mäusen zeigten, verlängert eine Substanz namens Rapamycin die maximale Lebensspanne der Tiere, definiert als die durchschnittliche Lebenszeit der ältesten 10 Prozent, um 9 bis 14 Prozent. Dies war das erste Mal, dass eine chemische Verbindung einen solchen Effekt hatte. Aus noch unbekanntenen Gründen profitierten Weibchen stärker als Männchen.



rerseits hohe Blutzuckerwerte und Diabetes zur Folge haben sowie zu anderen altersbedingten Krankheiten beitragen, beispielsweise zu Verengungen der Herzkranzgefäße.

TOR reagiert aber nicht nur auf Nahrungsmangel, sondern auch auf weitere Belastungssituationen in der Zelle, etwa niedrige Sauerstoffwerte oder Schäden an der Erbsubstanz DNA. Allgemein sinkt bei allen potenziell lebensbedrohlichen Zuständen die TOR-Aktivität, was die Proteinproduktion und Teilungsaktivität drosselt. Die dadurch freigesetzten Ressourcen können in die DNA-Reparatur oder andere Schutzmaßnahmen gesteckt werden. Untersuchungen an Taufliegen zufolge geht in diesem Alarmzustand aber nicht nur die Proteinsynthese insgesamt stark zurück, sondern sie verlagert sich auch: Die Zelle geht dazu über, vor allem wichtige Bausteine der Mitochondrien herzustellen. Möglicherweise dient das der besseren Energieversorgung. Zweifellos entstand diese vielseitige »Stressantwort«, um Zellen für widrige Bedingungen zu wappnen. Ein nicht beabsichtigter Nebeneffekt wäre aber auch, sie gegen den Zahn der Zeit abzuhärten.

Die Idee, dass TOR das Altern verlangsamt, kam Mitte der 1990er Jahre auf. Wie Forscher damals entdeckten, stellen ausgehungerte Zellen das Wachstum ein, weil die TOR-Aktivität zurückgeht. Für Gerontologen war das nichts Neues: Schon 1935 hatte der Ernährungswissenschaftler Clive McCay von der Cornell University in Ithaca (New York) festgestellt, dass junge Ratten, die auf extreme Hungerdiät gesetzt werden, nur sehr langsam wachsen und erstaunlich langlebig sind. Eingeschränkte Kalorienzufuhr hat sich seitdem bei verschiedenen Spezies vom Hefepilz über Spinnen bis hin zu Hunden als Rezept zur Verlängerung der maximalen Lebens-

spanne erwiesen. Nach vorläufigen Ergebnissen gilt das auch bei Affen. Eine Reduktion um etwa ein Drittel in der Jugend erhöht die maximale Lebensspanne allgemein um 30 bis 40 Prozent – wahrscheinlich durch Hinauszögern des altersbedingten Verfalls. Ältere Rhesusaffen aus Langzeitstudien zur Kalorienrestriktion sind jedenfalls außergewöhnlich gesund und sehen noch sehr jugendlich aus.

Der Trick funktioniert zwar nicht immer; bei einigen Labormausstämmen verkürzt sich die Lebensspanne sogar. Aber inzwischen mehren sich Hinweise, wonach Fasten auch beim Menschen ein gesundes Altern fördern kann. Substanzen, die den Effekt der Kalorienrestriktion nachahmen, ohne Hunger zu erzeugen, sind damit zum Heiligen Gral der Gerontologen geworden.

Kurz nach der Jahrtausendwende wussten die Forscher genug über TOR, um zu vermuten, dass seine Blockade eine verringerte Nahrungsaufnahme vortäuschen könnte. 2003 leitete Tibor Vellai, ein ungarischer Gastwissenschaftler an der Universität de Fribourg (Schweiz), eine Untersuchung an Rundwürmern, die erste experimentelle Belege dafür lieferte. Indem er und seine Kollegen die TOR-Synthese genetisch unterdrückten, konnten sie die durchschnittliche Lebensspanne der Tiere mehr als verdoppeln!

Dasselbe ergab eine Studie am California Institute of Technology in Pasadena unter Leitung von Pankaj Kapahi nur ein Jahr später bei Taufliegen. Die Hemmung von TOR ließ die Tiere im Mittel länger leben und bewahrte sie zugleich vor den negativen Folgen übermäßiger Nahrungsaufnahme. 2005 schließlich lieferten Brian Kennedy, damals an der University of Washington in Seattle, und seine Kollegen den endgültigen Beweis für die Verbindung zwischen TOR und dem Altern. Sie schalteten verschiedene TOR-Signalwege in Hefezellen aus. In allen Fällen lebten die Tiere dadurch länger.

Die Entdeckung von Alterungsgenen

Diese und weitere Studien bestätigten somit die Vermutung, dass die Hemmung von TOR den Effekt einer Kalorienrestriktion nachahmt. Zugleich aber stellten sie eine Verbindung zur Wirkung bestimmter Genmutationen her, um deren lebensverlängernde Wirkung man schon seit einiger Zeit wusste. Das erste solche »Gerontogen« war etwa ein Jahrzehnt zuvor in Rundwürmern entdeckt worden. Ihre Mutation verdoppelte die durchschnittliche und die maximale Lebensspanne dieser Tiere; späteren Erkenntnissen zufolge wurde dabei der Insulinsignalweg unterbrochen. Bis dahin war der Alterungsprozess undurchschaubar komplex erschienen. Nun zeigte sich, dass er sich durch die Abwandlung nur eines Gens dramatisch verlangsamen lässt. Das war eine Sensation für die Gerontologie; denn damit bestanden plötzlich reelle Chancen, das menschliche Altern durch Medikamente hinauszuzögern.

Die Aussichten verbesserten sich in den späten 1990er und frühen 2000er Jahren, als Forscher auch bei Nagetieren diverse Gerontogene entdeckten, die Wachstumssignale blockieren – darunter solche, die durch Insulin und ein nahe

verwandtes Hormon namens insulinähnlicher Wachstumsfaktor (IGF, von insulinlike growth factor) vermittelt werden. 2003 stellte eine Maus mit einer solchen Mutation den Rekord für Langlebigkeit in ihrer Art auf: fast fünf Jahre. Ihre Artgenossen erreichen im Labor normalerweise höchstens zweieinhalb Jahre.

Man sollte meinen, diese neu entdeckten Verbindungen zwischen TOR, Kalorienrestriktion und Gerontogenen hätten einen erbitterten Wettlauf darum entfacht, die lebensverlängernde Wirkung von Rapamycin an Säugetieren nachzuweisen. Doch Forscher, die sich mit dem menschlichen Altern befassten, »nahmen TOR nicht wirklich ernst«, sagt Steven Austad, Gerontologe am Barshop Institute for Longevity and Aging Studies an der University of Texas in San Antonio – jedenfalls nicht vor Ende der 2000er Jahre. Der Grund: Rapamycin war als Immunsuppressor bekannt; es schien deshalb nicht als Anti-Aging-Mittel geeignet, weil seine Einnahme über längere Zeit schädlich wäre. Zelton Dave Sharp, einer von Austads Institutskollegen, ließ sich davon jedoch nicht

abschrecken. Nach intensivem Studium der TOR-Literatur organisierte er 2004 einen Großversuch mit mehr als 2000 Mäusen, die dauerhaft Rapamycin erhielten.

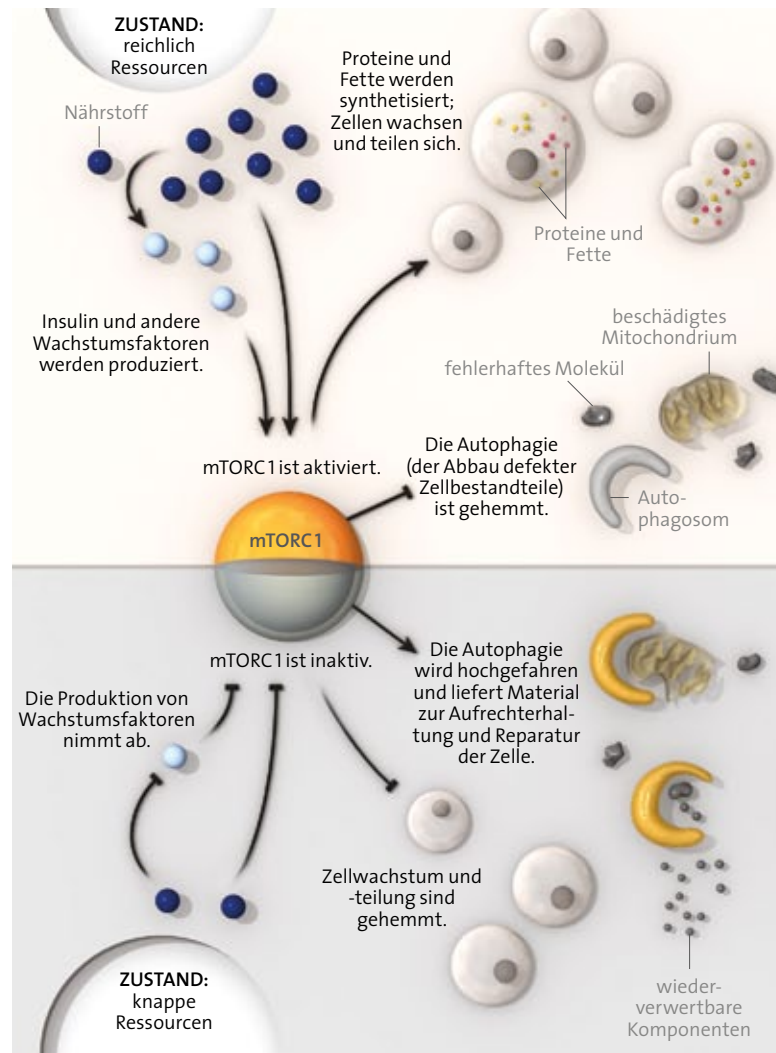
Dabei schien die vom National Institute on Aging finanzierte Studie schon im Vorfeld zu scheitern: Es gab Probleme, die richtige Dosierung des Wirkstoffs im Mausefutter herauszufinden. Dadurch verzögerte sich der Beginn des Experiments, bis die Mäuse 20 Monate alt waren – das menschliche Äquivalent von 60 Jahren. An diesem Punkt, erklärt Austad, »glaubte niemand – und ich meine wirklich niemand – mehr daran, dass es funktionieren würde«. Schließlich verlängert bei so alten Tieren nicht einmal Hungern mehr die Lebensdauer. Doch es kam anders, und die drei Gerontologie-Teams, die unter der Leitung von Randy Strong am Barshop Institut, David E. Harrison am Jackson Laboratory in Bar Harbor (Maine) und Richard A. Miller an der University of Michigan in Ann Harbor die Untersuchung durchführten, schrieben Geschichte: 2009 berichteten sie, dass Rapamycin die restliche Lebensdauer bei den alten männlichen Nagern im Ver-

Die TOR-Story: Ein Molekül mit zwei Gesichtern

Rapamycin verlängert das Leben von Hefepilzen und Tieren, indem es ein Enzym namens TOR hemmt. Auch eine drastisch verringerte Kalorienzufuhr kann das Altern verlangsamen – unter anderem durch ihren Einfluss auf TOR. Forschungen über dessen Wirkungsweise in Zellen und über die Frage, wie seine Hemmung das Altern verlangsamt, zeichnen ein zwiespältiges Bild dieses Moleküls. Einerseits ist es als Nährstoffsensor für Wachstum und Entwicklung früh im Leben unerlässlich. Andererseits kann es im ausgewachsenen Organismus Zellfunktionen beeinträchtigen und so das Gewebe schädigen. Forscher vermuten darin eine der Ursachen für das Altern und die damit verbundenen Krankheiten. Rechts sind die Wirkmechanismen von mTOR, der Säugetierversion, stark vereinfacht dargestellt. Das Enzym ist in ein komplexes Netzwerk von Molekülen eingebunden, die sich gegenseitig beeinflussen. Pfeile bedeuten eine Stimulation, Linien mit stumpfem Ende eine Hemmung.

ZENTRALER NÄHRSTOFF-SENSOR FRÜH IM LEBEN

Das Säugetier-TOR übt seine Funktion als Bestandteil eines Komplexes namens mTORC1 aus. Dieser wird bei reichlicher Nahrungszufuhr aktiv (oben), durch die sich die Konzentration von Insulin und damit verwandten Wachstumsfaktoren im Blut erhöht. In diesem Fall regt er die Synthese von Proteinen, Fetten und weiteren Zellbestandteilen an. Außerdem beschleunigt er Wachstum und Teilung der Zelle. Gleichzeitig gibt mTORC1 die Anweisung, die Autophagie zurückzufahren. Dabei handelt es sich um einen Mechanismus zum Abbau von fehlerhaften Molekülen und beschädigten Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle. Wenn Nahrung oder andere Ressourcen knapp sind (unten), geht mTORC1 in den inaktiven Zustand über. Das veranlasst die Zellen, das Wachstum weitgehend einzustellen und mehr für die Selbsterhaltung zu tun. Sie verstärken die Autophagie, um sich einen Notvorrat an Grundbaustoffen für Zellreparaturen und die Energieerzeugung zu beschaffen.

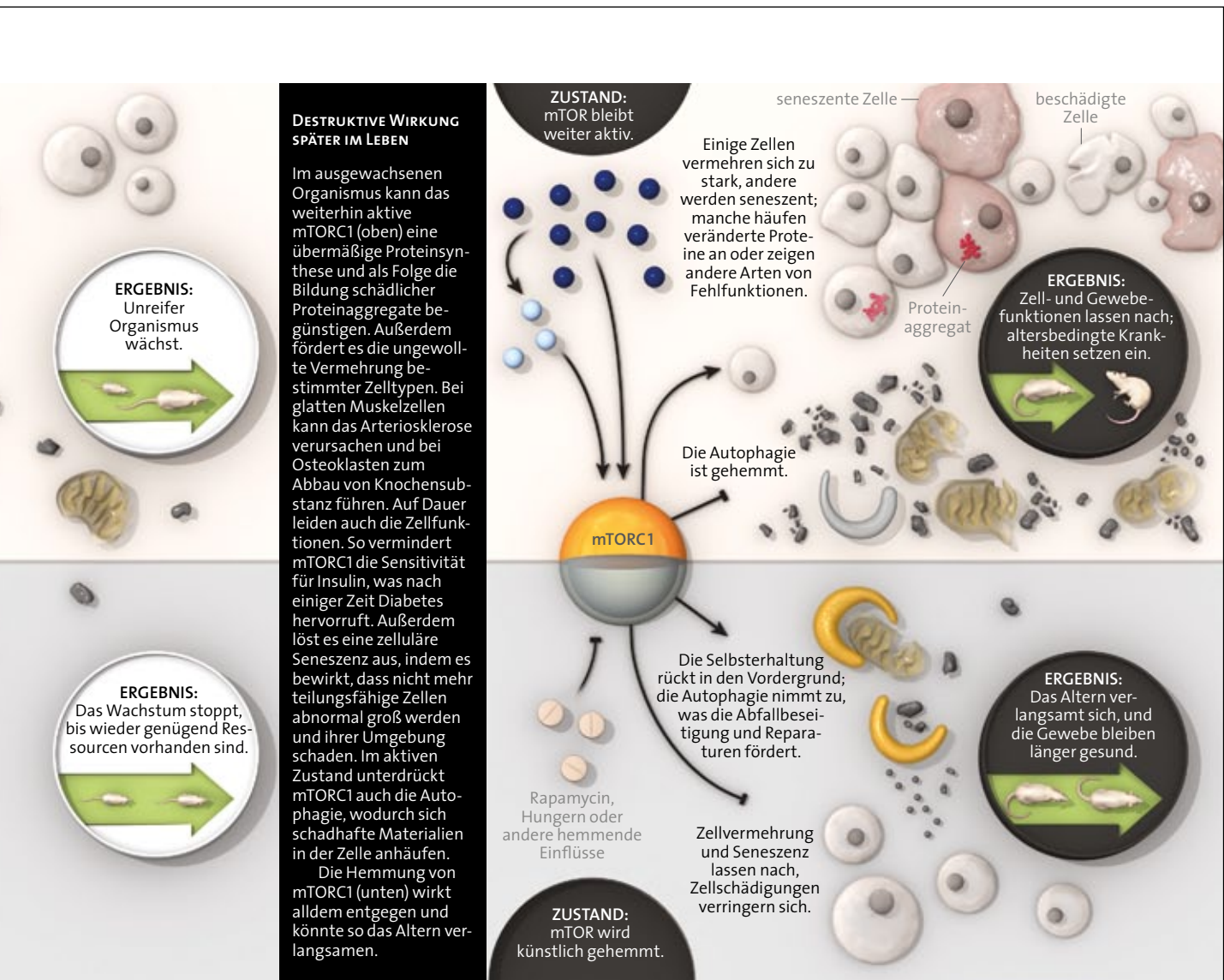


gleich zu unbehandelten Kontrolltieren um erstaunliche 28 und bei den weiblichen sogar um 38 Prozent erhöht hatte. Das entsprach einer Verlängerung der maximalen Lebensspanne um 9 beziehungsweise 14 Prozent.

Nach diesen aufsehenerregenden Ergebnissen an Mäusen bestätigten weitere Studien schon bald die Bedeutung von TOR für das Altern. So schalteten Wissenschaftler am University College in London ein Gen namens *S6K1* aus, auf dem ein Enzym verschlüsselt ist, das mTORs Kontrolle über die Proteinsynthese vermittelt. Dieser Eingriff machte weibliche Mäuse resistent gegen altersbedingte Krankheiten und erhöhte ihre maximale Lebensspanne; seltsamerweise profitierten männliche Tiere allerdings kaum davon. Die drei US-Labors, die Rapamycin an Mäusen getestet hatten, wiederholten ihren Versuch mit neun Monaten alten Tieren und fanden heraus, dass deren Lebensspanne etwa um den gleichen Betrag zunahm wie bei den Nagern, die den Wirkstoff erst mit 20 Monaten erhalten hatten. Demnach scheint Rapamycin vor allem nach der Lebensmitte Vorteile zu brin-

gen – möglicherweise, weil ab diesem Zeitpunkt die Abbauerscheinungen, denen es entgegenwirkt, vermehrt auftreten.

Die Tatsache, dass die Hemmung von TOR im gesamten Tierreich lebensverlängernd wirkt, ragt wie ein Leuchtturm aus dem Meer der molekularen Details des Alterns. Andere Signalwege sind für die Langlebigkeit aber ebenfalls wichtig, und auch die Kalorienrestriktion bleibt weiter von Bedeutung. Sie erweist sich zunehmend als einer von mehreren Bestandteilen eines komplexen, stark verzweigten Netzwerks mit vielerlei Stellschrauben, die sich justieren lassen, um ein gesundes Altern zu fördern. Andere Bestandteile sind mit Insulin verwandte Enzyme sowie so genannte Fox-Proteine (von englisch forkhead box) der Klasse O, welche die Stressantwort in Zellen aktivieren. Es gibt auch deutliche Hinweise darauf, dass Sirtuine eine wichtige Rolle spielen. Offenbar sind sie daran beteiligt, die positiven Effekte des Hungerns bei Säugetieren zu vermitteln. Unter bestimmten Umständen wirken sie auch an der TOR-Suppression mit. Nach derzeitigem Kenntnisstand erscheint TOR jedoch als oberste



Inстанz. Es fungiert als eine Art zentrale Schaltstelle dieses Netzwerks, bei dem die unterschiedlichen Inputs zusammenlaufen. Es verarbeitet sie und kontrolliert so die Alterungsgeschwindigkeit. Zumindest gilt das bei vielen Tierarten und vermutlich auch beim Menschen.

Beim Versuch, die Mechanismen besser zu verstehen, die das Altern verlangsamen, stellt sich unweigerlich die Frage, warum solche Mechanismen überhaupt existieren sollten. Evolutionsbiologen wissen darauf keine rechte Antwort. Der Sinn der natürlichen Auslese ist es, erfolgreiche Fortpflanzung zu ermöglichen, und nicht, einzelne Organismen im Spiel des Lebens in die Verlängerung zu schicken, so dass sie in einem Alter noch fit sind, in dem andere normalerweise schon Räubern, Infektionen, Unfällen oder ähnlichen Fährnissen zum Opfer gefallen sind. Dank dem Wirken der Evolution verfügen alle Lebewesen über das Rüstzeug, lange genug für eine erfolgreiche Vermehrung zu leben, um dann wie verlassene Gebäude allmählich zu verfallen. Wenn aber Fasten den altersbedingten Abbau bei vielen sehr unterschiedlichen Tierarten hinauszögert, kann das nur einen Grund haben: Es muss einen sehr alten, stark konservierten Mechanismus geben, der sich durch natürliche Auslese entwickelt hat, um das Altern bei Nahrungsknappheit zu verlangsamen. Wie ist das möglich?

Das pervertierte Wachstum des Alters

Eine häufig vorgeschlagene Lösung dieses Rätsels lautet: Die Evolution hat dafür gesorgt, dass Organismen in Hungerperioden langsamer altern, damit ihnen, wenn wieder günstigere Bedingungen herrschen, noch ausreichend Zeit für eine erfolgreiche Fortpflanzung bleibt. Skeptiker wie Austad vom Barshop Institute überzeugt das nicht. Sie bezweifeln, dass Wildtiere genauso wie ihre verhätschelten Artgenossen im Labor bei knapper Kost ein höheres Alter erreichen. Abgemagert und vom Hunger geschwächt, haben sie in freier Natur vermutlich kaum eine Chance, lange genug zu überleben, um von Genen zu profitieren, die ihr Altern verlangsamen – geschweige denn sie weiterzugeben.

Einige Gerontologen halten eine andere Möglichkeit für plausibler. Ihrer Ansicht nach verlängert die Kalorienrestriktion die Lebensspanne nur als Nebeneffekt von Mechanismen, die aus altersunabhängigen Gründen evolutionär entstanden sind. Austad etwa meint, dass Wildtiere in kargen Zeiten auch ungewohnte Nahrung fressen. Dabei nehmen sie möglicherweise Giftstoffe auf, die in ihrem normalen Futter nicht vorkommen. Das könnte eine Tendenz gefördert haben, in Hungerzeiten Vorkehrungen gegen Toxine zu treffen – durch Aktivierung der zellulären Programme zur Stressbewältigung und der zugehörigen Reparaturprozesse. Diese Maßnahmen wirken aber auch dem Altern entgegen.

Oder ist die magische Wirkung der Kalorienrestriktion vielleicht nur eine Art Betriebsunfall? Diese ziemlich ausgefallene Hypothese leitete vor einigen Jahren Mikhail V. Blagosklonny, Krebsforscher am Roswell Park Cancer Institute in Buffalo (New York), aus den Erkenntnissen über TOR ab. Der gebürtige Russe hat ein breit gefächertes Interessenspek-



trum, das von der Krebsforschung bis zur Zellbiologie reicht. Seiner Ansicht nach bringt uns ausgerechnet die Fähigkeit zum Wachstum, die das Wesen der Jugend ausmacht, am Ende ins Grab. Folglich verlängert Hungern das Leben, weil es die im fortgeschrittenen Alter eher schädlichen Wachstums-signale behindert. Und das wichtigste darunter ist TOR.

Warum das in der Jugend für Entwicklung und Fortpflanzung essenzielle Enzym später zum Sargnagel wird, hat laut Blagosklonny vielerlei Gründe. Zum Beispiel begünstigt es wegen seiner wachstumsfördernden Signale

- die Vermehrung glatter Muskelzellen in Arterien, was zur Arteriosklerose führt,
- die Bildung von Fettpolstern, die Entzündungsreaktionen Vorschub leisten,
- die Entwicklung einer Insulinresistenz, die Diabetes hervorruft,
- die Proliferation so genannter Osteoklasten, wodurch Knochensubstanz abgebaut wird
- und unkontrolliertes Zellwachstum mit Krebs als Folge.

Außerdem leistet TOR, indem es die Autophagie unterdrückt, der Ansammlung von Proteinaggregaten und nicht mehr funktionsfähigen Mitochondrien Vorschub, die erbgutschädigende freie Radikale freisetzen und den Energiestoffwechsel der Zelle stören. Schließlich trägt es auch dazu bei, dass sich abbauresistente Proteine in Nervenzellen anhäufen – ein Vorgang, der bei der Alzheimererkrankung und anderen Formen von Neurodegeneration eine Rolle spielt. Wie Blagosklonny nachweisen konnte, fördert TOR im hohen Alter zudem die Zellseneszenz, indem es nicht mehr teilungsfähige Zellen stimuliert, so dass sie anschwellen und durch übermäßige Aktivität ihre noch intakten Nachbarn schädigen. Das beeinträchtigt die Regenerationsfähigkeit des Gewebes.

All dies zeigt nach Ansicht des Forschers, dass die Evolution gar keinen Mechanismus entwickelt hat, um das Altern zu verlangsamen. Rapamycin, ungenügende Nahrungsaufnahme und Genmutationen, die wachstumsfördernde Hormone blockieren, sind im Grunde nichts als unwillkommene äußere Störungen. Lebensverlängernd wirken sie nur, weil

sie zufällig dem in die Quere kommen, was Blagoskonny das »pervertierte Wachstum« des Alterns nennt. Tatsächlich funktioniert der TOR-Signalweg geradezu als Alterungsprogramm, obwohl er entstanden ist, um die frühe Entwicklung eines Organismus zu unterstützen.

Blagoskonny's Theorie fußt im Kern auf einer weithin anerkannten Hypothese, die George C. Williams (1926–2010) schon 1957 aufgestellt hat. Der berühmte Evolutionsbiologe spekulierte damals, dass zweiseitige Gene für das Altern verantwortlich seien: Früh im Leben von Vorteil, wirkten sie später schädlich. Diese »antagonistischen pleotropen Gene« würden von der Evolution begünstigt, weil die natürliche Auslese laut Williams »im Zweifel stets der Jugend Vorrang vor dem Alter gibt«. Blagoskonny betrachtet TOR als perfektes Beispiel für ein solches Gen.

Wie viele neue Theorien ist auch seine jedoch umstritten. Manche Wissenschaftler meinen, sie messe TOR zu viel Bedeutung bei, und einige wenden ein, dass nicht TORs Einfluss auf das Wachstum die Hauptrolle beim Altern spiele; entscheidend seien vielmehr andere Aspekte – zum Beispiel die Hemmung der Autophagie, welche die Zellbestandteile erneuert. Dennoch gibt es auch zustimmende Reaktionen. Hall aus Basel hält es für das Verdienst Blagoskonny's, »Punkte verbunden zu haben, die andere nicht einmal sehen« – und fügt hinzu: »Ich bin geneigt, ihm Recht zu geben.«

Ein »TOR« in die Zukunft der Medizin

Wenn TOR eine Haupttriebfeder des Alterns ist, was gibt es dann für Möglichkeiten, es auszuschalten? Rapamycin hat erhebliche Nebenwirkungen. So kann es den Cholesterinspiegel erhöhen, Blutarmut verursachen und die Wundheilung stören. Deshalb scheidet es als Kandidat für ein Anti-Aging-Medikament beim Menschen wohl aus. Ein anderes Mittel, Metformin, wäre eventuell eine Alternative. Allerdings müsste es für diese Anwendung erst noch getestet werden. Immerhin scheint es ungefährlich: Es ist das am häufigsten verschriebene Medikament zur Behandlung von Diabetes – Millionen von Menschen nehmen es schon seit Langem zur Senkung des Blutzuckerspiegels, ohne dass bisher ernstliche Nebenwirkungen aufgetreten sind. Seine Wirkungsweise wirft noch Fragen auf, aber man weiß, dass es den TOR-Signalweg hemmt. Außerdem aktiviert es ein weiteres mit dem Altern zusammenhängendes Enzym namens AMPK, das die Stressantwort in Zellen einleitet und gleichfalls durch Fasten stimuliert wird. Metformin hatte in Versuchen mit Mäusen die gleiche Wirkung auf die Genaktivität wie Hungern, und es gibt Anhaltspunkte dafür, dass es die maximale Lebensspanne der Nager verlängert. Das wird derzeit in strengen wissenschaftlichen Tests überprüft. Ob das Mittel auch beim Menschen eine Kalorienrestriktion nachahmt, dürfte allerdings frühestens in einigen Jahren klar sein.

Hochgerechnet von den Ergebnissen der Studien an Mäusen, könnte Rapamycin Menschen im Durchschnitt fünf bis zehn Jahre länger leben lassen. Das wäre beachtlich. Die Lebenserwartung ist in den Industrieländern seit dem Auf-

kommen der modernen Medizin so stark angestiegen, dass es uns inzwischen wie Spitzensportlern ergeht, welche die bestehenden Rekorde nur noch minimal verbessern können: Die durchschnittliche Lebensspanne hat sich während des 20. Jahrhunderts in den USA um mehr als 50 Prozent erhöht; im letzten Jahrzehnt betrug die Zunahme dagegen nicht einmal mehr zwei Prozent. Weil die Kindersterblichkeit mittlerweile fast den niedrigsten überhaupt möglichen Wert erreicht hat, lässt sich die Lebenserwartung nur noch durch Zurückdrängen altersbedingter Krankheiten steigern. Die explodierenden Kosten der geriatrischen Medizin zeugen von den erheblichen Anstrengungen auf diesem Gebiet.

Arzneimittel, die das Altern verlangsamen, wären da ein wahrer Segen. Genauso wie heute schon Medikamente zur Senkung von Blutdruck und Cholesterinspiegel einem Herzinfarkt in mittleren Jahren vorbeugen, wäre damit eine Prophylaxe von altersbedingten Krankheiten möglich – sei es Demenz, Osteoporose, grauer Star, Krebs, Verlust von Muskelmasse und -kraft, Taubheit, ja sogar Falten. Weil uns solche Substanzen länger fit und vital hielten, würden sie uns eine qualitativ hochwertige Zeit schenken und nicht nur einfach ein paar Jahre anhängen.

Ihre Entwicklung dürfte allerdings nicht einfach sein. Ein Haupthindernis ist, dass es keine verlässliche Messmethode für das Alterungstempo gibt. Deshalb lässt sich die Wirksamkeit und Verträglichkeit eines Medikaments beim Menschen bisher nur in schier endlos langen Versuchsreihen prüfen. Doch die Entdeckung von sicheren Anti-Aging-Mitteln wäre den Aufwand wert, selbst wenn nur ein gesundes Altern herauskäme und kein längeres Leben. Dann hätte das Probenröhrchen voller Dreck, eingesammelt vor fünf Jahrzehnten, ein echtes Wunder bewirkt. ~

DER AUTOR



David Stipp ist Wissenschaftsjournalist in Boston und seit den späten 1990er Jahren auf Gerontologie spezialisiert. 2010 erschien sein Buch »The Youth Pill: Scientists at the Brink of an Anti-Aging Revolution«. Er bloggt über Erkenntnisse der Altersforschung unter www.davidstipp.com.

QUELLEN

- Blagoskonny, M. V., Hall, M. N.:** Growth and Aging: A Common Molecular Mechanism. In: *Aging* 1, S. 357–362, 2009
Harrison, D. E. et al.: Rapamycin Fed Late in Life Extends Lifespan in Genetically Heterogeneous Mice. In: *Nature* 460, S. 392–395, 2009
Sharp, Z. D.: Aging and TOR: Interwoven in the Fabric of Life. In: *Cellular and Molecular Life Sciences* 68, S. 587–597, 2011
Wullschleger, S. et al.: TOR Signaling in Growth and Metabolism. In: *Cell* 124, S. 471–484, 2006

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152343

Krebs, Blutgerinnung und Stress – eine ungewöhnliche Ménage-à-trois

Ein erhöhtes Krebsrisiko geht oft Hand in Hand mit einer verstärkten Neigung zu Blutgerinnseln. Die beiden verbindet ein bislang unbekannter Regulationsmechanismus bei der Bildung des Gerinnungsfaktors Prothrombin.

Von Matthias W. Hentze und Andreas E. Kulozik

Am Silvestertag 1866 entdeckte Armand Trousseau (1801–1867) in seinem linken Arm ein Blutgerinnsel. Der Pariser Internist hatte sich durch seine bahnbrechenden wissenschaftlichen Beiträge in ganz Frankreich einen ausgezeichneten Ruf erworben. Unter anderem hatte er einen Zusammenhang beobachtet zwischen dem häufigen Auftreten von Blutgerinnseln und Tumoren, insbesondere des Magens und der Bauchspeicheldrüse. Die Krankheitskombination wurde nach ihm auch als Trousseau-Zeichen benannt. Auf Grund dieser Erfahrungen interpretierte Trousseau sein eigenes Blutgerinnsel als Hinweis auf eine Krebserkrankung, von der er bis dahin noch nichts wusste. Tatsächlich erlag er ihr schon im Sommer des folgenden Jahres.

Es dauerte eineinhalb Jahrhunderte, bis nun endlich neue Forschungsergebnisse Licht ins Dunkel dieses mysteriösen Zusammenhangs zwischen Tumoren und der Neigung zur

Bildung von Blutgerinnseln (Thrombose) bringen. Untersuchungen zu den Ursachen dieser so genannten Thrombophilie haben einen bislang unbekanntem Mechanismus aufgedeckt, über den unser Körper die Produktion einzelner Proteine reguliert. Ihn nutzen auch Tumoren, um sich besser im Körper auszubreiten. Die zum Teil überraschenden Erkenntnisse erlauben nun sowohl neue Einblicke in die Prozesse, die bei Entzündungen ablaufen, als auch in die Entwicklung innovativer Behandlungsstrategien gegen Tumorerkrankungen.

Zentraler Akteur des Dramas ist ein Protein namens Prothrombin. Dessen Umwandlung in Thrombin, etwa bei Verletzungen, stellt einen wichtigen Schritt bei der Blutgerinnung dar. Zu große Mengen von Prothrombin, das auch F2 (Gerinnungsfaktor II) genannt wird, stören die fein regulierte Balance zwischen blutgerinnungsfördernden und -hemmenden Molekülen, was letztlich zu Thrombophilie führt.

Wie alle Eiweiße besteht auch Prothrombin aus einer Kette von Aminosäuren. Diese sind gemäß einem vorgegebenen Bauplan miteinander verknüpft – der Boten-RNA (mRNA für messenger RNA). Die mRNA besteht im Wesentlichen aus Abfolgen der basischen Moleküle Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Uridin (U) und beginnt ihr Dasein als direkte Kopie der in der DNA kodierten genetischen Information (siehe Grafik S. 33). Bevor sie jedoch als Blaupause für die Eiweißsynthese dienen kann, muss sie mehrere Reifungsschritte (»Prozessierung«) durchlaufen:

- Im mittleren Teil der Vorläufer-mRNA gehen oft zahlreiche Abschnitte verloren, so genannte Introns;
- das vordere Ende wird chemisch verändert, um die Stabilität zu erhöhen;
- Enzyme schneiden das hintere Ende an einem exakt festgelegten Punkt ab und hängen dort eine Abfolge von rund 250 Adeninen an: den »Poly-A-Schwanz«.

Dieser letzte Schritt ähnelt der Bearbeitung eines abgeschnittenen Seils, das sonst ausfransen würde. Der Poly-A-Schwanz spielt für die Funktionsfähigkeit der mRNA und auch für ihre Stabilität eine entscheidende Rolle. Letzteres ist

AUF EINEN BLICK

ÜBERRASCHENDE ZUSAMMENHÄNGE

1 **Krebspatienten** leiden häufig an einer Neigung zu **Blutgerinnseln**. Umgekehrt haben Menschen mit einer verstärkten Blutgerinnung ein erhöhtes Krebsrisiko.

2 Geraten Zellen durch **Entzündungsprozesse** unter **Stress** – etwa bei Krebs –, blockiert ein Enzym namens p38-MAP-Kinase jene Proteine, die normalerweise die Produktion von **Prothrombin** drosseln. Dadurch entsteht dieser Blutgerinnungsfaktor im Übermaß.

3 Thrombin, die aktive Version von Prothrombin, trägt auch zur Bildung neuer Blutgefäße bei und kann den Kitt auflösen, der die Zellen zusammenhält. Möglicherweise erhöhen also Krebszellen ihre Prothrombinproduktion, um besser in **gesundes Gewebe einzudringen** und **neue Blutgefäße herzustellen**, welche die Tumorzellen versorgen.

4 Dabei bestimmt ein zuvor unbekannter Mechanismus, wie viel Prothrombin entsteht. Er beeinflusst die Umwandlung der Vorläufer-mRNA in die **reife mRNA** – den Bauplan für das Protein – und letztlich die **Menge** des gebildeten Prothrombins.

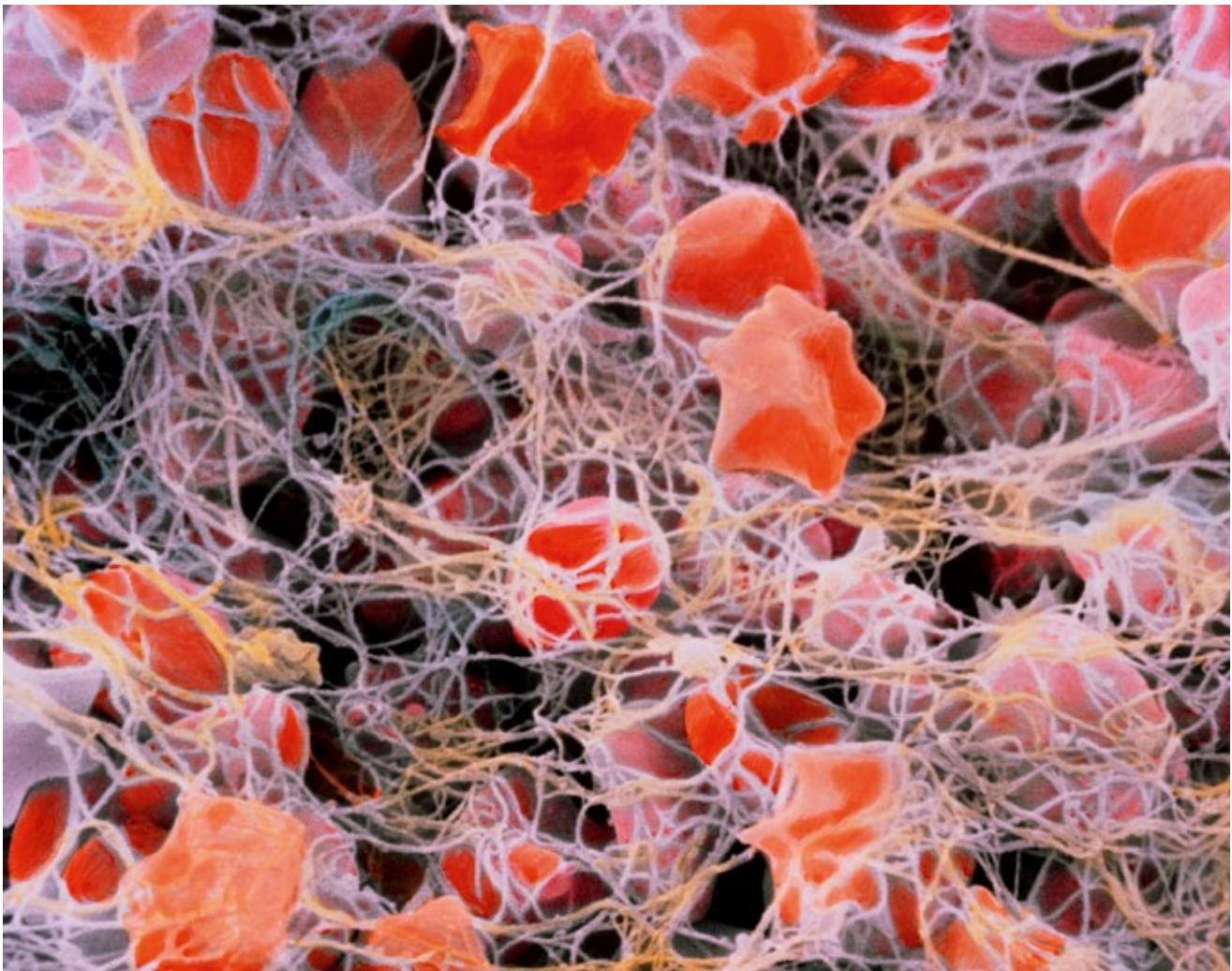
wichtig, denn: Häufen sich größere Mengen einer mRNA an, entsteht im Allgemeinen mehr entsprechendes Eiweiß – so auch bei der Prothrombin-mRNA.

Forscher um den niederländischen Biochemiker Rogier M. Bertina von der Universität Leiden hatten schon 1996 eine ungewöhnliche ererbte Mutation in der Prothrombin-mRNA entdeckt, die bei vielen Thrombophiliepatienten auftritt. Und zwar findet sich diese genau an jener Stelle des hinteren RNA-Teils, wo er vor Anfügen des Poly-A-Schwanzes abgeschnitten wird. Die Entdeckung überraschte die Wissenschaftler, denn meistens wirken sich Veränderungen der RNA nur dann auf ihre Funktion aus, wenn sie die Aminosäureabfolge des Eiweißes betreffen. Die Schnittstelle liegt jedoch hinter der Region, die den Bauplan dafür enthält. Zudem geht die bei etwa ein bis zwei Prozent der nord- und

westeuropäischen Bevölkerung vorkommende und damit vergleichsweise häufige Mutation nicht wie üblich mit einer eingeschränkten Funktion einher, sondern mit einer gesteigerten: Es entsteht dadurch mehr Protein.

Wegen dieser ungewöhnlichen Situation betrachteten die Forscher die Veränderung zunächst gar nicht als wirklichen Auslöser der erhöhten Eiweißsynthese, sondern nur als einen genetischen Marker für eine bis dato noch unbekanntes Ursache. Außerdem war man zu dieser Zeit allgemein der Auffassung, der Reifungsprozess am hinteren Ende der mRNA sei ein zwar notwendiger, aber kaum regulierter Schritt auf dem Weg vom Gen zum Protein. Zumindest waren damals noch keine Zusammenhänge zwischen Veränderungen an der Schnittstelle in der RNA und irgendwelchen Krankheiten durch gesteigerte mRNA-Produktion bekannt.

Die Blutgerinnung ist ein komplizierter mehrstufiger Ablauf, an dessen Ende sich ein Netzwerk aus Fibrinfasern bildet, in dem sich die roten Blutkörperchen verfangen. Ein wichtiger Schritt bei dieser biochemischen Reaktionskaskade ist die Umwandlung von Prothrombin in Thrombin. Normalerweise hat die Blutgerinnung die Aufgabe, den Körper etwa bei Verletzungen vor übermäßigem Blutverlust zu schützen. Eine zu große Menge an Prothrombin kann aber dazu führen, dass die Betroffenen vermehrt spontan Gerinnsel in den Blutgefäßen bilden.





Der französische Mediziner Armand Trousseau (1801–1867) entdeckte einen Zusammenhang zwischen dem häufigen Auftreten von Blutgerinnseln und bestimmten Tumoren (genannt Trousseau-Zeichen). Ironie des Schicksals: Trousseau starb an einer Krebserkrankung, die er bei sich selbst auf Grund eines Blutgerinnsels im Arm diagnostizierte.

Nachdem wir uns jedoch die Basenabfolge an dieser Stelle der Prothrombin-mRNA genauer angeschaut hatten, fiel uns auf: Bei Thrombophilie wird das normalerweise vorkommende CG durch ein CA ersetzt. Nun enthalten aber die mRNAs der meisten anderen Proteine dort genau dieses CA und kein CG. Insofern bildet die Prothrombin-mRNA eine Ausnahme unter den RNAs.

Daraus zogen wir zwei Schlussfolgerungen. Zum einen könnte der Reifungsprozess am hinteren Ende der Prothrombin-mRNA davon abhängen, ob hier ein CG oder ein CA steht. Und zum anderen könnte der Wechsel von CG zu CA bei Thrombophilie möglicherweise die Reifung fördern und damit zu mehr Prothrombin-mRNA führen, da CA ja eigentlich den Normalfall darstellt. Unsere folgenden Untersuchungen bestätigten diese Annahmen. Damit hatten wir ein grundsätzlich neues Prinzip etabliert, wie Genveränderungen Erkrankungen auslösen können: indem sie die Prozessierung der Vorläufer-mRNA fördern und dadurch die Menge an gereifter mRNA erhöhen.

W I S wissenschaft
in die schulen!



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

www.wissenschaft-schulen.de/krebs

Die Entdeckung warf jedoch sofort wieder neue Fragen auf: Weshalb hat das Prothrombin-Gen bei Gesunden ein ineffizientes Reifungssignal? Und wie schaffen es die Zellen, trotzdem ausreichende Mengen des Proteins zu produzieren? Eine genauere Untersuchung des RNA-Strangs zeigte zunächst, dass an der hinteren Schnittstelle sogar noch ein weiteres Element fehlt, das normalerweise die Prozessierung des Moleküls fördert. Dieses DSE (Abkürzung für »downstream sequence element«) enthält sehr viel Uridin, was bei der Prothrombin-RNA nicht der Fall ist.

Dann entdeckten wir jedoch einen kurzen Abschnitt, den wir USE für »upstream sequence element« nannten und der die Effizienz von CG als Reifungssignal massiv erhöhen kann. Dieser »USE-Verstärker« funktioniert allerdings nicht nur im Zusammenspiel mit CG, sondern genauso bei einem CA-Signal, und führt dann zu einer überhöhten Prothrombin-mRNA-Produktion. Genau das passiert bei Thrombophiliepatienten.

Aber warum hat sich überhaupt dieses komplizierte System aus einem abgeschwächten Element, das von einer anderen Sequenz verstärkt werden muss, im Verlauf der Evolution herausgebildet? Es wäre doch viel einfacher, wenn wie bei anderen RNAs ein einziges, ausreichend effizientes Signal die Aufgabe übernehme. Ein möglicher Zweck bestünde darin, die mRNA-Produktion bei Bedarf erhöhen zu können, also regelbar zu machen. Um herauszufinden, wie der USE-Verstärker beim Reifungsprozess mitwirkt, mussten wir uns näher mit jenen Proteinen beschäftigen, die an der Prozessierung am Schwanzende von mRNAs beteiligt sind.

Diese Eiweiße finden sich dabei teilweise zu größeren Komplexen zusammen und können sich erst dann an die mRNA anheften, um ihre Aufgabe zu erfüllen. Wie wir herausfanden, wird der Vorgang erleichtert, wenn sich an den USE-Verstärker einige weitere Proteine binden (mit den Bezeichnungen U2AF35, U2AF65 und PTB).

Zellen unter Stress

Von diesen Molekülen war bereits bekannt, dass sie eine Rolle spielen, sobald Zellen unter Stress geraten. Daher riefen wir als Nächstes bei Laborkulturen diesen Zustand durch Zugabe der Substanz Anisomycin hervor. Ergebnis: Die Zellen bildeten vermehrt Prothrombin-mRNA. Wie lässt sich das erklären?

Normalerweise kleben andere Proteine – genannt FBP2 und FBP3 – am USE und blockieren so den Zugang der Verstärkerproteine U2AF35, U2AF65 und PTB. Bei zellulärem Stress lösen sich FBP2 und -3 jedoch ab, was den Verstärkern ermöglicht, sich an das USE anzuheften, worauf sich größere Mengen an stabiler mRNA bilden. Experimente, bei denen wir in kultivierten Zellen einerseits U2AF35, U2AF65 und PTB beziehungsweise andererseits FBP2 und FBP3 gezielt ausschalteten, untermauerten diese Vorstellung: Sie belegten, dass erstere drei Proteine für die Reifung der Prothrombin-mRNA benötigt werden, während die beiden letzteren diesen Prozess blockieren.

Schließlich entdeckten wir die entscheidende Rolle eines Enzyms namens p38-MAP-Kinase, von dem bereits bekannt war, dass es durch intrazellulären Stress aktiviert wird: Es hängt den USE-Blockierern FBP2 und -3 eine oder mehrere Phosphatgruppen an, die chemisch gesehen sauer reagieren. Das erklärt, warum sich die beiden Proteine dann nicht mehr an das USE der ebenfalls sauren mRNA binden – denn »sauer« und »sauer« stoßen sich ab.

Damit fügten sich die vielen Puzzleteile zu einem Gesamtbild zusammen, das sowohl den ungewöhnlichen Bauplan der Prothrombin-mRNA sowie deren Rolle bei der Thrombophilie erklärt als auch ein ganz neues Regulationsprinzip für die Umsetzung genetischer Information in Proteine entwirft (siehe Grafik S. 34):

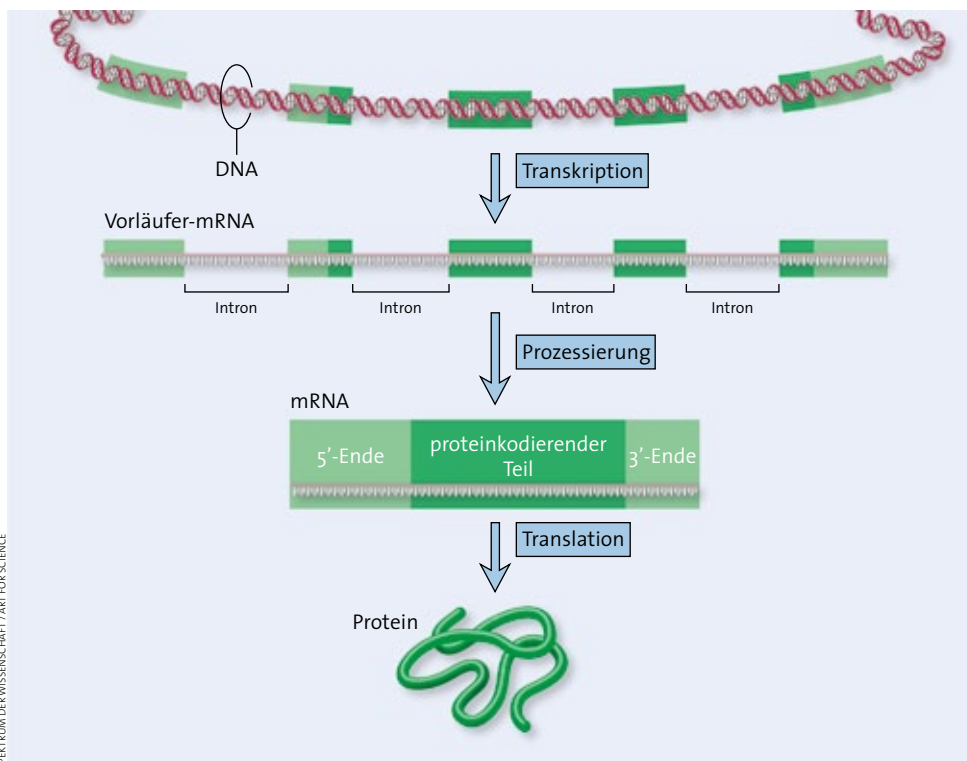
- Die Reifung der Prothrombin-mRNA wird nicht wie üblich recht unflexibel über hocheffiziente Signale in der Sequenz (CA) und das »downstream sequence element« (DSE) gesteuert, sondern über die Kombination eines deutlich abgeschwächten Signals (CG) ohne DSE mit einem regelbaren Verstärker, dem USE.
- Der Verstärker kann dann seine Aufgabe erledigen, wenn sich die Faktoren U2AF35, U2AF65 und PTB an ihn binden. Heften sich jedoch ihre Gegenspieler FBP2 und -3 an ihn, wird er ausgeschaltet.
- In gestressten Zellen sorgt die p38-MAP-Kinase dafür, dass sich die beiden FBPs nicht mehr an das USE anlagern. Folge: mehr Prothrombin-mRNA und entsprechend mehr Prothrombin, was die Blutgerinnung erleichtert.
- Wirkt dieser Verstärkermechanismus auf Grund einer Mutation zusammen mit einem normal starken RNA-Rei-

fungssignal (CA) statt mit einem abgeschwächten (CG), so entsteht ein Übermaß an Prothrombin. Die Betroffenen neigen dann zu Thrombosen.

Diese Erkenntnisse helfen aber nicht nur, die Thrombophilie besser zu verstehen, sondern wirken sich auch auf ganz andere Bereiche der Medizin aus. Jeder Klinikarzt weiß, dass das Thromboserisiko bei Patienten mit entzündlichen Erkrankungen oder bei Stresssituationen wie Operationen ansteigt. Und wie eingangs beschrieben, wurde Armand Trousseau durch seine Thrombose im Arm bewusst, dass er womöglich Krebs hatte – obwohl der Tumor selbst noch keine Symptome verursachte. Interessanterweise lassen sich bei solchen Erkrankungen meist größere Mengen an Prothrombin nachweisen, und die p38-MAP-Kinase ist in der näheren Umgebung von Entzündungen und Tumoren überdurchschnittlich aktiv. Diese Zusammenhänge erforschten wir anhand von Tiermodellen sowie an Gewebeproben von Patienten.

Zunächst nutzten wir die Tatsache, dass man bei Mäusen durch Einspritzen der bakteriellen Substanz LPS (Lipopolysaccharid) eine Entzündungsreaktion hervorrufen kann, die vor allem in der Leber die Prothrombinproduktion anregt. Wie wir feststellten, findet sich in solchen Mauslebern tatsächlich mehr reife Prothrombin-mRNA, und das Verstärkerprotein PTB neigt dort dazu, sich an das USE zu binden – dessen Gegenspieler FBP2 und FBP3 jedoch weniger.

Ergänzend untersuchten wir Gewebeproben von Krebspatienten, denen Metastasen aus der Leber entfernt worden waren. Es zeigte sich, dass diese Geschwulste im angrenzenden gesunden Lebergewebe die Prothrombinproduktion sti-

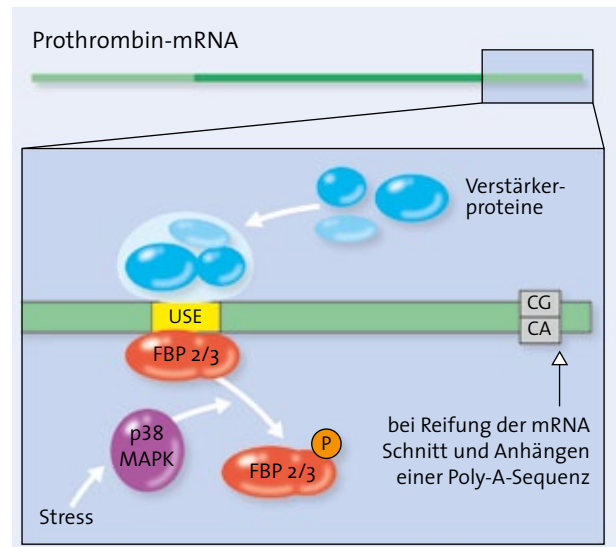


Die als DNA gespeicherte genetische Information für ein Protein wird zunächst in Vorläufer-mRNA übersetzt (Transkription), die dann in reife mRNA umgewandelt wird. Ein wesentlicher Teil dieser Prozessierung ist das Herausschneiden von Introns und das Zusammenfügen der so entstandenen Enden, aber auch Veränderungen am hinteren Ende der RNA, welche die Stabilität des Moleküls beeinflussen (siehe Grafik S. 34). Erst danach dient das Endprodukt als Bauanleitung für die Proteinsynthese (Translation).

Regulation der Prozessierung am hinteren Ende der Prothrombin-mRNA: Molekularer Schaltmechanismus

Die Vorläufer-mRNA wird hinter dem CG-Reifungssignal (bei Gesunden) beziehungsweise bei Thrombophiliepatienten hinter dem effizienteren CA-Signal abgeschnitten. Daraufhin wird dort ein Poly-A-Schwanz angehängt. Diesen Vorgang reguliert die Zelle über die Kombination des schwachen CG-Signals mit einem regelbaren Verstärker, dem USE (upstream sequence element). Der Verstärker wird dann tätig, wenn sich Verstärkerproteine wie U2AF35, U2AF65 und PTB an ihn binden. Dafür müssen aber erst ihre Gegenspieler FBP2 und -3 entfernt werden.

Dies geschieht etwa, wenn die Zelle unter Stress gerät. Dann heftet die p38-MAP-Kinase an die FBPs einen Phosphatrest an, worauf diese sich vom USE lösen. Das führt zu mehr Prothrombin-mRNA und entsprechend mehr Prothrombin, was die Blutgerinnung erleichtert. Liegt auf Grund einer Mutation ein starkes RNA-Reifungssignal (CA) vor statt eines abgeschwächten (CG), entsteht Prothrombin im Übermaß. Die Betroffenen neigen dann zu Thrombosen.



mulieren. Auch wenn hier streng genommen noch nicht bewiesen ist, dass der beschriebene Verstärkermechanismus via p38-MAP-Kinase und USE dafür verantwortlich ist, deutet gegenwärtig alles darauf hin.

Damit die Blutgerinnung ordnungsgemäß ablaufen kann, muss das aus Prothrombin entstehende Enzym Thrombin andere Proteine zerschneiden. Wegen dieser Funktion als Eiweißschere kann es auch den Kitt zwischen den einzelnen Zellen – die extrazelluläre Matrix – auflösen und damit dem Tumor helfen, sich in gesundes Gewebe hinein auszubreiten. Außerdem ist noch eine zweite Funktion des Gerinnungsfaktors bekannt: Er kann an speziellen Schaltermolekülen auf verschiedenen Zellen andocken und dadurch unter anderem das Gefäßwachstum ankurbeln. Bei Krebs verbessert das jedoch vor allem die Blutversorgung des Tumors. Auf diese Weise können Metastasen den beschriebenen Regulationsmechanismus zu ihren Zwecken missbrauchen – aber damit auch einen neuen strategischen Angriffspunkt gegen die Tumoren liefern. So ließen sich Medikamente, die eigentlich die Blutgerinnung hemmen sollen, möglicherweise gegen Krebs einsetzen.

Vermutlich gibt es eine Reihe weiterer mRNAs, die sich ebenfalls dieses bisher unbekanntes Regulationsprinzips bedienen. Sind erst die entsprechenden Gene und Proteine identifiziert, dürften wir besser verstehen, wie Tumoren, Entzündungen und vielleicht auch noch andere Stresszustände in das Steuerungsnetzwerk hineinspielen und wie sich daraus hilfreiche Behandlungsansätze für Patienten entwickeln lassen.

Bei dieser wissenschaftlichen Reise, die vor mehr als 150 Jahren in Paris begann, brachte uns die Veränderung eines

einzelnen Bausteins des Prothrombin-Gens auf eine entscheidende Spur. Sie hat zu ungeahnten Entdeckungen geführt und ist nun auf bestem Weg, sogar wichtige Grundlagen des Tumorwachstums aufzuklären. ~

DIE AUTOREN



Matthias W. Hentze ist Associate Director des Europäischen Laboratoriums für Molekularbiologie (EMBL) und Professor für Molekulare Medizin an der Universität Heidelberg.

Andreas E. Kulozik ist Professor für Kinderheilkunde und Ju-

gendmedizin und Ärztlicher Direktor der Klinik für Kinder- und Jugendmedizin III am Universitätsklinikum Heidelberg. Die beiden Forscher gründeten 2002 die Molecular Medicine Partnership Unit (MMPU) der Universität Heidelberg und des EMBL, der sie gemeinsam vorstehen.

QUELLEN

Danckwardt, S. et al.: p38 MAPK Controls Prothrombin Expression by Regulated RNA 3' End Processing. In: *Molecular Cell* 41, S. 298–310, 2011

Danckwardt, S., Hentze, M. W., Kulozik, A. E.: 3' End mRNA Processing: Molecular Mechanisms and Implications for Health and Disease. In: *EMBO Journal* 27, S. 482–498, 2008

Gehring, N. H. et al.: Increased Efficiency of mRNA 3' End Formation: A New Genetic Mechanism Contributing to Hereditary Thrombophilia. In: *Nature Genetics* 28, S. 389–392, 2001

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152344

Einige Verbindungen halten ewig, andere nur Sekunden: alles eine Frage der Chemie.

GEOkompakt Nr. 31
Die Grundlagen des Wissens

Wie uns CHEMIE die Welt erklärt
... und warum sie die aufregendste aller Wissenschaften ist

In Bruchteilen einer Sekunde laufen drei chemische Reaktionen ab, die ein Streichholz zum Glühen bringen

FORSCHUNG Die großen Errungenschaften der Chemie	WASSER Von der magischen Verbindung mit der Formel H_2O	KUNSTSTOFF Die wundersame Geschichte des Plastiks	FARBEN Weshalb unsere Welt so bunt ist
--	---	---	--

* Heft ohne DVD: 8,50 € (A: 9,80 €/CH: 17,60 sfr).
Heft mit DVD: 15,90 € (A: 17,90 €/CH: 33,00 sfr).




Heft 8,50 € –
mit DVD 15,90 €*

PALÄONTOLOGIE

Der Untergang der Höhlenbären

Dass der moderne Mensch die gigantischen Bären in Europa vor 30 000 Jahren noch antraf, bezeugen Bilder in der Chauvet-Höhle in Südfrankreich. Dort hinterließen die Tiere auch direkte Spuren ihres Aufenthalts – einschließlich zahlreicher Skelette, die teils sogar noch DNA enthalten. Diese Funde geben heute Aufschluss über ihr Aussterben.

Von Jean-Marc Elalouf und Valérie Féruglio



Hier porträtierten Künstler
der Kulturstufe des Aurignacien
eindeutig einen Höhlenbären.

Als der moderne Mensch vor 40 000 Jahren nach Europa kam, lagen weite Bereiche des Kontinents unter Eismassen begraben. In Südfrankreich reichten die Alpengletscher damals bis ins Gebiet von Lyon. Viele der großen eiszeitlichen Tierarten sind heute ausgestorben. Manche von ihnen gab es noch, als diese Kaltzeit vor gut 11 000 Jahren zu Ende ging. Die letzten Mammutts etwa lebten im Norden Sibiriens noch ein paar tausend Jahre lang. Auerochsen, von denen die Hausrinder abstammen, kamen hier zu Lande sogar noch im Mittelalter vor: Der letzte Ur verstarb im frühen 17. Jahrhundert in Osteuropa. Aber andere große Säugetiere verschwanden schon während oder vor dem Ende der letzten Vereisung – ebenfalls die Höhlenhyäne und der Höhlenbär.

Wohl jeder hat schon von dem riesigen Bären namens *Ursus spelaeus* (nach griechisch spelaion: »Höhle«) gehört, hat vielleicht eine der auch in Deutschland und im Alpengebiet zahlreichen »Bärenhöhlen« besucht, eines seiner Skelette oder eine Nachbildung der Kolosse bestaunt. Wegen der großen Knochen sprach der Volksmund früher gern von Drachenhöhlen. Das spektakulärste, für Wissenschaftler wohl bisher aufschlussreichste solche Naturmuseum dürfte die erst 1994 entdeckte Grotte Chauvet im Tal der Ardèche in Südfrankreich darstellen, deren zahlreiche steinzeitliche Felsmalereien Aufsehen erregten. Prähistorische Künstler haben das Tier dort vor 30 000 Jahren an die Wände und Decken gezeichnet.

Als Teil einer Ansammlung von 420 Tierbildern haben sich 13 Darstellungen dieses Bären erhalten. Dass er sich auch selbst im Innern der verzweigten Höhle aufhielt, belegen zahlreiche Spuren und Hinterlassenschaften. Dazu zählen mindestens 4000 Knochen von ungefähr 200 Höhlenbären, die teils sogar noch DNA-Reste enthalten.

Kein anderer bekannter Ort hält so viel Forschungsmaterial zu dieser Art bereit, deren Geschichte ein wenig der des Neandertalers gleicht: Sie trat in Europa etwa zur selben Zeit wie der stämmige Frühmensch in Erscheinung und verschwand ebenfalls während der letzten Vereisung. Daher könnte man *Ursus spelaeus* den Neandertaler unter den Bären nennen. Er stand vermutlich schon kurz vor dem Aussterben, als *Homo sapiens*, der moderne Mensch, ihn in der Grotte Chauvet in Bildern verewigte.

Jene Künstler lebten als Jäger und Sammler in nomadischen oder halbnomadischen Gruppen. Von ihrem Alltag und ihrer materiellen Kultur zeugen diverse Hinterlassenschaften an ihren Lagerstätten, die sich oft geschützt unter Felsvorsprüngen befanden, teils aber auch im Freien. Wir wissen von daher, welche Tiere sie erlegten und welche Waffen und Geräte sie benutzten. Höhlen bewohnten diese Menschen nur gelegentlich. Doch gerade dort ist an den Bildern zu sehen, dass ihre Auffassung von Tieren schon damals über das reine Betrachten als Beute hinausging. Denn die

künstlerischen Darstellungen repräsentieren nicht zwangsläufig gejagte Arten. Der Höhlenbär etwa gehörte kaum ins Beuteschema.

Die teils sehr deutlich ausgearbeiteten Tierbilder entstanden mit unterschiedlichsten Techniken. Sie lassen einiges von der spirituellen Welt ihrer Schöpfer erahnen. Manche Mythen mögen dort ihre Wurzeln haben und wurden von späteren Kulturen nur immer wieder abgewandelt. Die Darstellungen speziell des Höhlenbären sind aber auch für Biologen aufschlussreich, denn mit ihnen haben die prähistorischen Menschen eine heute ausgestorbene Art verewigt.

Johann Friedrich Esper (1732–1781) gilt als der erste moderne Naturforscher, der Knochen von Höhlenbären in einer wissenschaftlichen Abhandlung beschrieb. 1771 fand der Theologe Unmengen davon bei Burggailenreuth in der fränkischen Schweiz in der Zoolithenhöhle, benannt nach dem damals gebräuchlichen Ausdruck für Tierfossilien. Er hielt sie für Skelettreste von Eisbären. Vor ihm glaubte man sogar an Menschenknochen. Die systematische Einordnung und wissenschaftliche Namengebung besorgte 1794

der Mediziner Johann Christian Rosenmüller (1771–1820), der ebenfalls die Gailenreuther Höhle besuchte.

Der Höhlenbär unterschied sich wegen einiger charakteristischer anatomischer Besonderheiten eindeutig von heutigen Bären – selbst vom nahe verwandten Braunbären (*Ursus arctos*), der damals ebenfalls in Europa vorkam und heute in mehreren Unterarten, darunter dem Grizzly, in Eurasien und Nordamerika verbreitet ist.

Zunächst fällt die oft beachtliche Größe auf. Stand ein Höhlenbär auf allen vieren, betrug die Schulterhöhe vieler Tiere am Widerrist 1,20 Meter. Richtete er sich auf die Hinterbeine auf, reichte er mit seinen Pranken drei Meter hoch. Europäische Braunbären sind deutlich kleiner. Auch die Dicke der Beinknochen, die das Gewicht tragen mussten, beein-

Der »Neandertaler unter den Bären« stand kurz vor seinem Ende, als der moderne Mensch ihn verewigte

AUF EINEN BLICK

ALLMÄHLICHES AUSSTERBEN

1 Der Höhlenbär, *Ursus spelaeus*, war **kein Vorfahr des Braunbären**. Er entstand vor rund 300 000 Jahren, lebte in Europa und in angrenzenden Gebieten Asiens und starb vor spätestens 15 000 Jahren aus.

2 Die in den 1990er Jahren entdeckte **Chauvet-Höhle in Südfrankreich** bietet in vieler Hinsicht reiches Forschungsmaterial zu dem riesigen Pelztier. Einerseits überwinterten diese Bären darin, andererseits malten Menschen dort vor 30 000 Jahren von ihnen **detailgetreue Bilder** an die Wände.

3 Noch ist nicht klar, warum die Höhlenbären bald darauf verschwanden. Menschliches Zutun dürfte hierzu nur marginal beigetragen haben, denn schon damals war ihre **genetische Vielfalt** sehr gering. Vielleicht wurde ihnen schließlich ihre besondere Lebensweise zum Verhängnis.

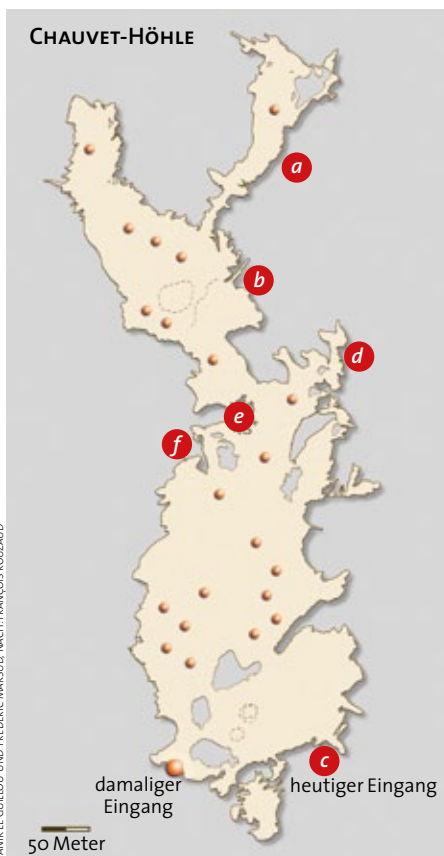
druckt. Demnach dürften die Kolosse fast dreimal so viel gewogen haben wie Braunbären. Männliche Tiere, die wie bei allen Großbären viel größer und massiger als die Weibchen waren, brachten es vermutlich auf 500 Kilogramm. Dabei gab es allerdings beträchtliche individuelle Unterschiede: An einigen Orten fand man vergleichsweise kleine Skelette.

Der Höhlenbär wich zudem vom Braunbären in seiner Kopf- und Körperform ab. Das haben die Steinzeitkünstler der Grotte Chauvet ziemlich naturgetreu festgehalten. Manchmal zeichneten sie nur den Kopf, an dem besonders auffällt, dass die Stirn eine markante Stufe bildet, während der Braunbär eine fliehende Stirn hat. Die obere Schnauzenpartie ist vorn im Profil sehr breit und leicht gerundet, was an Kufen eines Schaukelstuhls erinnert, und die Nasenlöcher weisen eher nach oben. Die Augenhöhlen im Schädel sind relativ kleiner als beim Braunbären. Somit besaß der Höhlenbär wahrscheinlich noch kleinere Augen als dieser. Im dichten Fell waren sie sicherlich kaum zu sehen. In der Tat haben die Menschen sie nicht mit abgebildet. Die Zeichnungen des ganzen Tiers geben zudem eine Vorstellung von der eindrucksvollen Gesamterscheinung des Höhlenbären mit den kräftigen Beinen und dem abfallenden Rücken, denn die hinteren Beine waren kürzer als die vorderen.

In Bärenhöhlen liegen gewöhnlich nur wenig Knochen von anderen Säugetieren, auch nicht von Braunbären. Demnach stießen die meisten Arten selten bis in solche Tiefen vor. Außerdem mieden die Höhlenbären und die Hyänen offenbar die unterirdischen Rückzugsorte der jeweils anderen Art, denn Bärenhöhlen enthalten kaum Hyänenspuren und umgekehrt. Dass fast alle entdeckten Überreste von *Ursus spelaeus* aus Höhlen stammen, bedeutet allerdings nicht, dass sich diese Bären das ganze Jahr über darin aufhielten. Aber sie überwinterten darin – im Gegensatz zu Braunbären, die sich lieber in Mulden oder Löcher unter toten oder umgefallenen Bäumen zurückziehen.

Typisch für Bärenhöhlen: Die Spuren vieler Generationen auf engem Raum

Ihre Verbreitung beschränkte sich weitgehend auf Europa einschließlich Großbritanniens, das in Kaltzeiten mit dem Kontinent verbunden war. Wo sich leicht Höhlen bildeten, also besonders in Karstgebieten, findet man vielerorts ihre Überreste. In warmen Phasen hinterließen diese Bären in den Alpen noch in über 2000 Meter Höhe Skelette, waren dort aber kleinwüchsig. Vielerlei ganz verschiedenartige Funde und Indizien belegen ihre Anwesenheit in einer Höhle

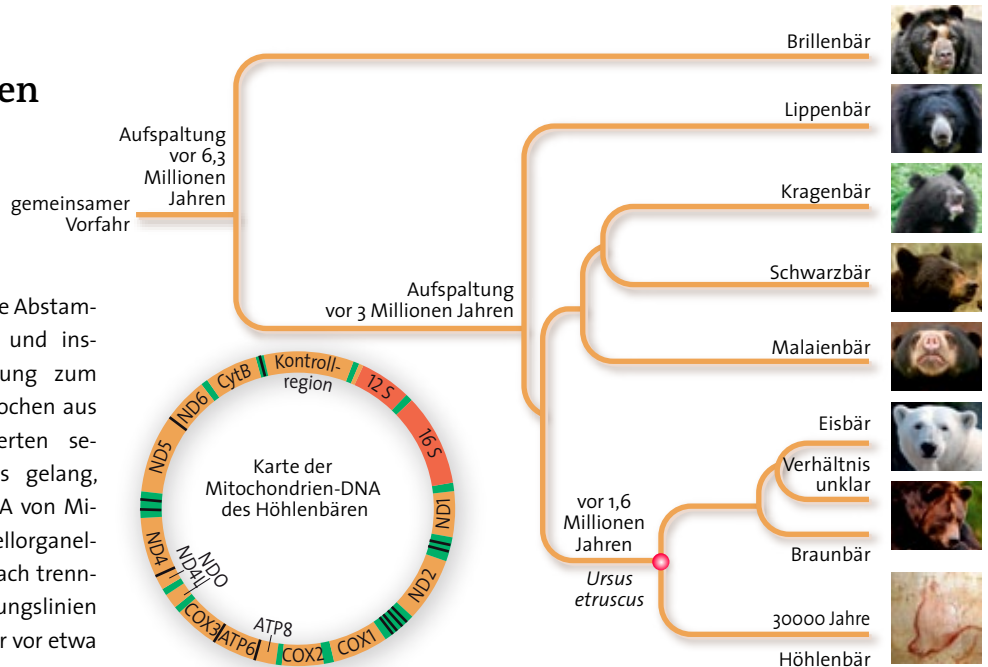


Die auf über 500 Metern gut zugängliche Höhle weist rund 400 Bilder aus der Altsteinzeit – aus dem frühen Jungpaläolithikum – auf, darunter 13 von Höhlenbären. Auf der Karte sind die Orte markiert, wo Bären Abdrücke hinterließen (kleine rote Kugeln), sowie die Stellen der hier gezeigten Darstellungen (a bis f).

Auf einem der beiden mit Kohle gezeichneten »schwarzen« Bären (a und b) sieht man Kratzer von Bärenklauen (a). Die »roten« Bären (c und d) wurden mit Ocker gemalt. Auf einer Wand aus bröckelndem Material findet sich ein undeutlicheres Profil (e). Das Fell eines neugierigen Bären (f) wurde mit Flecken markiert.

Abstammung des Höhlenbären

DNA-Vergleiche halfen, die Abstammung des Höhlenbären und insbesondere seine Beziehung zum Braunbären zu klären. Knochen aus der Chauvet-Höhle lieferten sequenzierbares Erbgut. Es gelang, daraus die komplette DNA von Mitochondrien genannten Zellorganellen zu erschließen. Demnach trennten sich die Abstammungslinien von Braun- und Höhlenbär vor etwa 1,6 Millionen Jahren.



GRAFIK: NOUR/IA SCIENCE; FOTOS: SHUTTERSTOCK - VON OBEN NACH UNTEN: CHRISTIAN MUSAÏ; ERIC GEVAERT; NCARBARE; MATT TILGHMAN; VADIM KWANALE; BODIBIGS; WELSKY/MCC; CNP PERIGUEUX

über viele Generationen, allem voran Knochen von nicht selten Hunderten, ja Tausenden von Tieren. Zudem kann der Untergrund versteinerte Abdrücke der Pranken aufweisen sowie hunderte Mulden, die sich die Bären zum Winter hin scharften. Die Wände tragen unzählige Kratzer ihrer Klauen, und manche Stellen, an denen sich die Petze häufig vorbeischooben, hat ihr Fell glatt poliert. So wurden auch einige Bilder in der Grotte Chauvet teilweise regelrecht wegradiert.

Spuren irgendwelcher Beutetiere hinterließen die Höhlenbären im Winterquartier nicht. Die Giganten waren zwar Allesfresser, aber schon vom Gebiss her noch mehr als andere Bären an vegetarische Kost angepasst. Ihre Zähne und Kiefer eigneten sich weniger zum Zerschneiden von Fleisch als zum Malmen von Früchten und anderer Pflanzennahrung. Diese vorherrschende Ernährungsweise spiegelt sich auch in der Isotopenzusammensetzung ihres Knochenkollagens. Insbesondere gleicht der Gehalt des schweren Stickstoffisotops 15 mehr dem von Pflanzen- als dem von typischen Fleischfressern.

Allerdings präsentiert sich heute längst nicht jede einstige Bärenhöhle so eindrucksvoll mit all den verschiedenen Indizien vom Aufenthalt des mächtigen Tiers wie gerade beschrieben. Mancherorts, etwa in der Dordogne, hat der saure Boden die Knochen zersetzt. Ebenso haben Fußabdrücke und Schlafmulden nicht immer überdauert. Manchmal waren daran natürliche Ereignisse wie Überflutungen schuld, manchmal auch der Mensch. Wenn eine solche Höhle in späteren Phasen zugänglich blieb, haben sich dort na-

türlich Menschen immer wieder eingefunden und ihre eigenen Spuren hinterlassen – einschließlich Graffiti aus jüngerer Zeit, wie etwa in den Höhlen von Arcy-sur-Cure in Burgund, Niaux in den Pyrenäen oder Rouffignac in der Dordogne, die alle eindrucksvolle prähistorische Wandverzierungen aufweisen. Viel krasser hat der Mensch solche Stätten allerdings verändert, wenn er die phosphatreichen Ablagerungen abbaute, die auf die vielen Bärenkadaver zurückgehen. In Lascaux wiederum wurde der Untergrund umgestaltet, um Wege für die Besuchermassen anzulegen.

Ein so guter Erhalt der vielfartigen Spuren und Hinterlassenschaften des Höhlenbären wie in der Chauvet-Höhle ist daher selten. Dass an den Wänden außerdem Bilder von ihm zu sehen sind, steigert den wissenschaftlichen Wert des Fundorts auch für biologische und Evolutionsstudien nochmals beträchtlich. Denn die modernen Menschen der oberen Altsteinzeit waren die ersten und letzten von uns, die diesen Tieren begegnet sind.

Bis vor Kurzem konnten Systematiker für die Rekonstruktion der Evolutionsgeschichte und die systematische Einordnung von *Ursus spelaeus* allein auf Zähne, Schädel- und Skelettmerkmale lebender und fossiler Bären zurückgreifen. Mittlerweile liegen auch verschiedene DNA-Sequenzen von Höhlenbären vor, die dieses Material ergänzen und einige neue Erkenntnisse brachten. Als Erstes gelang es mit einem Knochen aus der Grotte Chauvet, DNA der Mitochondrien zu gewinnen – der Organellen für die Zellatmung – und davon die komplette Sequenz zu bestimmen. Dieses Erbgut, das nur

Wo die Bären sich oft dicht vorbeischooben, haben sie mit ihrem Fell Bilder »wegradiert«



Diese über 30 000 Jahre alte Zeichnung lässt gut erkennen, dass Höhlenbären eine andere Kopf- und Körperform hatten als Braunbären. Ihre Schnauze war im Profil sehr hoch, sie besaßen eine stufenförmige Stirn, und der Rücken fiel nach hinten stark ab. Sie hatten sehr kleine Ohren und Augen – Letztere wurden nicht gemalt. Auf den Schultern saß ein Fetthöcker für Winterspeck.

die Mutter weitergibt, wird für Evolutionsanalysen besonders gern herangezogen und lässt sich auch aus Fossilien vergleichsweise leicht extrahieren. Es ist viel weniger umfangreich als die DNA des Zellkerns und kommt in Zellen sehr viel häufiger vor. Manche Abschnitte verändern sich im Verlauf der Evolution rasch und mit einer bestimmten Rate, was Forscher für systematische Vergleiche nutzen.

Die Entstehung des Höhlenbären – ein evolutionsbiologisches Rätsel

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand zweigten sich die Vorfahren der Echten Bären vor rund 30 Millionen Jahren von anderen Raubtieren ab. Anfangs waren das nur etwa waschbärgroße Arten – aber in den verschiedenen Linien, die sich bildeten, wurden die Tiere bald größer. Wann die Art *Ursus spelaeus* zuerst auftrat und wie sie mit den anderen Bärenspezies verwandt ist, war in der Forschung lange umstritten. Insbesondere die Beziehung zum Braunbären, dem der Höhlenbär verwandtschaftlich offenbar nahestand, war unklar. Frühere Paläontologen entwarfen dazu verschiedenste

Szenarien. Mal hielten sie den Höhlenbären für einen Vorfahren des Braunbären, dann wieder glaubten sie, er sei ein Seitenzweig eines frühen Braunbären. Nach heutigem Wissen entstanden die beiden Arten getrennt voneinander und zu unterschiedlicher Zeit. Ihr letzter gemeinsamer Vorfahr war wahrscheinlich *Ursus etruscus*, eine einst bedeutende Spezies, die vor rund 3 bis vor 1,2 Million Jahren in Europa und Asien verbreitet war.

Der Braunbär, *Ursus arctos*, erschien wesentlich früher als der Höhlenbär. Die ältesten Fossilien von ihm sind 900 000 Jahre alt. Er stammt aus Asien, eroberte später aber viele Regionen der Alten Welt sowie Nordamerika und bildete dabei eine Reihe von recht verschiedenen regionalen Linien. Zu den größten Vertretern gehören der Grizzly und der Kodiakbär. Viel kleiner sind die Bären Südeuropas und Vorderasiens. Von Braunbären stammt der Eisbär (*Ursus maritimus*) ab, der einzige reine Fleischfresser unter den Bären. Laut einer neuen Studie erfolgte die Trennung nicht erst vor 150 000 Jahren, wie zuletzt angenommen, sondern schon vor etwa 600 000 Jahren. Noch immer können sich beide miteinander fortpflanzen, was anscheinend sogar in der Wildnis gelegentlich vorkommt.

Höhlenbären in einem weiten Sinn traten viel später auf als die Braunbären. Der eigentliche Höhlenbär erschien sogar erst vor etwa 300 000 Jahren. Sein unmittelbarer Vorfahr war die ausgestorbene Art *Ursus deningeri*. Nach den genetischen Analysen lebte der letzte gemeinsame Vorfahr mit dem Braunbären etwa 1 Million bis 2,1 Millionen Jahre vor unserer Zeit, am wahrscheinlichsten vor rund 1,6 Millionen Jahren.

Ursus spelaeus existierte demnach nur eine recht kurze Zeitspanne. Wann verschwand die Art – und vor allem warum? Nach bisheriger Auffassung waren Höhlenbären vor



Abdrücke zweier »Sohlgänger« in der Grotte Chauvet: von einem Menschen (links) und von einem Bären. Wahrscheinlich suchte *Homo sapiens* diese Höhle nur im Sommer auf – wenn er keine Bären antraf.

In vielen Bärenhöhlen liegen Unmengen an Schädeln und Skeletten von *Ursus spelaeus* wie hier in der Grotte Chauvet. Die Tiere müssen dort im Winter gestorben sein – alters- oder krankheitsbedingt, aber manchmal wohl auch, weil sie sich nicht genügend Reserven hatten zulegen können. Skelette von Neugeborenen zusammen mit Bärinnen zeigen, dass die Geburten während der Winterruhe stattfanden.



MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC) / CENTRE NATIONAL DE PRÉHISTOIRE (CNPP) / PÉRICLÈUX

30 000 Jahren noch zahlreich. Aber bald darauf nahm ihr Vorkommen anscheinend rapide ab. Die Meinungen, wann die Art dann tatsächlich ausstarb, klaffen allerdings teils weit auseinander: ob vor 24 000 oder vor 10 000 Jahren oder irgendwann dazwischen.

Um hier genauere Ergebnisse zu erhalten, haben wir anhand der Mitochondrien-DNA die genetische Vielfalt von einer Reihe Tieren aus zwei Höhlen im Ardèche ausgewertet: der Grotte Chauvet sowie der einige Kilometer entfernten Grotte des Deux-Ouvertures. Verblüfft stellten wir fest, dass die untersuchten Bären nur zwei mütterlichen Linien angehörten. Das ist umso bemerkenswerter, als das untersuchte Material die Zeitspanne von vor 27 000 bis 32 000 Jahren umfasst, also mehrere Jahrtausende. Die Grotte Chauvet birgt zwar auch noch ältere Höhlenbärfossilien, doch die enthalten keine DNA mehr.

Aufschlussreich sind Vergleiche mit anderen Regionen und älteren Zeitphasen. Forscher haben beispielsweise rund 45 000 Jahre alte Höhlenbärfossilien aus Südwestrumänien von der Peștera cu Oase untersucht – der »Knochenhöhle«, in der sich auch die bisher ältesten Fossilien moderner Menschen in Europa fanden. Sie stellten dort für einen ebenfalls nur wenige Jahrtausende umfassenden Abschnitt eine wesentlich größere genetische Vielfalt der Bären fest als wir im Raum der Ardèche. Die rumänische Population muss zu jener Zeit sehr viel umfangreicher und somit »gesünder« gewesen sein als die spätere von uns untersuchte in Südfrankreich. Sie dürfte zehnmal so viele fortpflanzungsfähige Tiere umfasst haben. Verschiedene Studien zu Höhlenbären in anderen Gebieten lassen einen ähnlich großen Unterschied vermuten. Es sieht so aus, als ob die Art im Gebiet der Ardèche vor 30 000 Jahren bereits vom Aussterben bedroht war.

Die Unzahl von Skeletten täuscht

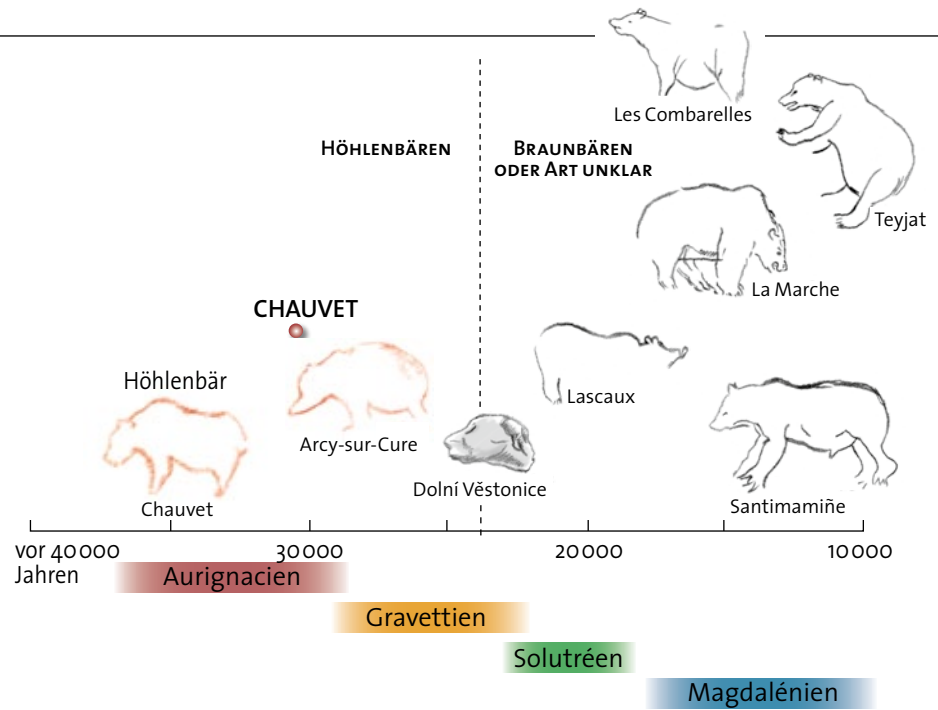
Die große Anzahl von Höhlenbären, die in der Grotte Chauvet verendet sind, darf nicht täuschen: 200 Tiere mögen viel erscheinen, aber damit sich während 4000 Jahren so viele Skelette ansammelten, musste dort nur alle 20 Jahre ein überwinternder Bär sterben. Vielleicht lebten in dem Gebiet gar nicht mehr viele Exemplare, als Menschen des Aurignacien sie abbildeten – so bezeichnen Archäologen die Kulturstufe des modernen *Homo sapiens* vor rund 28 000 bis 35 000 Jahren. Schon bald danach könnte die Art in der Region verschwunden sein.

Auch vor 25 000 bis 27 000 Jahren, in einer Phase des nachfolgenden Gravettien, besuchten Menschen wieder die Chauvet-Höhle und hielten sich dort in denselben Abschnitten auf wie ihre Vorgänger. Vielleicht haben sie die merkwür-



Die letzten Zeugen

Spätestens nach der Gravettien-Kultur haben altsteinzeitliche Künstler anscheinend keine Höhlenbären mehr gemalt – zumindest deren charakteristische Züge nicht mehr deutlich herausgearbeitet. Die Bilder in den Höhlen erinnern nun an Braunbären. *Ursus spelaeus* war damals vermutlich bereits ausgestorben. Die Darstellung von Dolní Věstonice ist allerdings schwer zuzuordnen.



MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), CENTRE NATIONAL DE PRÉHISTOIRE (CNP) PÉRIQUEUX

digen gezeichneten Geschöpfe bestaunt, die Braunbären nicht so richtig ähnelten. Denn aus eigener Anschauung kannten die Steinzeitkünstler dieser Zeit *Ursus spelaeus* oft wohl gar nicht mehr genau. Ob sie einfach nicht mehr naturgetreu malten oder ob sie nun Braunbären abbildeten, ist unklar. Zumindest haben sie die Charakteristika von Höhlenbären nicht mehr herausgearbeitet (siehe Kasten oben).

Ob der Mensch zum Aussterben der Höhlenbären beitrug, ist nicht sicher. Als Jagdbeute spielten sie anscheinend immer nur eine untergeordnete Rolle. Auch dürfte die Konkurrenz um Höhlen nicht besonders groß gewesen sein, zumal in einem Gebiet wie an der Ardèche, wo es reichlich derartige Unterschlüpfe gibt. Außerdem spricht einiges dafür, dass die Populationen schon schrumpften, bevor der moderne *Homo sapiens* in Europa erschien. Wenn eine Art in geografisch getrennte und genetisch verarmte kleine Bestände zerfällt, drohen Inzucht und damit schwache und missgebildete Tiere, was unter Umständen das Aussterben beschleunigt.

Möglicherweise fiel der Höhlenbär aber auch seiner eigenen Lebensweise zum Opfer. Der monatelange Rückzug ins Dunkle ohne jedes Sonnenlicht, wenn die Tiere nur von ihren Fettreserven zehrten, könnte Rachitis gefördert haben. In schlechten Jahren, also gerade in Kaltzeiten, hatten sie vor dem Winter womöglich nicht immer genügend Nahrung gefunden. Im Spätherbst mussten sie wahrscheinlich auch Fleisch fressen, und das glückte ihnen vielleicht mitunter nicht in ausreichendem Maß. Um diese offenen Fragen zur Ernährungssituation der Höhlenbären zu klären, untersuchen Paläontologen nun DNA-Spuren in Koprolithen: den versteinerten Exkrementen anderer Fleischfresser, darunter Wölfe und Höhlenhyänen. Dies könnte zeigen, ob Nahrungsmangel zum Aussterben des Riesenhären beitrug. ~

DIE AUTOREN



Jean-Marc Elalouf ist Genetiker und Paläogenetiker am Institut de biologie et de technologies de Saclay südwestlich von Paris. **Valérie Féruaglio** ist Prähistorikerin. Sie arbeitet an der Universität Paris Ouest Nanterre La Défense.

QUELLEN

- Bon, C. et al.:** Low Regional Diversity of Late Cave Bears Mitochondrial DNA at the Time of Chauvet Aurignacian Paintings. In: *Journal of Archaeological Science* 38, S. 1886–1895, 2011
- Bon, C. et al.:** Deciphering the Complete Mitochondrial Genome and Phylogeny of the Extinct Cave Bear in the Paleolithic Painted Cave of Chauvet. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 105, S. 17447–17452, 2008
- Clottes, J.:** *Pourquoi l'art préhistorique?* Gallimard, Paris 2011
- Stiller, M. et al.:** Withering away – 25,000 Years of Genetic Decline Preceded Cave Bear Extinction. In: *Molecular Biology and Evolution* 27, S. 975–978, 2010

LITERATURTIPPS

- Chauvet, J.-M. et al.:** *Grotte Chauvet bei Vallon-Pont-d'Arc. Altsteinzeitliche Höhlenkunst im Tal der Ardèche.* Jan Thorbecke, Stuttgart 1995, 3. Auflage 2001
- Bildband der Entdecker zu den grandiosen Höhlenmalereien*
- Rabeder, G. et al.:** *Der Höhlenbär.* Jan Thorbecke, Stuttgart 2000
- Ein Fachmann gibt einen Überblick über die Forschung zum Thema.*

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152345



Damit aus Neugier
Wissen wird.

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt **Spektrum NEO**. In jeder Ausgabe wird ein großes Thema behandelt – in Heft Nr. 2: »Die Welt im Jahr 2050«.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

 facebook

Jetzt die Hefreihe bestellen:
www.spektrum-neo.de



Schnelle Zündung für die Trägheitsfusion

Seit Jahren entwickeln Physiker immer stärkere Laser, mit deren Hilfe sie winzige Wasserstoffkügelchen zur Implosion bringen und auf diese Weise Energie aus Kernfusion gewinnen möchten. Unser Autor arbeitet am weltgrößten Laser, der National Ignition Facility in Kalifornien, und berichtet über Stand und Aussichten dieser Entwicklung.

Von Andreas J. Kemp

Trägheitsfusion ist eine Spielart der so genannten kontrollierten Kernfusion, in der millimetergroße Brennstoffkügelchen von Lasern mehr als 1000-fach komprimiert werden. Dadurch beginnen ab einem bestimmten Punkt Atomkerne miteinander zu verschmelzen – sie fusionieren. Der Prozess ähnelt den Vorgängen im Innern der Sonne und setzt wie dort Energie frei. Falls diese die eingesetzte Laserenergie übersteigt, lässt sich das System als Grundlage für einen Fusionsreaktor nutzen.

Weltweit arbeiten Forscher zwar seit Jahrzehnten an diesem Prinzip, und in den letzten Jahren sind beträchtliche Fortschritte erzielt worden, unter anderen an der National Ignition Facility (NIF) des Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL). Überraschenderweise ermöglichte dies quasi nebenbei ganz andere Anwendungen, etwa in der Medizintechnik, mit denen vorher niemand gerechnet hatte.

An der NIF befindet sich der bislang größte Laser der Welt. Mit ihm lassen sich bereits heute im Innern komprimierter

Kügelchen, so genannter Targets, physikalische Bedingungen erzeugen, die denen im Zentrum unserer Sonne ähneln. Noch im Lauf des nächsten Jahres hoffen die Fusionsforscher zum ersten Mal, auf diese Weise ein nukleares Feuer unter Laborbedingungen zu zünden. Sollte das gelingen, liegt die eigentliche Herausforderung allerdings erst noch vor ihnen: nämlich das Gleiche mit einer Energieausbeute zu schaffen, wie sie für ein ganzes Kraftwerk erforderlich wäre.

Das ist nicht so einfach, denn die aktuelle Methode hat nur eine begrenzte Effizienz. Deshalb entwickelten Forscher ein neues Verfahren, mit dem sie einen höheren Energiegewinn bei der Trägheitsfusion erreichen können: die »schnelle Zündung« (englisch: fast ignition). Sie beruht darauf, die Fusionskügelchen (die Targets oder Pellets) zunächst zu komprimieren und dann mit sehr energiereichen und zugleich extrem kurzen Laserpulsen zu bombardieren. Die schnelle Zündung hat erheblich von der Entwicklung solcher Kurzpuls-Lasersysteme profitiert. Sie konnte aber auch überraschende Querverbindungen etwa zu neuartigen Teilchenbeschleunigern eröffnen. Zum jetzigen Zeitpunkt ist jedoch noch einiges an Grundlagenforschung notwendig, bis ein Experiment die prinzipielle Machbarkeit der Trägheitsfusion als Energiequelle demonstrieren könnte.

Ihr Grundkonzept geht bis in die 1950er Jahre zurück, schon vor die Entwicklung des ersten Rubidiumlasers im Jahr 1960. Kurz nach diesen erfolgreichen Experimenten haben Forscher am LLNL bereits das Potenzial von Lasern für die kontrollierte Kernfusion erkannt.

In einem Artikel für die Zeitschrift »Nature« im Jahr 1972 berechnete der damalige Leiter der Laserabteilung des LLNL, John Nuckolls, dass man unter optimalen Bedingungen kleinste Mengen von Plasma mit Laserenergie von einem Ki-

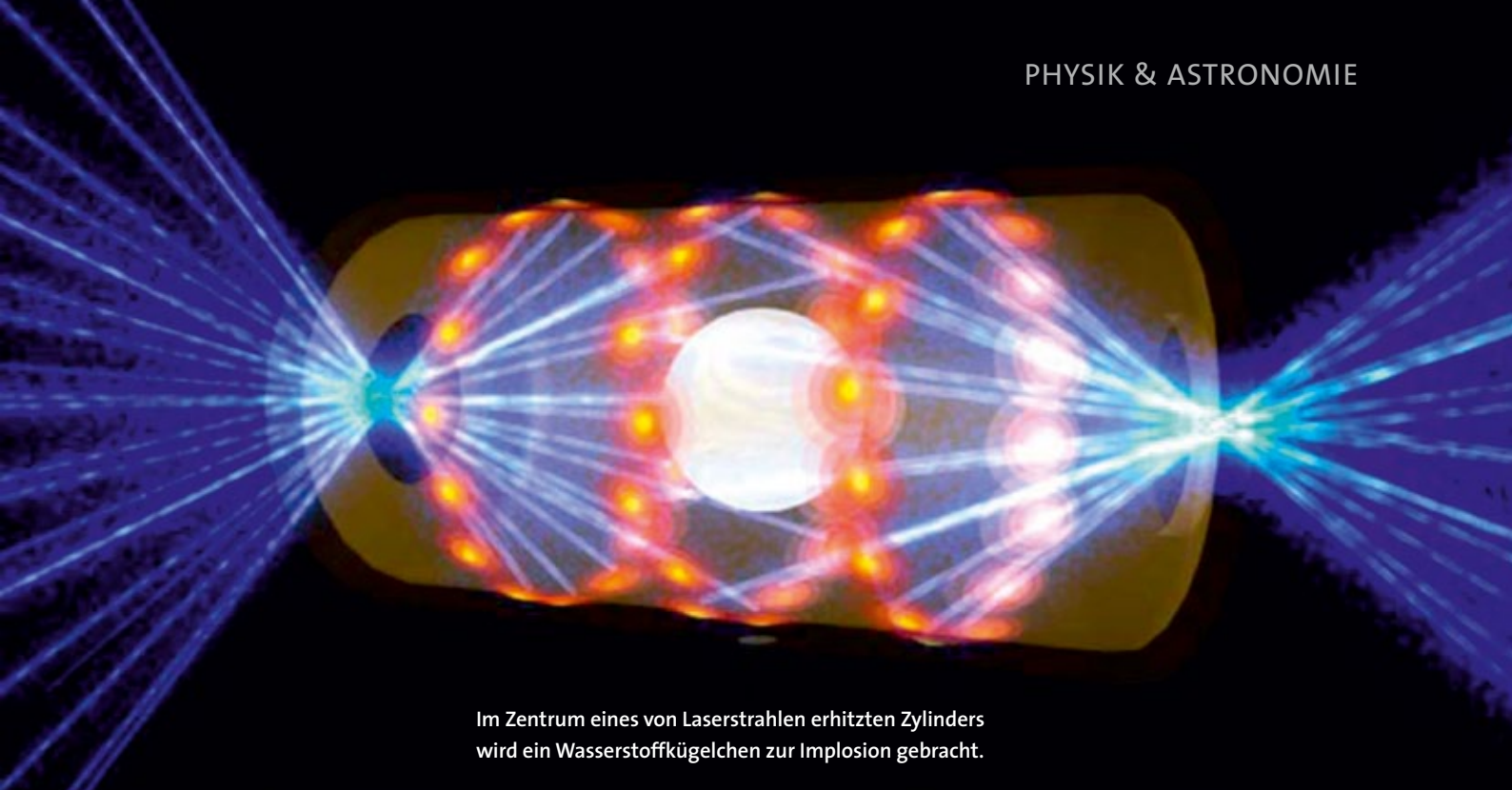
AUF EINEN BLICK

IMPLODIEREN, REAGIEREN, EXPLODIEREN

1 Seit Jahrzehnten versuchen Physiker, **gefrorene Kügelchen aus Wasserstoff** durch Beschuss mit Laserstrahlen implodieren zu lassen – und sie dabei zu komprimieren.

2 Durch die Kompression verschmelzen die Wasserstoffisotope, noch bevor ein Kügelchen wieder explodiert. Dabei wird Energie vor allem in Form **schneller Neutronen** freigesetzt.

3 Die so genannte **Schnelle Zündung** soll die Effizienz des Prozesses steigern – Voraussetzung für den Bau eines späteren Fusionsreaktors.



Im Zentrum eines von Laserstrahlen erhitzten Zylinders wird ein Wasserstoffkügelchen zur Implosion gebracht.

LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

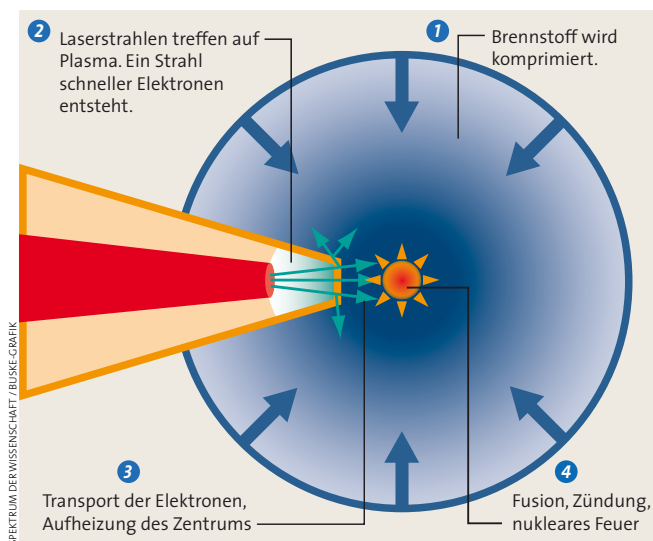
lojoule komprimieren könnte, was damals noch einen relativ großen Betrag darstellte. Dieser Standardweg zur Trägheitsfusion ähnelte ein wenig einem Dieselmotor: Eine Plastikapsel wird mit etwa einem Milligramm an den schweren Wasserstoffisotopen – Deuterium (D) und Tritium (T) im Verhältnis 1:1 – gefüllt und tiefgefroren. Dieser Mix wird durch die Laserenergie blitzschnell komprimiert, bis er so dicht und heiß wird, dass der Funke zündet – und Fusionsreaktionen einsetzen können. Schon während der Implosion verlieren die meisten Atome durch die extreme Aufheizung ihre Elektronenhülle, werden also ionisiert, so dass für Sekundenbruchteile ein so genanntes Plasma entsteht. Bei den Fusionsreaktionen kollidieren Paare elektrisch positiv geladener Atomkerne derart heftig miteinander, dass sie ihre gegenseitige Abstoßung überwinden und miteinander verschmel-

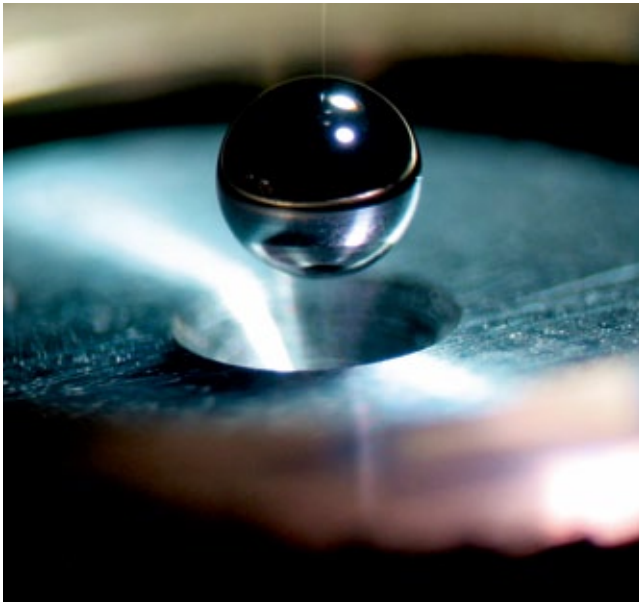
zen. Dabei bilden sich Heliumkerne, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen, sowie ein energiereiches Neutron. Die Heliumkerne geben ihre Energie rasch wieder an das umgebende Plasma ab. Für den Bruchteil einer Nanosekunde löst dies eine Lawine von Reaktionen aus, bei der ein Großteil des Deuterium-Tritium-Gemischs nuklear miteinander reagiert.

Um die notwendigen Bedingungen dafür zu erreichen, gilt es, eine exakt definierte Serie von Stoßwellen in der Brennstoffkapsel zu starten. Hierfür muss das Kügelchen äußerst symmetrisch geformt sein, mit einer Oberfläche, die bis auf tausendstel Millimeter Präzision geglättet wurde. Nur dann bleibt die Symmetrie auch während der Kompression erhalten, damit die Kapsel nicht schon während der Implosion zerbricht, noch ehe Fusionsreaktionen einsetzen.

Die NIF ist für solche Experimente hervorragend geeignet: Insgesamt 192 Laserstrahlen mit einer Gesamtenergie von mehr als zwei Megajoule durch zwei kleine Öffnungen in einen Goldzylinder, in dessen Mitte die Kapsel sitzt (siehe Bilder S. 47). Das entspricht der Energie von knapp einem halben Kilogramm Sprengstoff, konzentriert auf ein winziges Kügelchen. Das Innere des Zylinderhohlraums heizt sich innerhalb weniger Nanosekunden auf über drei Millionen Grad Celsius auf, was schlagartig die äußere Hülle der Brennstoffkapsel verdampft. Ähnlich einer Rakete beschleunigt

Um in einem Wasserstoffkügelchen Fusionsreaktionen zu zünden, wird es komprimiert (1). Dann feuert ein Laserstrahl bis fast ins Zentrum des Ziels (2). Dessen Licht erzeugt einen Strahl (nahezu) lichtschneller Elektronen, die wiederum den Wasserstoff im Mittelpunkt des Kügelchens implodieren lassen (3, 4).





LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Kalte Kugeln: An Kaliforniens National Ignition Facility werden die Targets für die Trägheitsfusion entwickelt – tiefgefrorene, zwei Millimeter große Wasserstoffkügelchen.

das Material der Kapsel nun konzentrisch nach innen auf ihr eigenes Zentrum zu. Nicht nur komprimiert dies den gefrorenen Brennstoff um das 1000-Fache bis zur 20-fachen Dichte von Blei, sondern es erhitzt ihn gleichzeitig bis auf über 100 Millionen Grad, was schließlich die Kernreaktionen zündet. Physiker sprechen hier von Hot-Spot-Zündung.

Neben der Brennstoffkugel erfordert auch die Laserkompression extreme Präzision. Doch selbst wenn beide Anforderungen erfüllt sind, erwarten die Experten der NIF allenfalls einen 15- bis 20-fachen Energiegewinn. Der Grund: Das Aufheizen des Brennstoffs erschwert die Kompression und reduziert ihre Effizienz gegenüber einer einfachen Implosion der Kapsel ohne Erhitzen. Wenn sich dagegen Kompressions- und Aufheizphase der Kapsel voneinander trennen ließen, könnte das die Ausbeute stark verbessern.

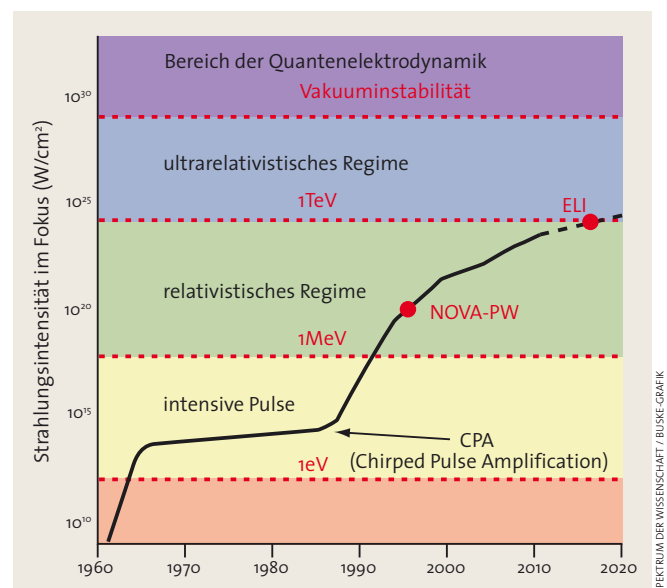
Dies würde auch die Anforderungen an die Präzision der Laserkompression reduzieren. Denn eine Implosion, bei der der Brennstoff nicht gleichzeitig erhitzt werden muss, kann langsamer ablaufen und würde das Zerschlagen der Kapsel unwahrscheinlicher machen. Es waren genau diese Gründe, welche die Forscher nach einem neuen Konzept für die Trägheitsfusion suchen ließen: nach der schon genannten schnellen Zündung. In den 1980er Jahren hatten der Fusionsphysiker Max Tabak und einige Kollegen vom LLNL ausgerechnet, dass eine Brennstoffkapsel mit dem neuen Verfahren bereits mit weniger als sieben Prozent der bis dahin für nötig gehaltenen Laserenergie gezündet werden könnte, also etwa 100 Kilojoule. Dabei würde der eigentliche Zündfunke, der die Fusionsreaktionen im Kugelzentrum in Gang setzt, gerade einmal zehn Prozent derjenigen Energie brauchen, die für die ganze Kompression eingesetzt wird. Der Zündfunke mit einer Energie von zehn Kilojoule könnte dann von einer externen Quelle zum komprimierten Brennstoff gelangen, ähnlich wie bei der Zündkerze im Verbrennungsmotor. Wegen der langsameren Kompression der Fast-Ignition-Kapsel ist der Energieaufwand, verglichen mit der Standardträgheitsfusion, deutlich reduziert. Weil gleichzeitig die absolute Ausbeute an thermonuklearer Energie etwa die gleiche ist, könnte damit der Energiegewinn pro Kapsel um mehr als das Zehnfache gesteigert werden. Wenn das gelänge, würde die schnelle Zündung für die Energiegewinnung wirklich attraktiv.

Rasante Entwicklung: In den letzten Jahrzehnten steigerte sich die Intensität der Laser über viele Größenordnungen, über den NOVA-Petawatt zur geplanten Extreme Light Infrastructure ELI.

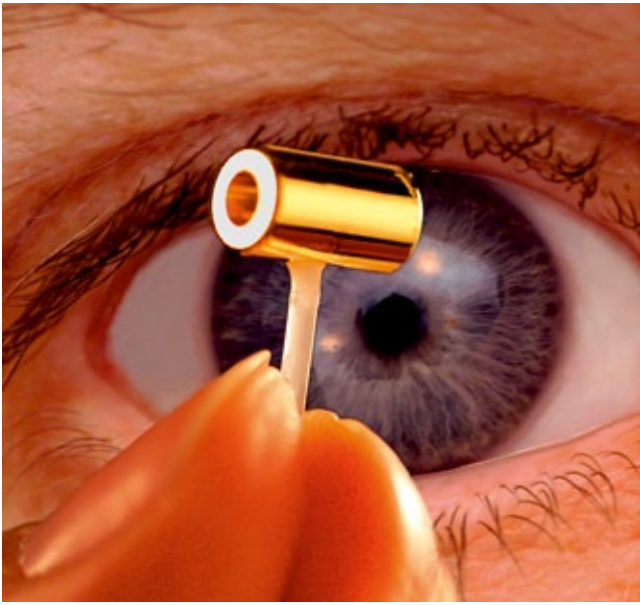
tenen Laserenergie gezündet werden könnte, also etwa 100 Kilojoule. Dabei würde der eigentliche Zündfunke, der die Fusionsreaktionen im Kugelzentrum in Gang setzt, gerade einmal zehn Prozent derjenigen Energie brauchen, die für die ganze Kompression eingesetzt wird. Der Zündfunke mit einer Energie von zehn Kilojoule könnte dann von einer externen Quelle zum komprimierten Brennstoff gelangen, ähnlich wie bei der Zündkerze im Verbrennungsmotor. Wegen der langsameren Kompression der Fast-Ignition-Kapsel ist der Energieaufwand, verglichen mit der Standardträgheitsfusion, deutlich reduziert. Weil gleichzeitig die absolute Ausbeute an thermonuklearer Energie etwa die gleiche ist, könnte damit der Energiegewinn pro Kapsel um mehr als das Zehnfache gesteigert werden. Wenn das gelänge, würde die schnelle Zündung für die Energiegewinnung wirklich attraktiv.

Die Sache hat aber einen Haken: Nach der maximalen Kompression der Kapsel dauert es lediglich zehn Pikosekunden (10^{-11} Sekunden), bis der Brennstoff wieder auseinanderfliegt. Die Zündenergie während dieses winzigen Zeitfensters in den Brennstoff im Zentrum des Kügelchens einzubringen, erfordert jedoch, wie eine simple Rechnung zeigt, mehr als ein Petawatt, also eine Million Gigawatt. Das klingt zunächst schlimmer, als es ist: Diese Leistung übertrifft zwar sogar das 100-Fache des Weltenergieverbrauchs, muss jedoch nur für einen aberwitzig kleinen Sekundenbruchteil erbracht werden. Dennoch handelte es sich seinerzeit um mehr als das 1000-Fache der Leistung des größten Lasersystems Ende der 1980er. Erst mit der Einführung der so genannten Chirped Pulse Amplification (CPA, etwa: Kurzpulsverstärkung) konnten Laserphysiker diese aussichtslos erscheinende Situation verändern.

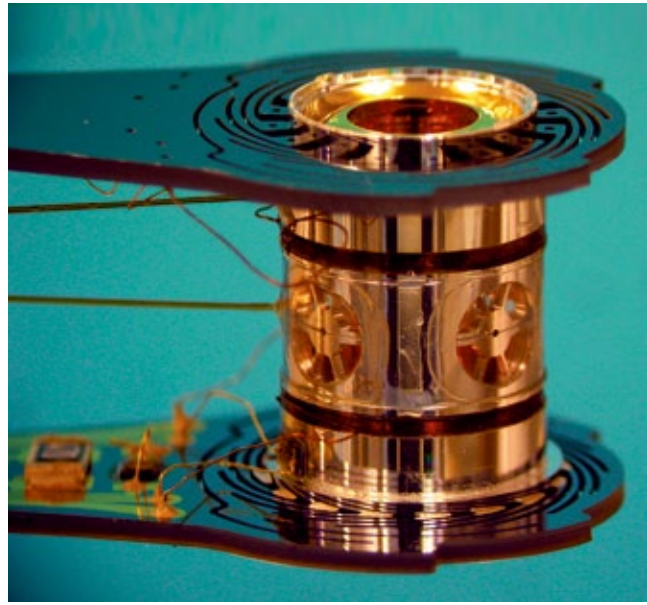
Was ist Chirped Pulse Amplification? Ursprünglich wurde sie in den 1950er Jahren für einen ganz anderen Zweck erfunden, nämlich um die Intensität von Radarsendern zu erhöhen, ohne deren Verstärker zu überlasten. Die Motivation



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSSE-GRAFIK



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Der ein Zentimeter lange Hohlraumzylinder nimmt die tiefgefrorene Fusionskapsel auf. Dann wird mit 192 Lasern durch die seitlichen Öffnungen in den Hohlraum geschossen, dessen Wände sich rasch erhitzen. An den Innenwänden verwandelt sich das Laserlicht in Röntgenstrahlung, die die Kapsel implodieren lässt. Dabei wird sie 20-mal dichter als Blei und erhitzt sich auf 100 Millionen Grad, wo die Fusion zündet.

dafür war der Bedarf nach größerer Reichweite und Zuverlässigkeit der Sender. Der französische Laserpionier Gérard Mourou und seine Mitarbeiterin Donna Strickland von der University of Michigan führten diese revolutionäre Technologie 1987 in die Welt der Kurzpuls Laser ein und ermöglichten damit besonders hohe Intensitäten.

Konventionelle gepulste Lasersysteme speichern Energie, indem Atome im Lasermedium auf optischem oder chemischem Weg angeregt werden. Ein Saftpuls beginnt dann die gespeicherte Energie in Photonen der gleichen Wellenlänge umzuwandeln, die »stimulierte Emission«. Während der Puls durchs Lasermedium fliegt, fügen Kaskaden von derart stimulierten Emissionen immer mehr Photonen hinzu, bis der ganze Puls aus dem Medium ausgekoppelt und zur Targetkammer geleitet wird. Dieses Prinzip ist jedoch nur bis zu einer gewissen Leistung nutzbar – wegen der physikalisch unvermeidlichen Selbstfokussierung. Dabei handelt es sich um einen nichtlinearen optischen Effekt, bei dem die Front des Laserstrahls den Brechungsindex im Lasermedium so verändert, dass der Rest des Strahls fokussiert (also stärker gebündelt) wird und wegen der verstärkten Energiekonzentration damit im Lasermedium Hitzeschäden verursacht.

Die Chirped Pulse Amplification umgeht dieses Problem, indem sie den Photonenfluss im Lasermedium stets unter der Schwelle für Selbstfokussierung hält. In einem CPA-Verstärker wird der Puls zeitlich gestreckt, indem er durch Paare von Beugungsgittern fliegt – Metallplatten mit feinen, gleichmäßig aufgetragenen Rillen. Diese brechen einfallendes Licht in seine verschiedenfarbigen Komponenten, ähnlich wie das Farbspektrum, das man auf der Oberfläche einer

CD sieht. Während ein kontinuierlicher Laserstrahl einfarbig sein kann, besteht ein gepulster Strahl immer aus vielen Farben beziehungsweise Wellenlängen. Die unterschiedlichen Farben des Kurzpulslichts werden vom ersten Gitter in verschiedene Richtungen reflektiert und treffen dann auf ein zweites, das parallel zum ersten ausgerichtet ist.

Dieses schickt alle Farben wieder in die gleiche Richtung, aber mit einer zeitlichen Verzögerung. Indem man den Abstand zwischen den Gittern verändert, kann man den Puls so bis zu 10 000-fach dehnen, von Pikosekunden bis zu mehreren Nanosekunden. Das reduziert den Photonenfluss drastisch, und man kann den Lichtstrahl viel mehr verstärken als ohne diesen Trick. Danach gelangt der Puls durch ein zweites Gitterpaar, das die Streckung umkehrt und damit die ursprüngliche Länge des Pulses wiederherstellt.

Elektronen werden in drei Femtosekunden auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt

In den 1990er Jahren konnten die Forscher mit der Chirped Pulse Amplification die Spitzenintensität von gepulsten Lasersystemen dramatisch steigern. Während für die konventionelle Trägheitsfusion in den letzten 20 Jahren immer energiereichere Laser mit Intensitäten um 10^{15} Watt pro Quadratzentimeter entwickelt wurden, führte die Entwicklung der CPA-Technologie zu relativ kompakten Infrarotlasern, die ohne Probleme bis zur so genannten relativistischen Schwelle von 10^{18} Watt pro Quadratzentimeter gelangten.

Bei dieser Intensität und einer Wellenlänge von einem Mikrometer, was infrarotem Licht entspricht, wird im Laserfokus alles Material fast unmittelbar ionisiert, und die Elekt-

ronen beschleunigen innerhalb einer einzigen Laserperiode von $3 \cdot 10^{-15}$ Sekunden auf beinahe Lichtgeschwindigkeit (siehe Kasten unten). In den nächsten Jahren erwarten Forscher sogar, noch bis zu 100 000-mal höhere Intensitäten zu erreichen. Damit würden sie in einen Bereich gelangen, wo nicht nur die leichten Elektronen, sondern auch die wesentlichen schwereren Wasserstoffkerne (Protonen) innerhalb einer Laserperiode auf fast Lichtgeschwindigkeit kommen.

Bei Spitzenintensitäten von 10^{24} Watt pro Quadratmeter erreicht die Energie des Laserfelds im Fokus bereits Werte, bei denen Paarerzeugung einsetzt: Spontan entstehen dann im Laserstrahl durch quantenelektrodynamische Prozesse Elektronen und ihre Antiteilchen, Positronen, – ein Prozess, der sonst eher in Teilchenbeschleunigern auftritt, aber wohl auch Sekundenbruchteile nach dem Urknall vorkam. Das europäische Extreme Light Infrastructure Project (ELI), geleitet von CPA-Miterfinder Gérard Mourou, soll diese bisher unerreichten Laserintensitäten anpeilen.

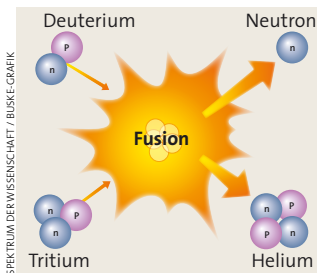
Schon vor den ersten Experimenten erwarteten die Forscher, dass energiereiche Kurzpuls laser im Rahmen der Schnellen Zündung in komprimierten Brennstoffkapseln einen Zündfunken produzieren könnten. Genauer analysierten Fusionsphysiker vom LLNL diesen Prozess mit Computersimulationen. Damit konnten sie zeigen, dass relativisti-

sche Laserpulse energiereiche Elektronenstrahlen erzeugen, wenn sie auf Festkörper treffen. Solche Strahlen könnten den Zündfunken des Fusionsfeuers in einem komprimierten Brennstoffkugelchen entfachen.

Des Weiteren ergaben diese Simulationen: Die hochenergetischen Laserpulse dringen, sobald sie auf ein nicht allzu dichtes Plasma treffen, durch Kanäle – ähnlich Bohrlöchern – in das Gas ein. Fachleute sprechen denn vom Hole Boring. Diese vergleichsweise tiefen, wenn auch winzigen Löcher helfen dabei, die Energie dort abzuladen, wo sie hin soll, nämlich so genau wie möglich im Zentrum der Brennstoffkugelchen.

Doch sind Simulationen, selbst wenn sie noch so akribisch durchgeführt werden, letztlich nur graue Theorie. In der Physik müssen sie sich immer durch Experimente bestätigen lassen. Waren also die Laserphysiker damit zumindest im Prinzip auf dem richtigen Weg zur Trägheitsfusion? Der erste positive Hinweis in diese Richtung kam aus Japan. Am Institute of Laser Engineering (ILE) in Osaka gelang es einem japanisch-britischen Team um Ryosuke Kodama im Jahr 2000 erstmals, eine lasergetriebene Implosion mit einem Kurzpuls laser zu kombinieren. Wie war ihm das gelungen?

In dem Experiment feuerte Kodama Nanosekunden-Laserpulse aus verschiedenen Richtungen auf eine Kapsel. Danach schoss er einen energiereichen CPA-Pikosekunden-Laserpuls ins Innere der Kapsel, um Elektronen in Richtung des dichten Materials zu beschleunigen – also zum Kugelmitelpunkt hin. In der Apparatur kam auch ein so genannter Zylinderkonus zum Einsatz, der vor dem Experiment so in die Kapsel eingefügt wurde, dass die Spitze des Konus im Zentrum der Kapsel lag. Dieser Konus diente dazu, den Abstand zwischen dem Punkt, an dem der Kurzpuls laser absorbiert wird, und dem dichten Plasma im Kern der Implosion zu verringern, und zwar exakt zum Zeitpunkt maximaler



Wenn Deuterium und Tritium miteinander fusionieren, entstehen ein Heliumatomkern sowie ein schnelles Neutron, das 80 Prozent der Reaktionsenergie mit sich führt.

Wie intensive Laserstrahlen ein Plasma verändern

Ein Elektron, das von einem Laserstrahl niedriger Intensität beschossen wird, schwingt im elektrischen Feld des Laserstrahls senkrecht zu seiner Ausbreitungsrichtung. Für einen Infrarotlaser bei einer Wellenlänge von einem Mikrometer beträgt die Oszillationsperiode, also die Zeit für eine vollständige Auf- und Abbewegung, ungefähr $3 \cdot 10^{-15}$ Sekunden. Wie weit und wie schnell sich das Elektron dabei bewegt, hängt von der Intensität des Lasers ab. Bei hohen Intensitäten, wie sie bei den Kurzpuls lasern für die schnelle Zündung gebraucht werden, also etwa 10^{18} Watt pro Quadratmeter für einen Infrarotlaser, wird das Elektron dabei beinahe auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt – ganz anders als bei niedrigen Laserintensitäten.

Das Elektron bewegt sich nun entlang der Ausbreitungsrichtung des Lasers. Die Auf- und Abbewegung wird, verglichen mit der Vorwärtsbewegung, zunehmend kleiner. Dieser Effekt rührt

daher, dass ein Teilchen nahe der Lichtgeschwindigkeit auf das elektromagnetische Feld des Lasers anders reagiert als ein langsames Teilchen. Das Magnetfeld des Laserstrahls lenkt dann die Bahn des Elektrons nach vorne um.

Dieses einfache Bild der Bewegung eines Einzelteilchens wird aber im Plasma komplizierter. Kollektive Effekte, bei denen viele Elektronen miteinander und mit dem Laserstrahl wechselwirken, beeinflussen die Ausbreitung des Laserstrahls und lösen zugleich Bewegungen des Plasmas durch das elektromagnetische Feld des Lasers aus. Als wichtige Eigenschaft des Plasmas, die sich aus solchen kollektiven Effekten ableitet, kann sich Licht nur unterhalb einer bestimmten Dichte des Plasmas darin ausbreiten. Für Infrarotlicht liegt diese »kritische Dichte« etwa beim 20-Fachen der Dichte von Luft.

Kompression. Die beiden Verfahren unterscheiden sich vor allem darin, dass beim Hole-Boring-Verfahren ein separater Laserpuls benötigt wird, um einen Kanal in das expandierende »Abgasplasma« der Implosion um den dichten Kern zu bohren, bevor der Zündpuls gefeuert werden kann. Mit dem Zylinderkonus als Alternative zum Hole-Boring-Laserpuls gelang trotz der plasmareichen Umgebung der Kapsel, den CPA-Kurzpuls in die Nähe des dichten Kerns vordringen zu lassen, wo die Elektronen beschleunigt werden.

Zwar produzierte das Experiment seinerzeit noch nicht genügend viele Kernreaktionen, um die Kernfusion zu zünden; dazu reichten sowohl die Kompressions- als auch die Heizenergie nicht aus. Dennoch war es für die Fusionsforscher ein großer Erfolg. Zum ersten Mal konnten sie zeigen, dass komprimierter Brennstoff mit Hilfe von laserbeschleunigten Elektronen aufgeheizt werden kann. Auch wurden in dem Versuch weit mehr Neutronen produziert als ohne den Kurzpuls-Laser. Natürlich verfolgt das ILE-Team dieses Konzept bis heute weiter. Es arbeitet derzeit daran, ihren frühen Erfolg mit einem zehnfach leistungsstärkeren Laser zu wiederholen, um noch höhere Dichten und Temperaturen im Plasma zu erreichen.

Die hohe Kunst, Löcher zu bohren

Wie ist der Forschungsstand außerhalb Japans? Gegenwärtig beschäftigen sich weltweit mehrere Labors mit der Kugelchenkompression durch energiereiche Nanosekundenlaser. Sie alle kombinieren diese mit CPA-Laserpulsen, die in der Lage sind, komprimiertes Plasma aufzuheizen. Der energiereichste Kurzpuls-Laser der Welt steht derzeit am Laboratory for Laser Energetics der Rochester University im US-Bundesstaat New York. Er kann seine intensiven CPA-Strahlen mit einer Energie von 2,6 Kilojoule innerhalb von zehn Pikosekunden abschließen. Zur Kompression der Kugelchen stehen 60 Nanosekunden-Laserstrahlen mit insgesamt 30 Kilojoule zur Verfügung. Mit dieser Kombination unterschiedlicher Lasersysteme ist es der Gruppe in Rochester auf Anhieb gelungen, die Fusionsreaktionen des Osaka-Experiments um ein Vielfaches zu übertreffen – ein viel versprechender Ansatz.

Doch lieferte vor allem die Kunst des Löcherbohrens in der Simulation den entscheidenden Trick, mit dem die Schnelle Zündung arbeitet. Wie kann ein Laserstrahl Löcher in Plasma bohren? Hierbei laufen verschiedene Wechselwirkungen zwischen Laserlicht und Plasma ab. So versetzt einerseits der Laserstrahl das Plasma in Bewegung, und andererseits lenkt das Plasma den Laserstrahl um, ähnlich wie Wasser das Licht. Welche Wirkung eintritt, hängt vom so genannten Strahlungsdruck ab, einem Effekt, den der Physiker James Clerk Maxwell bereits 1873 erkannte. So wie Teilchen, die auf eine Fläche prallen, dort Druck ausüben, kann auch Strahlung mit ihren Photonen auf eine Oberfläche Kraft übertragen.

Der Druck des Laserlichts übersteigt den Plasmadruck schon bei der Energieschwelle von 10^{18} Watt pro Quadratmeter. Jenseits dieser »relativistischen« Energie kann ein



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY



UNIVERSITY OF ROCHESTER

Vor jedem Experiment wird das Fusionskugelchen mit einem speziellen Arm innerhalb der Targetkammer exakt positioniert (oben). Sobald die Laser feuern, registrieren viele Messsonden (unten) die Explosion im Detail.

Laserstrahl relativ rasch ein gasförmiges, nicht allzu dichtes Plasma aus der Strahlbahn schieben und wie in einem dünnen Kanal, den es selbst vorantreibt, tiefer in das Medium eindringen – ähnlich wie ein scharfer Wasserstrahl ein Loch in weiche Erde bohrt.

Der Bohrlocheffekt wird bei der Schnellen Zündung dafür genutzt, im Kugelchen einen Kanal durch das Plasma zu treiben, das den Kern mit dem komprimierten Brennstoff umgibt. Dieser Kanal soll den Zündpuls, der schnelle Elektronen für das Erhitzen des Brennstoffes erzeugt, wesentlich näher an das Zentrum bringen und damit die Effizienz verbessern. Die zusätzliche Energie, die das Bohren des Kanals verbraucht, ist jedenfalls geringer als diejenige, die der eigentliche Zündpuls benötigt.

Leider sind der Ausbreitung des Laserlichts im Plasma Grenzen gesetzt. Überschreitet die Plasmadichte nämlich einen kritischen Wert, kann sich ein Laserpuls im Plasma nicht weiter ausbreiten. Stattdessen wird er dann reflektiert oder absorbiert, abhängig von Eigenschaften des Lasers wie Wellenlänge, Intensität, Einstrahlwinkel sowie jenen des Plasmas. Aber genau der Anteil des Lichts, den das Plasma schluckt, beschleunigt die Elektronen und erzeugt einen intensiven

Teilchenstrahl, der mit beinahe Lichtgeschwindigkeit in die gleiche Richtung läuft wie der Laserpuls selbst. An der Plasmaoberfläche, also nahe der kritischen Dichte, bilden sich extrem intensive, quasistatische elektrische und magnetische Felder. Es handelt sich dabei um die stärksten Magnetfelder, die je im Labor gemessen wurden. Sie lassen sich mit denen auf der Oberfläche eines Neutronensterns vergleichen und können ein fast lichtschnelles Elektron über einen Mikrometer hinweg umlenken. Das elektrische Feld auf der Plasmaoberfläche ist eine Million Mal stärker als dasjenige in den stärksten Teilchenbeschleunigern.

Simulationen statt Experimente

Die intensiven kurzen Laserpulse erzeugen Elektronenstrahlen, die nahezu die gesamte Laserenergie enthalten. Diese erhitzen die wenigen Kubikmikrometer Plasma im Laserfokus so heftig, dass es sich innerhalb von Pikosekunden thermisch ausdehnt. Normalerweise könnten die Elektronen mehrere Millimeter dicke Kupferplatten durchschlagen, doch werden sie im komprimierten Brennstoff einer Fusionskapsel mit einer über 100-mal höheren Dichte einfach gestoppt.

Die Kurzpulslaser, die den Brennstoff in zukünftigen Experimenten mit Schneller Zündung aufheizen sollen, werden vermutlich mehr als das 100-Fache Energie pro Puls haben als der derzeit energiereichste Pikosekundenlaser. Das bedeutet, dass Forscher sich vorläufig auf Computermodelle beschränken müssen, um die optimale Konfiguration aus Brennstoffkapseln und Laserpulsen zu ermitteln. Für die Entwicklung und Erforschung der Trägheitsfusion sind Simulationen also von besonderer Bedeutung, solange Experimente die zentralen Fragen noch nicht direkt beantworten können.

Doch hier haben die Theoretiker gleich ein grundsätzliches Problem: Die üblichen Computermodelle für die Heizphase der Schnellen Zündung sind völlig anders gestrickt und weniger ausgereift als die Modelle auf Basis der Hydro-

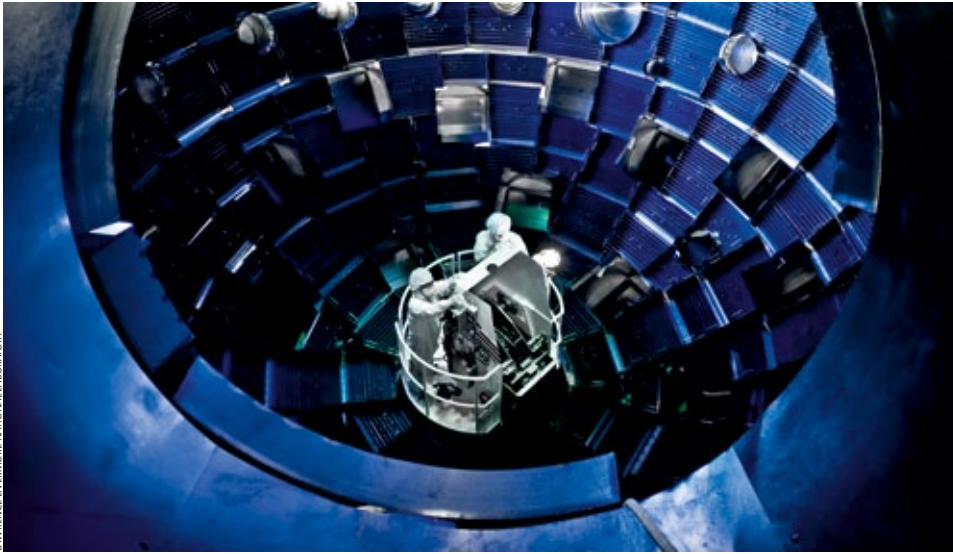
dynamik, wie sie schon seit Jahren an der NIF verwendet werden. Letztere reduzieren, ähnlich den Modellen für Klima- und Wettervorhersagen, das komplizierte Verhalten des Plasmas auf wenige makroskopische Variablen – wie Dichte, Temperatur und Geschwindigkeit – und berechnen ihre gegenseitige Abhängigkeit mit Hilfe physikalischer Grundgleichungen.

Verglichen mit den etablierten Hydrodynamiksimulationen für die Kompression von Fusionskapseln ist die Forschung an der Heizphysik für die Schnelle Zündung noch relativ jung. Die extremen elektromagnetischen Felder in intensiven kurzen Laserpulsen beeinflussen das Plasma derart, dass sich mikroskopische Effekte, die von makroskopischen Variablen wie der Temperatur nicht erfasst werden, nicht mehr vernachlässigen lassen. Daher sind Hydrodynamikmodelle für die Kurzpulswechselwirkung nicht anwendbar. Stattdessen verwenden Forscher die hier so genannte Particle-in-Cell (PIC)-Simulationen. Bei diesen wandern Millionen positiv und negativ geladener Teilchen durch ein virtuelles räumliches Gitter von Zellen, auf denen alle elektromagnetischen Felder definiert sind. Die Bewegungen von Teilchen und Feldern beeinflussen sich dabei laufend gegenseitig: Einerseits werden Teilchen von benachbarten Feldern abgelenkt, andererseits werden Letztere von elektrischen Strömen auf Grund der Teilchenbewegung verändert. Um die Entwicklung des Plasmas zu verfolgen, wiederholt der Computer diesen Zyklus laufend in – simulierten – Bruchteilen einer Femtosekunde (10^{-15} Sekunden).

Das PIC-Verfahren wurden in den 1960er Jahren entwickelt, um mittels Computer kollektive Plasmaeffekte in idealisierten Fällen zu untersuchen, bei denen viele Elektronen miteinander und mit dem Laserstrahl wechselwirken. Später fügten die Forscher zwar auch die komplexeren kollektiven Laser-Plasma-Wechselwirkungen für Nanosekundenpulse hinzu, aber aus Mangel an Rechnerleistung noch immer an



Eine von zwei Laserhallen der National Ignition Facility am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien: Jede der beiden Hälften links und rechts des Wartungsflurs in der Mitte enthält exakt 48 Strahlrohre. Bei einem Schuss verteilt sich ein Saatpuls auf 192 nahezu identische Pulse, die simultan verstärkt werden und dann gleichzeitig zum Target gelangen.



Im Zentrum der Targetkammer der National Ignition Facility: Mit einer Hebebühne inspizieren und warten Techniker das Innere der Anlage.

vereinfachten Modellen. Diese Situation verbesserte sich wesentlich, als in den 1990er Jahren die ersten Kurzpuls laser aufkamen. Inzwischen sind PIC-Simulationen zu einem wichtigen wissenschaftlichen Werkzeug geworden, das die extrem schwierigen Kurzpuls laserexperimente unterstützt.

Die relativ einfachen Algorithmen von PIC-Modellen, die leicht auf Parallelrechnern installiert werden können, aber große Mengen an Speicher benötigen, machen sie zu idealen Anwendungen, weshalb die Plasma-Teilchen-Simulationen Hand in Hand mit der Entwicklung von Supercomputern vorangeschritten sind. Einige der ersten großen Computerberechnungen relativistischer Laser-Plasma-Wechselwirkungen entstanden Mitte der 1990er Jahre, unter anderem am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Die Wissenschaftler konnten dazu erstmals einen Cray-T3E-Rechner mit 700 Prozessoren einsetzen, um bis zu einer Milliarde Teilchen zu simulieren.

Seitdem hat sich die Leistung von Supercomputern ver-hundertfacht, sowohl was Geschwindigkeit als auch Speicherplatz betrifft. Die größte bislang veröffentlichte Teilchensimulation von Laser-Plasma-Wechselwirkungen betrachtete etwa eine Billion, also 10^{12} Teilchen, was einem Speicherplatz von einem Petabyte (einer Million Gigabyte) entspricht. Diese Simulation gelang Forschern um Ken Bowers vom Los Alamos National Laboratory 2008 auf dem Supercomputer »Roadrunner« in Los Alamos – der ersten Rechenmaschine, die pro Sekunde 10^{15} Operationen durchführen konnte.

Aber auch für die größten heutigen Supercomputer ist eine Simulation der intensiven Laser-Plasma-Wechselwirkung für ein Experiment mit Schneller Zündung im 1:1-Maßstab, also mit dem gesamten Plasmavolumen, eine extreme Herausforderung. Der Grund liegt in der enormen Anzahl von Teilchen, die dafür benötigt wird: Der komprimierte Kern einer Kapsel für die Schnelle Zündung zum Beispiel enthält etwa 10^{21} Elektronen in einem Volumen, das einer Kugel mit einem Radius von etwa einem zehntel Millimeter entspricht. Allein die Positionen all dieser Teilchen zu regis-

trieren, würde die Speicherkapazität selbst des größten Rechners sprengen.

Wenn Forscher an ihre Grenzen stoßen, werden sie zu-meist erfindungsreich. Anstatt also das Simulationsproblem der Trägheitsfusion direkt zu lösen, zerlegen sie es in drei Schritte, die zeitlich dicht aufeinander folgen und sich zum Glück mit jeweils anderen Methoden behandeln lassen:

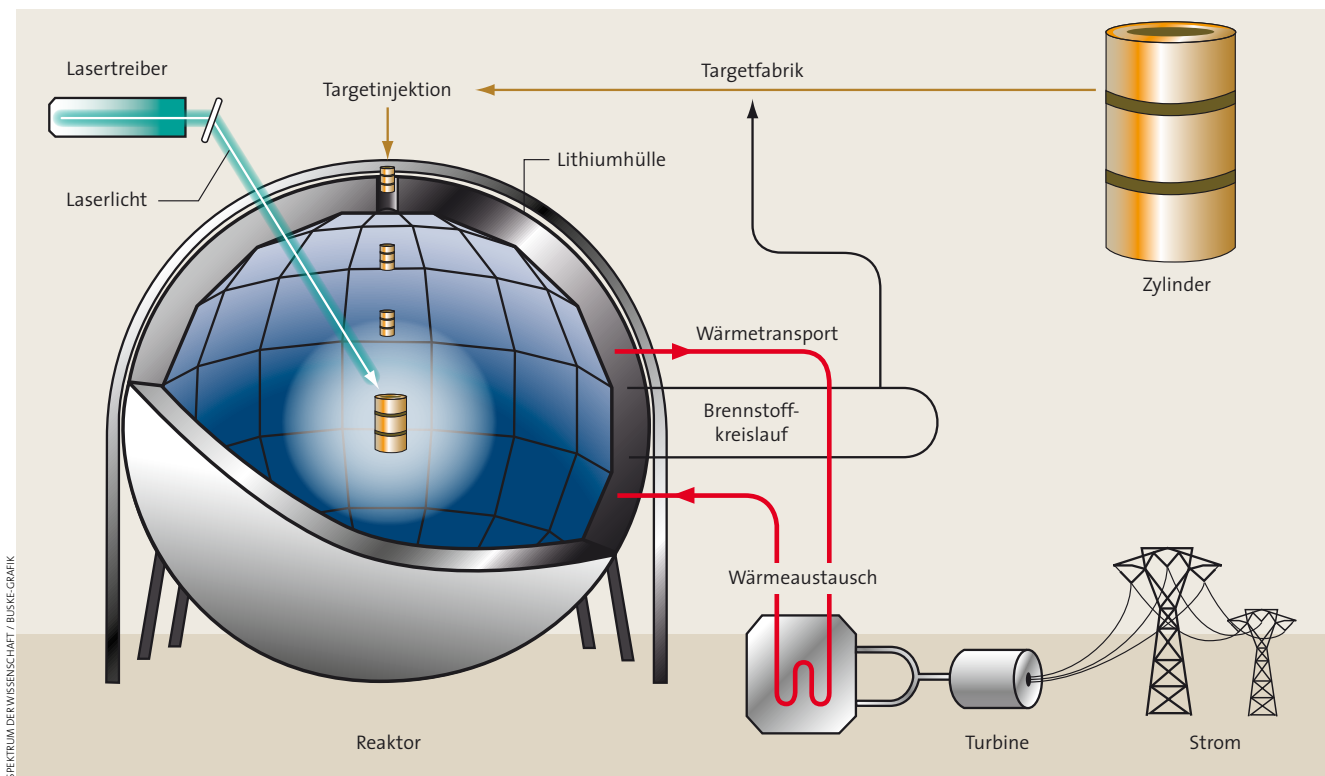
- die Kompressionsphase mit etwa 30 Nanosekunden;
- die Kurzpulswechselwirkung mit etwa 10 Pikosekunden;
- der Transport von relativistischen Elektronen zum dichten Kern des komprimierten Brennstoffes; Dauer rund 50 Pikosekunden.

Doch der Reihe nach: Die vergleichsweise lange Kompressionsphase der Brennstoffkugeln wird mit hydrodynamischen Simulationen ähnlich wie in der Standardträgheitsfusion behandelt.

Eng gebündelte Elektronenstrahlen

Was passiert nun genau im Kern einer solchen Fusionskapsel im Verlauf der zehn Pikosekunden, während der ihr Zentrum maximal komprimiert und zugleich der Kurzpuls laser ge-feuert wird? Um diese Vorgänge zu berechnen, kombinieren Forscher die Simulation der Teilchen mit einem separaten Computermodell des vom Laser verursachten Elektronenstrahls, der sich seinen Weg durchs Plasma in Richtung Kugelmitte bahnt. Die Zone, die der Laser direkt beeinflusst, erstreckt sich zwar über Hunderte von Mikrometern – für diese Prozesse eine große Distanz. Aber die vergleichsweise geringe Plasmadichte reduziert dort die Anforderungen an die Teilchensimulationen.

Je mehr sich allerdings der Elektronenstrahl dem Zentrum nähert, desto mehr gelangt er in Schichten höherer Plasmadichte. Dafür brauchen Theoretiker Modelle, welche die Eigenschaften verschiedener Ansätze kombinieren: Während der Elektronenstrahl selbst durch Teilchen auf einem virtuellen Gitter beschrieben wird (in einer Art Fortsetzung des Particle-in-Cell-Verfahrens), lässt sich das dichte Plasma



Ein Reaktor würde mittels Laserbombardement zehnmal pro Sekunde ein Target implodieren lassen. Die frei werdenen Neutronen erhitzen dann die Reaktorwand aus Lithium.

durch ein hydrodynamisches Modell darstellen. Dieses charakterisiert das Plasmaverhalten durch einige makroskopische Parameter – wie Druck, Dichte und Temperatur –, ähnlich wie in konventionellen Programmen zur Hydrodynamik. Solche Hybridmodelle sind Gegenstand aktueller Forschung.

Eine der größten Herausforderungen für Schnelle Zündung liegt aber in der Steuerung des lasererzeugten Elektronenstrahls. Teilchensimulationen sagen bisher voraus, dass dieser sich wie ein Fächer öffnet, anstatt geradewegs und gebündelt bis zum Kern durchzudringen. Das nicht erwünschte Verhalten des Elektronenstrahls hängt eng damit zusammen, wie der Laserstrahl vom Plasma absorbiert wird. Das lässt sich jedoch nicht einfach kontrollieren, beispielsweise durch eine raffiniertere Laseroptik oder spezielle Plasmakonfigurationen. Denn der energiereiche Laserstrahl modifiziert die Plasmaoberfläche selbst so sehr, dass er jede vorgegebene Anordnung rasch verändert.

Je mehr sich aber der Elektronenstrahl bei seinem Eindringen ins dichte Plasma aufspreizt, desto weniger kann er es im Kern des Brennstoffkügelchens aufheizen, wo die Fusionsreaktionen starten sollen; denn ein großer Teil des Strahls verfehlt dann schlicht den Kern, und seine Energie wird eher im Plasma abgegeben, das den Kern umgibt. Die Physiker möchten dieses Problem wie folgt lösen: Sie wollen im Plasma Magnetfelder erzeugen, welche die Elektronen wieder näher

zum Zentrum der Kapsel lenken, um der Strahlspreizung entgegenzuwirken und den Strahl wieder zu fokussieren. Es gibt bereits Entwürfe, wie der Elektronenstrahl selbst solche Magnetfelder im Plasma erzeugen könnte: Die Brennstoffkapseln sollen dazu noch vor der Kompressionsphase aus Schichten verschiedener Materialien zusammengesetzt werden. Ob diese Idee Erfolg hat, müssen die Experimente noch zeigen.

Die Schnelle Zündung galt lange als Königsweg zur Energiequelle Trägheitsfusion. Sie hat im Lauf der letzten 20 Jahre aber nicht nur das Interesse an Trägheitsfusion zur Energiegewinnung angefangen, sondern auch die Entwicklung von energiereichen Kurzpulslasern beschleunigt und – auf dem Gebiet der Laser-Plasma-Wechselwirkungen – zu ganz unvorhergesehenen Anwendungen geführt.

So gelang es im Jahr 2000 einer Gruppe von Wissenschaftlern des LLNL, in der Wechselwirkung mit einem energiereichen Kurzpulslaser einen relativ fokussierten und hochenergetischen Protonenstrahl zu erzeugen. Dies könnte eine Alternative für Teilchenbeschleuniger der nächsten Generation eröffnen, aber auch neue Möglichkeiten in der Krebsmedizin. Die Livermore-Physiker setzten dazu den NOVA-Petawatt-Laser ihres Instituts ein, mit dem sie hauchdünne Metallfolien beschossen. In Teilchensimulationen hatten sie bereits vorhergesagt, dass die Protonen aus der nur tausendstel Millimeter dicken Metallschicht von elektrischen Feldern auf der Rückseite der Folie beschleunigt werden.

Diese Felder, millionenfach stärker als etwa die von großen Teilchenbeschleunigern, entstehen, wenn das Laserlicht an der Folienvorderseite absorbiert wird und energiereiche Elektronen aus dem Material herausschlägt. Die fast lichtschnellen, geladenen Partikel erzeugen dann die hohen elek-

trischen Feldstärken. Sie sind so stark, dass sie innerhalb von Pikosekunden auch schwerere geladene Teilchen aus der Metallschicht ablösen, hauptsächlich eben Protonen und sogar die noch schwereren Kohlenstoffionen, und sie gleichfalls auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigen. Diese Entdeckung mit ihren potenziellen Anwendungen in bildgebenden Verfahren und in der Tumorbekämpfung sorgte weltweit für Aufregung und fand bereits zahlreiche Nachahmer. Da Kurzpulslaser inzwischen relativ kostengünstig verfügbar und auch genügend kompakt sind, könnten sie eines Tages teure und große Teilchenbeschleuniger ersetzen.

Doch zurück zur Trägheitsfusion. Die Physiker werden die Konfiguration aus Laserpuls, Hohlraum und Brennstoffkapsel weiter optimieren müssen, um das Verhältnis von Fusionsenergie zu investierter Laserenergie zu steigern. Nur dann hat die kommerzielle Nutzung der Trägheitsfusion in einem Reaktor überhaupt eine Perspektive. Das Konzept der Schnellen Zündung wird dazu sicherlich beitragen.

Eine Million Brennstoffkapseln pro Tag

Wie könnte ein solcher Fusionsreaktor aussehen? Sein Inneres unterscheidet sich in mehrerer Hinsicht von der NIF. Die Wände der Reaktorkammer zum Beispiel müssen eine rasche Folge von Mikroexplosionen und das Bombardement mit Neutronen aushalten, die bei der Kernverschmelzung freigesetzt werden. Diese Partikel enthalten den Großteil der gesamten Fusionsenergie. Sie dringen ungehindert aus dem explodierenden Kügelchen bis in die Wand der Targetkammer, werden dort abgebremst und setzen so Wärme frei. In der Behälterwand kreist eine Kühlflüssigkeit aus flüssigem Lithium, die die Energie der Neutronen aufnimmt und sich erhitzt. Über einen Wärmetauscher wird schließlich Wasserdampf erzeugt, der über eine Turbine Elektrizität generiert.

Zusätzlich hat die Reaktorkammer auch noch die Aufgabe, neuen Brennstoff für die Kügelchen zu erbrüten: Während Deuterium und Lithium in den Weltmeeren in genügenden Mengen vorrätig sind, muss das radioaktive, in der Natur kaum vorkommende Tritium künstlich erzeugt werden. Aus dem Lithium der Kühlflüssigkeit entstehen beim Neutronenbeschuss Tritium und Helium. Eine ähnliche Technologie zur Tritiumherstellung soll auch in Magnetfusionsreaktoren verwendet werden.

Die größte Herausforderung für ein Laserfusionsreaktor-konzept stellt aber die hohe Wiederholungsrate von Impllosionen dar, die für eine kommerzielle Nutzung erforderlich wäre. Eine LLNL-Studie namens Laser Inertial Fusion Energy, kurz LIFE, geht davon aus, dass pro Sekunde bis zu zehn Brennstoffkapseln mit hoher Geschwindigkeit in das Reaktorgefäß eingeschossen werden – das Minimum, um aus einem Reaktor eine Leistung von 2500 Megawatt herauszuholen.

Pro Tag müssen demnach etwa eine Million Brennstoffkapseln hergestellt und auf den Millimeter genau in die Mitte der Targetkammer platziert werden. Wegen der hohen Schussrate würde das LIFE-Lasersystem nicht mehr von Blitzlichtlampen gepumpt werden können, wie es beim jetzi-

gen Laser an der NIF der Fall ist, sondern mit Festkörperlaserdioden. Diese zeigen eine hohe Energieeffizienz und werden bereits seit etwa 20 Jahren in Industrie und Wissenschaft eingesetzt. Noch sind sie zwar relativ teuer, aber diesen Kosten könnten, so wie jene anderer Halbleiter auch, in nächster Zeit deutlich fallen.

Ähnlich wie bei der heutigen NIF-Anlage würde auch das LIFE-Lasersystem mit 192 Strahlen betrieben werden – oder vielleicht auch mit doppelt so vielen. Aber weil ihre Energiedichte viel höher liegt als die von Blitzlichtlampen, genügen zehn Meter Länge für die notwendige Verstärkung der Laserstrahlen an Stelle der 100 Meter langen Strecke der NIF.

Die relativ kompakten Lasermodule brächten große Vorteile für die Bedienmannschaft: Einzelne Module könnten ausgetauscht werden, ohne den Reaktor abzuschalten. Des Weiteren soll die Targetkammer in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden, was den Vorzug hat, dass ihre Wände nicht aus speziellen Materialien bestehen müssten, die dem dauernden Beschuss mit Neutronen über die gesamte Lebensdauer eines Kraftwerks, also mehrere Jahrzehnte, standhalten. Solche Legierungen gibt es derzeit noch nicht, sie müssten erst entwickelt werden.

Deshalb ist nach dem LIFE-Konzept für die Targetkammer konventioneller Stahl vorgesehen. Alle zwei Jahre, wenn der Stahl durch Neutronenbeschuss geschwächt ist, würde demnach die Kammer ausgetauscht. Sie würde dann Monate später, sobald die Radioaktivität hinreichend abgeklungen wäre, zerlegt und entsorgt. Die LIFE-Studie hat den Vorzug, durchweg auf heute verfügbare Technologien zu setzen. Das nutzen die Reaktoringenieure, um für den Bau mit einem ehrgeizigen Zeitplan aufzuwarten. Mike Dunne, der das LIFE-Projekt leitet, schätzt, dass ein Pilotkraftwerk nur zwölf Jahre nach dem Zeitpunkt betriebsbereit sein könnte, an dem mit der NIF die erste Zündung der Trägheitsfusion erreicht wurde. ~

DER AUTOR



Andreas J. Kemp studierte theoretische Physik an der Technischen Universität München und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching. Er arbeitet derzeit im Fusion Energy Sciences Program am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien an Computersimulationen von Laser-Plasma-Wechselwirkung für Fast-Ignition und andere Anwendungen.

QUELLEN

Atzeni, S., Meyer-ter-Vehn, J.: The Physics of Inertial Fusion. Oxford University Press, 2004
Clery, D.: Fusion Power's Road Not Yet Taken. In: Science 334, S. 445–448, 2011

WEBLINK

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152346

Von wegen 3-D!

Ein verdunkeltes Auge genügt, damit unser visuelles System zweidimensionale Bilder als räumlich wahrnimmt.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Wird abends in den Städten die Straßenbeleuchtung eingeschaltet, scheint eine Lampe nach der anderen aufzuflammen – wie ein Lauffeuer breitet sich das Licht entlang den Straßen aus. Doch warum? Schließlich braucht das Licht von Lampe zu Lampe über den Daumen gepeilt gerade einmal eine millionstel Sekunde. Viel zu wenig, als dass unser visuelles System irgendwelche Unterschiede feststellen könnte.

Liegt es vielleicht an der langen Kupferleitung, die der Strom passieren muss? Elektronen bewegen sich in Leitern tatsächlich nur mit Geschwindigkeiten von typischerweise Zehntelmillimetern pro Sekunde. Doch entscheidend ist, wie schnell die Energie in die Lampe übertragen wird – und das geschieht eben doch mit Lichtgeschwindigkeit.

Das Phänomen hat wohl eher etwas mit der langen Leitung unserer eigenen

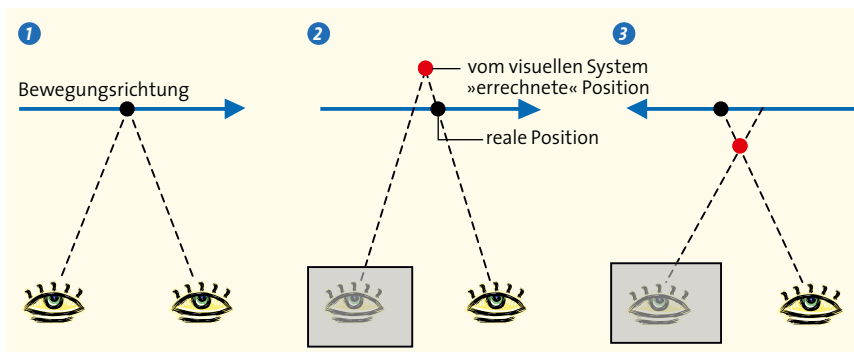
Unsere Sinne hintergehen
fortwährend den Verstand.

Michel de Montaigne (1533–1592)

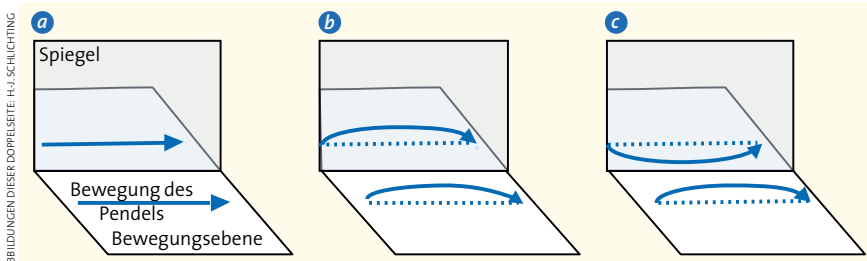
Wahrnehmung zu tun. Das visuelle System reagiert auf einen schwachen Lichtreiz bis zu einer zehntel Sekunde später als auf einen starken. Bei zwei unterschiedlich intensiven Lichtsignalen zur selben Zeit sehen wir das schwächere Signal deshalb verzögert, weil es – nach überwiegender Ansicht der Fachwelt – in unserem visuellen System langsamer übertragen wird als ein stärkeres Signal. Diese Verzögerung, der so genannte »visual delay«, ist dabei umso stärker, je schwächer das Licht ist.

Gehen wir davon aus, dass die Lampen in einer Straße identisch sind und praktisch zur selben Zeit aufleuchten. Da von einer Lampe umso weniger Licht in unsere Augen gelangt, je weiter sie von uns entfernt ist, nehmen wir ihr Aufleuchten also entsprechend später wahr – die reale Gleichzeitigkeit wird zu einem subjektiven Nacheinander. Noch interessanter wird diese optische Täuschung, wenn sie uns eine zweidimensionale Bewegung räumlich wahrnehmen lässt – ein Effekt, den der deutsche Physiker Carl Pulfrich (1858–1927) im Jahr 1922 entdeckt hat.

Obwohl er auf dem linken Auge blind war und seine Entdeckungen nie selbst überprüfen konnte, setzte sich Pulfrich in zahlreichen Publikationen mit dem räumlichen Sehen auseinander. Es wird dadurch möglich, dass jedes Auge einen Gegenstand aus einem anderen Winkel sieht. Diesen Unterschied nutzt unser visuelles System, um aus ihm die Entfernung der Gegenstände im Sichtfeld zu »errechnen«. Es weist also jedem der Objekte einen Abstand zu, und der Betrachter gewinnt einen räumlichen Eindruck der Situation.



Bewegt sich ein von uns betrachtetes Objekt von links nach rechts (1), erscheint es in Folge des Pulfrich-Effekts bei verdunkeltem linkem Auge ferner (2), als es in der Realität ist. Bei umgekehrter Richtung erscheint es hingegen näher (3).



Mit einem Spiegel lässt sich die 3-D-Illusion entlarven. Die blaue Linie symbolisiert die Bahn, die eine pendelnde Kugel zurücklegt. Deren Auf- und-ab-Bewegung ist hier vernachlässigt. Haben beide Augen freie Sicht, ergibt sich Situation a. Bei verdunkeltem linkem Auge tritt der Pulfrich-Effekt auf. Dann erscheinen, wie in b gezeigt, das reale wie das gespiegelte Objekt weiter entfernt. Würde die Kugel tatsächlich eine elliptische Bahn durchlaufen, sähe man mit zwei freien Augen Situation c.



Ein in 2-D gefilmtes Kettenkarussell in voller Bewegung ist ideal, um mit Hilfe des Pulfrich-Effekts und eines abgedunkelten Auges einen 3-D-Eindruck hervorzurufen.

Wir können unser Gehirn aber vor-sätzlich täuschen, wenn wir vor das linke Auge ein verdunkelndes Glas halten, während das rechte weiterhin freie Sicht hat. Richten wir den Blick nun auf einen Gegenstand, der sich von links nach rechts bewegt (Grafik links, 1). Das verdunkelte linke Auge reicht wegen des »visual delay« ein Bild ans Gehirn weiter, das den Gegenstand zu einem früheren Zeitpunkt auf seiner Bahn zeigt als das Bild vom rechten Auge. Der dazwischenliegende Winkel enthält nun nicht nur eine räumliche, sondern zusätzlich auch eine zeitliche Information.

Das visuelle System verrechnet sich

Von letzterer »weiß« das visuelle System aber nichts und errechnet daher eine falsche Entfernung: Der Gegenstand erscheint weiter entfernt, als er es tatsächlich ist (2). Bewegt er sich in umgekehrter Richtung, erscheint er hingegen näher (3).

An einem einfachen Fadenpendel lässt sich dies wunderbar demonstrieren. Lassen wir es senkrecht zur Blickrichtung in einer Ebene hin- und herschwingen und verdunkeln dann das

linke Auge. Während die Kugel nach rechts schwingt, erscheint sie weiter vom Betrachter entfernt; wenn sie sich nach links bewegt, scheint sie hingegen näher zu sein. Dabei verändert sich ihr scheinbarer Abstand kontinuierlich, denn die virtuelle Verschiebung ist umso größer, je schneller sich die Kugel bewegt. Und da die Kugel auf ihrem Weg vom tiefsten Punkt (in dem sie ihre größte Geschwindigkeit besitzt) zum Umkehrpunkt hin (in dem sie einen Moment lang völlig zur Ruhe kommt) immer langsamer und in der Rückschwingung wieder immer schneller wird, gewinnt der Betrachter den Eindruck, die Kugel würde eine geschlossene Kurvenbahn durchlaufen.

Die 3-D-Illusion lässt sich allerdings entlarven. Dazu positioniert man das Pendel vor einem senkrecht aufgestellten Spiegel. Sind beide Augen frei, sieht man die in der Grafik links unten skizzierte Bewegung (a). Die Auf-und-ab-Bewegung des Pendels haben wir dabei vernachlässigt. Verdunkelt man hingegen das linke Auge, sieht man die in b dargestellte Bewegungsfigur. Normalerweise würde ein Spiegelbild »vorne« und »hinten« vertauschen (c); hier aber

geschieht dies nicht – ein klarer Hinweis auf den Pulfrich-Effekt. Denn die reale Bewegung verläuft ebenso wie die virtuelle im Spiegel genau in der Schwingungsebene des Pendels. Und auf beide wirkt der Verzögerungseffekt gleich, sorgt also für dieselbe vermeintliche Bahnkrümmung.

Die Anordnung trickst demnach die eine optische Täuschung, nämlich die nur vorgegaukelte Spiegelwelt, mit der anderen, dem Pulfrich-Effekt, aus. Sie bringt zu Wege, was wir von einem ordentlichen Spiegel zumindest unbewusst stets erwarten, so unmöglich das auch immer sein mag: dass er rechts und links eben nicht vertauscht, dass er uns eine Spiegelung ohne Spiegelverkehrung liefert.

Mittlerweile wurde der Pulfrich-Effekt sogar schon in Fernsehsendungen eingesetzt; schließlich benötigt er weder besondere Kameras noch spezielle Projektoren oder Bildschirme. Damit er jedoch gut funktioniert, müssen sich die Objekte möglichst schnell und außerdem nur in eine Richtung bewegen. »Echten« 3-D-Filmen macht er darum keine Konkurrenz. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLEN

Pulfrich, C.: Die Stereoskopie im Dienste der isochromen und heterochromen Photometrie. In: Die Naturwissenschaften 10, S. 553–564, S. 569–574, S. 596–601, S. 714–722, S. 735–743, S. 751–761, 1922
Wilson, J.A., Anstis, S.M.: Visual Delay as a Function of Luminance. In: The American Journal of Psychology 82, S. 350–358, 1969

WEBLINK

Das Videoportal YouTube hält viele Filmbeispiele bereit. Auf www.spektrum.de/artikel/1152347 haben wir einige für Sie zusammengestellt.

MERKWÜRDIGES UND SCHERZHAFTES

Spiele mit Dimensionen

Aus den beiden Bedeutungen des Wortes »Dimension« – Anzahl der unabhängig voneinander wählbaren Koordinaten für einen Punkt einerseits, Bereich von Größenordnungen andererseits – und deren Zusammenhang ergibt sich Überraschendes über Milliarden von Erbsen und Menschen, einen Ölfleck und die Energieproduktion der Sonne.

VON NORBERT TREITZ

Vor wenigen Monaten hat die Anzahl der Menschen auf der Erde den Wert von sieben Milliarden überschritten. Kann man sich so eine (immerhin »natürliche«) Zahl irgendwie vorstellen?

Hoch entwickelte Säugetiere und Vögel können nicht zu große einstellige Zahlen auf einen Blick erfassen (Spektrum der Wissenschaft 6/2012, S. 12). Aber stellen Sie sich vor, Ihnen würde eine Auswahl von Haufen präsentiert. Einer enthält sieben Milliarden Erbsen, andere vielleicht die halbe, die doppelte, die vierfache Menge oder auch nur ein Viertel davon. Könnten Sie mit bloßem Auge und ein paar geschickten Überschlagsrechnungen den mit den sieben Milliarden herausfinden?

Wie sich herausstellt, kommt es entscheidend darauf an, in wie vielen Dimensionen man die Erbsen sortiert. Antike Philosophen grübelten über ein Paradoxon (»Sorites«), für das sie keine gute Auflösung fanden: Ab welcher natürlichen Zahl n bilden n Körner einen Haufen? Mein ehemaliger Duisburger Kollege Herbert Litschke, der inzwischen Professor in Wismar ist, schlug spaßeshalber folgende Lösung vor: Ab drei Dimensionen ist es ein Haufen. Möglicherweise kann man das ernst nehmen, als er es zunächst gemeint hat.

Ein kettenförmiger, also eindimensionaler Haufen von sieben Milliarden Erbsen der Dicke 5 Millimeter ist 35 000 Kilometer lang. Das sind $7/8$ des Erdumfangs. Der Erde würde also die Erbsenkette dort, wo sie am dicksten ist, nicht passen, aber immerhin auf knapp 29 Grad nördlicher oder südlicher Breite. Das hört sich recht handfest an, doch welche unmittelbaren Sinneserfahrungen haben wir mit dem Erdumfang? Von alters her geben wir große Wege als Reisezeiten an. Zu Fuß, per Reittier oder Fahrrad sind diese Zeiten Gegenstand unmittelbarer Sinneserfahrung, mit Auto, Bahn oder Flugzeug dagegen weniger. Nehmen wir 20 Kilometer pro Stunde für mäßig schnelles Radfahren. Der Erdumfang »dauert« dann 2000 Stunden oder etwas mehr als 83 Tage, nur geringfügig länger, als Jules Vernes Romanfigur Phileas Fogg unter Aufbietung der technischen Möglichkeiten seiner Zeit benötigte (Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 50). Ein Radfahrer, der Tag und Nacht durchstrampelt, hat nach knapp zweieinhalb Monaten das Ende der Erbsenkette erreicht. Das gibt ihm eine gewisse Vorstellung von der Zahl 7 Milliarden. Na ja.

Wie wäre es stattdessen in zwei Dimensionen? Wir kippen die Erbsen auf einen quadratischen Fußboden. Der

muss dann 418 Meter Kantenlänge haben. Ein Platz dieser Größe wäre gut zu überblicken.

In drei Dimensionen wird es noch kompakter: Unsere sieben Milliarden Erbsen passen in einen Würfel von knapp zehn Meter Kantenlänge – selbst dann, wenn wir uns jede Erbse in ein würfelförmiges Kästchen verpackt denken. Das ist nun erst recht gut überschaubar. Dass sich die Kugelpackung, in der Ebene wie im Raum, noch etwas optimieren lässt, ist diesmal ausnahmsweise nicht mein Thema.

Je größer die Zahl der Dimensionen, desto handlicher wird die Erbsenpackung. In zehn Dimensionen hätte der Würfel, der unsere sieben Milliarden Erbsen fasst, nur noch wenige Zentimeter Kantenlänge (Kasten unten). Dabei unterstellen wir, dass eine Erbse in jeder Dimension so weit ausgedehnt ist wie in den dreien, in denen wir leben. Zu ärgerlich, dass wir aus Mangel an Vorstellungsvermögen diese hochdimensionalen Räume nicht zur Erbsenzählerei nutzen können.

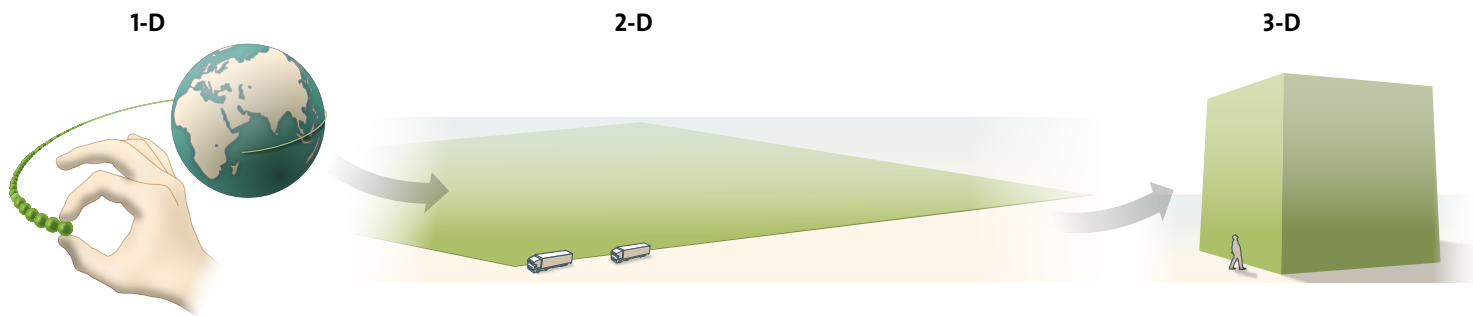
Thermische Ausdehnung

Zu den physikalischen Bagatelleffekten, die in der Schule – wegen durchaus interessanter Anwendungen – gemein wichtig genommen werden, ge-

Wie viele Erbsen passen in einen hochdimensionalen Würfel?

Ein n -dimensionaler Würfel der Kantenlänge L , gemessen in Erbsendicken, fasst L^n Erbsen, säuberlich im kubischen Gitter aufgereiht. (In einer optimalen Kugelpackung sind es noch weit mehr.) Für eine gegebene Anzahl N von Erbsen (zum Beispiel $N = 7 \cdot 10^9$) berechnet sich die erforderliche Kantenlänge

aus der Gleichung $L^n = N$ zu $L = \sqrt[n]{N}$. Durch Logarithmieren ergibt sich $\lg L = \lg N/n = 9,845/n$ (Zehnerlogarithmen). Ab $n=10$ ist $\lg L$ kleiner als 1 und damit L kleiner als 10. Dann passen so viele Erbsen, wie es Menschen gibt, in einen Würfel, dessen Kante nur knapp zehn Erbsenlängen misst.



ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

hört die thermische Ausdehnung. Angenommen, ein Material wird durch Erwärmung um, sagen wir, 20 Grad je ein Promille länger, dicker und breiter. Das ist sehr viel, aber bequem und anschaulich zu rechnen. Um wie viele Promille vergrößert sich dabei der Innenraum einer Flasche? Oder wird er gar kleiner, weil die Wände ja dicker werden?

Wir stellen uns die Flasche aus Glaswürfeln aufgebaut vor und den Innenraum aus ebenso großen Luftwürfeln. Werden nun diese Würfel in jeder der drei Dimensionen um den Faktor $(1+x)$ größer, so wachsen auch alle Wandlängen, -breiten und -dicken um diesen Faktor, alle Volumina also um den Faktor $(1+x)^3$ oder $1+3x+3x^2+x^3$, wie sich durch Ausmultiplizieren nach der binomischen Formel ergibt.

Nun beginnt eine Näherungsrechnung: x sei »klein gegen 1«. Damit ist gemeint, dass der Unterschied von 1 und $1+x$ gerade noch von Bedeutung ist, der zwischen 1 und $1+x^2$ oder dem Entsprechenden mit noch höheren Potenzen aber als unwesentlich vernachlässigt werden soll. $x = 1$ Promille ist ein typisches Beispiel: Auf ein Tausendstel kommt es noch an, auf ein Millionstel oder gar Milliardstel aber nicht mehr.

Die obige Formel sagt uns nun, dass die eindimensionale Änderung um ein Promille eine dreidimensionale um »wenig mehr als« drei Promille nach sich zieht. In der Formelsammlung liest sich das dann kurz und treffend so: Der kubische Ausdehnungskoeffizient ist rund dreimal so groß wie der lineare.

Eine Verdopplung aller Längen, Breiten und Dicken bringt dagegen eine Verachtfachung des Volumens, also einen Zuwachs um 7000 Promille: x ist

dann nicht 0,001, sondern 1. Die binomische Formel gilt immer noch, aber nicht die Bedingung, dass x klein gegen 1 sein soll.

Zeichnet man den Würfel mit und ohne Vergrößerung, so sieht man ohne Weiteres, welche Quader man wann vernachlässigen kann und welche nicht. Das Quecksilber steigt also bei Erwärmung im Thermometer, obwohl dessen Hohlraum größer wird, und dem wäre nicht so, wenn es sich nicht stärker ausdehnen würde als das Glas.

Wenn Ihnen das Ganze auch schon vor diesen Erklärungen trivial erschien, fragen Sie einmal Ihre Bekannten – und seien Sie nicht zu sehr enttäuscht.

Der Ölfleckversuch

Lassen wir nun in Gedanken die Erbsen auf Atomgröße schrumpfen, so dass wir mit bloßem Auge ihre Größe nicht mehr erkennen, geschweige denn sie zählen können. Durch ein geschicktes Spiel mit Dimensionen können wir trotzdem die Dicke des einzelnen Objekts bestimmen.

Wir füllen ein bestimmbares Volumen, sagen wir einen Würfel von makroskopisch messbarer Kantenlänge, mit Erbsen (wie viele das sind, können wir nicht wissen) und schütten sie sorgfältig auf den Fußboden, so dass nirgends eine Erbse auf eine andere zu liegen kommt. Dann ist die (messbare) Fläche des Erbsenteppichs mal die unbekannte Dicke einer Erbse gleich dem zuvor gemessenen Gesamtvolumen – also kann man aus den beiden Messgrößen die Erbsendicke bestimmen.

Mit echten Atomen statt Erbsen geht das so: Man präpariert eine genau bemessene Mischung aus wenig Öl und

Sieben Milliarden Erbsen werden erst dann einigermaßen übersichtlich, wenn man sie dreidimensional verpackt.

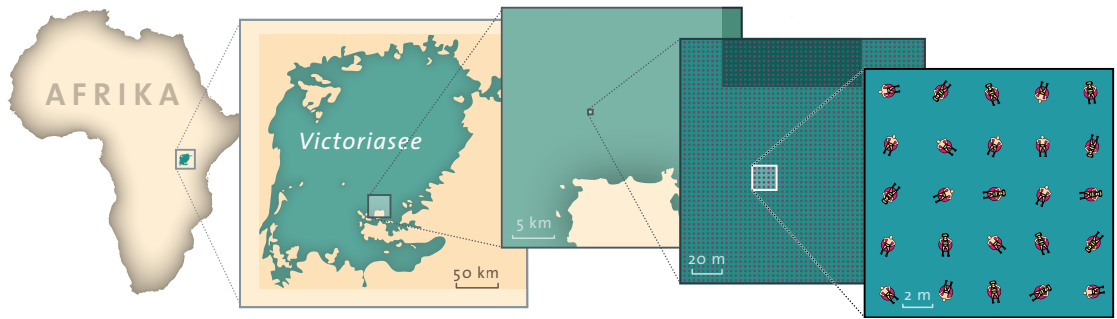
viel Benzin und gibt einen Tropfen davon vorsichtig auf eine Wasseroberfläche. Das Benzin hilft dem Öl, sich in einer nur ein Molekül dicken Schicht auf dem Wasser zu verteilen, und verdunstet dann rasch. Übrig bleibt ein Ölfleck. Man misst dessen Fläche, indem man beobachtet, wie weit er zuvor auf der Wasseroberfläche ausgestreutes Lycopodium (Bärlappsporen) wegschiebt. Wie bei den Erbsen gewinnt man daraus eine Größenordnung für die Länge eines Ölmoleküls und damit auch für die Durchmesser seiner Atome.

Historisch ist der Ölfleckversuch von großer Bedeutung. Immerhin war es noch am Ende des 19. Jahrhunderts fast eine Glaubensfrage, ob man Atome für wirkliche Objekte oder bestenfalls eine nützliche Modellvorstellung hielt. Inzwischen erlauben uns Geräte wie das Tunnelmikroskop einen etwas direkteren Blick auf einzelne Atome.

Mordanschlag oder Scherzaufgabe?

Was geschieht, wenn man an Stelle der Ölmoleküle Menschen verwendet? Im Sommer 1998 hatte der Regietheaterregisseur Christoph Schlingensief die vier Millionen Arbeitslosen in Deutschland aufgefordert, gleichzeitig, nämlich am 2. August, in dem 13 Quadratkilometer großen See zu baden, an dem Bundeskanzler Helmut Kohl in jedem Sommer Urlaub zu machen pflegte. Kohl sollte damit zumindest durch das Überlaufen des Sees erschreckt werden. Eine spätere Literaturnobelpreisträger-

Alle Menschen dieser Welt könnten zugleich im Victoriasee planschen – mit durchaus komfortablen drei Meter Abstand zu den Nachbarn.



rin fürchtete für den Fall ihrer Teilnahme um ihr Leben, und die »New York Times« sprach am 25. August 2010 in einem Nachruf auf den inzwischen verstorbenen Schlingensief von einer »theoretisch möglichen« Überflutung des ganzen Salzkammerguts.

Ein Parteifreund des Regisseurs hat immerhin die Grundrechenarten angewandt und ausgerechnet, dass 4 Millionen mal 0,06 Kubikmeter (das durchschnittliche Körpervolumen eines Erwachsenen) geteilt durch 13 Quadratmeter nur knapp 2 Zentimeter sind. Um den Wasserspiegel um die eigentlich beabsichtigten 2 Meter steigen zu lassen, bräuchte man also die 100-fache Anzahl von Badegästen – und etliche Millionen Schnorchel, denn so viele Leute passen nicht nebeneinander auf die Oberfläche des Sees.

Denken Sie sich eine telefonzellenförmige Badewanne mit einem Quadratmeter Grundfläche. Um das Wasser darin um 2 Meter steigen zu lassen, müssten etwa 25 Menschen zugleich darin baden, wie Sie leicht abschätzen können. Auf einem See beliebiger Größe wäre die für diesen Anstieg erforderliche Bevölkerungsdichte die gleiche.

Nehmen wir für Wasserstandsschätzungen lieber einen See, der wesentlich größer ist als der Wolfgangsee, etwa den Victoriasee in Ostafrika mit seinen 69 000 Quadratkilometern, lassen dann aber auch alle sieben Milliarden Erdbewohner zugleich darin baden. Dadurch steigt der Wasserspiegel um ganze 4 Millimeter, und die Bevölkerungsdichte der Badenden beträgt etwas mehr als 100 000 pro Quadratmeter – ein Gitter von Menschen mit drei Meter Abstand voneinander. So ein Zustand wäre mit Schwimmreifen nicht einmal

unbequem, allerdings wäre die Anreise über mehrere hundert Kilometer Wasserfläche recht mühsam und müsste sorgfältig geplant werden. Die Schiffe, welche die Badenden an ihren Platz befördern, sollten ja die bereits Ausgesetzten möglichst nicht überfahren.

Da kann man sich schon eher vorstellen, dass alle Menschen weltweit gleichzeitig Badeurlaub an ihrer jeweils nächstgelegenen Meeresküste machen. Das Wasser steigt dabei in den Ozeanen um 1,2 Mikrometer. Allerdings lässt uns die Berechnung mit der Erbsenkette vermuten, dass die Leute nicht nebeneinander an der Küste stehen können, sondern in mehreren Reihen hintereinander ins Meer hinein ausweichen müssen, und das, obwohl die fraktale Küstenlinie länger ist als der Erdumfang.

Reale Bevölkerungsdichten

Gemittelt über die gesamte Erdoberfläche leben 13 Menschen pro Quadratmeter, auf dem Landanteil rund 50. Das ist angesichts der großen kaum bewohnbaren Teile der Erde erstaunlich viel. Die Menschen sind sehr ungleichmäßig auf die Länder und Regionen verteilt, und je genauer man hinschaut, desto stärker sind die Abweichungen vom Durchschnitt.

Unter den Flächenstaaten in Europa halten die Niederlande den Rekord mit 402 Einwohnern pro Quadratmeter, werden aber übertroffen von Nordrhein-Westfalen mit 523. Im Weltmaßstab führt Bangladesch mit rund 1000 die Liste an, wird aber in den Schatten gestellt von Zwergstaaten wie Monaco und dem Vatikan und vor allem grünflächenarmen Bezirken von Metropolen. Im 11. Arrondissement der Stadt Paris, das zwischen den Metrostationen

Bastille, Nation und République liegt, leben über 40 000 Menschen pro Quadratmeter. Wenn die Leute dort gleichmäßig auf die Bodenfläche verteilt ständen, hätte jeder von seinen Nachbarn nur fünf Meter Abstand. Es lebe die mehrstöckige Bauweise, also eine begrenzte Ausweitung in die dritte Dimension!

Hier könnte man Betrachtungen einfügen über Rekordversuche von möglichst vielen Menschen in einer Telefonzelle oder über die Größe von Kabinen oder Kojen in großen Schiffen. Die schlimmsten Fälle von Massensamenhaltung gab es wohl bei der Verschleppung von Sklaven über den Atlantik. Bei größeren Anzahlen wird deutlich, dass das, worauf es für die Menschen zum Wohnen ankommt, nicht das Volumen ist, sondern die Fläche, vor allem wegen der Zufuhr von Luft, Wasser und Licht.

Die Solarkonstante

Unsere Sonne ist bekanntlich eine ungeheuer ergiebige Energiequelle. Auch hier werden gewisse sehr große Zahlen erst vorstellbar, wenn man sie zum Beispiel durch die Anzahl der Menschen auf der Erde teilt.

Die Energiestromdichte des Sonnenlichts am Ort der Erde, die so genannte Solarkonstante, beträgt rund 1,38 Kilowatt pro Quadratmeter. Unser Blauer Planet schickt etwa ein Viertel von dem, was er bekommt, im Wesentlichen unverändert in den Weltraum zurück, bevor es den Boden erreicht (»Albedo«). Der Rest wird erst absorbiert und dann zeitversetzt in energieärmeren Photonen als Wärmestrahlung wieder abgegeben. Hinzu kommt noch etwas Energie aus dem Erdinneren.

Für uns nutzbar bleibt also rund ein Kilowatt auf jedem Quadratmeter des Erdquerschnitts übrig. Bei einer Kugel ist die Oberfläche genau viermal so groß wie diese Querschnittsfläche. Also trifft auf jeden Quadratmeter der Erdoberfläche, gemittelt über Tages- und Jahreszeiten und über alle Klimazonen, immerhin 1/4 Kilowatt Licht.

Ein Mensch hat einen Grundumsatz von rund einem Watt pro Kilogramm Körpermasse, also 100 Watt oder eher weniger. Das ist die Leistung, die er aus Nahrung und Sauerstoff bei deren Umwandlung in (hauptsächlich) CO₂ und Wasserdampf gewinnt und die wenige Wochen vorher grüne Pflanzen beim umgekehrten Vorgang (der Photosynthese) dem Sonnenlicht entnommen haben. Wenn man dabei noch körperlich arbeitet, erhöht sich der Umsatz zeitweise auf ein Mehrfaches. Die Werte, die früher die Arbeiter beim Bau von Pyramiden oder Kathedralen erreichten, kommen heute fast nur noch bei der Tour de France vor.

Damit könnte man eigentlich ganz munter leben, aber in der Industriegesellschaft setzen wir mit Verkehrsmitteln, geheizten Wohnungen und (anteilig) mit Industrieanlagen pro Person und im Zeitmittel das 50- bis 100-Fache unseres Körpers um (5 Kilowatt in Europa und 10 in den USA) und bezahlen das auch: direkt an der Tankstelle, beim Heizölhändler oder Stromversorger, indirekt beim Kauf jedes Gegenstands, für dessen Herstellung Energie aufgewendet wurde (also praktisch aller Gegenstände). In der Energiebilanz ist das so, als würden im Sinn (echter) spätrömischer Dekadenz 50 Sklaven mit je 0,1 Kilowatt körperlich für Ihre Bequemlichkeit arbeiten. So gut wie wir hatte es die römische Oberschicht bei Weitem nicht, und das nicht nur, weil es viel weniger Sklaven gab, als unserer Energieverschwendung entsprechen würde.

Können wir denn dieses 50-Fache unserer eigenen Leistung überhaupt aus der aktuellen Sonnenenergie ziehen, wenn die fossilen Brennstoffe, die wir zurzeit 500 000-mal so schnell verbrauchen, wie sie vor Jahrmillionen entstanden sind, in absehbarer Zukunft er-

schöpft sind? Auf jeden Quadratmeter der Erdoberfläche, auf dem im Mittel die erwähnten 13 Menschen wohnen, strahlen nach Abzug der Albedo durchschnittlich 250 Megawatt, pro Person also knapp 20 Megawatt. Das ist deutlich mehr als der Grundumsatz von 100 Watt pro Person; es übertrifft sogar den »technischen Umsatz« von 5 Kilowatt um drei bis fünf Zehnerpotenzen. Hier ist also noch viel Platz. Wir müssen nur einen sehr kleinen Teil des Erdbodens für Landwirtschaft oder Sonnenkollektoren in Anspruch nehmen, können uns bei der Bereitstellung und beim Verbrauch von Energie mit schlechten Wirkungsgraden zufriedengeben, und für die anderen Teile der Biosphäre bleibt immer noch das meiste übrig. Jedenfalls scheitert die Absicht, unseren Energieluxus allein aus der gegenwärtigen Leistung der Sonne (Wasser- und Windkraft eingeschlossen) zu befriedigen, nicht daran, dass die Sonne zu wenig liefern würde.

Leistung pro Masse

Ein Studienkollege von mir war sehr stolz auf das beschleunigungsgünstige Verhältnis aus Leistung und Masse seines leicht übermotorisierten Kleinwagens. Dieses Verhältnis ist für ein Auto bei Vollgas um bis zu drei Zehnerpotenzen größer als für einen ruhenden Menschen, zum Glück aber nicht im Zeitmittel rund um die Uhr. Für große Schiffe ist es kaum größer als für Menschen, für Flugzeuge dagegen vergleichbar den Autos.

Will ein Mensch sich mit möglichst geringem Leistungsaufwand fortbewegen, sind die Wadenmuskeln optimal: recht bequem auf dem Fahrrad, deutlich anstrengender aber im »Gossamer Albatross«, mit dem der Mensch nicht nur segeln, sondern mit eigener Kraft fliegen kann (wie 1979 über den Ärmelkanal). Dazu muss der Flieger das Leistungs-Masse-Verhältnis eines trainierten Radrennfahrers aufbringen, also deutlich mehr als das eine Watt pro Kilogramm. Vergleicht man verschiedene Tierarten, so ist dieses Verhältnis umso größer, je kleiner das Tier ist. Für Säugetiere und Vögel gilt die Regel von

Kleiber mit dem Exponenten 3/4 (SdW 5/2010, S. 32). Die kleinsten von ihnen kommen auf etwa 10 Watt pro Kilogramm Grundumsatz.

Wie mag das Verhältnis für einen Stern wie die Sonne sein? Sie liefert bei uns, also in 150 Millionen Kilometer Abstand, die genannten 1,38 Kilowatt pro Quadratmeter ab. Da sie keine Richtung bevorzugt, errechnet sich daraus die Leistung $4 \cdot 10^{26}$ Watt. Geteilt durch ihre Masse von $1,97 \cdot 10^{30}$ Kilogramm ergibt das 0,2 Milliwatt pro Kilogramm.

Wenn eine wohlmeinende Fee jedem einzelnen Menschen ein Stück von der Sonne mit der für ihn ausreichenden Leistung von 100 Watt schenken wollte, müsste dieses so schwer sein wie 80 000 Menschen, passend aus inneren und äußeren Teilen der Sonne gemischt und trotzdem zur Kernfusion fähig, wie immer das gehen mag. Aufbewahrung und Handhabung werfen weitere Probleme auf.

Gemessen an Lebewesen oder technischen Geräten leistet die Sonne also in Relation zu ihrer Masse ausgesprochen wenig. Wir sollten aber nicht vergessen, dass diese 80 000 Menschenmassen Sonnenmaterial auch den Brennstoff für noch Milliarden von Jahren in sich enthalten. Im Gegensatz zu einem Vogel oder Flugzeug muss die Sonne ja niemals auftanken. Wir sollten froh darüber sein, dass die schwache Wechselwirkung die Kernfusion so langsam ablaufen lässt. ~

DER AUTOR



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

WEBLINKS

www.berliner-zeitung.de/archiv/musskohl-nach-hause-fahren-10810590_9447002.html

Die »Berliner Zeitung« über Schlingensiefel und seine Badeaktion

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152348

Die Geometrie der Horizonte

Mathematiker versehen abstrakte geometrische Räume mit einem Rand, der wie die Fluchtpunkte in der perspektivischen Malerei das Unendliche einfängt. Dieses neue theoretische Werkzeug hat Anwendungen weit über die Geometrie dieser Räume hinaus gefunden.

Von Françoise Dal'Bo-Milonet

Für uns ist es ein vertrautes Bild: Zwei parallele Geraden – zum Beispiel Eisenbahnschienen oder Straßenränder – scheinen sich in einem Punkt zu treffen. Auf einer Fotografie oder Zeichnung tun sie das auch. Aber in Wirklichkeit schneiden sie sich nirgends; das ist schließlich die Definition von parallel. Die Maler der Renaissance im 15. Jahrhundert setzten als Erste diesen Schnittpunkt zweier Parallelen, den es eigentlich gar nicht gibt, als Fluchtpunkt auf die Leinwand. Das löste eine Revolution in der bildenden Kunst aus: die Eroberung der Perspektive.

Damit hatten die Künstler den unendlich fernen Horizont in die Ebene hineingeholt, handhabbar gemacht und nebenbei den fundamentalen Unterschied zwischen dem Endlichen und dem Unendlichen ein bisschen gemildert. Zwei Jahrhunderte später vollzog der Architekt und Mathematiker Girard Desargues (1591–1661) diesen Schritt in wissenschaftlicher Strenge nach. Um die verschiedenen Methoden der perspektivischen Darstellung zu vereinheitlichen, entwarf er eine Struktur, welche die gewöhnliche Ebene enthält, in der aber zwei Geraden sich stets schneiden – auch parallel. Deren Schnittpunkt ist ein »unendlich ferner Punkt«, und alle unendlich fernen Punkte zusammen bilden die unendlich ferne Gerade. Damit legte er den Grundstein für das, was man heute »projektive Geometrie« nennt.

Im damaligen Bewusstsein war jedoch die Geometrie, die der antike Mathematiker Euklid (325–265 v. Chr.) auf einen kleinen Satz von Axiomen gegründet hatte (womit er auf

Jahrtausende stilbildend für die Mathematik wirkte), die einzige überhaupt denkbare. Diesen Alleinvertretungsanspruch anzufechten, kam einer Revolution gleich; da Desargues zudem seine Werke in einem wenig wissenschaftlichen Stil verfasst hatte, geriet er bald in Vergessenheit.

Erst im 19. Jahrhundert wandten die Wissenschaftler ihre Aufmerksamkeit über die geometrischen Figuren hinaus dem Raum zu, der sie enthält. Um 1850 wurde die erste nicht-euklidische Geometrie entdeckt, und just zu dieser Zeit erwarbten auch Desargues' Ideen aus ihrem Dornröschenschlaf. Man fasste die unendlich fernen Punkte der projektiven Geometrie in einen formalen Begriffsrahmen, dessen Weiterentwicklung heute »visueller Rand« heißt.

In den letzten 40 Jahren haben die Mathematiker, allen voran der Amerikaner George Mostow, diese Beziehung zu einem wertvollen theoretischen Instrument ausgebaut. Mit seiner Hilfe lassen sich Probleme aus einem unbegrenzten geometrischen Raum in einen begrenzten übertragen, der auch noch weniger Dimensionen hat. Die Vorteile dieses Ansatzes seien an zwei Gegenständen der aktuellen Forschung erläutert: hyperbolischen Mannigfaltigkeiten, das sind geometrische Objekte, an denen Topologen und Kosmologen arbeiten, und regelmäßigen nichteuklidischen Pflasterungen.

Der hyperbolische Raum

Schon seit der Antike war das fünfte Postulat in der Geometrie des Euklid, das berüchtigte Parallelenaxiom, Gegenstand intensiver Diskussion. In seiner bekanntesten Version besagt es, dass es durch einen Punkt P der Ebene, der nicht auf einer Geraden g liegt, genau eine Gerade gibt, die g nicht schneidet (Bild S. 62/63 oben, **a**). Da diese Aussage schon vom Wortlaut her viel weniger elementar ist als die anderen Axiome, haben die Mathematiker mehr als zwei Jahrtausende lang ihrem Status als (unabhängigem) Axiom misstraut und versucht, sie aus den übrigen vier Axiomen herzuleiten.

Erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts wurde klar, warum diese Versuche zum Scheitern verurteilt waren. Das fünfte Axiom ist in der Tat unabhängig von den anderen, denn es gibt »nichteuklidische« Geometrien: solche, die zwar die ersten vier Axiome, nicht aber das fünfte erfüllen. Die ersten

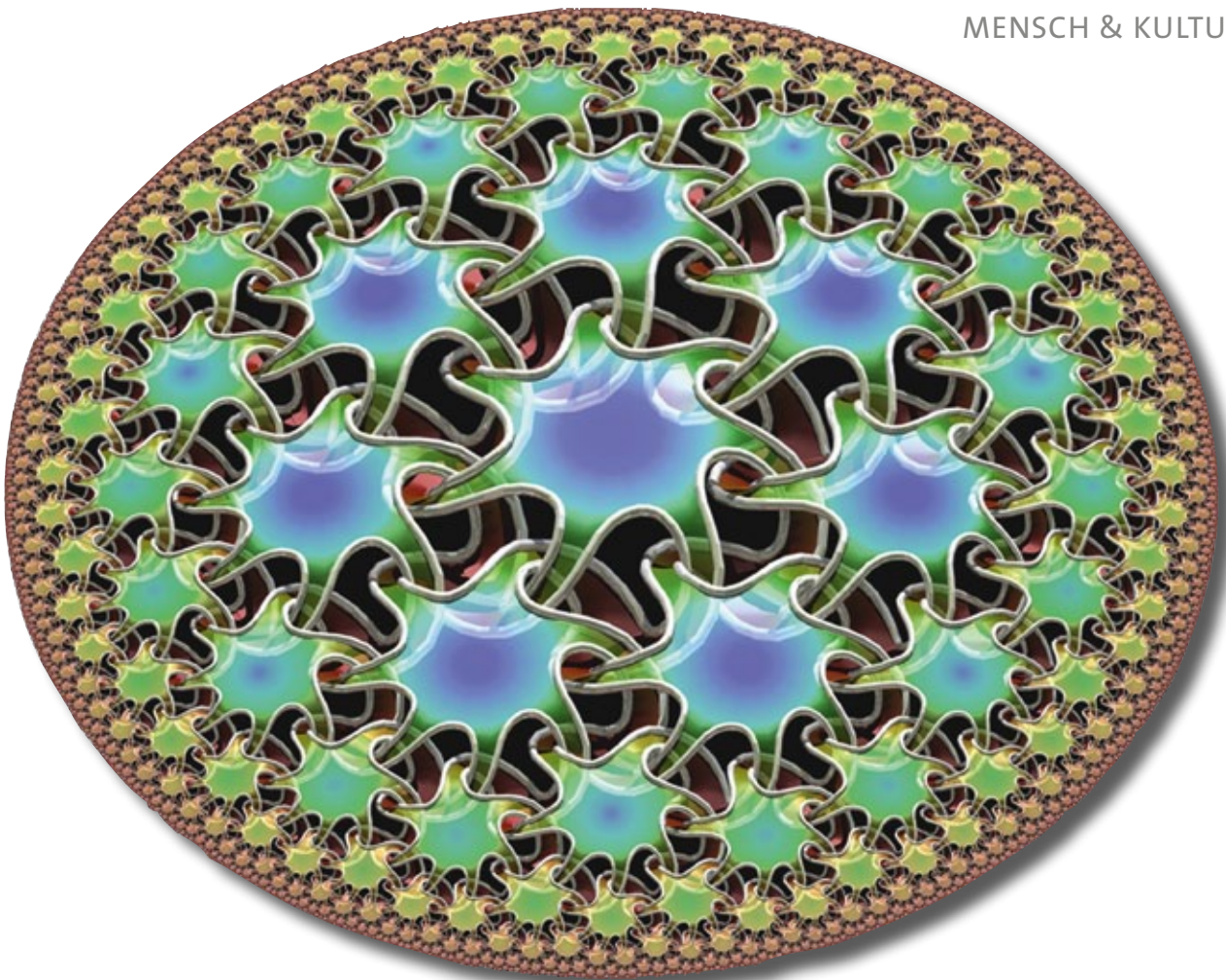
AUF EINEN BLICK

KOMPAKTIFIZIERUNG

1 Mathematiker haben Methoden entwickelt, um den **Horizont eines unbeschränkten geometrischen Raums** in einen endlichen Rand zu verwandeln, der den Raum abschließt.

2 Mit ihrer Hilfe können sie schwierige Probleme **auf einfachere Räume übertragen** und dadurch besser zugänglich machen.

3 Diese Methoden lassen sich insbesondere bei Flächen und ihren Verallgemeinerungen, den »**Mannigfaltigkeiten**«, sowie **in der Zahlentheorie** anwenden.



PAUL NYLANDER, WWW.BUGMAN13.COM

Beispiele haben der Ungar János Bolyai (1802–1860) und der Russe Nikolai Lobatschewski (1792–1856) veröffentlicht. Schon davor hatte Carl Friedrich Gauß (1777–1855), der »Fürst der Mathematiker«, Vergleichbares gefunden, aber aus Furcht vor den Anfeindungen seiner Fachkollegen unveröffentlicht im Schrank liegen lassen – was diese verständlicherweise nicht begeisterte. Der neu entdeckte nichteuklidische Raum, der »hyperbolisch« heißt, ähnelt in vieler Hinsicht der euklidischen Ebene, aber mit einem entscheidenden Unterschied: Der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten ist kein euklidisches Geradenstück. An die Stelle der Geraden treten die so genannten Geodäten (Linien kürzesten Weges), und die erfüllen das fünfte Axiom nicht, wie wir sehen werden.

Die Sphäre, ein unerlaubter geometrischer Raum?

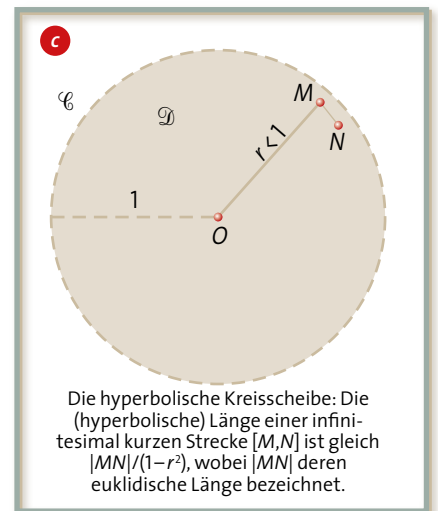
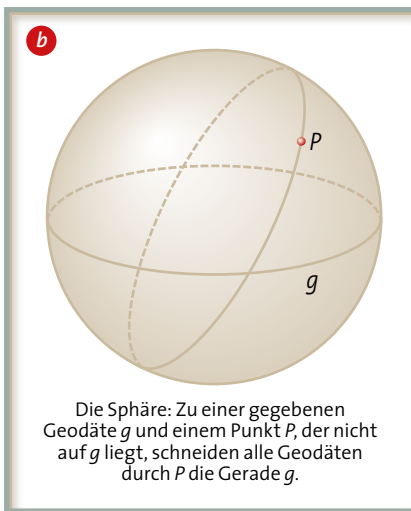
Es gibt einen weiteren Raum, in dem das fünfte Axiom nicht gilt: die Sphäre, das ist der Rand einer dreidimensionalen Kugel. Die Mathematiker kannten sie natürlich, kamen aber, wohl wegen der unangefochtenen Herrschaft der euklidischen Geometrie, jahrhundertlang nicht auf die Idee, sie als eigenständigen Raum ernst zu nehmen. Nur Kosmologen haben bisweilen darüber nachgedacht, ob unser Universum einer 3-Sphäre – das heißt dem dreidimensionalen Rand einer vierdimensionalen Kugel – gleichen könnte und damit sowohl grenzenlos als auch von endlichem Volumen wäre.

Eine künstlerische Darstellung, von der hyperbolischen Kreisscheibe inspiriert: Der eigentlich unendlich ferne Horizont entspricht dem Rand des Kreises.

Seefahrer wissen es schon lange: Der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten auf der Oberfläche der Erde liegt auf einem Kreis, dessen Mittelpunkt mit dem der Erde zusammenfällt: einem Großkreis (Bild S. 62/63 oben, **b**). Zwei Großkreise (»Geodäten der Sphäre«) schneiden sich stets. Es gibt also durch einen Punkt P außerhalb einer Geodäten g keine Parallele zu g . Hier und im Folgenden sollen zwei Geodäten parallel heißen, wenn sie sich nicht schneiden.

Überkreuzen sich zwei Geodäten stets in mindestens einem Punkt, dann muss der zugehörige Raum von begrenztem Volumen (genauer: kompakt, siehe Kasten S. 64) sein. Das aber, so der Historiker François Russo, war nicht mit der Vorstellung der Mathematiker von einem Raum vereinbar – nicht einmal für Lobatschewski und Bolyai.

Der Deutsche Bernhard Riemann (1826–1866) hat dieses Denkhindernis aus dem Weg geräumt, indem er an die Stelle der noch unklaren Vorstellungen von einem Raum den präzisen Begriff der Mannigfaltigkeit setzte. Das ist eine Menge, die »lokal«, also in der näheren Umgebung jedes ihrer Punkte, aussieht wie ein euklidischer Raum fester Dimension n .



Einige Eigenschaften der euklidischen Ebene (a) und zweier nichteuklidischer Räume: der Sphäre (b) und der hyperbolischen Kreisscheibe (c bis f).

Die Sphäre ist eine spezielle Mannigfaltigkeit der Dimension 2 und steht als solche gewissermaßen gleichberechtigt neben den Räumen von Euklid und Bolyai-Lobatschewski.

Seitdem gehören alle drei Geometrien, die euklidische, die hyperbolische und die sphärische, zum festen Bestand der Mathematik. Jede Mannigfaltigkeit fällt in eine der drei Klassen; welche es ist, kann man für besonders regelmäßige Exemplare daran erkennen, wie sich deren Geometrie zum Parallelenaxiom verhält. Wie viele Parallelen gibt es zu einer Geodäten g durch einen Punkt P , der nicht auf g liegt?

- Gar keine: Dann ist die Geometrie sphärisch;
- genau eine: euklidisch;
- mehr als eine (dann gleich unendlich viele): hyperbolisch.

Euklidische und hyperbolische Länge

In welchem Sinn existiert der Raum von Bolyai und Lobatschewski? Die beiden Mathematiker hatten nur eine abstrakte Beschreibung abgegeben. Das erste konkret handhabbare Modell stammt von dem Franzosen Henri Poincaré (1854–1912): die hyperbolische Kreisscheibe.

Man nehme dazu eine Kreisscheibe \mathcal{D} mit Mittelpunkt O und Radius 1 in der euklidischen Ebene. Der Rand \mathcal{C} des Kreises gehört schon nicht mehr dazu. Auf dieser »offenen« Scheibe erlassen wir eine neue Vorschrift zur Entfernungsmessung: Der Abstand zwischen einem Punkt M , der den euklidischen Abstand r vom Mittelpunkt hat, und einem dicht benachbarten Punkt N sei gleich deren euklidischem Abstand geteilt durch $(1-r^2)$ (Bild oben, c).

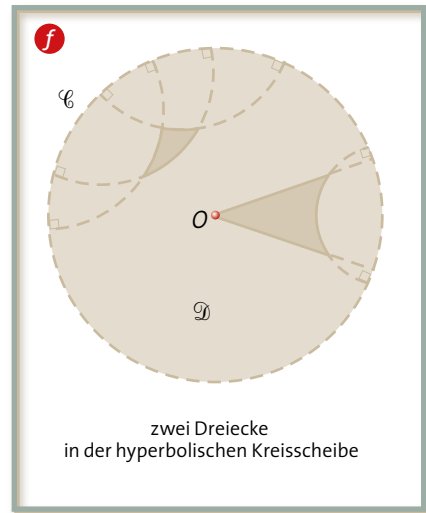
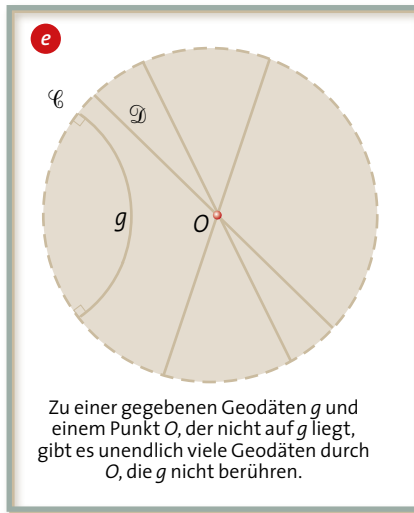
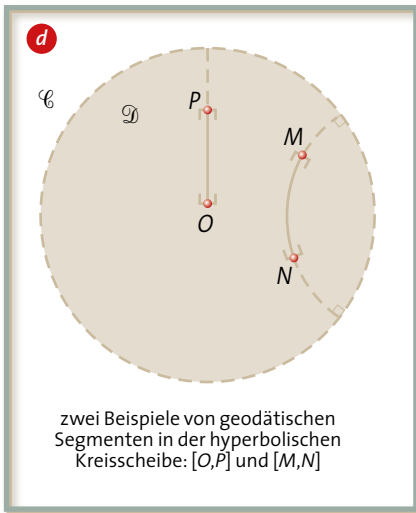
Merkwürdigerweise genügt es festzulegen, wie sehr kleine (»infinitesimale«) Entfernungen bestimmt werden sollen (exakt gilt diese Festlegung sogar nur im Grenzwert verschwindend kleiner Entfernungen). Um die Länge eines Kurvenstücks zu bestimmen, legt man eine Reihe von Punkten

auf die Kurve und approximiert die Länge der Kurve durch die Summe der Entfernungen von einem Punkt zum nächsten. Legt man die Punkte immer dichter, so dass die Entfernungen benachbarter Punkte immer kleiner werden, dann strebt der Näherungswert gegen die exakte Länge der Kurve. Die Entfernung zweier – nicht unbedingt dicht benachbarter – Punkte M und N ist gleich der Länge der kürzesten Kurve von M nach N .

In der Mitte der Kreisscheibe, wo r annähernd gleich null ist, verhalten sich die Entfernungen so, wie wir es gewohnt sind. Gegen den Rand zu werden sie jedoch immer größer, weil der Nenner $1-r^2$ der Null immer näher kommt. Der Rand der Kreisscheibe selbst ist gar nicht erreichbar, weil der Weg dorthin unendlich lang ist.

Die poincarésche Kreisscheibe ist gewissermaßen ein Bild der unendlich ausgedehnten hyperbolischen Ebene, das mit einem sehr merkwürdigen Vergrößerungsglas (eigentlich Verkleinerungsglas) gewonnen wurde (Spektrum der Wissenschaft 10/1990, S. 12). Die Punkte in der Mitte bildet es einigermaßen korrekt ab. Die weitab vom Mittelpunkt gelegenen Gebiete werden dagegen so stark verkleinert, dass die ganze unendliche Welt in diese endliche Kreisscheibe passt. In der hyperbolischen Wirklichkeit des Bilds auf S. 61 sind die siebenarmigen Tintenfische alle gleich groß. Dass sie gegen den Rand zu immer kleiner zu werden scheinen, liegt an der Verzerrung durch das Verkleinerungsglas.

Man kann zeigen, dass die Geodäten in der poincaréschen Kreisscheibe genau die Kreisbögen sind, die den Randkreis \mathcal{C} in zwei Punkten schneiden und in diesen Punkten senkrecht auf ihm stehen, plus die Kreisdurchmesser, also die euklidischen Geradenstücke, die durch den Mittelpunkt O gehen (und ebenfalls \mathcal{C} im rechten Winkel schneiden). Anders ausgedrückt: Die kürzeste Verbindung zweier Punkte M und N liegt auf der euklidischen Geraden durch M und N , falls diese durch O verläuft, ansonsten auf dem Kreisbogen durch M und N , der den Außenkreis \mathcal{C} zweimal rechtwinklig schneidet (Bild oben, d). Wie im euklidischen Fall bestimmen zwei Punkte eindeutig eine Geodäte.



ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS FÜR L'ASCIENCE

In dieser neuen Geometrie ist die Aussage des fünften euklidischen Axioms falsch. Tatsächlich gibt es zu einer gegebenen Geodäten, zum Beispiel einem Kreisbogen, unendlich viele andere Geodäten, die diese nicht treffen, also zu ihr parallel sind. Ein Beispiel ist ein geeignetes Bündel von Kreisdurchmessern (Bild oben, **e**).

Ein Dreieck in der hyperbolischen Ebene besteht wie ein euklidisches aus drei Punkten, die durch Geodätenstücke miteinander verbunden sind. Bemerkenswerterweise ist die Winkelsumme im hyperbolischen Dreieck stets kleiner als 180 Grad (Bild oben, **f**); mehr noch: Sie kann jeden Wert kleiner als 180 Grad annehmen, im Gegensatz zur Winkelsumme eines euklidischen Dreiecks, die stets gleich 180 Grad ist.

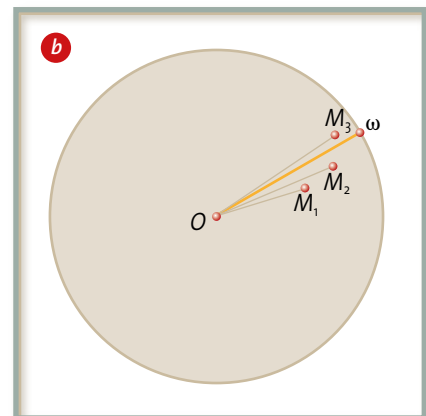
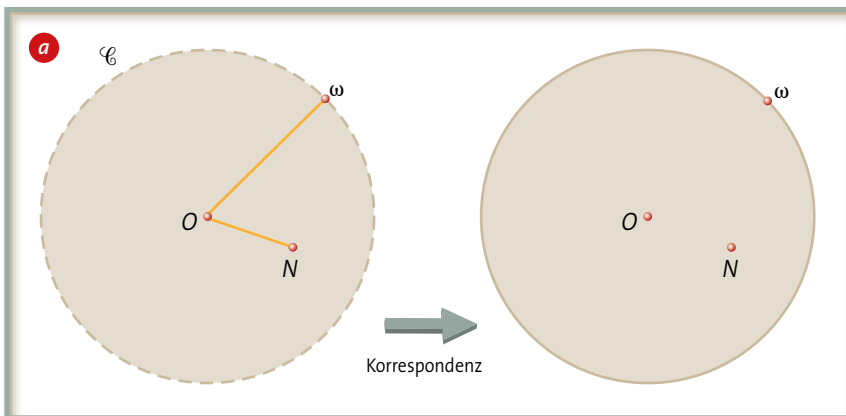
In einem gewissen Sinn ist die hyperbolische Geometrie weniger rigide als die euklidische. Sie erlaubt Dinge wie zum

Beispiel Fünfecke mit fünf rechten Winkeln oder gar – in drei Dimensionen – Dodekaeder aus solchen Fünfecken (Bild S. 67), die in der klassischen Geometrie unmöglich sind.

Die Kreislinie \mathcal{C} ist ein legitimer Bestandteil der euklidischen Ebene, aber in der hyperbolischen Welt gibt es sie eigentlich nicht, denn sie ist ja unendlich weit von allen Punkten in \mathcal{D} entfernt. Wie kann man diesen nichtexistenten Kreis in hyperbolischen Begriffen beschreiben? Stellen wir uns vor, der Punkt O sei eine Lichtquelle, die in alle Richtungen leuchtet. Das Licht breitet sich entlang der Geodäten aus, also in diesem Fall in (euklidisch) gerader Linie von O zu einem Punkt ω auf \mathcal{C} . Da diese Geodäten (hyperbolisch gemessen) unendlich lang sind, kann man sich ω als einen Punkt am Horizont vorstellen.

Indem man jedem unendlichen Lichtstrahl von O in Richtung ω den Punkt ω zuordnet, erhält man eine Korrespondenz zwischen der Menge der Strahlen aus O und der Kreislinie \mathcal{C} . Ebenso ordnet man einem hyperbolischen Lichtstrahl endlicher Länge, der von O bis zu einem Punkt der hyperbolischen Kreisscheibe verläuft, seinen Endpunkt zu (Bild unten, **a**). Damit haben wir eine gemeinsame Beschreibung für die hyperbolische Kreisscheibe \mathcal{D} und den Randkreis \mathcal{C} gefunden. Jeder Punkt aus \mathcal{D} oder \mathcal{C} ist ein – endlich oder unendlich langer – Strahl mit Ausgangspunkt O . Auf diese Wei-

Man identifiziere jeden unendlichen Lichtstrahl, der von O ausgeht, mit dem Punkt ω des Horizonts \mathcal{C} , in dessen Richtung er leuchtet, und jeden endlichen Strahl von O bis N mit seinem Endpunkt N . Dadurch wird die hyperbolische Kreisscheibe Teil eines größeren Raums, der kompakt ist und seinen Horizont enthält (**a**). In diesem Raum konvergiert die Folge M_1, M_2, M_3, \dots gegen ω (**b**).



Kompakte Räume

Wozu will man einen unendlichen Raum auf etwas Endliches zusammenziehen?

Viele mathematische Argumentationen verwenden unendliche Folgen a_1, a_2, a_3, \dots . Die Folgenglieder a_i können Punkte eines Raums sein, wobei ein »Raum« in der Mathematik nichts weiter ist als eine Menge, zu deren Elementen (den »Punkten« des Raums) man eine – möglicherweise sehr schwammige – Aussage darüber treffen kann, ob sie nahe beieinanderliegen.

Das Interessanteste an den Folgen ist, dass manche von ihnen einen Grenzwert haben. Das ist ein Punkt, dem die Folgenglieder von einer gewissen Nummer an beliebig nahe kommen. Typischerweise ist der Grenzwert ein Punkt, den man haben will (zum Beispiel die Lösung einer Gleichung), aber nicht auf direktem Weg ansteuern kann; man findet nur Punkte in seiner Nähe.

Eine Folge, die zum Beispiel in immer gleichen Schritten in einem euklidischen Raum geradeaus wandert, hat keinen Grenzwert. Eine Folge, deren Glieder innerhalb eines endlichen Volumens – sagen wir einer Kugel – verbleiben, hat auch nicht unbedingt einen Grenzwert, aber immerhin kann man aus ihr eine Teilfolge (mit ebenfalls unendlich vielen Gliedern) auswählen, die einen Grenzwert hat (konvergiert).

Ein Raum, in dem jede Folge eine derartige konvergente Teilfolge hat, heißt kompakt (genauer: folgenkompakt). Solche Räume machen dem Mathematiker das Leben einfacher, weil er den Fall einer Folge ohne konvergente Teilfolge nicht mehr gesondert berücksichtigen muss.

se wird die hyperbolische Kreisscheibe Teil eines größeren Raums, der seinen Horizont enthält.

Die wesentliche Eigenschaft dieses neuen Raums ist seine Kompaktheit (Kasten oben): Es kommt nicht mehr vor, dass eine Folge von Punkten nur deshalb keinen Grenzwert hat, weil sie ins Unendliche läuft. Vielmehr definiert man, dass eine Folge M_1, M_2, M_3, \dots gegen einen Horizontpunkt ω konvergiert, wenn der (hyperbolische) Abstand der Folgenglieder M_i von O gegen unendlich und ihr von O aus gesehener Winkel zu ω gegen null geht (Bild S. 63 unten, **b**).

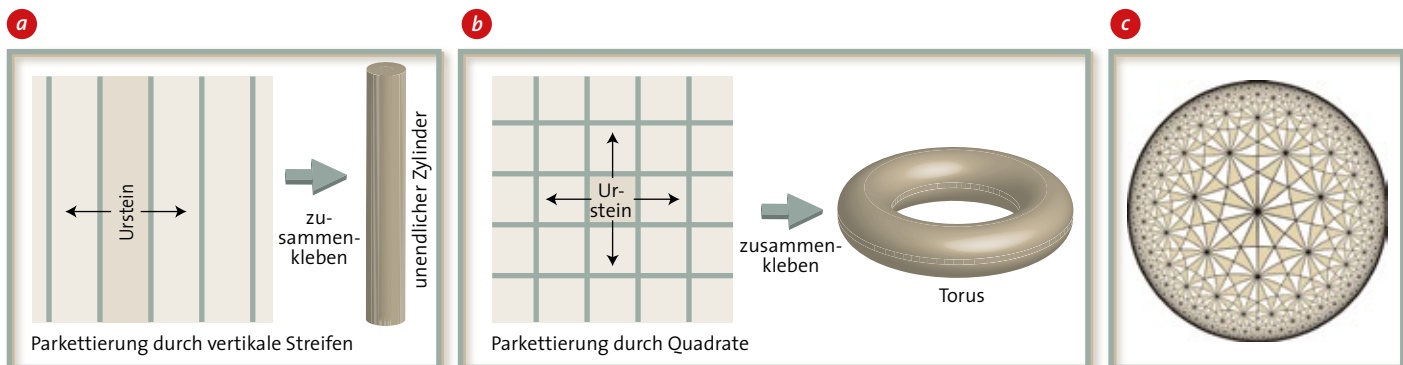
Entgegen dem Anschein spielt der Scheibenzentrum O keine besondere Rolle. Er ist nur ein willkürlich ausgewählter Punkt, auf den man sich festlegt, um Punkte und Entfernungen beschreiben zu können – wie der Nullpunkt eines euklidischen Koordinatensystems. Setzt man diesen durch eine einfache Parallelverschiebung (Translation) an eine andere Stelle, so ändert sich nichts Wesentliches. Ebenso kann man ohne nennenswerte Konsequenzen durch eine hyperbolische Translation einen beliebigen anderen Punkt ins Zentrum der Poincaréschen Kreisscheibe rücken. Insbesondere konvergiert nach einer solchen Koordinatentransformation jede Folge gegen denselben Horizontpunkt wie zuvor – wenn überhaupt. Die Koordinatentransformation verschiebt gewissermaßen nur unser Verkleinerungsglas, ändert aber nichts an der hyperbolischen Ebene selbst.

Der visuelle Rand, ein Spiegel des Raums

Dieses Verfahren, einen geometrischen Raum durch einen Horizont, einen »visuellen Rand«, zu kompaktifizieren, hat sich seit den 1970er Jahren in der mathematischen Forschung durchgesetzt, insbesondere durch die Arbeiten des Amerikaners Patrick Eberlein. Es funktioniert übrigens auch für euklidische Räume. Der visuelle Rand der euklidischen Ebene ist wie bei der hyperbolischen Ebene eine Kreislinie, denn deren Punkte lassen sich eindeutig den vom Ursprung ausgehenden Strahlen zuordnen (Bild rechts, **a**). Sie ist im Wesentlichen die moderne Form der unendlichen Geraden aus der projektiven Geometrie von Desargues.

Heute weiß man, dass in vielen Fällen der visuelle Rand wichtige Informationen über den Raum enthält, den er umschließt. So kann man aus der Tatsache, dass er ein Kreis ist, schließen, dass der Raum zweidimensional ist. Entsprechend gehört eine Sphäre als visueller Rand stets zu einem dreidimensionalen Raum. Ob dieser euklidisch oder hyperbolisch ist, verrät das zwar noch nicht; aber im Allgemeinen gibt der visuelle Rand über »seinen« Raum noch detailliertere Auskünfte, darunter wahrscheinlich etliche, die noch der Entdeckung harren.

Aus der Anschauung geboren, ist der visuelle Rand ein abstraktes, ungeheuer nützliches Konzept. Wenn es den Geometern gelingt, eine Frage, die sich in einem unbegrenzten Raum stellt, auf dessen visuellen Rand zu übertragen, so ist der neue Schauplatz des Geschehens nicht nur – im Gegen-



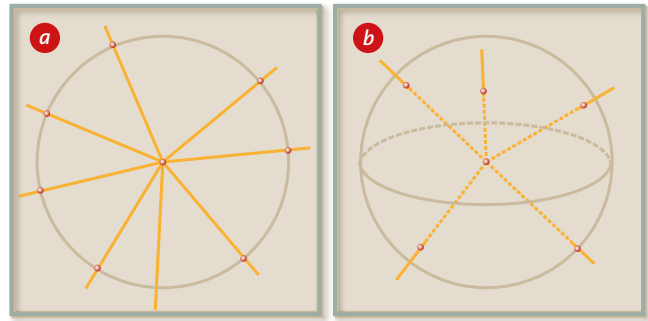
satz zum alten – kompakt, sondern auch einfacher, weil er eine Dimension weniger hat. Das ist besonders hilfreich bei der Untersuchung von so genannten Parkettierungen.

Von einer regulären Pflasterung zu ihrer Grenzmenge

Einen geometrischen Raum zu parkettieren, bedeutet, ihn lückenlos und überschneidungsfrei mit Figuren (»Parkettsteinen« oder »Kacheln«) zu bedecken, so wie man einen Fußboden kachelt. Eine Parkettierung heißt regulär, wenn sie aus lauter Exemplaren ein und desselben Parkettsteins (des »Ursteins«) besteht und es zu je zwei Steinen eine Kongruenzabbildung gibt, die nicht nur den einen Stein auf den anderen, sondern zugleich das gesamte Parkett auf sich selbst abbildet (Spektrum der Wissenschaft 5/2011, S. 73). Die Menge aller dieser Abbildungen hat die mathematische Struktur einer Gruppe; sie heißt Parkettierungsgruppe. Die Erforschung der regulären Parkettierungen läuft im Wesentlichen auf das Studium dieser Gruppen hinaus.

Die Parkettierungsgruppen in der euklidischen Ebene sind gut bekannt. Es gibt ihrer nur endlich viele, und sie bestehen aus Rotationen und Translationen. Ein Beispiel ist die Gruppe aller Translationen um Vielfache von 1 in horizontaler Richtung. Der zugehörige Urstein ist ein vertikaler (unendlich langer) Streifen der Breite 1. Oder man nimmt, wie bei der üblichen Badezimmerkachelung, als Urstein ein Quadrat und als Parkettierungsgruppe alle Translationen mit ganzzahligen Vektoren in horizontaler wie vertikaler Richtung (Bild unten, **a** und **b**).

Bei der hyperbolischen Kreisscheibe sind die Parkettierungsgruppen schwieriger zu beschreiben, und es gibt unendlich viele davon. Ein Beispiel kann man konstruieren, indem man als Urstein ein hyperbolisches Dreieck mit den Innenwinkeln $180^\circ/p, 180^\circ/q$ und $180^\circ/r$ nimmt. Dabei sind p, q und r ganze Zahlen, die zusätzlich die Bedingung $1/p + 1/q + 1/r < 1$ erfüllen müssen, damit die Summe der Innenwinkel kleiner als 180 Grad ist. Um die Ecke mit dem Winkel $180^\circ/p$ passen genau $2p$ Exemplare dieses Dreiecks, und zwar abwechselnd Bild und Spiegelbild; Entsprechendes gilt für die anderen Ecken (Bild unten, **c**). Indem man immer wieder ein Dreieck an einer seiner Seiten spiegelt (auch in der hyperbolischen Geometrie gibt es Spiegelungen), füllt man die ganze hyperbolische Ebene mit Kopien des Ursteins. Die Parkettierungsgruppe besteht also hier aus allen möglichen



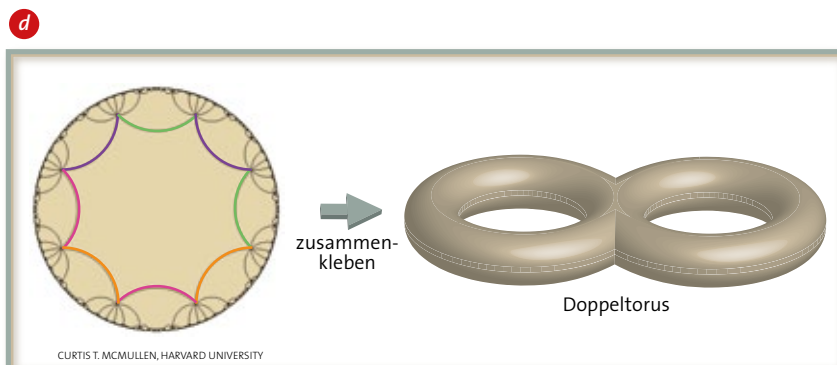
Der visuelle Rand der euklidischen Ebene ist die Kreislinie (**a**), der des euklidischen Raums die Sphäre (**b**).

Kombinationen der drei elementaren Spiegelungen. In der poincaréschen Kreisscheibe scheinen die Dreiecke zum Rand hin immer kleiner zu werden, aber innerhalb der hyperbolischen Geometrie sind sie alle gleich groß.


Vor ungefähr 40 Jahren haben die Mathematiker das Konzept der »Grenzmenge« eingeführt. Es handelt sich um die Menge aller Grenzwerte von Punktfolgen, die durch wiederholtes Anwenden mehrerer Abbildungen entstehen. Die hübsch anzusehenden Figuren, die als »Indra's Pearls« populär geworden sind (Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 72), sind Grenzungen einer gewissen Gruppe von Abbildungen (Möbius-Transformationen der komplexen Ebene). Die Grenzmenge aller Abbildungen aus der Parkettierungsgruppe kann endlich sein, den ganzen visuellen Rand umfassen oder von fraktaler Struktur sein. Ihre Eigenschaften erlauben wertvolle Rückschlüsse auf die Parkettierung selbst.

Flächen durch Zusammenkleben von Parkettierungen erzeugen


Aus einer regulären Parkettierung der euklidischen Ebene, der hyperbolischen Kreisscheibe oder der Sphäre kann man durch einen Kunstgriff eine Fläche erzeugen – genauer: eine zweidimensionale Mannigfaltigkeit. Man stellt sich vor, dass alle Steine einer Parkettierung eigentlich ein und derselbe sind. Nur damit die Sache bequem in die Ebene passt, ist der Stein in mehreren Exemplaren dargestellt. So grenzt der vertikale Streifen aus dem Bild unten (**a**) mit seinem rechten Rand nicht an den linken Rand seines Nachbarstreifens, sondern an den linken Rand seiner selbst. Klebt man die Ränder



Eine Parkettierung der Ebene durch vertikale Streifen wird durch Identifizieren korrespondierender Punkte (»Zusammenkleben«) zu einem Zylinder unendlicher Höhe (**a**), eine Pflasterung durch Quadrate zu einem Torus (**b**). Die hyperbolische Kreisscheibe lässt sich auf unendlich viele Arten parkettieren, zum Beispiel mit Dreiecken (**c**) oder mit Achtecken (**d**). Wenn man bei dieser Parkettierung wieder zusammengehörige Randpunkte zusammenklebt, erhält man einen Doppeltorus.

so zusammen, wie sie zusammengehören, zeigt der Streifen seine wahre Gestalt: Es ist ein Zylinder. Entsprechend sind beim Badezimmerkachel-Quadrat nicht nur die linke und die rechte Seite zusammenzukleben, sondern auch die obere und die untere. Es ergibt sich ein Torus (Bild S. 64, .

Während man den Zylinder noch aus Papier zusammenrollen kann, ist das beim Torus nicht mehr möglich. Aber das ist Nebensache: Auf dem Torus gilt dieselbe Abstandsmessung wie auf dem Quadrat, aus dem er entstanden ist.

Nicht alle Flächen sind euklidisch. Ein Gegenbeispiel ist die Sphäre: Sie lässt sich nicht durch Zusammenkleben aus einer Parkettierung der Ebene erzeugen. Ein weiteres Gegenbeispiel ist der Torus mit zwei Löchern (»Doppeltorus«): Er entsteht, wenn man die hyperbolische Ebene mit Achtecken pflastert, die zu acht um jede Ecke herumliegen (Bild S. 65 unten, .

Die genannten drei Beispiele illustrieren die allgemeine Situation, die Poincaré ans Licht gebracht hat: Eine geschlossene Fläche ist entweder euklidisch, sphärisch oder hyperbolisch. Die ersten beiden Familien von Flächen haben nur endlich viele Elemente, die dritte ist unendlich.

Die letzte Aussage ist im Sinn der Topologie zu verstehen. In diesem Teilgebiet der Mathematik gelten zwei Flächen als im Wesentlichen gleich (»homöomorph«), wenn sie umkehrbar eindeutig aufeinander abgebildet werden können und die Abbildung ebenso wie ihre Umkehrung stetig ist. So gesehen ist die Oberfläche der knolligsten Kartoffel eine Sphäre, die einer Tasse mit Henkel ein Torus. Es stellt sich heraus, dass zwei geschlossene Flächen nur dann überhaupt topologisch verschieden sind, wenn ihr »topologisches Geschlecht« unterschiedlich ist. Diese Kennzahl ist gleich der Anzahl der Löcher, welche die Fläche aufweist: 0 für die Sphäre, 1 für den Torus, 2 für den Doppeltorus und so weiter.

Um zu wissen, welche Geometrie eine Fläche hat, genügt es also, ihr topologisches Geschlecht zu kennen. Das reicht allerdings nicht aus, um die Parkettierung zu rekonstruieren, aus der die Fläche entstanden ist. So gibt es unendlich viele reguläre Parkettierungen der hyperbolischen Ebene, die einen Doppeltorus ergeben. Diese Mehrdeutigkeit verschwindet jedoch, wenn es um Objekte höherer Dimension geht.

Die einfachsten unter ihnen sind dreidimensionale Mannigfaltigkeiten. Beispiele sind die (dreidimensionale) Vollkugel, der Volltorus und allgemein zu jeder geschlossenen Fläche der von ihr eingeschlossene Teil des Raums. Leider

sind das die eher uninteressanten Fälle. Im Allgemeinen ist es unmöglich, eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit im gewöhnlichen Raum zu visualisieren. Gleichwohl existieren diese abstrakten Objekte mathematisch gesehen.

Einer der ersten Mathematiker, der sich genauer für sie interessierte, ist der Amerikaner William Thurston (Spektrum der Wissenschaft 9/1984, S. 110). Für die Beiträge, die er in den 1970er Jahren auf diesem Gebiet leistete, erhielt er 1978 die Fields-Medaille. Im Zentrum seiner Arbeiten steht folgende Frage, welche die genannten Untersuchungen an Flächen nahelegen: Ist eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit »geometrisierbar«? Das heißt, lässt sie sich aus einer Parkettierung eines geeigneten dreidimensionalen Raums, des »Modellraums«, erzeugen? Oder ist sie wenigstens in Teile zerlegbar, für die das gilt?

Diese tiefgründige Frage ist der Ausgangspunkt für viele Forschungsprojekte in der Topologie. Eine Antwort auf einen Spezialfall gibt die Poincaré-Vermutung, nach der jede kompakte dreidimensionale Mannigfaltigkeit ohne Löcher topologisch äquivalent zu einer dreidimensionalen Sphäre ist (dem Rand der euklidischen vierdimensionalen Kugel). Dem Russen Grigori Perelman gelang es 2003, die Vermutung zu beweisen (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 86) – eine Jahrhundertleistung, die vor allem dadurch öffentliches Aufsehen erregte, dass Perelman 2006 die ihm dafür verliehene Fields-Medaille ablehnte, ebenso später den mit einer Million Dollar dotierten Clay-Preis.

Die Geometrisierung von Flächen erfordert drei Modelle: die euklidische Ebene, die Sphäre und die hyperbolische Kreisscheibe. Für dreidimensionale Mannigfaltigkeiten braucht man acht. Darunter befinden sich »unser« euklidischer Raum und die hyperbolische Kugel, die aus einer gewöhnlichen euklidischen Vollkugel (ohne Rand) entsteht, indem man nach dem Vorbild der poincaréschen Kreisscheibe Abstände und damit Längen von Kurven neu definiert.

Reguläre Parkettierungen der hyperbolischen Kugel sind nicht einfach zu finden. Hat man aber eine (Bild rechts oben), so kann man wieder durch Zusammenkleben eine dreidimensionale Mannigfaltigkeit erzeugen, die man dann hyperbolisch nennt. Diese Objekte, die sich unserem intuitiven Verständnis entziehen, interessieren viele Topologen wegen ihrer komplexen Formen und ihrer Verbindung mit der mathematischen Knotentheorie. Kosmologen spekulieren mit ihrer Hilfe über die Topologie des Universums.

Anders als bei zweidimensionalen Flächen bestimmt bei dreidimensionalen hyperbolischen Mannigfaltigkeiten die Topologie die Geometrie. Das ist die Aussage des »Starrheitssatzes«, den George Mostow 1972 bewiesen hat: Zwei hyperbolische 3-Mannigfaltigkeiten, die topologisch homöomorph sind, haben die gleiche geometrische Struktur.

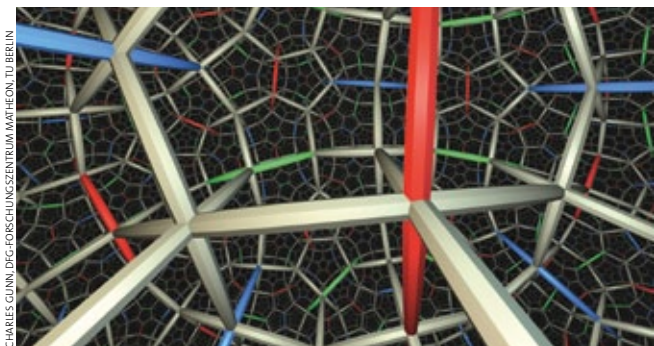
Beim Beweis seines Satzes macht Mostow in sehr origineller Weise Gebrauch vom visuellen Rand der hyperbolischen Kugel. Grob gesprochen beginnt die Darlegung mit einer regulären Parkettierung der Kugel durch einen beschränkten Urstein. Bei genauerer Untersuchung stellt man fest, dass die

W I S wissenschaft
in die schulen!



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

www.wissenschaft-schulen.de/fraktale



CHARLES GUNN, DIGITALENSCHWIMMUNGSZENTRUM MATHIEON, TU-BERLIN

Das Innere dieser hyperbolischen Kugel ist durch Dodekaeder gepflastert, die von lauter gleichseitigen Fünfecken mit je fünf rechten Winkeln begrenzt sind. Das Bild stammt aus dem Video »Not Knot« des inzwischen aufgelösten Geometry Center in Minneapolis (Minnesota).

zugehörige Parkettierungsgruppe anders als im euklidischen Fall nicht nur Translationen, Drehungen und Spiegelungen, sondern auch kompliziertere Transformationen enthält. Mostow wendet diese Transformationen auf die Punkte des visuellen Rands der hyperbolischen Kugel an. Das ist die Sphäre und damit ein beschränkter und nur noch zweidimensionaler Raum. Dies ausnutzend, kann Mostow zeigen, dass die Transformationen auf der Sphäre die ursprüngliche Parkettierung bereits eindeutig bestimmen.

Heute ist der Starrheitssatz von Mostow durch allgemeinere Aussagen etwas in den Schatten gestellt worden – aber die Idee, den visuellen Rand zu betrachten, lebt bei den Mathematikern des 21. Jahrhunderts fort. Darüber hinaus hat der »unendliche Rand« seit den Arbeiten von Mostow und dem Russen Grigori Margulis seinen Weg auch in die Arithmetik und die Zahlentheorie gefunden, nachdem unvermutete Verbindungen zwischen Zahlen und Kurven auf unbegrenzten Mannigfaltigkeiten zu Tage traten.

Der Rand bei unendlich für die Zahlentheorie

In den 1930er Jahren hatte der Brite John Littlewood die Vermutung ausgesprochen, dass es zu je zwei reellen Zahlen a und b stets ganze Zahlen p , q und r gibt, so dass die Größe $q^3(a-p/q)(b-r/q)$ der Null beliebig nahe kommt. Das läuft darauf hinaus, dass man die reellen Zahlen a und b nicht nur irgendwie durch rationale Zahlen annähern kann (das ist trivial), sondern dass man für eine gute Annäherung nicht allzu große Nenner benötigt, und das selbst dann, wenn der Nenner für beide Zahlen a und b derselbe ist. Bemerkenswerterweise kann man diese Vermutung in eine geometrische Formulierung umsetzen, die mit einer regulären Parkettierung eines achtdimensionalen Raums und einem Punkt auf dem visuellen Rand desselben arbeitet; dieser Punkt repräsentiert das Zahlenpaar (a, b) .

Man untersucht nun eine Familie von Geodäten, die sämtlich gegen (a, b) streben, und analysiert, welche Steine der Parkettierung sie treffen. Auf diese Weise hat der junge Israeli Elon Lindenstrauss zusammen mit zwei Kollegen bewie-

sen, dass es entweder gar keine oder (in einem mathematisch präzisen Sinn) nur sehr wenige Fälle gibt, in denen die Vermutung von Littlewood nicht gilt; Lindenstrauss erhielt dafür 2010 die Fields-Medaille. Seine Arbeiten illustrieren eindrucksvoll die Stärke der Methode vom visuellen Rand.

In der euklidischen Ebene, in der hyperbolischen Kreisscheibe und in analogen Räumen höherer Dimension können Lichtstrahlen sich »mit Leichtigkeit fortpflanzen«: Für Geodäten in diesen Räumen existieren einfache und gut beherrschbare formelmäßige Darstellungen. Das ist nicht immer der Fall. Es gibt Flächen mit so vielen Löchern und Höckern, dass die Strahlen in völlig undurchschaubarer Weise abgelenkt werden. Das gilt zum Beispiel für einen Torus mit unendlich vielen Löchern oder die hyperbolische Fläche, die durch Zusammenkleben einer Parkettierung entsteht, deren Urstein ein Polygon mit unendlich vielen Seiten ist.

Um das Unendliche solcher Flächen zu konstruieren, benutzt man nicht mehr den visuellen Rand, sondern eine abstraktere Menge, den »Horo-Rand«, den der russisch-französische Mathematiker Mikhail Gromov (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 74) in den 1980er Jahren eingeführt hat. Seitdem sind noch weitere Begriffe für geeignete »Ränder« definiert worden.

Seit den Tagen des Girard Desargues sind die Räume, in denen die Mathematiker sich zu Hause fühlen, um ein Vielfaches komplizierter geworden, und ihr Vorstellungsvermögen kann ihnen schon lange nicht mehr helfen. Aber das grundsätzliche Arbeitsprinzip ist immer noch dasselbe: Man fängt das notorisch problematische Unendliche ein, indem man sich etwas Abstraktes zurechtdefiniert – wobei die Anschauung durchaus behilflich, aber nicht einengend sein darf – und dann den Nachweis führt, dass dieses Abstraktum einen brauchbaren Stellvertreter für das Unendliche abgibt. Wenn diese Gedankenkonstruktion, wie im Fall des visuellen Rands, dem Vorstellungsvermögen sogar entgegenkommt – umso besser. ~

DIE AUTORIN



Françoise Dal'Bo-Milonet ist Professorin für Mathematik an der Université Rennes 1; dort beschäftigt sie sich im Rahmen des universitätsübergreifenden Forschungsnetzes »Platon« mit den Zusammenhängen zwischen Geometrie, Ergodentheorie und Wahrscheinlichkeitstheorie.

QUELLEN

Gunn, C. (Regie): Knoten ohne Knoten (Not Knot). Video, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1992
Thurston, W.: Three-Dimensional Geometry and Topology 1. Princeton University Press, Princeton 1997

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152349



Helmut Dette

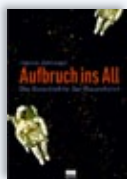
APOLLO 11 Der erste Flug zum Mond – Wahrheit oder Täuschung?

2006, 120 S. m. zahlr. meist farb. Abb.,
geb., Imhof

Bestell-Nr. 2391

früher € 19,95, jetzt nur € 7,95 (D), € 8,20 (A)

Wenn gleich in der Wissenschaft unbestritten, versuchen so genannte Verschwörungstheoretiker mit angeblichen Beweisen für eine Inszenierung die bemannten Expeditionen zum Mond in den Bereich der Fabel zu verweisen. Sind die Zweifel berechtigt? Das Buch schildert zunächst den Ablauf von Apollo 11 und setzt sich dann kritisch mit den so verblüffend überzeugend scheinenden Argumenten der Kritiker auseinander. Ein Zeitdokument, das die Tatsachen ins rechte Licht rückt.



Harro Zimmer

AUFBRUCH INS ALL Die Geschichte der Raumfahrt

2007, 144 S. m. zahlr. meist farb. Abb. u.
1 Karte., geb., Primus

Bestell-Nr. 3622

früher € 36,00, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Der Start von Sputnik 1 am 4. Oktober 1957 läutete das Zeitalter der Raumfahrt ein. Seitdem sind über 50 Jahre vergangen, in der die Raumfahrttechnologie rasante Fortschritte gemacht hat. Harro Zimmer erzählt diese spannende Geschichte, nicht ohne dabei auch auf die Trends zukünftiger Entwicklungen hinzuweisen.



Siegfried Bäumler

HEILPFLANZENPRAXIS HEUTE Porträts – Rezepturen – Anwendung

2010, XIV, 989 S. m. 217 Farbabb., geb.,
Elsevier

Bestell-Nr. 3624

früher € 84,95, jetzt nur € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Auf Grundlage der rationalen und der erfahrungshelkundlichen Phytotherapie bietet das Werk Grundlagenwissen, Arzneipflanzenporträts, Phytotherapeutische Praxis, Rezepturen und eine Indikationsliste zum schnellen Nachschlagen.



KOMPAKTXLEXIKON MEDIZIN

3., neu bearb. u. erw. Aufl. 2004, 934 S. m.
520 Farbabb. u. 80 Tab., kart., ElsevierDie handliche Sonderausgabe –
jetzt zum günstigen Preis!

Bestell-Nr. 3625

früher € 24,95, jetzt nur € 9,99 (D),
€ 10,30 (A)

Die Sonderausgabe der Auflage 2004 ist ein kompaktes, handliches Medizinlexikon mit über 23.000 Stichwörtern, 520 farbigen Abbildungen und 80 Tabellen. Der praktische Anhang informiert Sie über Indikations- und Auffrischimpfungen, Inkubationszeiten, die Meldepflicht nach dem Infektionsschutzgesetz, die Berufskrankheiten-Verordnung sowie über das Verhalten bei Notfällen.



Werner Bils

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

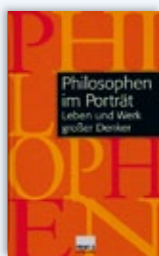
899 Aufgaben und Lösungen zu Zoologie und
Botanik, Zellbiologie und Genetik, Evolution,
Ökologie und Verhalten, Humanbiologie und
Tierphysiologie

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

Bestell-Nr. 3619

früher € 79,80, jetzt nur € 39,95 (D), € 41,10 (A)

Die Vermittlung biologischen Wissens ist eine komplexe und daher schwierige Aufgabe. Aber was ist mit der Überprüfung des erlernten Stoffes? Welche Fragen sollen sinnvollerweise gestellt werden? Ganz einfach: aus der vierbändigen Reihe »Biologisches Wissen in Frage und Antwort«!

Andreas Graeser, Günter Figal,
Jan Szaif u. a.

PHILOSOPHEN IM PORTRÄT

Leben und Werk großer
Denker

2004, 432 S., geb., Primus

Bestell-Nr. 3623

früher € 14,90, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Der Band gliedert sich in die vier großen Epochen: Antike, Mittelalter, Neuzeit und Moderne. Jeder Epoche ist ein kurzer Beitrag vorangestellt, der einen Überblick vermittelt und die Philosophen in ihre Zeit einbettet. Vorgestellt werden im Anschluss daran Leben und Werk von 23 Philosophen.



Harro Zimmer

SATURN

Aufbruch zum Herrn der
Ringe.
In Zus.-Arb. mit d. ESA2006, 144 S. m. 82 meist farb.
Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 2137

früher € 29,90, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Der Text-Bildband, illustriert mit hervorragendem Bildmaterial der NASA und der ESA, beschreibt die spannende Erkundung des Saturns und seiner Monde bis heute und konzentriert sich dabei auf die aktuelle Cassini-Huygens-Mission. Vorgestellt werden dabei immer auch die Menschen, die die Forschungsgeschichte des Saturns mitgeschrieben haben, von Huygens bis hin zu den Protagonisten der Raumfahrtmissionen.

Für regnerische Feiertage



Robert Winston

COOLE EXPERIMENTE FÜR ZU HAUSE

2012, 144 S. m. 350 Farbabb. u.
Zeichn., geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3626

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Ab 8 Jahren. Leuchtende Götterspeise, »Elefantenzahnpasta«, ein Vulkanausbruch in der Küche oder selbst gezüchtete Kristalle – dieses Buch steckt voller faszinierender Versuche, die sich leicht zu Hause umsetzen lassen, garantiert Spaß bringen und zu unglaublichen Ergebnissen führen. Mit Kurzporträts großer Wissenschaftler – die ideale Ergänzung zum Schulunterricht!

Naturwissenschaften sind alles andere als langweilig!



3-D MEMO SPACE

Entdecke die neue 3-D
Memo Welt40 Karten mit 20 Motiven aus
Astronomie und Raumfahrt,
Campagames

Bestell-Nr. 3345

€ 14,90 (D), € 14,90 (A)

Die Motive sind in 3-D-Lentikular Technik (ähnlich wie Wackelbilder) bearbeitet, so dass der Weltraum mittels eines wunderschönen, tiefen 3-D-Effekts spielerisch entdeckt werden kann! Motive sind u.a. Jupiter, Uranus, Saturn, der Astronaut Edwin Aldrin und das Spaceshuttle. Geeignet für bis zu 4 Spieler ab 4 Jahren.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



Andreas Martius

PAPIERFLIEGER DER EXTRAKLASSE, MIT CD-ROM

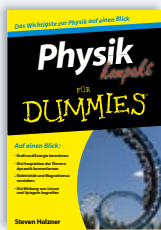
2012, 64 S. m. zahlr. farb. Abb.,
Beil.: Vorlagenbogen, geb.,
Christophorus

Bestell-Nr. 3539

€ 12,99 (D), € 13,40 (A)

Immer wieder ist es faszinierend, wie dieses gefaltete Stück Papier die Schwerkraft für eine Weile überwindet und sanft schwebt. Papierflieger sind aber nicht nur etwas zum Träumen, das Falten begeistert außerdem alle Konstrukteure. In dieser »Flugwerft für Profis« werden ganz besondere futuristische Modelle in einer speziellen Falltechnik gebaut, der Verhakung. So sind diese Flieger besonders stabil und flugsicher.

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



Steven Holzner

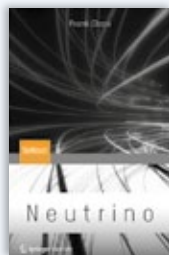
PHYSIK KOMPAKT FÜR DUMMIES

Ein Grundkurs

2012, 219 S., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3548 € 10,- (D), € 10,30 (A)

Dieses Büchlein hilft Ihnen, wenn Sie sich einen schnellen Überblick über die Physik verschaffen wollen. Steven Holzner erklärt leicht verständlich, was Sie über Kräfte und Bewegungen, Energie, Wärme, Licht, elektrische Felder und Kernphysik unbedingt wissen sollten.



Frank Close

NEUTRINO

2012, 233 S. m. 11 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3546

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Über ein rätselhaftes Teilchen und seine wachsende Bedeutung für die Astrophysik

Der Autor schildert in diesem spannenden kleinen Buch nicht nur die ersten theoretischen Hinweise auf die Existenz von Neutrinos, sondern auch den langen Kampf, solche Teilchen zu »fangen« und ihre Natur zu verstehen.



Lisa Randall

DIE VERMESSUNG DES UNIVERSUMS

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

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

Bestell-Nr. 3496

€ 24,99 (D), € 25,70 (A)

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

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



Monica Ramirez Basco

SCHLUSS MIT PROKRASTINIEREN

Wie Sie heute beginnen, mit dem Aufschieben aufzuhören

2012, 184 S. m. Abb. u. Tab., kart., Huber

Bestell-Nr. 3614

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Sind Sie frustriert davon, dass Sie immer alles aufschieben?

Dr. Monica R. Basco, selbst »geheilte Prokrastiniere« und Experte für Kognitive Verhaltenstherapie, zeigt Ihnen mit anschaulichen Beispielen, kurzweiligen Selbsttests und praktischen Übungen, wie Sie heute mit dem Aufschieben aufhören können.



Florian Freistetter

KRAWUMM!

Ein Plädoyer für den Weltuntergang

2012, 210 S. m. zahlr. Abb., geb., Ecowin

Bestell-Nr. 3497

€ 22,90 (D), € 22,90 (A)

Ob nun Planeten aufeinanderprallen, Galaxien zusammenstoßen oder gar ganze Universen kollidieren: Die Folgen sind immer dramatisch. Kollisionen bringen aber nicht nur Zerstörung. Sie stehen auch am Anfang aller Dinge, ohne sie würde es kein Leben auf der Erde geben. Sehen Sie aus sicherer Entfernung dabei zu, wie alles ineinanderkracht, was im Weltall ineinanderkrachen kann! Von Asteroideneinschlägen bis hin zu ganzen Universen, die zusammenstoßen, werden Sie die verschiedensten Kollisionen erleben und dabei feststellen, dass wir den kosmischen Katastrophen viel zu verdanken haben.

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



Mitarbeit: Stefan Heusler

QUANTENDIMENSIONEN, DVD-ROM

Doppelspalt – Verschränkung – Quantencomputer

2010, in DVD-Box., für PC und Mac, Lehr-Programm gem. § 14 JuSchG., Klett, Sciencemotion

Bestell-Nr. 3552 € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Diese ausgefuchste Lernsoftware bringt Licht in die mysteriöse Quantenwelt!

Mit den beiden Detektoren Alice und Bob begeben wir uns auf die faszinierende Reise in die Quantendimensionen von Licht. Wie lässt sich Licht beschreiben, woraus besteht es und wie verhält es sich? Auf der Suche nach Antworten nähern wir uns dem Licht auf zwei verschiedene Weisen – im Spielfilm »Schattenwelten« und anhand von 14 Lernstationen auf der U-Bahn-Linie 1, der Nonlocality Line. Diese Lernsoftware zur Quantenphysik wurde von Physikdidaktikern der Universität Münster entwickelt. Ein großer Spaß für alle Physikinteressierten und auch ideal für den Unterricht in der Oberstufe.

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



Neuheiten
Schnäppchen*
Science & Fun

SCIENCE-SHOP
SPEZIAL 4/2012

* Lieferung, solange Vorrat reicht



Herausgegeben von Michael Esfeld

PHILOSOPHIE DER PHYSIK

2012, 481 S., kart., Suhrkamp

Bestell-Nr. 3621

€ 18,00 (D), € 18,50 (A)

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

**BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X**

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern und Deckgläsern, Präparierbesteck, Garnelenbrutanlage, MikrOkular II mit Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618

€ 89,- (D), € 89,- (A)

Hochwertiges Schülermikroskop mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, einem MikrOkular I (PC-Okular mit 640x480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optischen Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.



Harald Fritsch

MIKROKOSMOS

Die Welt der kleinsten Teilchen

2012, 191 S. m. Abb., geb., Piper

Bestell-Nr. 3620

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Um zu verstehen, warum alles, was uns umgibt, existiert, müssen wir unser Auge vom Riesiggroßen auf das Winzigkleine lenken. Was die moderne Teilchenphysik ist und wo die letzten Fragen offenbleiben – das alles erklärt Harald Fritsch in leichter Sprache und mit feinem Witz.

Bequem bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de→ per E-Mail
info@science-shop.de→ telefonisch
+49 6221 9126-841→ per Fax
+49 711 7252-366→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



Bas Kast

ICH WEISS NICHT, WAS ICH WOLLEN SOLL

Warum wir uns so schwer entscheiden können und wo das Glück zu finden ist

2012, 284 S. m. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3613

€ 18,99 (D), € 19,60 (A)

Wir haben alle Chancen der Welt, wir können leben, mit wem wir wollen, wo wir wollen und wie wir wollen, wir können unseren Neigungen nachgehen und an der Erfüllung unserer Wünsche arbeiten – und trotzdem tun sich viele von uns so schwer mit der Liebe und dem Leben. Bas Kast fügt zusammen, was unterschiedlichste wissenschaftliche Disziplinen – wie Psychologie, Hirnforschung, Politik- und Wirtschaftswissenschaften – zur Qual der Wahl und unserer rasenden Wohlstandsgesellschaft herausgefunden haben. Denn erstmals lassen sich die Fragen nach Glück und Zufriedenheit empirisch beantworten. Ein Buch voller überraschender Analysen und Einsichten über uns und den Zustand der Welt, in der wir leben.



Heinz Böker, Erich Seifritz (Hg.)

PSYCHOTHERAPIE UND NEUROWISSENSCHAFTEN

Integration – Kritik – Zukunftsaussichten

2012, 656 S. m. z. Tl. farb. Abb. u. Tab., geb., Huber

Bestell-Nr. 3615 € 64,95 (D), € 66,80 (A)

Die beeindruckenden Erkenntnisse der Neurowissenschaften ermöglichen einen vertieften Einblick in das Gehirn und beleuchten insbesondere zunehmend die Funktionsweise der Psychotherapie. Dieses Buch vermittelt einen Überblick über den aktuellen Dialog zwischen Psychotherapie und Neurowissenschaften. International anerkannte Experten stellen den Stand der bisherigen Forschung zu verschiedenen Psychotherapieverfahren vor und überprüfen die Ergebnisse im Hinblick auf ihre klinische Relevanz.

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



Robert Feldman

LÜGNER

Die Wahrheit über das Lügen

2012, 370 S., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3503

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Wann haben Sie das letzte Mal gelogen? Wie die psychologische Forschung zeigt, lügen sich fremde Menschen während eines zehnmütigen Gesprächs im Mittel dreimal an. Täuschung und Unehrlichkeit spielen eine erstaunlich große und entscheidende Rolle in unserer Gesellschaft. Robert Feldman enthüllt im vorliegenden Buch die ganze Wahrheit über das Lügen.



Stefan Ineichen, Bernhard Klausnitzer, Max Ruckstuhl

STADTFAUNA

600 Tierarten unserer Städte

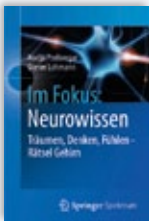
2012, 434 S. m. 600 Farbfotos, geb., Haupt

Bestell-Nr. 3521

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

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

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



Nadja Podbregar, Dieter Lohmann

IM FOKUS: NEUROWISSEN

Träumen, Denken, Fühlen – Rätsel Gehirn. Naturwissenschaften im Fokus

2012, 140 S., 20 Farbb., geb., Springer-Spektrum

Bestell-Nr. 3550

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Können wir im Schlaf lernen? Wie weit reicht der Einfluss der Hormone? Und was bestimmt, ob wir hochbegabt oder nur Durchschnitt sind? Im Zentrum all dieser Fragen steht unser Gehirn, die Schaltzentrale unserer Persönlichkeit und unseres Menschseins.

In den letzten Jahren sind Neurowissenschaftler immer tiefer in die Struktur und Physiologie des Gehirns vorgedrungen. Doch noch sind längst nicht alle Mitspieler im Konzert unseres Bewusstseins bekannt. Dieses Buch nimmt Sie mit auf eine Erkundungsreise zu faszinierenden, rätselhaften und beeindruckenden Phänomenen unseres Denkens, Fühlens und Bewusstseins.



Michael Stocker, Sebastian Meyer

WILDTIERE

Hausfreunde und Störenfriede

2012, 352 S. m. 120 Farbfotos u. 100 Zeichn., geb., Haupt

Bestell-Nr. 3522

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Dieses Buch lädt ein auf einen Rundgang durch Haus und Garten – aufs Dach und auf den Dachboden, ans Fenster und auf den Balkon, an die Fassade und in Innenräume und Keller. Mit Tierporträts und Tipps fürs Beobachten bietet es spannendes Wissen rund um die Natur in der Nähe. Außerdem Tipps und Anleitungen: mit Bauplänen für Nisthilfen, Wissen fürs Bauen und Renovieren, sowie Vorschlägen fürs Entschärfen von Tierfallen.



Stefan Korth, Bernd Koch

STARS AM NACHTHIMMEL

Der sichere Wegweiser zu den 50 schönsten Himmelsobjekten

2., überarb. Aufl. 2012, 151 S. m. zahlr., meist farb. Abb., Kosmos

Bestell-Nr. 3499

€ 16,99 (D), € 17,50 (A)

Sternhaufen, Galaxien und Gasnebel: Mit dieser Anleitung fällt es leicht, die Stars am Nachthimmel zu entdecken. Ob mit bloßem Auge, Fernglas oder Teleskop – hier finden Sie den Weg zu den Attraktionen des Universums. Und das geht ganz einfach per »Starhopping«: keine Koordinaten, kein Computer – dieses Buch genügt. Für jedes Objekt gibt es eine eigene, speziell entwickelte Sternkarte, eine genaue Wegbeschreibung und ein wunderschönes Foto. So wird die Beobachtungsnacht zum unvergesslichen Erlebnis!



David J. Linden

HIGH

Woher die guten Gefühle kommen

2012, 272 S. m. 25 Abb., geb., C.H.Beck

Bestell-Nr. 3553

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Was hat ein köstliches Essen mit einem Dauerlauf zu tun? Oder eine großzügige Spende mit dem Nervenkitzel beim Roulette? Anhand vieler anschaulicher Beispiele klärt uns der Neurowissenschaftler David J. Linden darüber auf, was in unserem Gehirn geschieht, wenn wir Freude, Vergnügen und Lust empfinden. Dabei macht er eine erstaunliche Entdeckung: Bei all diesen Tätigkeiten werden neuronale Signale ausgesendet, die in derselben Hirnregion zusammenlaufen, im so genannten Belohnungszentrum. Doch dieses Wohlfühlzentrum hat auch eine dunkle Seite. Denn künstliche Stimulanzien wie Nikotin, Alkohol oder Drogen nutzen die Vorgänge im Belohnungszentrum ebenfalls. Die Forschungsergebnisse sprechen dafür, dass hier die Süchte mit all ihren negativen Auswirkungen entstehen.



Carsten Könneker

WISSENSCHAFT KOMMUNIZIEREN

Ein Handbuch mit vielen praktischen Beispielen

2012, XII, 219 S. m. 30 SW- u. 50 Farbb., kart., Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3612

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

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



**DAS BAUMEISTERSPIEL
KLASSIK**

Unendliche Vielfalt
Format 12,5 x 12,5 cm, blaue
Steine mit grauer Platte aus
Recyclingkunststoff, Logika
Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,- (D), € 16,- (A)

Das Baumeisterspiel lässt sich in seiner handlichen und ansprechenden Aufmachung ein ganzes Leben in immer wieder neuen Variationen spielen. Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengesetzt. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult sozusagen spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.

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



**DIE KNOTENBOX
50 Knoten-Klassiker
für Freizeit, Sport
und Alltag**

Mit 2 Schnüren zum
Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95 (D), € 12,95 (A)

Warum hat es der Seemann so gut? Richtig – er kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber wir Landratten müssen nicht verzagen: Mit der Knotenbox lernen wir 50 praktische und bewährte Knoten mit Hilfe der 50 handlichen Karten und der beiliegenden 2 Schnüre. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

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



VERSCHÄTZT NOCH MAL!

**Sinnloses Wissen,
nutzlose Fakten und
verrückte Fragen!**
2012, 106 Fragekarten,
ab 12 Jahren, Kyskapsodie
Bestell-Nr. 3566
€ 21,95 (D), € 21,95 (A)

Ein fesselndes und unterhaltsames Spiel mit mehr als 300 interessanten und bizzaren Fragen. Dabei geht es nicht darum, die korrekte Antwort zu wissen, sondern vielmehr darum, der richtigen Antwort durch Raten oder Schätzen so nahe wie möglich zu kommen.



Armin Täubner
**DAS GROSSE
FRÖBELBUCH**
**Kreative Bastelideen aus Papier
nach Friedrich Fröbel**
2012, 128 S. m. zahlr. farb. Abb. u.
Faltzeichn., geb., Frech

Bestell-Nr. 3627 € 14,99 (D), € 15,50 (A)

Basteln mit Papier fördert in besonderem Maße Ästhetik und Kreativität, mathematische Grundkenntnisse und Feinmotorik. Eine Vielzahl an kreativen Papierarbeiten nach Friedrich Fröbel.



Ivan Moscovich
**1000 DENKSPIELE
aus Wissenschaft,
Natur & Technik**
2012, 431 S. m. 1200 Abb., kart.,
Ullmann

Bestell-Nr. 3628 € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Textaufgaben und Puzzlespiele aus den Bereichen Mathematik, Physik, logisches Denken und räumliche Vorstellungskraft. Durch Knobelaufgaben aus Alltagssituationen werden naturwissenschaftliche Zusammenhänge spielerisch erklärt. »1000 Denkspele« ist ein Knobelspaß von leicht bis schwierig für Jugendliche und Erwachsene.



Hanno Depner
KANT FÜR DIE HAND
**Die »Kritik der reinen Vernunft«
zum Basteln & Begreifen. Mit
Anleitung und 12 Bogen Bausatz**
2011, 71 S. m. farb. Abb., 12 Bastelbo-
gen, geb., Knaus

Bestell-Nr. 3629 € 19,99 (D), € 20,60 (A)

Der Bausatz »Kant für die Hand« des Philosophen Hanno Depner ermöglicht einen überraschenden und einzigartigen Zugang zu einem Hauptwerk der Geistesgeschichte. In 3 Stunden Bastelzeit wird Erkenntnis zum Abenteuer und ein Buch auf ganz neue Weise zur besten aller möglichen Beschäftigungen.

Ein Video zum Titel finden Sie unter
www.science-shop.de/artikel/1066936

**Portofreie Lieferung nach
Deutschland und Österreich**



PSYCHOSPIELE
**Persönlichkeitstests, Spiele
und Fragebögen.**
**Wer sind Sie? Erkunden Sie
die Geheimnisse Ihrer
Persönlichkeit!**
2012, in Box, Kunstmann
Bestell-Nr. 3556
€ 24,90 (D), € 24,90 (A)

Was für ein Mensch sind Sie?

Eine außergewöhnlich schön gestaltete Sammlung von Psychospielen, Persönlichkeitstests und Fragebögen – allesamt von Psychologen entwickelt –, die Ihnen die verborgenen Seiten Ihrer Persönlichkeit offenbaren. Die Karten sind angereichert mit informativen und anregenden Texten zu den einzelnen Tests und Spielen, ihren Grundlagen und Ergebnissen. Keine Angst: Mit diesen Psychospielen kann Ihnen nichts Schlimmeres passieren, als dass sich Ihr Leben ändert (zum Besseren natürlich).

BESTELLCOUPON Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Zahlung per Bankeinzug

Geldinstitut/Ort _____

Konto-Nr. _____

BLZ _____

Datum/Unterschrift _____

Zahlung per Rechnung

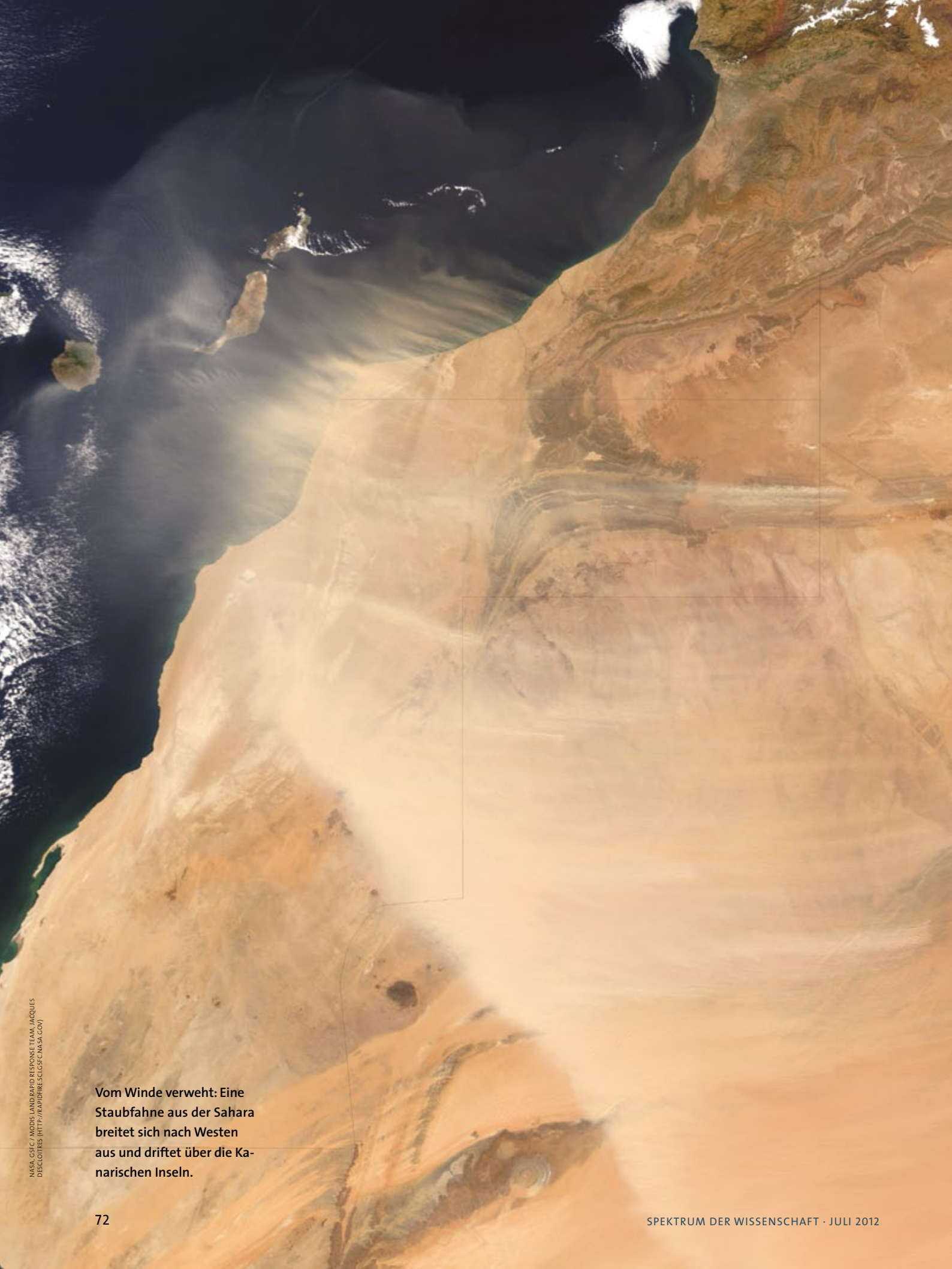
PLZ/Wohnort _____

Kunden-Nr. (falls vorhanden) _____

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname _____ Straße/Hausnummer _____

Datum/Unterschrift _____ E-Mail-Adresse _____



NASA, GSFC / MODIS LAND RAPID RESPONSE TEAM, JACQUES DESCLOTRES (HTTP://KAP/PIPHRES/CIGFENASA.GOV)

Vom Winde verweht: Eine Staubfahne aus der Sahara breitet sich nach Westen aus und driftet über die Kanarischen Inseln.

INTERKONTINENTALE STAUBDRIFT

Von Afrika zum Amazonas

Riesige Staubfahnen wehen von Kontinent zu Kontinent. Sie düngen die Ozeane und halten gewaltige Ökosysteme am Leben. Ihr Wirken ist zudem eng verzahnt mit dem Klimawandel.

Von Jeffrey Bartholet

Die Bodélé-Depression ist eine Bodensenke in der Republik Tschad. Sie hat etwa die Größe Kaliforniens und liegt am südlichen Rand der Sahara, südwestlich des Tibesti-Gebirges und nördlich des Tschadsees. Es ist eine öde, einsame Gegend. Wind pfeift durch die nahe gelegenen Berge und weht mit hoher Geschwindigkeit in die ausgetrocknete Senke hinunter. Einst wogte hier ein gewaltiger Süßwassersee, von dem nicht viel mehr geblieben ist als eine mickrige Pfütze.

Wenn der Wind über den ehemaligen Seegrund fegt, von dem große Teile schon seit Jahrtausenden trockenliegen, wirbelt er riesige weiße Staubwolken auf. Sie bewegen sich himmelwärts und gehen dann auf große Reise rund um den Globus. Wohin und unter welchen Umständen, das würden Atmosphärenforscher gern besser verstehen. Noch vor wenigen Jahrzehnten widmeten sie dem natürlichen Staub kaum Aufmerksamkeit, abgesehen davon, dass sie ihn zu Hause mit dem Lappen aufwischten und sich über Flusen in den Ecken ärgerten. Viel interessanter erschienen ihnen menschengemachte Schadstoffe, die sich in der Luft verteilen. Nur wenigen Wissenschaftlern war klar, dass ständig Millionen Tonnen aufgewirbelter Bodenpartikel rund um den Erdball jagen und dabei das Klima beeinflussen, die Ozeane düngen und

den Regenwald am Amazonas mit Nährstoffen versorgen – sowie zahlreiche andere Gebiete auch.

Joseph M. Prospero gilt als Pionier der Staubforschung. Der emeritierte Professor für Meeres- und Atmosphärenchemie an der University of Miami (USA) erinnert sich noch, wie skeptisch seine Kollegen reagierten, als er in den 1960er und 1970er Jahren mehrere Fachartikel veröffentlichte mit der These, dass gewaltige Staubmengen von Afrika über den Atlantik nach Nord- und Südamerika driften. »Die Leute machten sich damals über das Thema lustig«, sagt Prospero. Etliche hätten bezweifelt, dass es sich um ein ernst zu nehmendes Forschungsgebiet handle.

So war es für ihn zunächst ein einsames Unterfangen, entlegene Staubmessstationen auf der Insel Barbados und anderswo zu überwachen und die Körnchen zu untersuchen, die er in Luftfiltern aufgefangen hatte. Später nahm das Interesse an seiner Forschung allerdings zu – unter anderem deshalb, weil Satellitenaufnahmen immer besser aufgelöst zeigten, was Prospero und andere beschrieben hatten: gigantische Staubfahnen mit mehreren hundert Kilometer Länge, die von Afrika fortgeblasen werden und auf der anderen Seite des Atlantiks wieder zu Boden sinken. Zugleich rückte der Klimawandel in den Fokus, und es zeichnete sich ab, dass

natürlicher Staub in der Atmosphäre einen maßgeblichen Einfluss auf die globale Durchschnittstemperatur hat.

»Heute erscheinen so viele wissenschaftliche Aufsätze zum Thema, dass es unmöglich ist, sie alle zu lesen«, sagt Prospero. Zwischen den frühen 1970er Jahren und der Jahrtausendwende verdoppelte sich alle vier Jahre die Zahl der Fachartikel, die von Saharastaub handeln. Was sagen uns all diese Untersuchungen? Zum Beispiel, dass sich Vorgänge in einer bestimmten Region intensiv auf Gebiete auswirken können, die tausende Kilometer entfernt liegen. Doch viele Details sind dabei noch unverstanden. »Sobald wir die Antwort auf eine unserer Fragen gefunden haben, tauchen sofort drei neue Fragen auf«, sagt Robert J. Swap, Professor für Umweltwissenschaften an der University of Virginia (USA), der über afrikanischen Staub am Amazonas geforscht hat.

Von der eingangs beschriebenen Bodélé-Depression, aber auch aus der weitläufigeren Sahara und der nahe gelegenen Sahelzone treibt der Staub über den Atlantik nach Amerika. Er braucht etwa eine Woche oder länger für die Reise. Jeden Sommer gehen riesige Mengen davon über dem Süden und Osten der USA nieder; sie machen beispielsweise in Florida bis zu 80 Prozent aller niedersinkenden Staubkörnern aus. Wenn die Bewohner Miamis nach einem Regenguss ihre Autos von einer rötlichen Schmutzschicht befreien, wischen sie einen Gruß aus dem fernen Afrika weg. Und Spaziergänger, die über die Inseln der Bahamas oder Florida Keys wandern, laufen im Wesentlichen über afrikanischen Boden.

Weltweit setzen sich schätzungsweise zwei Milliarden Tonnen Bodenpartikel pro Jahr mit dem Wind in Bewegung. Mehr als die Hälfte davon stammt aus den Wüsten und Trockengebieten Afrikas. Chinesischer Staub wird nach Hawaii und in den Westen Nordamerikas geblasen; von Patagonien aus treiben die Körnchen in die Antarktis. Ein Großteil des Staubs, der in Grönland niedergeht, kommt aus Asien – doch als eine jahrelange Dürre in den 1930er Jahren die Great Plains (Großen Ebenen) Nordamerikas vielerorts in eine riesige »Staubschüssel« verwandelte, fanden die Partikel von dort offenbar ebenfalls ihren Weg bis zu den grönländischen Gletschern.

Ein großer Teil des aus Afrika verwehten Staubs driftet mit den Passatwinden 6400 Kilometer westwärts über den

Atlantik. Etwa 40 Millionen Tonnen, angereichert mit lebenswichtigen Mineralen wie Eisen und Phosphor, rieseln einer Schätzung zufolge jährlich über dem Amazonas-Regenwald nieder. Die Hälfte davon dürfte aus der Bodélé-Depression stammen.

Dieser gigantische Materialtransport hinterlässt Spuren. In der Bodélé-Depression hat der Wind bereits zahlreiche Bodenschichten abgetragen. Die nötige Luftgeschwindigkeit, um die Körnchen in Bewegung zu setzen, hängt von den Verhältnissen an der Bodenoberfläche und den klimatischen Bedingungen ab. Meist liegt sie zwischen vier und zwölf Meter pro Sekunde. Sobald die Partikel sich lösen und über den Erdboden zu hüpfen beginnen, schlagen sie weitere los. Die kleinsten treiben bald aufwärts. In der Luft vermischen sie sich zunächst mit zahllosen weiteren Körnchen aus der Bodélé-Senke, später auch mit aufgewirbeltem Material aus anderen Teilen Afrikas. Schließlich werden sie zum Teil einer gewaltigen Staubbahn, die über den Atlantik zieht.

Eine Ursache – verschiedene Wirkungen

Befindet sich das Material erst einmal in der Luft, beeinflusst es auch das Klima der Erde. Es verschluckt bestimmte Wellenlängen der Sonnenstrahlung, was die Atmosphäre erwärmt. Andere Wellenlängen reflektiert es in den Weltraum, was die Abkühlung fördert. In welchem Verhältnis die absorbierte zur reflektierten Energie steht, hängt von der chemischen Zusammensetzung und Korngröße des Staubs ab sowie vom Spektrum der Strahlung. Meist werden die kurzen, aus dem Weltraum kommenden Wellen zurückgeworfen und die langen, von der Erdoberfläche kommenden absorbiert. Wenn die Staubkörnchen mit Ruß vermischt sind, verschlucken sie noch deutlich mehr langwellige Strahlung.

Driftet der Staub über dunklen Gebieten, etwa über Ozeanen, reflektiert er Licht, das andernfalls absorbiert worden wäre, woraus eine Abkühlung resultiert. Zieht er hingegen über helle Areale wie Eis- oder Sandfelder, hat er eher einen wärmenden Effekt, da er sie verdunkelt und somit die Absorption erhöht. Aus demselben Grund steigen die Temperaturen auch, wenn die feinen Partikel auf sonnenbeschienene Schnee- oder Eisflächen fallen. Viele Wissenschaftler glauben dennoch, dass der atmosphärische Staub unterm Strich den Planeten abkühlt. Allerdings reicht dies bei Weitem nicht, um die globale Erwärmung durch Treibhausgase auszugleichen.

Durch die Luft transportierter Staub beeinflusst das Klima auch indirekt. Zum Beispiel spielt er eine wichtige Rolle bei der Wolkenbildung. Feuchtigkeit in der Luft kondensiert nicht von selbst, sondern muss sich hierfür an Partikel anlagern. Die Wissenschaftler sind uneins, in welchem Ausmaß Staubkörner als Kondensationskeime dienen. Natalie Mahowald, Professorin an der Cornell University und Entwicklerin von Atmosphärenmodellen, zeigt sich überzeugt, dass sowohl Wasser als auch Eis an den Körnchen kondensieren. Paul Ginoux, der Klimamodelle für die Wetter- und Ozeanografiebehörde der USA erstellt, ist vorsichtiger. Er hält Staub-

AUF EINEN BLICK

GETRÜBTE SICHT

1 Jedes Jahr werden weltweit etwa **zwei Milliarden Tonnen Staub** vom Wind aufgewirbelt und dann von Kontinent zu Kontinent getrieben. Mehr als die Hälfte stammt aus Afrika.

2 Der Staub beeinflusst das **Weltklima** sowie den **Nährstoffgehalt von Ozeanen und Regenwäldern**. Das hat enorme Auswirkungen auf Planktonblüten im Meer und die Artenvielfalt an Land.

3 Trotz intensiver Forschungen verstehen Wissenschaftler das komplizierte Wechselspiel zwischen dem Staub und der **Atmosphäre** bisher nur unzureichend.



BEDI FOTOS: DESERT RESEARCH INSTITUTE (WWW.DRI.EDU)

Wissenschaftler entnehmen Eisbohrkerne in Grönland. Später werden sie die Konzentrationen bestimmter Elemente darin messen, etwa von Aluminium und Cer. Diese Stoffe kommen in Staubkörnchen vor, die sich über Jahrhunderte hinweg in Eis und Schnee abgesetzt haben (rechts). Ziel der Untersuchungen ist es, den früheren Staubgehalt der Atmosphäre zu rekonstruieren.



partikel ebenfalls für wichtige Keime bei der Eisbildung. Andererseits meint er, Wasser lagere sich nur an Körnchen an, die Sulfate enthielten – wobei diese Schwefelverbindungen hauptsächlich aus menschengemachter Luftverschmutzung stammten.

In einem Punkt stimmen Mahowald und Ginoux überein: Unser Wissen über die Wolkenbildung ist extrem lückenhaft (siehe SdW 7/2011, S. 80). Große Mengen winziger, in der Atmosphäre treibender Partikel können zahlreiche Wassertropfen entstehen lassen. Da diese aber sehr klein sind, fallen sie nur mit relativ geringer Wahrscheinlichkeit als Regen zu Boden. Wolken aus kleinen Tropfen sind zudem heller als solche aus großen und streuen deshalb mehr Strahlung in den Weltraum zurück. Falls die Körnchen, an denen das Wasser kondensiert, jedoch Wärme absorbieren, verdunstet die sie umgebende Flüssigkeit schneller und die Wolken lösen sich rascher auf. »Staub kann die Niederschlagswahrscheinlichkeit erhöhen oder senken, abhängig davon, was in der Atmosphäre insgesamt geschieht«, sagt Mahowald. Selbst die besten Computersimulationen könnten hiervon kein vollständiges Bild liefern.

Wolken haben einen erheblichen Einfluss auf das Weltklima, denn stets ist die Erdoberfläche zu etwa 60 Prozent von ihnen bedeckt. Kleine Veränderungen bei ihrer Entstehungsrate und ihren Eigenschaften könnten das Klima dramatisch beeinflussen. Nun driftete Staub allerdings während der gesamten Erdgeschichte um den Planeten. Warum sollte er heute andere Auswirkungen haben als zuvor? Etwa deshalb, weil sich in vielen Gebieten derzeit mehr Staub in Bewegung setzt

als früher – das zumindest vermutet Mahowald. »Es scheint so, als habe sich die Staubmenge im 20. Jahrhundert über großen Teilen der Erdoberfläche verdoppelt«, sagt die Meteorologin. »Wir wissen nicht genau, wie es dazu kam, aber menschliche Aktivitäten könnten eine wichtige Ursache sein.«

Joseph R. McConnell vom Desert Research Institute in Reno, Nevada (USA), ist einer der Wissenschaftler, die sich mit dieser Frage befassen. Er analysiert Staubkörnchen, die im grönländischen und antarktischen Eis eingeschlossen sind. Hierfür entnimmt er zunächst Eisbohrkerne. Sie sind zwischen 20 Meter und drei Kilometer lang, je nachdem, wie weit der Zeitraum zurückliegt, über den McConnell Informationen gewinnen möchte. In seinem Labor misst er mit hochauflösenden Massenspektrometern die Konzentrationen bestimmter Elemente im Eis, etwa von Aluminium und Seltenen Erden wie Cer. Letztere kommen in Bodestaub vor, aber nicht in Meersalz, Industrieabgasen, vulkanischen Emissionen oder Rauchfahnen von Waldbränden.

McConnell versucht dann zu ermitteln, wie stark die atmosphärischen Staubkonzentrationen in der Vergangenheit schwankten, und herauszufinden, aus welchem Grund sie das taten. Seine Erkenntnisse deuten etwa darauf hin, dass im frühen 20. Jahrhundert, als in Patagonien die Schafwirtschaft ausgeweitet wurde und vermehrt Wüsten entstanden, sich der Staubeintrag in die Antarktis verdoppelte. Es liegt nahe, dies in einen ursächlichen Zusammenhang zu bringen: Die übermäßige Landnutzung führte zur Wüstenbildung, wodurch mehr Bodenmaterial aufwirbelte, das über große Distanzen verweht wurde. McConnell betont jedoch,

dass die zu Grunde liegenden Wechselwirkungen noch nicht hinreichend genau verstanden seien, um solche Schlüsse ziehen zu können.

Möglicherweise erhöhen steigende Temperaturen den Staubgehalt in der Atmosphäre, indem sie Böden austrocknen lassen und so zur vermehrten Wüstenbildung beitragen. Das scheint aber nur ein kurzfristiger Effekt zu sein; über längere Zeiträume hinweg gehen hohe atmosphärische Staubkonzentrationen offenbar mit einer Abkühlung einher. So zeigen McConnells Ergebnisse, dass zwischen dem 10. und 13. Jahrhundert – einer Periode moderater Erwärmung und stärkerer Niederschläge im Nordatlantik – weniger Staub in die Antarktis gelangte. Zwischen dem 13. und dem 19. Jahrhundert hingegen, als die Durchschnittstemperaturen sanken und weniger Niederschläge fielen, setzte sich mehr Staub rund um den Südpol ab. Im Zentrum Grönlands wiederum zeigen die Eisbohrkerne eine zunehmende Staubkonzentration über drei Jahrhunderte hinweg bis in die 1930er Jahre hinein, gefolgt von einem Rückgang (siehe Kasten unten).

Aufgewirbelte Bodenpartikel beeinflussen jedoch nicht nur die Atmosphäre, sie wirken auch als Dünger, der sich in gewaltigen Mengen über Ozeane und Länder ergießt. Bei ihrer Drift nach Westen fallen viele Staubkörner in den Atlantik. Sie tragen Eisen ins Meerwasser ein und regen dadurch das Wachstum von Phytoplankton an. Dieses nimmt Kohlendioxid aus der Atmosphäre auf und wandelt es fotosynthetisch in Biomasse um. Wenn die Phytoplanktonorganismen absterben, sinken sie in die Tiefe und entfernen den gebundenen Kohlenstoff für Jahrhunderte aus der Atmosphäre.

Die Ozeane enthalten fast 85 Prozent des irdischen Kohlenstoffs, der nicht in Gesteinen gebunden ist. Damit erweist sich das Phytoplankton als einer der wichtigsten Akteure im

Kohlenstoffkreislauf. Große Teile der Weltmeere enthalten zwar reichlich Stickstoff und Phosphor, aber nur wenig Eisen, was das Planktonwachstum einschränkt. Diese Erkenntnisse stachelten manche Wissenschaftler zu ehrgeizigen Geoengineering-Träumen an. Viele dachten etwa so: Die Weiten der südlichen Ozeane und des Nordwestpazifiks sind nährstoffreich, bringen aber nur bescheidene Planktonblüten hervor. Hier brauche man nur reichlich Eisen ins Meer zu kippen, und schon würde sich das Phytoplankton enorm vermehren, Unmengen Kohlendioxid binden und schließlich damit zum Ozeangrund sinken. Eine einfache Idee, die auf den ersten Blick verspricht, den Gehalt an Treibhausgasen in der Atmosphäre rasch zu senken.

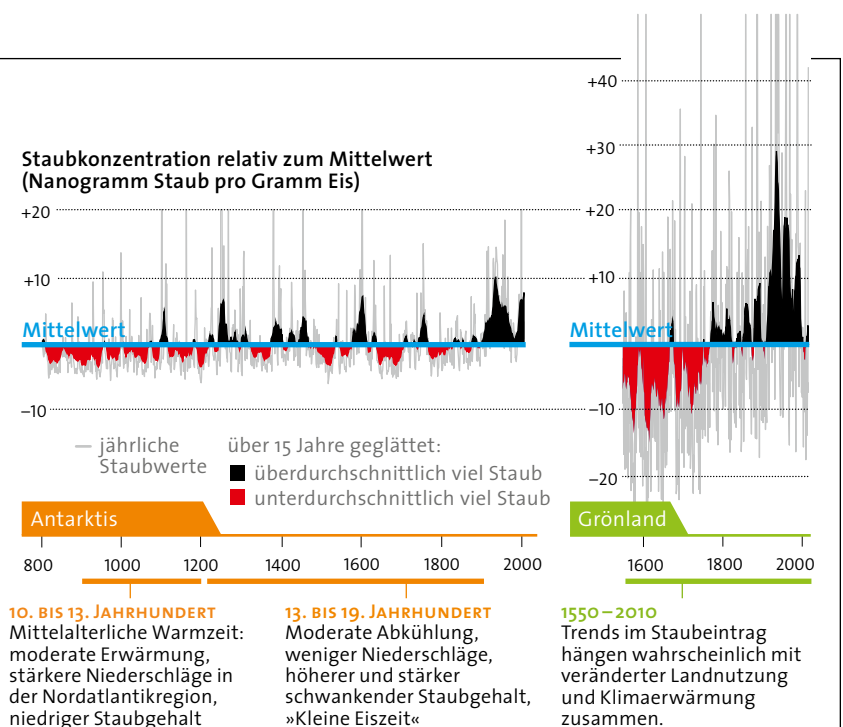
Eingriff mit unabwägbar Folgen

Es dauerte jedoch nicht lange, bis man die Gefahren eines solchen Vorgehens erkannte. Es können zahlreiche unbeabsichtigte Folgen eintreten, etwa eine drastisch veränderte Verteilung der Mikroorganismen-Spezies entlang der Wassersäule. Das ist nicht zwangsläufig schlimm, doch die Auswirkungen sind unvorhersehbar. Neue Ökosysteme erweisen sich oft als weniger vielfältig und produktiv als diejenigen, die sie ersetzt haben. Zudem besteht die Gefahr, dass die Planktonwolken, die sich nach der Eisendüngung bilden, nicht nur Kohlendioxid in die Tiefe ziehen, sondern auch Phosphor und Stickstoff. Diese Nährstoffe stünden im Meerwasser dann möglicherweise nicht mehr ausreichend zur Verfügung.

Es gibt noch weitere Argumente gegen die künstliche Düngung der Ozeane. Die Menge an Eisen, die mit dem afrikanischen Staub ins Meereswasser gelangt, kann stark variieren. Säuren, die etwa bei der Verbrennung von Biomasse und anderen organischen Stoffen entstehen, können mit den

Spuren der Vergangenheit

Auf den Eisschilden Grönlands und der Antarktis setzen sich ständig Staubpartikel ab, die vorher mitunter tausende Kilometer gedriftet sind. Wenn später eine neue Eisschicht auf dem Schild entsteht, werden die Partikel eingeschlossen. Bohrkerne, die tief ins Eis hineinreichen, erlauben es, in dessen Schichten zu lesen wie in einem Klimaarchiv. Anhand solcher Kerne können Forscher den Staubgehalt der Atmosphäre in zurückliegenden Jahrhunderten rekonstruieren. Kühle Perioden scheinen mit mehr Staub in der Atmosphäre einherzugehen. Aber auch andere Effekte spielen eine Rolle, etwa eine veränderte Landnutzung.





Partikeln reagieren und dadurch das Eisen wasserlöslicher machen. Indem wir also Treibstoffe und Abfall verbrennen, tragen wir bereits dazu bei, dass die Menge des verfügbaren Eisens in den Meeren steigt. »Sie dürfte sich durch menschliche Aktivitäten verdoppelt haben«, schätzt Mahowald. »Außerdem gibt es viel mehr sedimentäres Eisen in den Ozeanen als früher angenommen. Überraschend viel wird aus den Schelfmeeren eingetragen. Deshalb spielt das Eisen, das über die Atmosphäre in die Meere gelangt, eine geringere Rolle, als wir dachten.«

Sehr wichtig ist die Staubbüngung aber unbestritten für das Amazonasbecken. Die Böden dort sind sehr alt. Fortwährend prasselt Regen auf sie nieder, weshalb viele essenzielle Nährstoffe wohl schon vor langer Zeit ausgewaschen wurden. Warum bleibt die Gegend dennoch fruchtbar? Manche meinen, die Zersetzung pflanzlichen Materials sei dafür verantwortlich. Andere halten das für unwahrscheinlich und fragen sich, wie Amazonien überhaupt eine solch üppige Pflanzen- und Tierwelt hervorbringen konnte. »Eine einleuchtende Hypothese besagt, dass die Fruchtbarkeit des Amazonasbeckens zum großen Teil auf den afrikanischen Staub zurückgeht, der Jahr für Jahr niederrieselt«, sagt Daniel Muhs vom U.S. Geological Survey. »Wie sonst hätte sich die enorme Artenvielfalt in einer so heißen, feuchten und alten Landschaft erhalten können, in der die Böden längst ausgelaugt sein sollten?«

Neue Studien haben interkontinentale Staubbdriften auch in anderen Gebieten bestätigt. Muhs etwa hat sie anhand von Bodenproben für verschiedene Karibische Inseln nachgewiesen. »Auf einigen davon besteht die Erde ausschließlich aus afrikanischem Staub, auf anderen zumindest teilweise«, erläutert er. Manche Inseln setzen sich aus Kalkstein, Korallenriffen und Sand zusammen, doch ihre Bodenkrume ist reich an Lehm, Ton und Aluminiumsilikaten mit erkennbar anderer Herkunft. Für diese Materialien gibt es zwei mögliche Quellen: Asche aus einem vulkanisch aktiven Teil der Karibik oder Staub aus Afrika. An einigen Orten, etwa auf Barbados, bestehen die Böden aus beidem. Anderswo, etwa auf den Bahamas und den Florida Keys, stammt fast das gesamte Material aus Afrika. »Unsere Untersuchungen auf Barbados an fossilen Rif-

fen deuten darauf hin, dass die interkontinentale Staubbdrift schon seit hunderttausenden Jahren andauert«, sagt Muhs.

Nicht nur die Staubpartikel haben eine tief greifende Wirkung auf das Klima, der Einfluss wirkt auch umgekehrt. »Der Klimawandel verändert die Windgeschwindigkeiten und Niederschläge«, sagt Prospero, »und das hat Folgen für den Staubtransport. Die Körnchen reagieren schon auf kleine Veränderungen bei Wind und Regen.« Hinweise darauf finden sich etwa in Eiskernen: Während früherer Kaltzeiten setzte sich mehr Staub ab als während der Warmzeiten. »Allerdings versuchen wir immer noch herauszufinden, ob zuerst das Huhn oder das Ei da war«, sagt Muhs. »Führten die Kaltzeiten zu stärkerem Staubbiederschlag oder verursachte mehr atmosphärischer Staub die Kaltzeiten? Da gibt es viele Rückkopplungen, und es wird schnell sehr kompliziert.« Das macht die vermeintlich einfachen Lösungen des Klimawandelproblems – etwa Bioengineering-Träume wie das Düngen der Ozeane mit Eisen – von vornherein verdächtig.

Auch John M. Prospero betont, dass die verschachtelten Rückkopplungsschleifen des Klimageschehens kaum verstanden sind. In den ersten Jahrzehnten seiner Staubbforschung beobachtete er gut nachvollziehbare Phänomene. So fielen hohe Staubeinträge auf Barbados und in Miami zeitlich eng mit Dürreperioden in Nordafrika zusammen: je trockener dort, umso mehr Staub hier. Doch in den 1990er Jahren änderte sich das. »Jetzt gibt es keine Korrelation mehr, und wir wissen nicht, was vor sich geht. Das verwirrt uns und macht uns Sorgen«, sagt Prospero. Er befürchtet, der Staub könne ein weiterer Indikator dafür sein, dass das komplexe Klimasystem immer mehr aus dem Gleichgewicht gerät. ~

DER AUTOR



Jeffrey Bartholet ist langjähriger Auslandskorrespondent der Zeitschrift »Newsweek« und früherer Leiter des »Newsweek«-Büros in Washington.

QUELLEN

Prospero, J.M. et al.: Environmental Characterization of Global Sources of Atmospheric Soil Dust Identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Absorbing Aerosol Product. In: Reviews of Geophysics 40, 1002, 2002

Shao, Y. et al.: Dust Cycle: An Emerging Core Theme in Earth System Science. In: Aeolian Research 2, S. 181–204, 2011

WEBLINKS

www.rgs.org/OurWork/Grants/Grant+recipients/Example+projects/The+Dustiest+Place+of+Earth.htm
Informationen über das BodEx-Feldexperiment (Bodélé Dust Experiment), ein Projekt der britischen Royal Geographical Society in der Bodélé-Depression

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152350

Die Zukunft der Schokolade

Den Maya galten Kakaobohnen als Geschenk der Götter, heute begründen sie ein Milliardengeschäft. Doch dessen Zukunft ist ungewiss, denn Klimawandel, Krankheiten und andere Widrigkeiten setzen dem empfindlichen Kakaobaum zu.

Von Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro

Götterspeise, so lautet die Übersetzung des botanischen Namens *Theobroma cacao* für den Kakaobaum. Denn in vorkolumbischer Zeit sahen die Völker Mittelamerikas ein Gebräu aus fermentierten, gerösteten und zerstoßenen Kakaobohnen als zeremonielle Speise an. Die Maya sollen als Erste die wilden Pflanzen in Gärten kultiviert haben. Von den Azteken lernten die spanischen Eroberer den heute gebräuchlichen Begriff Schokolade: »xocóatl«, bitteres Wasser, nannten sie das heilige Getränk.

Mitte des 16. Jahrhunderts brachten die Konquistadoren Kakaobohnen mit in ihre Heimat, wo Adlige sich den Aufguss gesüßt und mit Aromen versetzt servieren ließen. Bereits im folgenden Jahrhundert war die Trinkschokolade eine elitäre Mode geworden, in der Folge verbreitete sich der Plantagenanbau in den Kolonien.

Zudem schrieb man dem Getränk allerlei heilende Wirkung zu. Im 19. Jahrhundert galt Kakao beispielsweise den Kubanern als Aphrodisiakum, und zu Beginn des 20. Jahrhunderts empfahl die berühmte amerikanische Köchin Fanny Farmer seinen stimulierenden Effekt bei schwacher Verdauung. Seit wenigen Jahren wissen Pharmazeuten, dass die Bohnen tatsächlich medizinisch wirksame Substanzen ent-

Bis zu 30 Zentimeter lang sind die Baumfrüchte, aus deren Samen heutzutage das Produkt Schokolade in einer kaum überschaubaren Variantenvielfalt hergestellt wird.



AUF EINEN BLICK

BEDROHTE LECKEREI

1 Schokolade wird aus Kakaopulver hergestellt, das man aus den **Samen des Kakaobaums** gewinnt. Doch diese Pflanze gibt Anlass zur Sorge: Da sich die wenigen Sorten genetisch stark ähneln, können sich **Pilz- und Virusinfektionen** wie Seuchen ausbreiten.

2 Weitere Probleme: Die **Klimaerwärmung** bedroht die klassischen Anbaugelände in Afrika und Lateinamerika. Armut und unzureichende Kenntnisse erschweren den Einsatz ertragssteigernder Techniken.

3 Wissenschaftler nutzen genetische Informationen, um **widerstandsfähigere Sorten** zu züchten. Außerdem gilt es, die Bauern besser zu schulen, ihnen Zugang zu preiswertem Dünger zu verschaffen und neue Methoden etwa zu **Bewässerung und Schädlingsbekämpfung** zu erproben.



ADAM VOORHES PHOTOGRAPHY

halten. So weisen einige Studien etwa darauf hin, dass der Verzehr dunkler Schokolade hohen Blutdruck senken kann. Freilich nur in angemessener Dosierung, denn die Leckerei ist ausgesprochen kalorienreich.

Die eigentliche Karriere des Kakaos begann freilich, nachdem der holländische Apotheker Coenraad van Houten ein Verfahren ersonnen hatte, durch Walzen der zerkleinerten Bohnen Kakaobutter zu gewinnen und sie später zusammen mit Zucker und anderen Ingredienzien dem Pulver wieder beizumischen – das Ergebnis ist die beliebte feste Schokolade.

Von der Hand in den Mund

Nur etwa zehn Prozent der Kakaobohnen stammen von großen Plantagen. Tatsächlich leben weltweit fünf bis sechs Millionen Familien von ihren Bäumen, die meisten davon im tropischen Afrika: Die Republik Côte d'Ivoire (Elfenbeinküste) liefert 40 Prozent des weltweit verbrauchten Rohkakaos, Ghana, Nigeria und Kamerun zusammen weitere 30 Prozent. Die Bauernfamilien und ihre Arbeiter ernten die 25 bis 30 Zentimeter großen Früchte, lösen die darin liegenden 30 bis 60 Samen heraus, lassen sie in Kisten oder Fässern gären und dann in der Sonne trocknen. Nun sind die Bohnen lagerfähig und werden zur Weiterverarbeitung verschifft. Die zweite Phase bis zum Verkauf der fertigen Produkte sichert weiteren 40 bis 50 Millionen Menschen ihren Lebensunterhalt.

Die Bedeutung des Kakaoanbaus zeigen auch folgende Angaben: 15 Prozent des Bruttoinlandsprodukts der Republik Côte d'Ivoire basieren darauf, und fünf Prozent aller Haushalte dort leben davon. Reich werden die Bauern allerdings nicht: »Viele leben von der Hand in den Mund. Sie pflücken einige Früchte und verkaufen sie schnell, um Schulgebühren oder Arztkosten bezahlen zu können«, berichtet Peter Läderach vom International Center for Tropical Agriculture. Er leitete Studien über die Auswirkung des Klimawandels auf den Kakaoanbau in der Republik Côte d'Ivoire und in Ghana.

Solche Forschung tut not, denn *Theobroma cacao* ist ein heikles Gewächs: Es bevorzugt fruchtbare, durchlässige Böden, die in den Tropen jedoch selten sind, außerdem braucht es Wärme und Feuchtigkeit.

Das beschränkt die Anbauggebiete auf einen schmalen Gürtel von etwa 18 Grad geografischer Breite nördlich beziehungsweise südlich des Äquators. Die dortigen Bedingungen fördern aber auch Schädlinge und Pilzinfektionen.

1982 eröffnete der Lebensmittelkonzern Mars daher in der Anbauregion von Bahia (Brasilien) ein Zentrum für Kakaoforschung. Sechs Jahre später entdeckten Forscher in den Plantagen die durch Pilze verursachte Hexenbesenkrankheit (witches' broom), die ihren Namen besenartigen Wucherungen verdankt. Befällt der Pilz *Moniliophthora perniciosa* eine Blüte, bringt diese keine Frucht hervor. Befallene Triebe müssen herausgeschnitten und verbrannt werden, doch die Krankheit ist hartnäckig. In der Region Bahia sackte der

Die gebräuchlichsten Sorten des Kakaobaums ähneln sich in ihrer Erbsubstanz. Das fördert die Anfälligkeit für Krankheiten



MIT FROD. GEN. VON MARS INCORPORATED

Ernteertrag um 80 Prozent ab; Familien, die seit Generationen vom Kakaoanbau gelebt hatten, mussten ihre Farmen verlassen. Derzeit breitet sich erneut eine Pilzkrankheit in Lateinamerika aus: die Weiße Schotenfäule (frosty pod, *Moniliophthora roreri*), die junge Kakaofrüchte befällt. Noch sind beide auf den amerikanischen Kontinent begrenzt. Würden sie in die Anbauggebiete Afrikas gelangen, drohte weltweit ein Ernteeinbruch um bis zu 25 Prozent. Und das bei wachsender Nachfrage: Von derzeit etwa 3,7 Millionen Tonnen soll sie bis 2020 auf mehr als 4 Millionen Tonnen Kakao steigen.

Doch auch außerhalb Amerikas gibt es genug Probleme: Die Larven der javanischen Kakaomotte (cacao pod borer,

Conopomorpha cramerella Snellen) bohren sich in die Früchte und fressen deren Fleisch; die Tiere verursachen in Südostasien Verluste von bis zu 600 Millionen Dollar pro Jahr. Dort grasst auch der Pilz »vascular-streak dieback« (*Oncobasidium theobromae*),

der dafür sorgt, dass die Bäume ihre Blätter verlieren. Der »swollen shoot virus« aus der Familie der Caulomoviridae wird in Westafrika von Schmierläusen beim Saugen des Pflanzensafts übertragen und lässt einen Kakaobaum nach spätestens zwei Jahren absterben. Außerdem ist in Ghana die Schwarzfäule (black pod rot) verbreitet, deren Verursacher zur Gattung der *Phytophthora* gehören, das sind pilzähnliche Mikroorganismen, auch Oomyceten oder Algenpilze genannt. Experten fürchten, dass diese Plagen bald

Dieser Kakaobaum (links) auf den Philippinen ist von der Schwarzfäule betroffen. Die Infektion durch pilzähnliche Mikroorganismen ist leicht an den Verfärbungen der Früchte zu erkennen.

Brasilianische Bauern setzen neuerdings ihre Kakaobäume zusammen mit anderen Bäumen, hier mit Kokospalmen. So können sie nicht nur das ganze Jahr hindurch Nahrungsmittel ernten und Einkommen erzielen; das heterogene Wurzelwerk sorgt obendrein dafür, dass der Boden Wasser besser speichert.



MIT FROLD GEN VON MAIS INCORPORATED

auch auf die benachbarte Republik Côte d'Ivoire übergreifen könnten. Westafrika stünde dann ein ähnlicher Ertragsseinbruch bevor wie Brasilien Ende der 1990er Jahre.

Die Bedrohung ist nicht zuletzt eine Folge der begrenzten genetischen Vielfalt des Kakaobaums. Unser Kollege Juan Carlos Motamajor und sein Team fanden heraus, dass es von der botanischen Art *Theobroma cacao* gerade einmal zehn genetisch unterschiedliche Varietäten gibt. Mit anderen Worten: Die auf den Plantagen dieser Welt gebräuchlichen Sorten ähneln sich in ihrer Erbsubstanz sehr. Das erleichtert es zwar, sie miteinander zu kreuzen, macht sie aber auch mehr oder weniger gleich anfällig für Krankheiten und Schädlinge. Ziehen Bauern aus den selbst geernteten Samen neue Bäume, schwächt lokale Inzucht die Widerstandskraft ihrer Pflanzen noch weiter.

Der Anbau wird aus einem weiteren Grund zunehmend problematisch. Die Landwirtschaft in den Tropen hatte immer schon mit extremen Wetterverhältnissen zu kämpfen – Fluten, Dürren und Stürme kommen regelmäßig vor. Nun könnte der Klimawandel alles noch schlimmer machen. 2007 sagte der Report des Intergovernmental Panel on Climate Change voraus: Bis 2020 könnten in einigen Ländern Afrikas die Erträge um bis zu 50 Prozent zurückgehen, sofern die Flächen allein durch Regen bewässert werden – das betrifft auch den Kakaobaum. Läderachs Forschungen zufolge müssten Anbauggebiete in Ghana und der Republik Côte d'Ivoire in höher gelegene Regionen verlegt werden, um dem Anstieg der mittleren Temperatur Rechnung zu tragen, doch »in weiten Bereichen Westafrikas gibt es solche Gebiete gar

nicht«, so der Studienleiter. Während Afrika unter Trockenheit und Hitze leiden wird, trifft der Klimawandel Indonesien auf andere Weise: Der jährliche Monsunregen fällt in kürzerer Zeit, dann aber oft mit einer Wucht, die Kakaoblüten beschädigt und damit die Fruchtbildung verhindert.

Die Probleme der Dritten Welt sind auch die Probleme der Kakaoindustrie

Nicht weniger bedrohlich sind gerade in Westafrika die gesellschaftlichen Probleme. So leben in der Republik Côte d'Ivoire und in Ghana Angehörige verschiedener ethnischer Gruppen zusammen – ein Konfliktpotenzial, das durch Migranten aus dem ärmeren Nachbarland Burkina Faso noch verstärkt wird. Kinder- und Zwangsarbeit kommen vor; Mars arbeitet mit den Regierungen zusammen, um die Plantagen der Elfenbeinküste und Ghanas zu zertifizieren. Zudem sind die Eigentumsrechte kompliziert, weshalb Bauern zögern, neue Bäume zu kaufen. Junge Menschen verlassen die Kakaoanbauggebiete und suchen ihr Heil in den Städten, wodurch das Durchschnittsalter auf dem Land steigt, während der Bildungsgrad sinkt. Armut und mangelnde Kenntnisse wiederum haben zur Folge, dass Düngemittel, Herbizide und Pestizide wenig bis gar nicht eingesetzt werden; die Produktivität der Plantagen könnte sonst oft dreimal so groß sein.

Schädlinge, Krankheiten, Klimaveränderung, Armut und fehlendes Wissen – es ist ein ganzes Paket von Problemen, das den Kakaoanbau weltweit gefährdet. Schutzmaßnahmen müssen an all diesen Punkten ansetzen. Beispielsweise verlegt man in Bahia große Kakaoplantagen in höhere Regio-

nen, in denen die üblichen Schädlinge und Infektionen weniger stark grassieren. Damit sie in der prallen Sonne dort produktiv sein können, versorgt man die Bäume mit Wasser, in dem Dünger gelöst ist.

Ein Ziel unserer Forschungseinrichtung ist es, die Erträge zu steigern, ohne durch zusätzliche Landgewinnung Regenwald zu vernichten. Stattdessen müssen vorhandene Brachflächen aufbereitet werden, indem man einerseits die Böden mit Dünger anreichert, andererseits Bäume und Sträucher pflanzt, um die Bodenerosion infolge von Wind und Starkregen zu begrenzen.

In Brasilien beispielsweise lernen Bauern, Agroforstwirtschaft zu betreiben: Sie pflanzen die Kakaobäume zwischen Nahrungsmittelpflanzen und andere Bäume, deren Laub Viehfutter und deren Holz Rohstoff liefern. Die jeweiligen Wurzelstrukturen der unterschiedlichen Bäume verbessern die Speicherkapazität des Bodens für Regenwasser, Trocken-

zeiten werden länger ertragen. Bauern in Vietnam kämpfen mit schwindendem Grundwasser, weil sie zu viel davon zur Bewässerung entnommen haben. Nun bauen sie Reservoirs, um Niederschläge zu sammeln.

Derzeit erbringt ein Hektar Kakaopflanzung im Weltdurchschnitt ungefähr 450 Kilogramm Bohnen. Mit Hilfe moderner landwirtschaftlicher Techniken ließe sich dieser Wert leicht auf 1500 Kilogramm steigern. Für viele Kakaobauern entspräche das dem Unterschied zwischen dem täglichen Kampf ums Überleben und einem gesicherten annehmbaren Lebensstandard.

Anfang 2009 startete die World Cocoa Foundation (WCF) ein 40-Millionen-Dollar-Programm, das von der Bill & Melinda Gates Foundation und 16 Unternehmen finanziert wird. Es soll die Lebensgrundlage von schätzungsweise 200 000 Kakaobauern in fünf west- und zentralafrikanischen Ländern verbessern. Im Rahmen des auf fünf Jahre angelegten

Regionale Unterschiede – weltweite Anstrengungen zur Ertragssteigerung

Nur zwischen 18 Grad nördlicher und 18 Grad südlicher Breite finden Kakaobäume günstige Wachstumsbedingungen: Wärme und Feuchtigkeit. Die lassen aber auch Schädlinge und Mikroorganismen gedeihen.

BEDROHUNGEN

Die **Weißer Schotenfäule**, eine Pilzkrankung, hat sich über Mittelamerika ausgebreitet und könnte bald Brasilien erreichen.

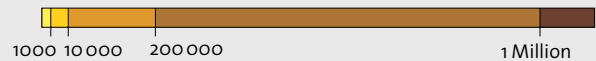
Infolge der Klimaerwärmung fallen **Niederschläge** in Brasilien **nur unregelmäßig**.

Arme Bauern in Ghana und anderen Staaten Westafrikas können sich Düngemittel, Fungizide und Pestizide nicht leisten. Ihre Erträge bleiben daher weit hinter den Möglichkeiten zurück.

Die **Kakaomotte** verursacht in Ostasien jährlich Ernteverluste von hunderten Millionen Dollar.



Kakaoproduktion (Tonnen, 2009)



MASSNAHMEN

Mit Hilfe der Genkarte des Kakaobaums identifizieren Wissenschaftler genetische Varianten, die widerstandsfähiger gegen Krankheiten sind. So können Züchter ihre Kreuzungen besser selektieren.

Agroforstsysteme sind **Mischpflanzungen**, die nicht nur Erträge steigern, sondern auch Trockenzeiten besser überstehen.

Das **Cocoa Livelihoods Program** schult Bauern und verbessert so die Effizienz ihrer Arbeit.

Um die Biodiversität in der jeweiligen Region zu erhalten, setzen Bauern die **natürlichen Feinde der Schädlinge** ein, in Südostasien beispielsweise Schwarze Ameisen gegen die Kakaomotte.



Projekts erhalten einige von ihnen eine Ausbildung und geben ihre Kenntnisse dann an andere weiter. Neben den spezifischen Themen wie Krankheitsmanagement, Baumschnitt und Ernte gehören auch Malaria, HIV/Aids, technische Sicherheitsvorkehrungen und das Vermeiden von Kinderarbeit zu den Themen. Laut Bill Guyton, Präsident des WCF, steigerten Absolventen der Kurse ihr Einkommen um 23 bis 55 Prozent.

Vor zwei Jahren gelang ein großer Schritt nach vorn: Wissenschaftlern unseres Konzerns, Forschern des Agricultural Research Service (ARS; eine Einrichtung des US-amerikanischen Landwirtschaftsministeriums), von IBM und weiteren Einrichtungen war es gelungen, das Genom der so genannten Varietät Matina 1-6 von *Theobroma cacao* zu sequenzieren und zu analysieren. Diese gilt als der Vorläufer von mindestens 96 Prozent aller Kakaobäume. Die Ergebnisse wurden frei zugänglich gemacht. Ein anderes Konsortium, das von der französischen landwirtschaftlichen Forschungsorganisation CIRAD geleitet wird, veröffentlichte bald darauf die Gensequenz einer anderen Kakaosorte.

Von Nutzen sind solche Analysen vor allem dann, wenn sie die Züchter in den Anbauländern unterstützen. So entdeckte Wilbert Phillips-Bora in Costa Rica eine Kulturvarietät, die sich weniger anfällig gegen »frosty pod rot« zeigte. Er schickte Proben davon an die Molekularbiologen in einem von Mars mitorganisierten Netzwerk, um anhand der Genkarten jene Genvarianten zu identifizieren, die diese Widerstandsfähigkeit verleihen. Damit kann man nun bei Züchtungsversuchen leichter überprüfen, ob eine neue Sorte die begehrte Eigenschaft trägt. Schon jetzt pflanzten Bauern in Lateinamerika Zweige der entsprechenden Varietät auf ihre Bäume.

Es wurden auch schon gegen die Hexenbesenkrankheit resistente Sorten entdeckt, allerdings produzieren sie Kakaobohnen schlechter Qualität. Derzeit suchen Wissenschaftler nach der genetischen Grundlage, die einer bestimmten Sorte Widerstandskraft gegen die in Südostasien grassierende Krankheit »vascular-streak dieback« verleiht. Letztendlich

hoffen sie, durch sorgfältige Kreuzungen Resistenzen mit hohem Ertrag und gute Qualität zu kombinieren. Natürlich gibt es noch etliche und durchaus sehr ehrgeizige weitere Ziele: Bäume, die auch bei Hitze und Wassermangel gedeihen, sowie eine geringere Wuchshöhe. Bei der Ernte schneiden die Farmer die Kakaofrüchte mit Messern ab, die sie an langen Stäben befestigen. Diese Arbeit ist anstrengend, zudem besteht die Gefahr, die Pflanzen zu verletzen. Niedrigere Sorten wären eine große Erleichterung.

Neben der Erhöhung der Erträge gilt es auch, diesen Landwirtschaftszweig nachhaltig zu gestalten. Und zwar nicht allein im Sinn einer Bewahrung der Plantagen für künftige Generationen, sondern auch in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht. Effektive Dünger, Fungizide und Schulungsprogramme gibt es bereits, Bauern und Labore entwickeln miteinander widerstandsfähigere Sorten. Zum Maßnahmenpaket gehört das schon erwähnte Konzept der Agroforstwirtschaft ebenso wie der Kampf südostasiatischer Pflanzler gegen die Kakaomotte mit Pheromonfallen und dem natürlichen Feind der Schädlinge – Schwarzen Ameisen – statt mit einem vermehrten Einsatz von Pestiziden. Entscheidend ist, dass die Summe dieser Maßnahmen letztlich den Bauern ein sicheres Einkommen verschafft und so auch die sozialen Spannungen in den Anbauländern mindert. ~

DIE AUTOREN



Der Lebensmittelwissenschaftler **Harold Schmitz** (links) koordiniert als Chief Science Officer alle Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des US-amerikanischen Nahrungsmittelkonzerns Mars. Zu seinen Forschungsschwerpunkten

gehören ökologische, soziale und kulturelle Nachhaltigkeit in der Lebensmittelproduktion. **Howard-Yana Shapiro** ist leitender Mitarbeiter in der Abteilung Plant Science and External Research bei Mars. Er lehrt zudem Botanik an der University of California in Davis. Shapiro koordinierte die verschiedenen internationalen Vorhaben, das Genom des Kakaobaums (*Theobroma cacao*) zu sequenzieren.

QUELLEN

Grivetti, L. E., Shapiro, H.-Y. (Hg.): Chocolate: History, Culture, and Heritage. Wiley, New York 2009

Zapke, S.: Kakao – Fairer Handel für faire Chancen: Alternative Formen zum konventionellen Welthandel mit Kakao. Grin, München 2011

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/feb2012/chocolate
Ein englischsprachiger Abriss der Geschichte der Schokolade
www.youtube.com/watch?v=DagakV6Ts3M&feature=related
Video über organischen Kakaobau

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1149654

Schnüffelnde Transistoren

Eine perfekte Nase könnte Sprengstoff auffinden, Lebensmittel überprüfen und alle erdenklichen Emissionen kontrollieren. Doch bei der Entwicklung eines verlässlichen elektronischen Spürsinn müssen Forscher noch manches Problem lösen.

Von David R. Walt, Shannon E. Stitzel und Matthew J. Aernecke

» Welcher Organsinn ist der undankbarste und scheint auch der entbehrlichste zu sein? Der des Geruchs. Es belohnt nicht, ihn zu kultivieren oder wohl gar zu verfeinern«, schrieb der Philosoph Immanuel Kant im 18. Jahrhundert. Ein recht drastisches Urteil und wohl auch nicht ganz zutreffend, wie jeder weiß, der schon einmal Schnupfen hatte: Die von Speisen und Getränken ausgehenden Düfte werden im Mundraum über den Rachen auch den Riechrezeptoren zugeführt. Wäre dem nicht so, würden wir Rotweinen keine Vanillenote zuschreiben und Fernsehkochduelle lediglich nach den Geschmacksgrundkategorien sauer, salzig, süß, bitter und glutamatartig (umami) entscheiden. Zudem kann der Geruchssinn Leben retten: indem er vor giftiger und verdorbener Nahrung, toxischen Gasen oder Raubtieren warnt.

Vor allem diese einzigartige Fähigkeit veranlasst Forscher seit gut 30 Jahren, künstliche Nasen zu entwickeln, die den Riechsinn der Säugetiere mit technischen Mitteln zumindest ansatzweise imitieren. Sie könnten in der Lebensmittelherstellung Gärungsprozesse überwachen oder die Frische transportierter Produkte prüfen, in der medizinischen Diagnostik Mikroben, in der Sicherheitstechnik Nervengase und

Sprengstoffe aufspüren. Denn Menschen oder auch eigens geschulte Tiere vermögen nicht alle solche Stoffe zu riechen. Abgesehen davon: Lebewesen ermüden, ihre Wahrnehmung gewöhnt sich an einen Dauerreiz und ist überdies stets subjektiv. Der amerikanische Erfinder Alexander Graham Bell klagte deshalb 1914 in einem Vortrag: »Haben Sie je versucht, einen Geruch zu messen? Kann man sagen, dass ein Geruch doppelt so stark ist wie ein anderer? Wenn Sie den Ehrgeiz haben, eine neue Wissenschaft zu begründen, messen Sie einen Geruch.«

Es sollte noch Jahrzehnte dauern, bis Forscher dieser Forderung nachkamen, denn olfaktorische Systeme (nach dem lateinischen *olfacere* = riechen) sind kompliziert. Säugetiere können Tausende verschiedener Gerüche erkennen, einerlei ob es sich dabei um eine einzige Molekülsorte handelt oder um ein Gemisch aus verschiedenen Komponenten. Zudem erfolgt die Wahrnehmung sekundenschnell und in Konzentrationen, die vom gesättigten Dampf bis zum ppb-Bereich (parts per billion, Teile pro Milliarde) reichen.

Durch Einatmen gelangen die Moleküle zur Schleimhaut der Nasenhöhle. Schon dabei können Mischungen allein durch den zurückzulegenden Weg aufgetrennt werden, bevor sie zu den Sinneszellen gelangen. Die amerikanischen Forscher Linda Buck und Richard Axel haben 1991 den biochemischen Mechanismus des Riechens aufgeklärt (Nobelpreis für Medizin 2004): Proteine in den Zellmembranen bilden Hohlräume; passt ein Duftmolekül hinein, löst das eine biochemische Kaskade aus. Dabei wird der Reiz derart verstärkt, dass schon bei geringsten Konzentrationen ein elektrisches Signal entstehen kann und über den Riechnerv zu den Verarbeitungsstationen im Gehirn gelangt.

Im Unterschied zu den Rezeptormolekülen anderer Sinne sind Duftrezeptoren keine selektiven Spezialisten, sondern reagieren auf viele Substanzen, sofern diese sich chemisch ähneln; je größer die Abweichung, desto schwächer fällt die Rezeptorantwort aus. Säugetiergenome kodieren etwa 1000 solcher Moleküle; dank der Breitbandreaktion lassen sich aber weit mehr Düfte erkennen. Die Signale aller aktivierten Sensoren überlagern einander im Riechkolben, einer zur Na-

AUF EINEN BLICK

MIT ELEKTRONIK RIECHEN

1 Viele **Säugetiere** vermögen Tausende gasförmiger Stoffe voneinander zu unterscheiden und selbst geringe Spuren davon noch wahrzunehmen. Dieser hoch entwickelte Geruchssinn liefert aber nur qualitative Ergebnisse. Außerdem steht er nicht permanent zur Verfügung.

2 Forscher entwickeln deshalb **elektronische Systeme**. Diese sollen etwa zur Prozesskontrolle in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden, die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten überwachen oder Gefahrstoffe entdecken.

3 Kern jedes Systems ist ein Array von Sensoren. Die meisten reagieren nicht spezifisch auf bestimmte Gase; die Systeme können Gasgemische lediglich mittels **Mustererkennung** anhand der Sensorantworten voneinander unterscheiden.

senhöhle hin gelegenen Hirnstruktur, zu einem komplexen Antwortmuster. Das ist der Kode, anhand dessen nachgeordnete Instanzen die Identität eines Duftstoffs (Odorant) erkennen und eine bewusste Wahrnehmung generieren. Das Aufsummieren verbessert überdies das Signal-Rausch-Verhältnis und dient auch der Verstärkung.

Das erste Olfaktometer, mit dem sich Düfte messen lassen sollten, präsentierte bereits 1888 der niederländische Physiologe Hendrik Zwandemaker: Er hatte die Innenwand eines großen Reagenzglases mit einer öligen Flüssigkeit bedeckt, die den Duftstoff enthielt, und eine kleinere Röhre eingeführt, an deren Ende ein Proband schnupperte. Die Intensität der Wahrnehmung variierte, je nachdem, wie tief das Röhrchen in den Behälter eindrang. Zwandemaker experimentierte auch mit

zwei solchen Geräten gleichzeitig, um zu sehen, welche Düfte sich in ihrer Wirkung aufhoben. Tatsächlich bestand die erste praktische Anwendung dieser Olfaktometer darin, Substanzen zu finden, die schlechte Gerüche neutralisierten.

Des Weiteren dienten sie dazu, die Schwelle der Wahrnehmbarkeit zu bestimmen, indem beispielsweise die Aus-

Raubtiere wittern ihre Beute, Pflanzenfresser wiederum ihre Feinde. Auch dem Menschen hat die Wahrnehmung von Gerüchen im Lauf der Evolution gute Dienste geleistet, etwa bei der Entscheidung, ob Nahrung genießbar oder giftig ist. Elektronische Nasen (im Bild ein Prototyp der NASA) imitieren die biologischen Vorbilder, reichen aber noch lange nicht an sie heran.



dünstungen von Abfällen immer weiter verdünnt wurden. Weiterentwicklungen solcher »mechanischen Nasen« sind noch heute in Gebrauch, beispielsweise um Schwellenwerte für unangenehm riechende Emissionen zu ermitteln: Jene Konzentration in einer Verdünnungsreihe gilt dann als Grenzwert etwa für Abfallverwertungsanlagen, bei der die Hälfte der Testpersonen keinen Geruch mehr wahrnimmt. Letztlich aber bleiben die Ergebnisse solcher Experimente subjektiv, dementsprechend variieren die Werte bei mehreren Testreihen oft bis zum Vierfachen.

Abhelfen könnten elektronische Nasen, die den Probanden ersetzen. Wie bei den biologischen Vorbildern lassen sich meist drei Hauptkomponenten unterscheiden: Gaszuleitung, Sensorblock und Datenverarbeitung. Erstere führt die zu analysierenden Stoffe den Messfühler zu. Großenteils geschieht das aktiv durch Pumpen, die Luft ansaugen, insbesondere im so genannten Kopfraum einer festen oder flüssigen Substanz. Das ist der Bereich unmittelbar über ihrer Oberfläche, aus der stets Moleküle austreten und in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen. Diese Vorgehensweise liefert Momentanwerte der Konzentrationen; es bedarf daher mehrerer Messungen, um den »wahren« Wert zu bestimmen. Es gibt auch passive Systeme, bei denen das Gas in der Messkammer zunächst einen stationären Zustand erreicht, in dem sich die Konzentrationen nicht mehr ändern, bevor die Sensoren ausgelesen werden. Den Zeitverlauf einer Gasexposition zu messen, entspricht aber eher dem natürlichen Vorbild; aktive Technik ist daher erfolgreicher, wenn es um die Unterscheidung verschiedener Düfte in einem Gemisch geht.

Eine weitere Anleihe bei der Biologie im Bereich der Luftzufuhr besteht darin, die Messzellen in eine mehrere Zentimeter lange absorptive Schicht einzubetten, was Nate Lewis und seine Kollegen am California Institute of Technology in Pasadena versuchen. Damit imitieren sie das Eindringen der Duftmoleküle in die Schleimhaut, was eine zusätzliche raumzeitliche Komponente verleiht und wieder das Unterscheidungsvermögen bei Gasgemischen verbessert. Unsere Gruppe an der Tufts University verfolgt noch einen anderen Ansatz: Wir haben die Anatomie einer Hund Nase aus Kunststoff nachgebaut (siehe Kasten unten). Es zeigt sich, dass die dadurch entstehenden Luftströmungen ebenfalls verschiedene Gase in einem Gemisch trennen.

Auch künstliche Nasen müssen trainiert werden

Letztlich ist es Aufgabe einer elektronischen Datenverarbeitung, im Signalmuster der Sensoren die Gase zu erkennen. Mit anderen Worten: Die Messwerte müssen klassifiziert werden. Die Trefferquote der Mustererkennung verbessert sich, wenn der Algorithmus während der Anwendung aus seinen Fehlern lernen kann. Das lässt sich durch eine Trainingsphase vorbereiten. Dazu präsentiert man dem Messgerät bereits bekannte Reize und korrigiert seine Antworten. So entwickelt es eine Datenbank von »Deskriptoren«, um später auch unbekannte Gerüche ohne Rückmeldung eines Menschen einzig anhand von Ähnlichkeiten mit den schon vorliegenden Informationen zu klassifizieren. Die natürliche Wahrnehmung kommt allerdings ohne Anfangswissen aus. Dem entspricht in der Technik das nichtüberwachte Lernen. Hier muss der Algorithmus – beispielsweise ein neuronales Netz – anhand der Messwerte selbst Geruchsklassen definieren.

Das Herzstück einer elektronischen Nase ist der Sensorblock, der auf eine gasförmige Substanz mit einem elektrischen Signal reagiert. Es gibt diverse Arten, ihn zu realisieren, aber die meisten nutzen eines von drei Messprinzipien: elektrisch, massenabhängig oder optisch. Alle drei werden bereits in kommerziellen Systemen eingesetzt, mitunter mit einem vorgeschalteten Gaschromatografen oder Massenspektrometer. Erstere trennen Gasgemische nach dem jeweiligen Dampfdruck und der Polarität der Moleküle auf, Letztere auf Grund verschiedener Massen.

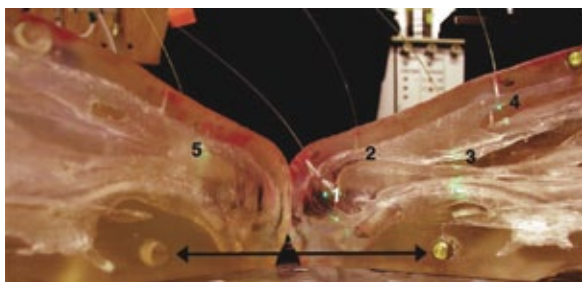
Bereits 1954 erkannte der deutsche Physiker G. Heiland von der RWTH Aachen, dass Gase die Ladungsträgerkonzentration in halbleitenden Metalloxiden beeinflussen können. Tetsuro Seiyama von der Kyushu-Universität in Fukuoka (Japan) beobachtete 1962, dass manche Spurengase die elektrische Leitfähigkeit dünner Zinkoxidschichten bei Temperaturen um 300 Grad Celsius verändern. Im gleichen Jahr beschrieb sein Landsmann Naoyoshi Taguchi Ähnliches bei gesinterten Zinndioxid und schlug vor, diesen Effekt zum Nachweis von Gasen zu nutzen. Anfang der 1970er Jahre brachte das von ihm mitbegründete Unternehmen Figaro in Osaka erste Halbleitergassensoren auf den Markt. Heute gibt es weltweit eine Vielzahl kommerzieller Anbieter dieser Pro-

Tiermodell – einmal anders

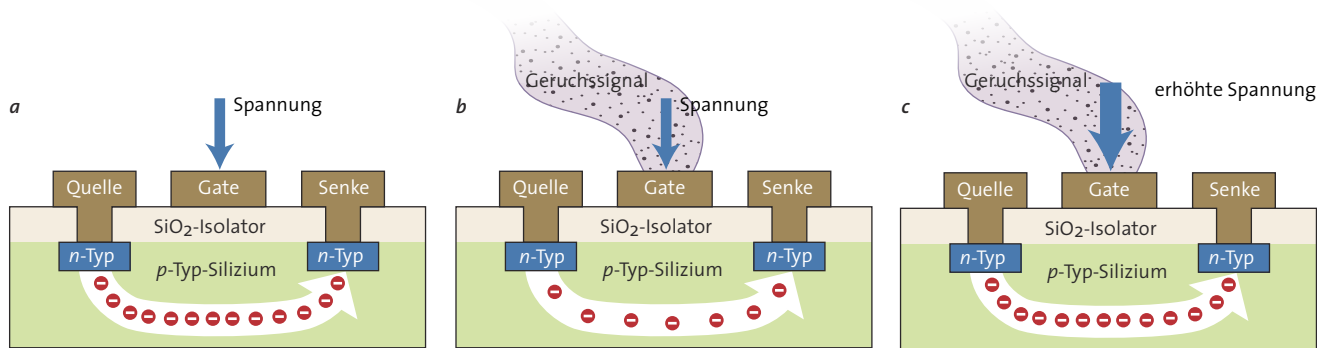
Die Anatomie der Hund Nase, mittels Computertomografie (oben) erfasst, ahmten die Autoren in einem Plastikmodell nach (unten). Fünf Stellen (Zahlen im Bild) bestückten sie mit Geruchssensoren. Durch den komplexen Luftstrom



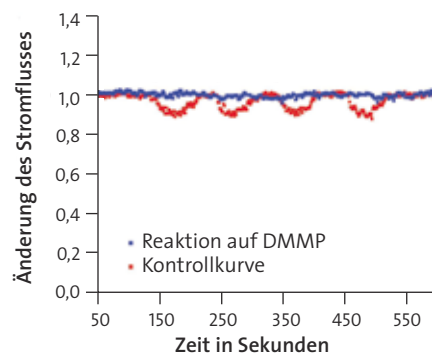
trennen sich Gasgemische auf ihrem Weg durch das Modell auf und sind besser zu unterscheiden. Über die mit Doppelpfeil markierten Öffnungen lässt sich das Modell verschließen.



REIFE ABRILJANZEN ALS STITZ, S.F. ET AL. ON HANGING VAPOR SENSOR DISCRIMINATION BY AMIRKING A CANINE NASAL CAVITY FLOW ENVIRONMENT. IN: JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 126, 5, 3684–3688, 2003; ABDUCCI, M.F. FRIL, GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY.



Der Feldeffekttransistor (FET, a) ist ein Sensortyp, der häufig in künstlichen Nasen eingesetzt wird. Eine Spannung am Gate sorgt für einen konstanten Stromfluss von der Quelle zur Senke, die beide meist aus *n*-Typ-Silizium bestehen. Das ist ein Halbleiter, in dem freie Elektronen die elektrische Ladung transportieren. Erreicht eine gasförmige Substanz das Gate (b), ändert sich die notwendige Spannung (c) oder der Strom sinkt. Den gleichen Effekt haben auch FETs, deren Gate aus beschichteten Nanokohlenstoffröhren aufgebaut ist (rechts): Die roten Messkurven zeigen die Reaktion auf DMMP, eine Substanz, die bei Tests das Nervengas Sarin repräsentiert (blaue Kurve: Kontrollgerät).



GRAPHIK: AMERICAN SCIENTIST; UNTEN: STAL, C. ET AL., DNA-DEKORATED CARBON NANOTUBES FOR CHEMICAL SENSING, IN: NANOLETTERS 5, S. 174-178, 2005, FIG. 4; ABRÜCK MIT FRIEDRICH-DER-AMERICAN-CHEMICAL-SOCIETY

dukte, die für die Automobilbranche ebenso tätig sind wie für die Verfahrenstechnik.

Halbleitersensoren reagieren recht unspezifisch auf nahezu alle reduzierenden und oxidierenden – also Elektronen abgebenden oder aufnehmenden – Gase. Die Moleküle reichern sich auf den Halbleiteroberflächen an (Adsorption) und gehen mitunter auch chemische Bindungen ein (Chemisorption). Die dabei stattfindende Wanderung von Ladungsträgern ändert die Leitfähigkeit des Halbleiters entsprechend der Konzentration des Gases.

Ein Nachteil des Verfahrens: Das in der Luft befindliche Wasser chemisorbiert an einer heißen Halbleiteroberfläche als OH-Gruppe und beeinflusst damit ebenfalls die Messung. Wer diese Sensoren einsetzt, muss den entsprechenden Wert deshalb stets mitbestimmen und den Effekt bei der Auswertung berücksichtigen.

Eine trickreiche Variante des Verfahrens verwendet so genannte Feldeffekttransistoren (FETs). Diese bestehen beispielsweise aus einer Basis von *p*-dotiertem Silizium. Die freien Ladungsträger darin sind positiv geladene »Löcher«, also Stellen im Halbleitergitter, an denen Elektronen infolge des Einbaus (Dotierung) von Fremdatomen fehlen. Zwei Kontakte mit – in diesem Fall – *n*-dotiertem Silizium bilden darauf eine »Quelle« und eine »Senke« (source und drain) für Elektronen. Ebenso ist die umgekehrte Paarung möglich: *n*-dotiertes Silizium für die Basis, *p*-dotiertes für die beiden anderen Kontakte. Auf diese Struktur kommt eine Isolierschicht und darauf schließlich als letzte Komponente eines FETs ein »Gate«-Material. Legt man dort eine positive elektrische Spannung an, können ab einem bestimmten Schwellenwert Elektronen von der Quelle zur Senke fließen. Wird aber ein Gas auf der Gate-Elektrode adsorbiert, ändert sich dieser Wert und damit die Spannung, die ein konstanter Strom be-

nötigt. Ein solcher Transistor erfordert keine hohen Temperaturen. Im Lauf der Zeit kann sich aber seine Schwellenspannung verschieben, deshalb muss der Sensor regelmäßig kalibriert werden. Außerdem wird bei der geringeren Temperatur weniger Wasser verdunstet, Luftfeuchte macht sich daher stärker bemerkbar.

Organische Halbleiter statt Silizium

Leitfähige Kunststoffe wie Polyacetylen, Polypyrol, Polyanilin und Polythiophen bieten theoretisch eine Alternative zum Silizium. Ihre Leitfähigkeit beruht hauptsächlich auf der Elektronenbewegung entlang ihres »Rückgrats« aus verketteten Monomeren, nicht aber auf Sprüngen von Kette zu Kette. Obwohl man den Mechanismus noch nicht völlig erforscht hat, nimmt man an, dass sich anlagernde Gase das Polymer anschwellen lassen, was den Leitungsweg schließlich unterbricht. Derartige Sensoren sind sehr empfindlich und reagieren noch auf Konzentrationen von 0,1 ppm (parts per million).

Auch elektrisch isolierende Polymere eignen sich – sofern sie mit leitfähigen Materialien wie Ruß, Graphit oder Metallpulver versetzt werden. Das Ergebnis ist ein Kompositpolymer, in dem die eingebrachten Partikel Wege für Ladungsträger bilden. Bindet ein Gas, so schwillt das Material wieder an, die Abstände zwischen den eingelagerten Teilchen wachsen und damit steigt auch der elektrische Widerstand des Sensors. Gegenüber reinen Polymeren haben Komposite den Vorteil, dass eine breite Palette von Ausgangsmaterialien zur Verfügung steht, was die Zahl detektierbarer Moleküle erhöht. Beide Varianten haben allerdings auch zwei Nachteile: Zum einen ändert sich im Lauf der Zeit ihr Antwortverhalten durch Oxidation. Zum anderen lässt Luftfeuchte die Polymere besonders stark quellen, weshalb solche Stoffe inzwischen

zwar in Feuchtesensoren genutzt werden, sich bei elektronischen Nasen aber nicht durchgesetzt haben.

Eine Materialneuheit sind winzige Röhrchen, deren Wand aus einer Schicht Kohlenstoff besteht. Sie haben einen Durchmesser von etwa einem Nanometer und leiten den Strom in Richtung ihrer Achse. Daraus hergestellte Strukturen ähneln Feldeffekttransistoren mit Nanoröhren als Gate-Material. Die zu analysierenden Moleküle werden physikalisch an den Oberflächen adsorbiert und ändern dabei deren Leitfähigkeit sowie die Kapazität der Röhrchen, also ihre Fähigkeit, Ladung zu speichern. Durch Beschichtung mit Polymeren oder Metallen lässt sich der Effekt modifizieren. Weil auch Substanzen, von deren Oberfläche nur sehr wenige Moleküle in den gasförmigen Aggregatzustand wechseln, gut entdeckt werden, eignen sich Nanoröhrensensoren theoretisch etwa für die Detektion chemischer Kampfstoffe. Grundsätzlich ist es jedoch schwierig, identische Chargen herzustellen, was die Anwendung dieser Technologie einschränkt.

Gase lassen sich auch anhand ihrer Massen erkennen, beispielsweise mit einer Quarzmikrowaage. Man nutzt hier den piezoelektrischen Effekt: Wird Druck auf eine einkristalline Quarzschicht ausgeübt, verformt sich ihr Kristallgitter. Dabei verschieben sich elektrische Ladungen gegeneinander – elektrische Spannung entsteht. Umgekehrt lässt sich ein Piezokristall durch eine angelegte elektrische Spannung verformen. Auf diesem Prinzip beruhen zum Beispiel Ultraschallköpfe für die medizinische Diagnostik: Eine Wechselspannung versetzt den Kristall in Schwingungen, dieser sendet Schallwellen aus.

Wird die piezoelektrische Schicht mit einer Substanz bedeckt, die Moleküle aus der zugeführten Luft absorbiert, lässt sich die äußerst geringe Massenänderung von einem Nanogramm messen: Bindet ein Molekül, erhöht sich die Masse der Beschichtung und damit sinkt die Resonanzfrequenz des Systems. Allerdings ist auch diese Methode unspezifisch; die Bauelemente sind temperatur- und feuchtigkeitsempfindlich. Sorgt man dafür, dass sich die akustische Welle nur auf der Kristalloberfläche und nicht im Inneren ausbreitet, reduziert das die schwingende Masse, weshalb sich diese Sensoren leicht miniaturisieren lassen. Leider wächst mit der Resonanzfrequenz das Hintergrundrauschen; des Weiteren messen solche Sensoren über längere Zeit nicht sonderlich stabil. Obwohl viele Gruppen seit Jahren an dieser Technik arbeiten, gibt es noch keine kommerziellen Produkte.

Auf Veränderungen im Schwingungsverhalten beruhen auch mikroskopisch kleine Balkensensoren aus Silizium. Ein darauf aufgebrachter chemisch selektiver Film lässt sie vibrieren, denn er dehnt sich unter dem Einfluss der Umgebungswärme nicht im gleichen Maß aus wie das Grundmaterial. Die so hervorgerufene mechanische Spannung und damit die Frequenz der Schwingung ändern sich, wenn der Film Moleküle bindet und seine Masse zunimmt. Das lässt sich auf verschiedene Art bestimmen, beispielsweise indem man einen Laser auf das Ende des Balkens richtet und dessen Bewegungen anhand der Lichtreflexion verfolgt. Solche Sen-

soren sind sehr empfindlich und können Gasmengen von billionstel Gramm (Pikogramm) bestimmen.

Alle bislang beschriebenen Sensoren verraten allerdings nicht, welche Art von Molekül sich an ihnen anlagert. Sie messen vielmehr die gesamte Menge der Komponenten einer Gasmischung. Allenfalls Mustererkennungsverfahren können anschließend Gemische voneinander unterscheiden, denn die Sensorantworten fallen durchaus verschieden aus. Doch die Zusammensetzung der Probe lässt sich damit nicht analysieren. Anders hingegen Kunstnasen, die auf optische Prinzipien setzen. Beispielsweise wechseln manche Pigmente ihre Farbe, wenn sich ein bestimmtes Gas in ihnen löst. Der erste Messfühler dieser Art nutzte eine mit einem Farbstofffilm beschichtete Glaskapillare: Die chemische Reaktion veränderte die Lichtdurchlässigkeit des Films. Eine Variante zeigten Otto Wolfbeis und seine Kollegen an der Universität Regensburg auf: Herkömmliches Thermo-papier für Drucker reagiert mit organischen Dämpfen wie Ether und Alkohol durch Farbänderungen, was die Lichtabsorption bei einer Wellenlänge von 605 Nanometern beeinflusst.

Farbstoffsensoren auf Papier gedruckt

Verschiedene Gruppen untersuchen in diesem Zusammenhang Metallporphyrine auf ihre Eignung für Sensoren. Das sind chemische Verbindungen mit ringartiger Struktur, wie sie sich auch bei Hämoglobin und Chlorophyll finden. Diese Moleküle sind stabil und gut erforscht. Sie lassen sich modifizieren, indem man entweder die Komponenten in der Ringstruktur ändert oder das im Zentrum des Rings gebundene Metallion austauscht. Kenneth Suslick und seine Kollegen von der University of Illinois haben solche Farbstoffe auf inerte Oberflächen wie Papier oder Kunststoff aufgedruckt. Wurden sie dann Dämpfen ausgesetzt, wechselten die verschiedenen Pigmente ihre Farbe; ein Flachbettscanner erfasste das Resultat. Ein Vorher-nachher-Vergleich ergab eine per Mustererkennung auswertbare Farbbildkarte. Leider ist der Farbwechsel nicht immer umkehrbar, diese Sensoren lassen sich dann nur einmal verwenden.

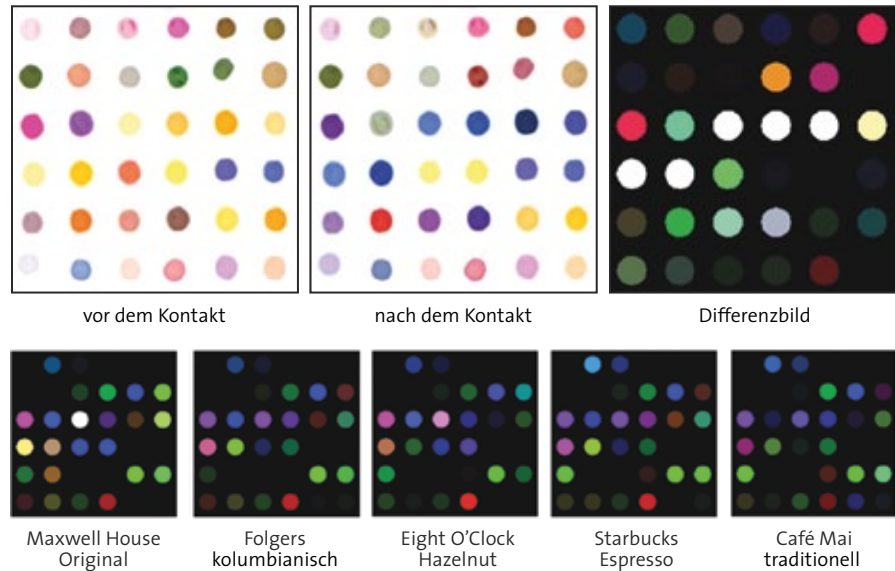
Ein viertes Grundprinzip basiert auf der Fluoreszenz von Polymeren oder Farbstoffen. Die Aufnahme von Gasen verändert die Dauer des Leuchtens, dessen Spektrum oder Intensität. Um den Sensor anzuregen, benötigen solche Systeme eine Lichtquelle – oft einen Laser, eine Leuchtdiode oder eine Xenon-Bogenlampe –, um ihn auszulesen, einen lichtempfindlichen Detektor. Auf diesem Gebiet sind wir selbst tätig. In der ersten Generation brachten wir farbstoffgetränkte Polymere jeweils auf ein Ende optischer Fasern auf, an das andere schlossen wir Mikroskop und Kamera an. Kam ein Bündel präparierter Fasern mit einem Gas in Kontakt, so drang dieses unterschiedlich tief in die Polymere ein und verschob damit das Spektrum des resultierenden Fluoreszenzlichts. Leider gibt es einen gewaltigen Nachteil: Der Farbstoff bleicht aus und ist schließlich nicht mehr zu gebrauchen.

Unsere optische Nase der zweiten Generation besteht aus Mikrokugeln aus fluoreszierendem Polymer oder Siliziumdioxid, nicht mehr als etwa drei Mikrometer im Durchmesser. Ein Gramm davon enthält Milliarden von Kügelchen. Sie werden in geätzte Vertiefungen an den Enden optischer Fasern platziert, die wiederum aus Bündeln von tausenden Strängen bestehen. Bei Kontakt mit einem spezifischen Gas zeigt jeder Materialtyp eine charakteristische Emissionswellenlänge, was es erlaubt, seine Position im Bündel zu bestimmen.

Ist ein Kügelchen durch Ausbleichen unbrauchbar geworden, übernimmt ein anderes. Unser System der ersten Generation hatte 19 Sensoren auf einadrigen Fasern, der Nachfolger weist mehr als 40 000 Sensoren auf. Bei einer so großen Zahl messen einige davon zwangsläufig die gleichen Gase, so dass wir ihre Signale aufsummieren können. Das Ergebnis lässt sich dann besser vom Grundrauschen unterscheiden. Problematisch ist es allerdings, ausreichend geeignete Farbstoffe mit großen und unterschiedlichen Verschiebungen der Wellenlängen zu finden.

Aromatest in bunten Farben

Kaffeeverkoster urteilen subjektiv – daran kann auch eine gute Schulung nichts ändern. Eine elektronische Nase könnte das Verfahren objektivieren. Bei einem Versuch der Autoren basierten die Sensoren auf Farbstoffen, die auf die Anlagerung von Aromastoffen hin ihre Farbe ändern. So entsteht für jeden Duft ein charakteristischer »Fingerabdruck«, wie der Vergleich verschiedener Kaffeesorten beweist.



OBEN: IANZEN, M. C. ET AL. - COLORIMETRIC SENSOR ARRAYS FOR VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS. IN: ANALYTICAL CHEMISTRY 78, S. 3591-3600, 2006, FIG. 3; MITTE: ALUŠ, S. LUSICK, B. A. ET AL. - DISCRIMINATION OF COMPLEX MIXTURES BY A COLORIMETRIC SENSOR ARRAY. COFFEE AROMAS. IN: ANALYTICAL CHEMISTRY 82, S. 2067-2073, 2010; BEIDE ABBILDUNGEN MIT FRDL. GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY; FOTO UNTEN: CORBIS / REUTERS, PILAR OLIVARES

Heutzutage sind diverse elektronische Nasen auf dem Markt. Bei Nahrungsmitteln und Getränken dienen sie bereits zur Qualitätskontrolle bei Produktion, Transport und Lagerung. Sie dringen hier in einen Bereich vor, der bislang Menschen vorbehalten war, denn diese werden trotz aller Ausbildung stets subjektiv urteilen und überdies nach einer gewissen Zeit ermüden.

Herkunftsangaben im Geruchstest

Ein wichtiges Anwendungsgebiet ist die Fermentation, ein zentraler Schritt bei der Herstellung vieler Nahrungsmittel. Die Überwachung flüchtiger Verbindungen im Kopfraum über dem werdenden Produkt hilft festzustellen, wann der Prozess gestoppt werden sollte oder ob eine Charge durch einen unerwünschten Mikroorganismus kontaminiert wurde. In einer Studie wurde beispielsweise eine elektronische Nase aus acht Metalloxid-Halbleitersensoren zur Überwachung der Fermentation von Teeblättern eingesetzt. Nach einer Trainingsphase konnte sie vier Prozessstadien unterscheiden und den optimalen Zeitpunkt zum Abbruch des Vorgangs identifizieren. Auch bei der Herstellung von Antibiotika und anderen Arzneimitteln, die biotechnisch, also von Mikroorganismen erzeugt werden, könnten solche Sensoren gute Dienste bei der Prozesssteuerung leisten.

Die Analyse flüchtiger Verbindungen, die von einem Produkt ausgasen, mag sogar Aufschluss über dessen Herstellungsort geben und so eine Echtheitsprüfung unterstützen.

Mit künstlichen Nasen lassen sich bereits Essigarten und Aprikosensorten nach Regionen unterscheiden. Auch die Aromen, die einen Wein auszeichnen, hängen nicht nur von Traubensorte und Jahrgang ab, sondern zudem vom jeweiligen Anbaugbiet. Um eine elektronische Nase einzusetzen, müssten aber zunächst gasförmiges Ethanol und Wasser aus dem Kopfraum entfernt werden, da sie die in wesentlich geringeren Konzentrationen vorkommenden charakteristischen Bestandteile verdecken.

Ob Nahrung verdorben ist, vermag die menschliche Nase schnell festzustellen – in der Geschichte unserer Art hing das Überleben davon ab. Ob Lebensmittel hingegen durch gesundheitsschädliche Bakterien kontaminiert sind, lässt sich derzeit nur anhand von Probenkulturen im Labor überprüfen, und das kostet Arbeit und Zeit. Technische Nasen, die mit verschiedenen Sensoren bestückt waren, bewiesen ihre Tauglichkeit bereits bei der Überprüfung der Frische von Eiern, Rind- und Lammfleisch, Äpfeln und Gemüse. Angenehm für die Verbraucher: Ob Tomaten oder Äpfel reif waren, ließ sich so ebenfalls ermitteln.

Auch zur Prozesskontrolle von Industrie- oder Abfallanlagen bieten sich Sensoren an, wie Tests auf einer Müllkippe, einer Kompostieranlage, in einer Fleischfabrik und einer Kläranlage bewiesen haben. Eine Trainingsphase war dabei stets entscheidend für den Erfolg.

Elektronische Nasen können auch lebensbedrohliche Konzentrationen giftiger Gase wie Kohlenmonoxid und Stickstoffdioxid feststellen. Zwar zeigten Studien, dass Wasserdampf sie im Lauf der Zeit unbrauchbar macht. Kenneth Suslick und seine Mitarbeiter konnten das aber mit hydrophoben kolorimetrischen Sensoren umgehen. Ihre künstliche Nase vermochte 20 toxische Chemikalien zu unterscheiden – selbst bei Konzentrationen, die noch unter den gesetzlichen Schwellenwerten lagen. Das Gerät war etwa einen Quadratzentimeter groß und wurde mit einem kleinen, mobilen Scanner ausgewertet.

Sicherheitsexperten erhoffen sich von dieser Technik neue Wege, Explosivstoffe und Nervengifte aufzuspüren. Das ist eine große Herausforderung: Die Kunstnase muss binnen Sekunden reagieren und die gefährlichen Substanzen, sofern sie vorhanden sind, mit hoher Zuverlässigkeit entdecken, ohne falschen Alarm auszulösen. Dabei gasen die fraglichen Stoffe meist nur im unteren ppb-Bereich aus. Doch unser Fluoreszenzsystem vermag den militärischen Sprengstoff Dinitrotoluol (DNT) über kontaminiertem Erdreich bereits bei Werten von 120 ppb auszumachen. Im Labor konnte das System der zweiten Generation ein Nervengift mit einer hohen Trefferquote identifizieren: Tatsächlich war

Kommerzielle Versionen von künstlichen Nasen gibt es in vielen Formen und Größen; sie werden in ganz unterschiedlichen Situationen genutzt. Die wichtigste Anwendung ist wohl die öffentliche Sicherheit. Hier fahndet ein Feuerwehrmann nach Spuren von Brandbeschleunigern, die auf ein Verbrechen hindeuten würden.



MINESAFETY APPLIANCES (MSA) – THE SAFETY COMPANY

Thema Nanotechnologie bei

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

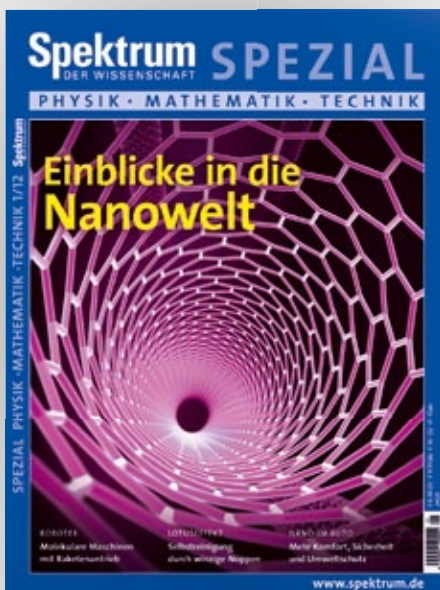


Neu!

Als PDF direkt in Ihr Postfach

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

spektrum.com/briefings

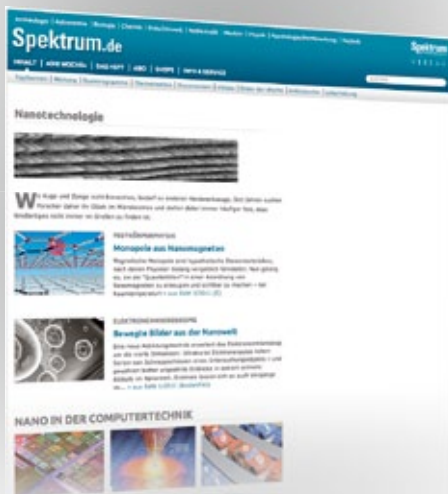


Spektrum-Spezial – Physik • Mathematik • Technik 1/2012

»Einblicke in die Nanowelt«

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

spektrum.de/spezialabo



Themenseite »Nanotechnologie«

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

www.spektrum.de/nano

das Toxin beziehungsweise ein für Studien geeigneter ungefährlicher Ersatz nur in etwa 50 von 17700 über zwei Wochen hinweg getesteten Gasproben vorhanden. Auch Dieselkraftstoff findet das Sensorarray verlässlich – er ist oft Bestandteil improvisierter Sprengkörper.

Die Gruppe von Lewis trainierte ihre Kompositpolymerensensoren erfolgreich für Ersatzstoffe von DNT und Nervengiften. Lal Pinnaduwage und seine Kollegen am Oak Ridge National Laboratory in Tennessee fanden heraus, dass Mikrobalkengeräte Explosivstoffe schon in Konzentrationen von Teilen pro Billion (parts per trillion) entdecken – innerhalb weniger Sekunden. Zudem blieb das Messverhalten über ein Jahr hinweg stabil. Einige Studien zeigten auch, dass Kohlenstoffnanoröhren dank ihrer großen Oberfläche und ihrer elektronischen Eigenschaften ebenfalls für die Sicherheitstechnik taugen.

Schließlich gäbe es auch in der medizinischen Diagnostik Aufgaben für elektronische Nasen – als Alternative etwa zum Zeit raubenden Anlegen von Kulturen, um Infektionen nachzuweisen. Aus klinischen Studien ist bekannt, dass Geruchssensoren auf der Basis leitfähiger Polymere den Erreger *Helicobacter pylori* – Mitverursacher von Magengeschwüren – in Atemproben und das *Mycobacterium tuberculosis* in Speichelproben identifizieren. Darüber hinaus ließen sich einige Mikroben, die Harnwegsinfekte hervorrufen, im Kopfraum über dem Urin der Patienten nachweisen. Weil Lungenbläschen mit dem Blut flüchtige Verbindungen austauschen, können künstliche Nasen Unterschiede zwischen Gesunden und Diabetes- sowie Lungenkrebspatienten in deren Atemluft erschnuppeln, vielleicht sogar verschiedene Stadien dieser Tumorerkrankung differenzieren.

Die Aufzählung möglicher Anwendungen zeigt nicht nur das Potenzial auf, sondern auch die großen Probleme. Für Unternehmen wird dieser Markt erst dann lukrativ, wenn Sensortypen universell einsetzbar sind und damit in großen Mengen nachgefragt werden, doch ist dies nach bisherigem Kenntnisstand ausgeschlossen. Und selbst wenn es gelänge, beispielsweise für die Lebensmittelindustrie ein Sensorarray aus Feldeffekttransistoren zu bauen, das für alle Nahrungsmittel und Prozessschritte geeignet wäre, müsste jedes Gerät doch für jede Anwendung eigens geeicht, also trainiert werden. Das Trainingsergebnis als Datensatz auf ein anderes System zu übertragen, was bei gleichartigen Einsatzbedingungen viel Zeit sparen würde, ist noch nicht ohne Weiteres möglich – und das behindert die massenhafte Verbreitung.

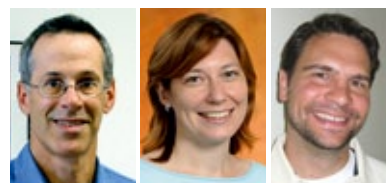
Zudem sollten Nutzer wissen, was die Systeme können und was nicht, um keine falschen Erwartungen zu hegen. Denn letzten Endes gibt es doch einen großen Unterschied zwischen biologischen und elektronischen Nasen: Erstere können Substanzen, die gemeinsam auftreten, einzeln identifizieren, wie auch ein Gaschromatograf oder ein Massenspektrometer ein komplexes Gemisch in seine Komponenten aufzutrennen vermag. Eine künstliche Nase hingegen erkennt nach entsprechendem Training lediglich das Gemisch

in einer Probe und seine Konzentration. Obendrein trennen die biologischen Vorbilder und ihr technisches Analogon Welten hinsichtlich der Messempfindlichkeit: Während sie bei Letzterem im Bereich von ppm liegt, nimmt der im Verlauf der Evolution geschärfte natürliche Geruchssinn noch millionstel ppm wahr.

Biotechnologische Ansätze könnten hier weiterhelfen. Erst 2007 gelang es der Arbeitsgruppe des Zellbiologen Danny Dhanasekaran von der Temple University School of Medicine in Philadelphia, Hefezellen genetisch so zu modifizieren, dass sie sich ähnlich wie Riechzellen verhalten: Sie produzieren Rezeptormoleküle, die sie auf ihrer Oberfläche präsentieren, und senden ein biochemisches Signal, wenn ein Duftstoff die passende »Tasche« besetzt. Statt eine Abfolge elektrischer Potenziale wird hier ein fluoreszierender Farbstoff aktiviert. Mit dieser Methode hoffen die Forscher, ebenfalls eine große Bandbreite an Substanzen nachweisen zu können.

Gelingt es, einige dieser Probleme zu lösen, bieten künstliche Nasen einmalige Möglichkeiten, Gase zu erkennen und über elektronische Verbindungen Reaktionen in die Wege zu leiten – von der Sicherheitsüberwachung in U-Bahn-Stationen bis zur Prozessüberwachung im heimischen Backofen: Wenn der Kuchen den richtigen Duft verströmt, darf die elektronische Nase den Strom abschalten. ~

DIE AUTOREN



David R. Walt lehrt Chemie an der Tufts University in Boston (Massachusetts). Seine Forschungsschwerpunkte sind neue Werkzeuge zur Untersuchung

einzelner Moleküle und Zellen etwa zur Detektion pathogener Stoffe. Die Chemikerin **Shannon E. Stitzel**, Assistenzprofessorin an der Towson University in Baltimore (Maryland), entwickelt Sensoren zur Überwachung der Wasserqualität. **Matthew J. Aernecke** ist Mitglied der Forschungsgruppe für chemische, biologische und Nanotechnologien am MIT Lincoln Laboratory in Lexington (Massachusetts) und Experte für gasempfindliche Mikrosensoren.

QUELLEN

Boeker, P.: Elektronische Nasen: das methodische Konzept und seine Problematik. Teil 1: Einführung und Problemlage. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 70, S. 314–320, 2010

Boeker, P. et al.: Methodik und Technik der Online-Geruchsmessung. In: Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 63, S. 283–289, 2003

Radhika, V. et al.: Chemical Sensing of DNT by Engineered Olfactory Yeast Strain. In: Nature Chemical Biology 3, S. 325–330, Juni 2007

Stitzel, S. E. et al.: Artificial Noses. In: Annual Review of Biomedical Engineering 13, S. 1–25, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1152358



Lisa Randall

Die Vermessung des Universums

Wie die Physik von morgen

den letzten Geheimnissen auf der Spur ist

Aus dem Englischen von Jürgen Schröder.

S. Fischer, Frankfurt am Main 2012.

492 S., € 24,99

PHYSIK

Rundumschau mit Schwächen

Die prominente Physikerin hat durchaus Interessantes zu sagen, verpackt es aber in einen übermäßigen Wortschwall.

Lisa Randall hat offenbar Freude am Schreiben gefunden. 2005 machte sie mit dem Buch »Verborgene Universen« (»Warped Passages«) auf sich aufmerksam (Spektrum der Wissenschaft 2/2007, S. 100), zwei Jahre später folgte »There is Another Dimension«. Nun legt sie ein neues umfangreiches Werk vor mit dem poetischen Originaltitel »Knocking on Heaven's Door«.

Randall arbeitet als theoretische Physikerin an der Harvard University und befasst sich mit Teilchenphysik, Stringtheorie und Kosmologie. Insbesondere untersucht sie, wie sich das Standard-

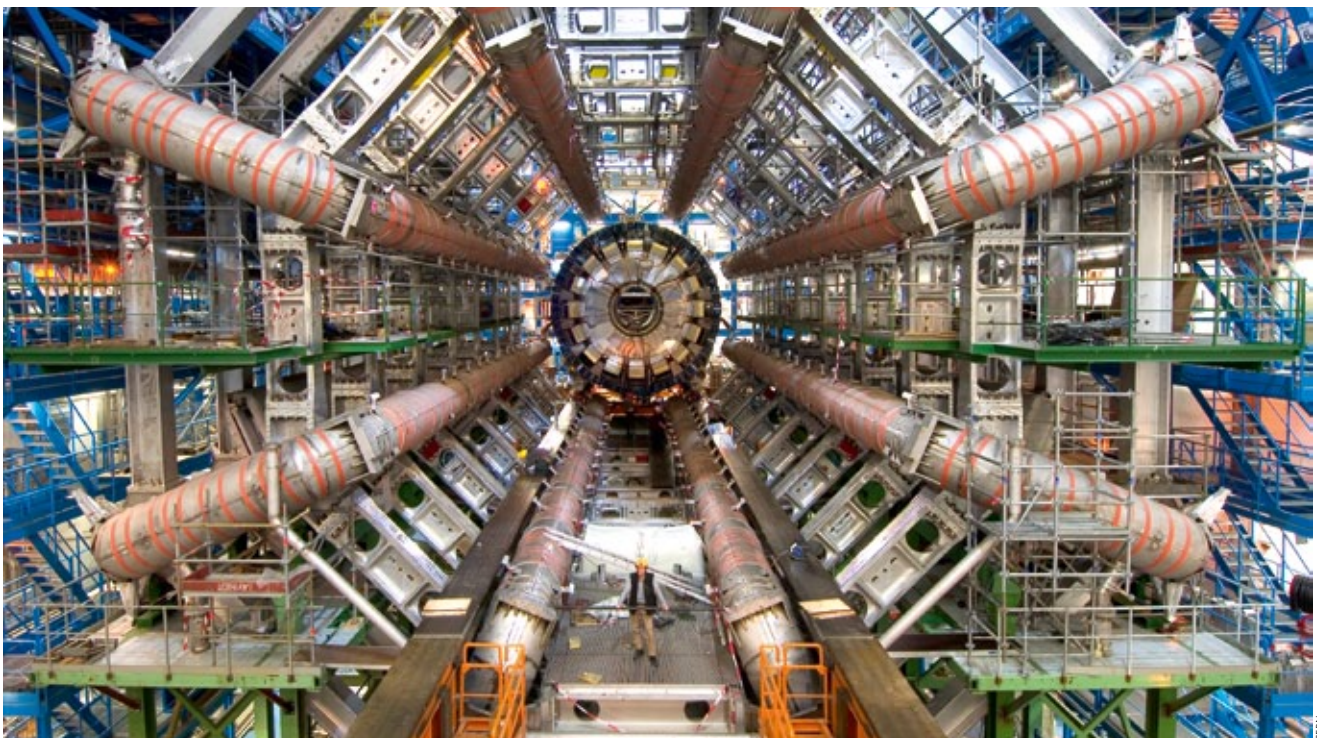
modell der Teilchenphysik erweitern lässt, um grundlegende Fragen der heutigen Naturwissenschaft zu beantworten: Woher bekommen Elementarteilchen ihre Masse? Warum ist die Gravitation so schwach, verglichen mit den anderen fundamentalen Wechselwirkungen? Woraus besteht Dunkle Materie? Kann die Supersymmetrie helfen, ungelöste Probleme der Teilchenphysik zu überwinden?

Diesen Hohlraum füllt inzwischen der ATLAS-Detektor des LHC. Die auffälligen Röhren sind supraleitende Magnetspulen, die den Weg der gesuchten Elementarteilchen krümmen.

Aufsehen erregte Randall vor allem mit ihren Modellen, die zusätzliche räumliche Dimensionen enthalten. Diese blieben uns verborgen, weil sie winzig klein aufgerollt oder verzerrt seien oder weil wir uns auf dreidimensionalen Flächen (so genannten Branen) in einem höherdimensionalen Raum befänden. Lege man solche Annahmen zu Grunde, schreibt sie, ließen sich einige Probleme der Theorie lösen, etwa die rätselhafte Schwäche der Gravitation.

In »Verborgene Universen« hatte sich Randall noch auf die Physik konzentriert, war detailliert auf Modelle und Theorien eingegangen. In ihrem neuen Buch versucht sie sich dagegen an einer Rundumschau. Sie erklärt, warum Naturwissenschaft wichtig ist und wie Forscher denken und arbeiten, sie unternimmt Exkursionen in die Wissenschaftsgeschichte und schildert, wie Physiker zu immer kleineren und auch immer größeren Skalen vorstoßen.

Große Teile des Buchs befassen sich mit dem Large Hadron Collider (LHC) bei Genf, dem leistungsfähigsten Teilchenbeschleuniger der Welt (Bild unten).



Randall beschreibt, wie er aufgebaut ist und funktioniert und was Forscher sich von ihm erhoffen: etwa die Entdeckung des Higgs-Bosons, Hinweise auf die Dunkle Materie und Belege für supersymmetrische Teilchen oder zusätzliche Raumdimensionen. Am Ende unternimmt sie einen Ausflug in die Kosmologie. Diese Abschnitte sind interessant, aufschlussreich und bieten einen guten Überblick.

Leider muss der Leser sich bis dahin durch mehr als 200 Seiten arbeiten, aus

denen nur schwer eine klare Aussage zu extrahieren ist. Randall versucht dort zu erläutern, was die Naturwissenschaft besonders macht, was empirisches Arbeiten auszeichnet und wie es historisch entstanden ist. Dabei mäandert sie – weitschweifig und redundant – zwischen autobiografischen Episoden, geschichtlichen Rückblicken, essayistischen Abschnitten und dem Schildern von Gesprächen und Vorträgen, bei denen sie zugegen war. Streckenweise verfällt das Buch in einen ausgeprägten

Nominalstil mit stark verschachteltem Satzbau, der das Verständnis deutlich erschwert – möglicherweise eine Folge der Übersetzung.

In der Gesamtschau ergibt sich der Eindruck eines Buchs, das zwar einen interessanten Kern besitzt, diesen aber hinter einem dicken Wortpolster versteckt.

Frank Schubert

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Werner Bartens

Glücksmedizin

Was wirklich wirkt

Droemer, München 2011. 318 S., € 19,99

MEDIZIN

Verkroampf di net!

Oder: Immer schön locker bleiben, auch beim Gesundheitsverhalten.

Anbieter von Wellness vermitteln ihren Kunden das Gefühl, nur noch gesund auf Probe zu sein. Ernährungsberater rufen mal hü, mal hott und sollten besser gar keine Empfehlungen mehr geben. Pharmafirmen erfinden einen Haufen Prä-Erkrankungen, um ihren Umsatz zu steigern.

Das ist die Meinung von Werner Bartens, der als Arzt in Klinik und Forschung gearbeitet hat und seit 1997 als Wissenschaftsredakteur bei der »Süddeutschen Zeitung« tätig ist. Er hat zahlreiche Sachbücher zum Thema Gesundheit geschrieben und ist gern gesehener Talkshowgast. Den von Diät-, Wellness- und Pharmaindustrie propagierten Gesundheitsdogmen steht er sehr kritisch gegenüber. Deren Kampagnen würden den Menschen einreden, wer gesund bleiben wolle, müsse sporteln, abnehmen, Vitamine schlucken, entschlacken, acht Stunden schlafen, davon möglichst viel vor Mitternacht, keinen Alkohol trinken und vieles mehr.

Dabei komme eines zu kurz, nämlich das Gesundsein.

Mit insgesamt 331 »Tatsachen« möchte Bartens seinen Lesern zu einem entspannteren und gesünderen Leben verhelfen. Als Beleg zieht er zahlreiche international anerkannte Publikationen heran, die zum Beispiel zeigen, dass Menschen mit leichtem Übergewicht und mäßigem Alkoholenuss gesünder leben als idealgewichtige Abstinenzler. Dass sie auch deutlich gesünder leben als Fettleibige und maßlose Trinker, sagt er nicht ausdrücklich; immerhin stellt er keinen Freifahrtschein für hemmungslose Völlerei und Trunksucht aus.

Das Buch referiert eine ansehnliche Sammlung wissenschaftlicher Studien. Wer sich allzu bewusst ernährt, gewaltsam Sport treibt und krampfhaft auf seine Gesundheit achtet, findet hier viele gute Gründe, sich das Leben zu erleichtern. Dem überzeugenden Literaturverzeichnis zum Trotz jubelt uns Bartens jedoch hier und da auch nicht

belegte Meinungen als Tatsachen unter. Ausgerechnet für das sehr interessante Kapitel über »gute Gefühle« bietet er nur einen einzigen Beleg, und zwar sein eigenes Buch »Körperglück«. Die Zusammenfassung am Ende jedes Kapitels entspricht nicht immer dem zugehörigen Text, sondern bringt zuweilen Punkte, die anderswo oder gar nicht vorkommen. Die Internetadresse, unter der man Bartens schreiben soll, was sonst noch hilft, ist nicht, wie im Buch abgedruckt, www.waswirklichwirkt.de, sondern www.werner-bartens.de.

Immer wieder greift der Autor die enorm gesundheitsfördernde Kraft von Glücksgefühlen und Lebenszufriedenheit auf. Tatsächlich gefährdet Einsamkeit unser Leben in doppelt so hohem Maß wie Übergewicht, und emotionale Belastungen erhöhen das Herzinfarktrisiko fast ebenso stark wie Rauchen und sogar mehr als Diabetes oder Bluthochdruck. Dennoch wird dieser Gesundheitsfaktor in der Öffentlichkeit, der Forschung und der ärztlichen Praxis praktisch nicht beachtet.

Die Botschaft des Buchs ist nach den ersten zwei Kapiteln klar: Achte auf genügend Schlaf, gute Beziehungen, Zufriedenheit im Job, Essen und Bewegung nach Lust und Laune, und vor allem: Entspann dich! Tu, was dir guttut, und dir geht es gut. Fixiere dich nicht zu sehr auf das Einhalten bestimmter Lebensstilfaktoren, sondern achte mehr auf das persönliche Wohlfühl dabei. Sport und gesund essen nütze nichts, solange man dabei keinen Spaß habe. Was also wirklich wirkt? Alles, was man

mit Freuden tut. Wie man allerdings das viel gepriesene Glück im Leben findet, kann einem auch dieses Buch nicht erzählen.

Dagegen ist Stress in jeder Hinsicht unbekömmlich, wie viele Untersuchungen bestätigen. Wundheilung, Infekte, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schmerzen oder Krebs – alles wird durch Stress schlimmer. Und alles, was zu psychischer Stabilität und Heiterkeit führt, ob Topfpflanzen, leckeres Essen oder gute Freunde, fördert die Gesundheit.

Das ist gut und richtig, aber nicht wirklich neu. Mit seinen zahlreichen, teils redundanten Ratschlägen am Ende jedes Kapitels reiht sich das Buch ein in die endlose Liste viel gekaufter und wenig umgesetzter Ratgeberliteratur – und unterscheidet sich nicht sonderlich von den von Bartens geschmähten esoterischen oder fernöstlichen Lebenshilfe-Ratgebern.

Das Buch ist hilfreich für jeden, der sich bei nächster Gelegenheit an einem kalten regnerischen Abend mit gutem Gewissen für die ungesunde Couch und

gegen das gesunde Joggen entscheiden und mal wieder mit Appetit seine kalorienreiche Lieblingsspeise statt eines gehaltvollen Biosalats verzehren möchte. Es wendet sich definitiv nicht an jene, die mangels Bildung oder Geld so wieso keinen Zugang zu einem gesünderen Leben finden; die aber machen den Großteil der in deutschen Praxen behandelten Patienten aus.

Das Buch ist ansprechend geschrieben und leicht zu lesen. Wer allerdings zu den eher verbissenen Aktivisten zählt, muss sehr viel Humor aufbringen, um die etwas polemisierenden und pauschalisierenden Passagen über diverse Gesundheitspraktiken amüsant zu finden. Letztlich zeigen aber auch die von Bartens zitierten Studien: Gesundheitsbewusstes Verhalten zahlt sich im Alter aus – selbst wenn es jetzt gerade nicht wirklich Spaß macht.

Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.



Matthias Bloechle

Vom Recht auf ein gesundes Kind

Ein Plädoyer für die PID –

Präimplantationsdiagnostik

Irisiana, München 2011. 208 S., € 19,99

ETHIK

Recht und Unrecht beim Kinderwunsch

Ein Frauenarzt erzwingt durch eine Selbstanzeige die gerichtliche Klärung der Streitfrage um die Auswahl gesunder Embryonen. Aber die gesellschaftliche Diskussion darüber dauert an.

Manche Paare müssen befürchten, dass ein von ihnen gezeugtes Kind unter einem schwer wiegenden genetischen Defekt leiden wird. Um ihnen aus dem dadurch ausgelösten Dilemma zu helfen, hat die Medizin

ein Verfahren erfunden, dessen Name »Präimplantationsdiagnostik« (PID) so monströs ist wie die darüber bisweilen fundamentalistisch geführte öffentliche und juristische Debatte. PID ist eine Methode, um nach der künstlichen Be-



Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bildern) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert).

Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows.

Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland);

ISBN 978-3-941205-92-5

spektrum.com/recherche



David Shenk

Das Genie in uns. Neue Erkenntnisse über Begabung und Intelligenz

Aus dem Englischen von Jens Hagedstedt. Hoffmann und Campe, Hamburg 2012. 460 S., € 24,99

Sie wären auch gern ein bewundertes Genie wie Mozart, Shakespeare oder Einstein? Tja, Sie haben es vermasselt. Mit genügend Anstrengung, Durchhaltevermögen und der frühen Förderung im Elternhaus hätten Sie es werden können. Das ist die traurige Erkenntnis nach der Lektüre dieses Buchs. Angeborenes Talent oder Begabung gibt es nicht, jeder Mensch kommt mit den gleichen Möglichkeiten zur Welt, er muss sie nur nutzen. Diese an sich tröstliche These belegt der renommierte amerikanische Sachbuchautor mit einer Fülle wissenschaftlicher Befunde. Untersuchungsergebnisse, die auf den ersten Blick das Gegenteil beweisen, zerpfückt er höchst geschickt und so überzeugend, dass man am Ende denkt: Vielleicht hat er ja wirklich Recht. Und doch mag sich angesichts der eigenen Lebenserfahrung der letzte Glaube nicht einstellen. Sind die eingefleischten Vorurteile einfach zu übermächtig?

GERHARD TRAGESER



Hans-Ulrich Grimm

Leinöl macht glücklich. Das blaue Ernährungswunder

MensSana bei Knauer, München 2012. 174 S., € 17,99

So wie der ehemalige »Spiegel«-Redakteur Grimm es formuliert, hilft Leinöl wegen der darin enthaltenen Fettsäuren gegen praktisch alles: von psychischen Krankheiten bis zu Krebs, von Diabetes bis zu Arteriosklerose. Grimm bemüht gern den suggestiv-reißerischen Stil mancher Anzeigen für medizinische Wunderdrogen; ein halb so hohes Lob würde man ihm eher glauben. Die Kernaussagen trichtert er dem Leser regelrecht ein – weniger Vorteilhaftes, wie den nicht besonders angenehmen Geschmack des Wunderöls, erwähnt er nur kurz nebenbei. Dabei zitiert er durchaus eine Anzahl ernst zu nehmender wissenschaftlicher Studien. Lohnend sind die Ausführungen zur Geschichte des Leinbaus, zur früher großen Bedeutung der Pflanze – auch als Nahrungsmittel – und zu den wirtschaftlich bedingten, nicht besonders gesunden Ernährungsumstellungen in heutiger Zeit. Zuletzt bekommen wir noch verlockende Küchenrezepte mit Leinöl geliefert.

ADELHEID STAHNKE



Tony Crilly

Die großen Fragen. Mathematik

Aus dem Englischen von Roland Girgensohn. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2012. 208 S., € 19,95

Mit seinem abwaschbaren Einband und dem sehr handlichen, zum Fliegenklatschen geeigneten Format wirkt das Buch wie gemacht für den Dschungel oder die einsame Insel. Für das unmittelbare Überleben ist es dagegen weniger relevant: In 20 Kapiteln gibt der emeritierte englische Mathematikprofessor Tony Crilly einen gut und verständlich geschriebenen, repräsentativen Überblick über sein Fach, von den ersten Zahlzeichen bis zu den großen philosophischen Fragen und den aktuellen ungelösten Problemen. Viel Stoff, der nur dank ziemlich kleiner Schrift überhaupt ins Format passt; aber auf der einsamen Insel ist Zeitmangel ja nicht das vorrangige Problem.

CHRISTOPH PÖPPE



Vera Rupp und Heide Birley (Hg.)

Landleben im römischen Deutschland

Theiss, Stuttgart 2012. 194 S., € 34,95

Keine andere Kultur der Antike hatte sich so der Urbanität verschrieben wie die römische. Doch ohne ein Umland, das Nahrungsmittel und handwerkliche Produkte lieferte, konnte keine Stadt existieren. 50 Archäologen, von Basel rheinabwärts bis Xanten und westlich des Limes bis Ingolstadt, beschreiben Kleinstädte, Dörfer und Landgüter in den heute zu Deutschland gehörenden Teilen der römischen Nordprovinzen. Porträts wichtiger Fundstätten, manche davon zu Freiluftmuseen ausgebaut, konkretisieren einen breit angelegten Überblick über das Landleben, von der Militärverwaltung und der Struktur von Ortschaften und Gutshöfen über Ackerbau und Viehzucht bis hin zu Religion und Freizeitgestaltung. Manche Ereignisse werden verwirrend oft erwähnt, vor allem Germanenüberfälle, die das Schicksal manches »vicus« besiegelten. Ein kurzer Abriss der provinziäl-römischen Geschichte hätte hier dem Laien geholfen, sich besser zu orientieren.

KLAUS-DIETER LINSMEIER

fruchtung mehrerer Eizellen solche für die Implantation auszuwählen, die den Defekt nicht in sich tragen.

Dass dies Elternpaaren in ihrem Konflikt helfen kann, ist hinlänglich bewiesen. Deutschland gestattet diese Vorinspektion jedoch bislang nur mit Einschränkungen. Dass in Europa zehn Länder, darunter so katholische wie Spanien und Irland, damit offenbar weniger Probleme haben, hat die Debatte hier zu Lande wenig beeinflusst. Der Berliner Reproduktionsmediziner Matthias Bloechle ist nun jener Arzt, der es nicht hinnehmen wollte, dass eine Methode, die seinen Patientinnen helfen würde, in Deutschland gesetzlich nicht zugelassen ist. »Erblich bedingte Erkrankungen und Todesfälle müssen nicht wiederholt klaglos erduldet werden.« Also zeigte er sich in einem spektakulären Akt selbst

wegen Missbildung ertragen könnten. Die Umstände sind für die Frauen offenbar demütigend. Bloechle: »Warum wird sie behandelt wie ein unmündiges Kind? Warum müssen ihr andere hineinreden? Kann sie denn nicht selbst entscheiden, was richtig für sie ist?« Und bei einer anderen Fallgeschichte von einer Mutter, die bereits ein behindertes Kind pflegt und aufzieht: »Wer kommt denn dadurch zu Schaden, wenn sie sich behandeln lässt, um ein gesundes Kind zu bekommen?« Alles Fragen, die einem der gesunde Menschenverstand nahelegt, die aber bei diesem Thema nicht immer eine Rolle spielen.

Bloechle, selbst Vater von fünf Kindern, erzählt auch seinen Werdegang und berichtet über die Motive, die ihn bis zur genannten Selbstanzeige gebracht haben. Ausführlich beschreibt er

ihn begreiflicherweise »eine große Erleichterung«. Wie der Streit und die Debatte darüber dennoch weitergehen, berichtet er im dritten Teil »Politik« – ein ernüchternder bis erschütternder Kommentar zur moralisch-ethischen Verfasstheit unserer Gesellschaft am Beispiel einer existenziellen Frage.

Inwieweit ist es Teil der reproduktiven Freiheit der Menschen, Embryonen oder Föten nach bestimmten Merkmalen auszuwählen? Dem Autor sind die üblichen Totschlagargumente geläufig: Durch PID entstehe ein gesellschaftlicher Druck hin zum »Designerbaby« und eine Abwertung aller nichtperfekten Kinder; es gebe kein »Recht auf ein gesundes Kind«; oder die PID sei der erste Schritt auf dem Weg zu einer Selektion von lebensunwertem Leben im Geist des Holocaust.

Da ist es zumindest erhellend, wenn Matthias Bloechle jüdische Stimmen zur PID zitiert. Ein Rabbiner aus Düsseldorf äußert sich so: »Nach jüdischem Recht gilt: Wer der künstlichen Befruchtung zustimmt, muss auch PID zulassen.« Die Wissenschaftsethikerin Tatjana Tarkian von der Universität Erfurt empfahl PID-Befürwortern kürzlich, darauf hinzuweisen, dass es hier um die Frage geht, »ob die Rechtsordnung es Paaren mit Kinderwunsch und genetischem Risiko verwehren sollte, eine Chance auf ein gesundes Kind ergreifen zu können, ohne dabei die Möglichkeit eines Schwangerschaftsabbruchs in Kauf nehmen zu müssen.«

Wer wie Bloechle so weit ging, sich potenziell selbst zu inkriminieren, wird bewegt von der bisweilen unmenschliche Weltferne, die sich durch die deutsche PID-Debatte zieht. »Menschen, die keine Erfahrungen mit dem Tod von ungeborenen und geborenen Kindern haben, tun sich oft leicht damit, ein Verbot der PID zu fordern. Wer jedoch individuelle Geschichten vom einzelnen betroffenen Menschen kennt, wird sich schwertun, anderen ihr Recht auf ein gesundes Kind zu verwehren.«

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist Editor-at-Large bei »Spektrum der Wissenschaft« und kinderlos.

Die PID ist zumeist ein letzter verzweifelter Schritt nach vielen schmerzhaften Enttäuschungen

an, um die rechtlichen Fragen von den Gerichten klären zu lassen. Vier Jahre später, 2010, erhielt er vom Bundesgerichtshof die Bestätigung, dass die PID vereinbar mit dem deutschen Gesetz zum Embryonenschutz sei. In der Folge wurde 2011 ein neues Gesetz erlassen, das ihre Grenzen sowie rechtliche Fragen detailliert regelt.

Dennoch ist »die gesellschaftliche Auseinandersetzung nicht beendet« – Grund genug für Bloechle, in diesem Buch nochmals nachdrücklich und sehr persönlich sein Anliegen vorzubringen, das natürlich die ganze Gesellschaft angeht. In drei Teilen – Medizin, Justiz, Politik – handelt er die wesentlichen Seiten des Themas ab. Dazwischen schiebt er immer wieder echte Fallgeschichten aus der eigenen Praxis ein.

Für ein Paar mit unerfülltem Kinderwunsch ist die PID zumeist ein letzter verzweifelter Schritt nach vielen schmerzhaften Enttäuschungen. Es lohnt sich, Bloechles Patientengeschichten zu lesen. Man kann sie als anekdotisch abtun – oder eben zugestehen: Das sind Betroffene, die beispielsweise keinen dritten Schwangerschaftsabbruch

die medizinische Prozedur bei der In-vitro-Fertilisation sowie die Genetik der Fortpflanzung. Spannender jedoch finde ich seinen Bericht über die Gesetzgebung rund um das Embryonenschutzgesetz sowie den Verlauf des Verfahrens von der Selbstanzeige bis zum höchstrichterlichen Urteil. Verblüffend, wie ein Gesetz, das eigentlich verhindern soll, dass Fortpflanzungstechniken missbräuchlich angewendet werden, gerade bei der PID (auch wenn es nur um wenige hundert Fälle pro Jahr geht) zum Unglück vieler Paare wird.

Dass ihnen, wie vor Jahrzehnten beim Abtreibungstourismus nach Holland, auch hier die Reise in ein Nachbarland offensteht, stellt Ethiker, Politiker und Gesetzgeber vor ein interessantes Dilemma. Denn natürlich würde niemand daraus ableiten, so Bloechle, »dass diese Staaten Unrechtsstaaten seien, in denen durch den dort anders geregelten Umgang mit menschlichen Embryos die Menschenwürde mit Füßen getreten wird«. Wie aber kann dann das, was dort Recht ist, hier zu Lande Unrecht sein?

Die letztlich für den Frauenarzt positive richterliche Entscheidung war für



Dirk Eidemüller

Das nukleare Zeitalter

Von der Kernspaltung bis zur Entsorgung

Hirzel, Stuttgart 2012. 184 S., € 19,80

KERNENERGIE

Grundlagen für eine unmögliche Diskussion

Sachliche Information ist gerade bei diesem hochkontroversen Thema dringend geboten – etwas weniger staubtrocken präsentiert wäre sie noch hilfreicher.

Diskussionen scheitern häufig daran, dass es den Diskutanten zwar nicht an Engagement, aber dafür an grundlegendem Wissen mangelt. Gerade bei prominenten Themen hat auf Grund der Berichterstattung aller Medien jeder eine Meinung, bei komplexen Sachverhalten aber oft nur minimale Informationen.

Kernenergie ist im Kontext von Politik, Kriegen, Energiegewinnung, Klimawandel und Langzeitfolgen extrem komplex. Gerade deshalb ziehen sich Befürworter wie Gegner gerne auf einfache Standpunkte zurück – mit der unangenehmen Folge, dass von dort aus keine sachliche Auseinandersetzung mehr stattfinden kann.

In »Das nukleare Zeitalter« setzt sich Dirk Eidemüller zum Ziel, »zu einer nüchternen Abwägung der gesellschaftlich relevanten Aspekte der Kernenergie beizutragen«, mit Betonung auf »nüchtern«. Der studierte Kern- und Teilchenphysiker hat das Buch mit einer thematisch geordneten Literaturliste, einem Glossar und einem Sachwortverzeichnis ausgestattet, es ist somit durchaus auch als Nachschlagewerk geeignet.

Ein Jahr nach Fukushima strahlt die Atomdebatte wieder kräftig in die Gesellschaft. Beide Seiten haben gültige Totschlagargumente: Die Gegner weisen mit Recht darauf hin, dass radio-

aktiver Müll der Menschheit noch für Jahrtausende eine Bürde auferlegt, die nur schwer zu rechtfertigen ist. Die Befürworter haben auf ihrer Seite, dass drei Kilogramm Uran so viel Energie liefern wie 8000 Tonnen Braunkohle und dabei kaum klimaaktives CO₂ ausstoßen. Da Kohle im Übrigen ebenfalls geringe Mengen radioaktiven Materials enthält, stößt ein Kohlekraftwerk im Normalbetrieb in etwa gleich viel Strahlung aus wie ein Kernkraftwerk.

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

Ist es bei dieser Ausgangslage tatsächlich hilfreich, beim Aufbau des Atoms zu beginnen, Energiegewinnungsformeln wiederzugeben und den Aufbau der Reaktortypen im Detail vorzustellen? Der Autor sieht es jedenfalls so, und bei der Lektüre aufblitzende Zusammenhänge bestätigen ihn: Spätestens wenn es darum geht, ob abgebrannte Brennstäbe wiederaufbereitet oder endgelagert werden sollen, merkt der Leser, dass der gedankliche Weg von grundlegenden Kenntnissen zu weitreichenden Entscheidungen erstaunlich kurz ist. Solche Zusammenhänge

sind eben nur zu erkennen, wenn die Grundlagen vorgestellt werden.

»Das nukleare Zeitalter« hält neben den Basics durchaus auch überraschende Munition für die Gegner bereit, beispielsweise das Versicherungsproblem von Kernkraftwerken: Keines ist gegen einen großen Störfall versichert, da einerseits das Risiko nicht kalkuliert werden kann und andererseits keine Versicherungsgesellschaft für die enormen Schäden im Fall eines GAUs aufkommen könnte. »Für Katastrophen haftet die Gesellschaft.« Die negativen Folgen des Uranabbaus haben in erster Linie indigene Völker zu tragen, 70 Prozent des Abbaus finden auf ihrem Boden statt. Es bleiben ihnen jedoch meist nur die Schäden; den Gewinn machen die Konzerne, die sich den Grund und Boden der meist armen Bevölkerung billig angeeignet haben.

Der Autor schlägt einen sachlichen Ton an; umso irritierender wirken daher die gelegentlich eingestreuten Zeilen, die Meinungsinhalte transportieren – beispielsweise wenn Eidemüller kurz über den Natur- oder Zivilisationsbegriff bei indigenen Völkern spekuliert. Oder wenn er im Abschnitt über Atomwaffen die Spieltheorie auf knappen drei Zeilen abtut und erschreckend oberflächlich über das Gleichgewicht des Schreckens schreibt. Der weitere historische Abriss über die Entwicklung der Atomkräfte zeigt dann wieder in aller Nüchternheit, dass das nukleare Zeitalter auch lange nach dem Kalten Krieg noch das Potenzial hat, einen explosiven Abgang hinzulegen.

Der Anspruch des Werks ist in jeder Hinsicht lobenswert. Ich bezweifle allerdings, ob ein trockenes Faktenwerk mit der Anmutung eines pädagogisch nicht aufbereiteten Schulbuchs genügend Leser findet, um die Debatte auf ein höheres Niveau zu heben.

Und noch ein Fazit: Mehr über das nukleare Zeitalter zu wissen, ist leider keinesfalls beruhigend.

Jörg Wipplinger

Der Rezensent hat Zoologie studiert; er ist Journalist und Videoblogger (<http://diewahrheit.at>) in Wien.

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

Das Projekt Wissenschaft in die Schulen! – eine Investition in die Zukunft

Naturwissenschaften und Technik sind für Oberstufenschüler eine spannende Sache und für den Wirtschaftsstandort Deutschland von fundamentaler Bedeutung. Daher möchten wir gemeinsam mit Ihnen das Interesse der Jugendlichen an diesem Themenbereich wecken und fördern. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie, das Max-Planck-Institut für Astronomie, die Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen in Bad Wildbad und das Haus der Astronomie in Heidelberg.

Bisher haben sich schon über 7500 Schüler für WIS angemeldet. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie eine Klasse und das Projekt unterstützen können und was es mit **WIS** auf sich hat, dann finden Sie hier Informationen dazu:

www.wissenschaft-schulen.de

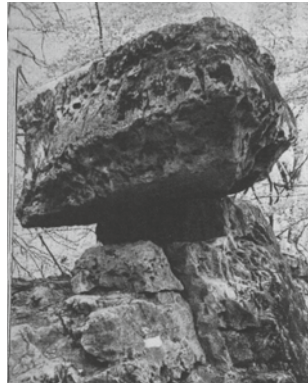
TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebitzer Agrarbetriebe | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Freundeskreis des Rudi-Stephan-Gymnasiums | Symbio Herborn Group | NDT Systems & Services AG | Weinmann GmbH | Stadtwerke Düsseldorf | Karl-Möller-Stiftung | Förderverein des Eichenfeldgymnasiums | Kernkraftwerk Isar, Essenbach | HUK Coburg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Vollmer Werke Maschinenfabrik GmbH | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymsnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Sternwarte am Wallgarten

Schaukelnde Steine

»Zu den eigenartigsten und zugleich seltensten Verwitterungsformen der Erdrinde gehören die Wackel- oder Schaukelsteine. Es sind dies harte Felsblöcke, die nur noch mit einer kleinen Fläche einer festen Unterlage aufliegen und durch den Wind oder andere Kräfte in Schaukelbewegungen versetzt werden können. Kaum bekannt ist dagegen, daß wir auch in der Bundesrepublik Deutschland einen schönen großen Wackelstein besitzen. Er liegt knapp 12 km ostwärts von Hameln im nördlichen Tal des Ith, oberhalb der kleinen Gemeinde Bessingen.« Kosmos 7, 1962, S. 298–299



Wind und Wetter arbeiteten diesen Klotz aus dem Dolomitgestein des Ithkamms heraus.

Kommt die Fernseh-Schallplatte?

»Bereits vor Jahresfrist hatten Techniker der NBC ein Magnetophongerät entwickelt, das imstande ist, Bild und Ton von Fernsehsendungen auf Band aufzunehmen und zu reprodu-

zieren. Während dieses ziemlich komplizierte Gerät wegen seines Preises von rund 100 000 Dollar nur für kapitalkräftige Fernsehgesellschaften Bedeutung erlangen dürfte, haben nunmehr zwei italienische Ingenieure einen Plattenspieler entwickelt, der für den bescheidenen Preis von etwa 50 000 Lire in Serie hergestellt werden kann und in Verbindung mit einem Fernsehgerät Bild



und Ton abspielt. Die Zahl der Interessenten, die auf diese Art ihre Lieblingssänger zugleich hören und sehen möchten, dürfte Legion sein.« Neuheiten und Erfindungen 321, 1962, S. 125

Tiefe Einblicke

»Das Panoramix-Röntgenverfahren ermöglicht es, sämtliche Organe der Mundhöhle auf einem einzigen Röntgenbild zur Darstellung zu bringen. Mit der Röhre, die in die Mundhöhle eingeführt wird, ist es nicht nur möglich, die ganzen Zahnreihen des Ober- und Unterkiefers darzustellen, sondern auch das komplizierte Knochengestüt des Gesichtsschädels mit den zahlreichen Hohlräumen, die Infektionen besonders ausgesetzt sind, genauer zu untersuchen.« Neuheiten und Erfindungen 321, 1962, S. 125



Tödlicher Mief

»Das Aussehen der neuen grossstädtischen Strassen ist ein anderes geworden gegen vor 30 bis 40 Jahren, aber in hygienischer Beziehung haben sie noch Mängel. Die Wohnungen leiden meist an dem grossen Übelstande, dass sie nicht durchlüftbar sind. Auf Grund vorsichtig gewählten Materials hat sich ergeben, dass die Sterblichkeit in den nicht-durchlüftbaren Wand- an Wandhäusern um 15 Prozent höher ist als in den durchlüftbaren. Der Unterschied steigt bis auf 20 Prozent, wenn die Wand- an Wandhäuser in lang fortlaufenden Strassenzügen stehen. Diese Feststellungen sind Veranlassung gewesen, dass in England durch eine Vorschrift von 1909 die Einrichtung von Wohnungen nach diesem als gesundheitsschädlich erkannten Bautypus verboten ist.« Gesundheit 13, 1912, S. 406–407

Ahnenkult um Robert Koch

»Kürzlich hat in Tokio eine Gedenkfeier für Robert Koch stattgefunden, die von der hohen Verehrung der Japaner für den Meister ein beredtes Zeugnis ablegt. Die Gegend in Tokio, wo das Institut für Infektionskrankheiten steht, wird Shirokane

genannt. Hier im Vorgarten des Instituts steht der Koch-Tempel. An der Vorderseite aus schönem japanischen Holz befindet sich ein Bildnis von Koch. In den steinernen Unterbau ist ein Kupferkästchen eingemauert, in welchem eine Anzahl von Kochs Haupthaaren aufbewahrt wird.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 31, 1912, S. 661–662



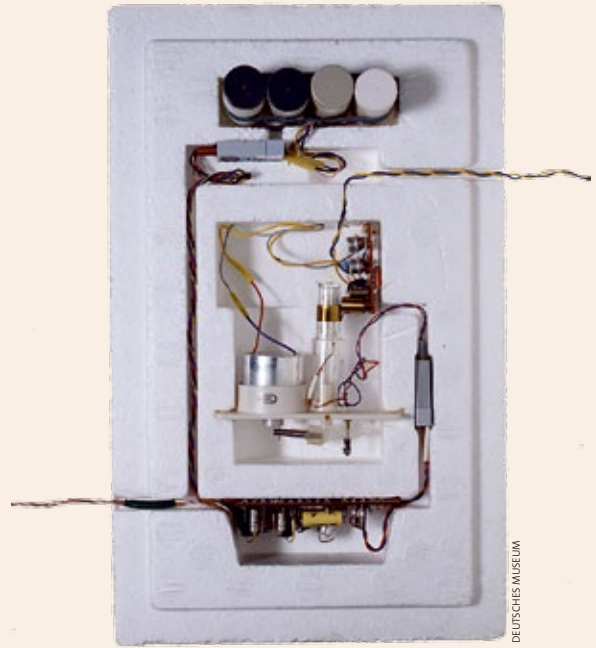
Japanischer Tempel für den Pionier der Bakteriologie

Bewegung stört Vogelgesang

»So haben die Singvögel, die während ihres Gesangs eine ruhige Haltung einnehmen, wie Nachtigall, Singdrossel, Schwarzamsel, die Schönheit ihrer Melodie zur höchsten Vollendung gebracht. Laubsänger und Fliegenfänger, die unter Platzwechsel singen, stehen ihnen an Fülle und Kraft der Stimme nach. Auch Vögel, die, wie Lerchen, ihren Gesang mit einem Balzflug verbinden, tun dies auf Kosten ihres Gesangs.« Prometheus 1186, 1912, S. 672

Meilenstein der Klimaforschung – die Ozonsonde OSE

An einem Wetterballon stieg 1985 die Ozonsonde der DDR-Antarktisstation in die Stratosphäre auf und bestimmte erstmals die vertikale Verteilung des Ozons. Die Messungen bestätigten den Verdacht, dass die Ozonschicht während des Polarfrühlings schwindet – und stärkten das Renommee der DDR-Forschung.



Von Daniela Zeibig

Hoch oben in der Stratosphäre, 10 bis 17 Kilometer über dem Erdboden, beginnt die Ozonschicht, benannt nach dem Molekül aus drei Sauerstoffatomen, das dort entsteht und vergeht. Dass es dabei die besonders energiereichen und damit für das Leben auf der Erde schädlichen Frequenzen ultraviolett Lichts absorbiert, geriet in den 1970er Jahren in die öffentliche Diskussion: Flugzeugabgase, vor allem aber die in Spraydosen und Kühlschränken massenhaft eingesetzten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) kamen unter Verdacht, Ozon abzubauen. Am 16. Mai 1985 berichteten Forscher der britischen Antarktisstation Halley Bay schließlich über einen drastischen Ozonschwund während des Polarfrühlings, also in den Monaten September bis November.

Die Briten hatten ihre Messungen mit einem Dobson-Spektrometer von der Erdoberfläche aus vorgenommen: Das Gerät vergleicht die Intensität der energiereichen UV-B mit jener der harmloseren und vom Ozon kaum beeinflussten UV-A-Strahlung – ohne die Sauerstoffverbindung müssten beide gleich groß sein.

Diese Methode verriet allerdings nicht, in welcher Höhe genau die Ozonschicht beschädigt war. Die Deutsche Demokratische Republik nutzte die Chance, internationales Renommee zu erlangen: Am 22. Mai 1985 ließ der ostdeutsche Antarktisforscher Peter Plesing eine von ihm entwickelte Ozonsonde, kurz OSE genannt, an einem Wetterballon aufsteigen. Erstmals erschloss sich damit die vertikale Verteilung des Gases in der südpolaren Atmosphäre bis in eine Höhe von 35 Kilometern; Zeitreihen zeigten zudem jahreszeitliche Veränderungen auf.

Plesing setzte ein 1959 von den Klimatologen Alan W. Brewer und James Milford an der University of Oxford entwickeltes Messprinzip ein. Die Sonde war im Grunde eine galvanische Zelle, in der eine Silberanode und eine Platinkatode in eine Kaliumjodidlösung eintauchten. Eine schwache Gegenspannung blockierte den Stromfluss, doch sobald ozonhaltige Luft durch die Lösung gepumpt wurde, lief eine elektrochemische Reaktion ab, die zwei Elektronen je Ozonmolekül freisetzte.

Ein sowjetischer Radiosender vom Typ RKS-5 an Bord der OSE funkte Stromstärke sowie Temperatur- und Luftfeuchtedaten zur sowjetischen Antarktisstation »Nowolassarskaja«, die etwa zwei Kilometer von den DDR-Containern entfernt lag. 1992 wurde die regelmäßige Ozonmessung der bundesdeutschen Neumayer-Station II übertragen. Die Klimaforscher verwenden seitdem die ECC-Sonde: eine Weiterentwicklung, die ohne Gegenspannung auskommt und noch genauer arbeitet.

Spektrometrische Messungen, seit den 1970er Jahren auch von Satelliten aus, und Sondenflüge liefern weitere Daten, um die Prozesse rund um das Ozon in der Stratosphäre zu modellieren. Die Berechnungen haben bestätigt, dass FCKWs einen wesentlichen Anteil am alljährlichen Ozonloch haben. Ihre inzwischen weltweite Ächtung wird leider nur langsam Wirkung zeigen, denn die schon in die oberen Luftschichten gelangten Moleküle sind sehr stabil. Vermutlich werden die Ozonwerte erst 2065 wieder auf das Niveau vor 1985 steigen.

Daniela Zeibig studiert Wissenschaftsjournalismus an der Technischen Universität Dortmund.



Super-Supernovae

Die größten Sterne beenden ihre Laufbahn mit einer ungeahnt heftigen und lange andauernden Explosion. In solchen extremen Supernovae scheinen mitunter Prozesse abzulaufen, bei denen sich Materie und Antimaterie zu purer Energie vereinen.

RON MILLER

Wie riskant ist Fracking?

Für eine höhere Förderleistung und zur Erschließung unkonventioneller Quellen von Erdgas und -öl werden Gesteinsformationen rund um das Bohrloch durch Einpressen von Flüssigkeiten aufgesprengt. Dieses »Fracking« könnte nach Ansicht von Kritikern das Grundwasser gefährden und andere Umweltschäden hervorrufen.

Sklavenhandel ließ Westafrikas Königreiche erblühen

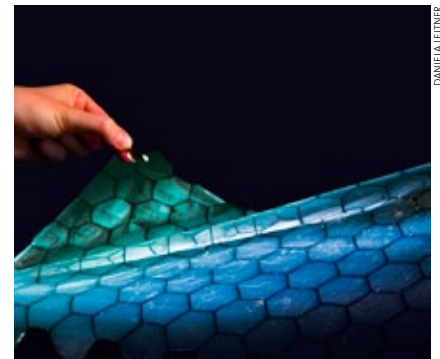
Der verstärkte Sklavenhandel Mitte des 17. Jahrhunderts führte zu tief greifenden gesellschaftlichen Veränderungen an der Bucht von Benin: Siedlungen wuchsen zu Städten, und kleinere Reiche entwickelten sich zu straff organisierten Staaten, die miteinander um Macht und Einfluss rangen.



FLAMEN PETKOV

Schalter im Erbgut

Epigenetische Veränderungen im Gehirn spielen eine große Rolle bei psychiatrischen Erkrankungen, etwa Sucht oder Depression. Das eröffnet Wissenschaftlern neue Wege, Medikamente gegen seelische Störungen zu entwickeln.



DANIELA LETTNER

Graphen aus dem Chemielabor

Das erst vor acht Jahren entdeckte Material aus Kohlenstoffatomen, die in einem einlagigen Bienenwabennmuster angeordnet sind, könnte die Elektronik revolutionieren. Noch fehlen effiziente Herstellungsmethoden. Doch Chemiker sind dabei, sie zu entwickeln.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!



- 1** 12 Ausgaben zum Preis von nur € 84,- inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90
- 2** 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!
- 3** Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln
- 4** Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet
- 5** Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

Produkt im Juli



Das Spiel »Verschätzt noch mal!« präsentiert kuriose Wissen und verrückte Fragen

- 6** Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Auf der CD-ROM von **Spektrum der Wissenschaft** finden Sie den kompletten Jahrgang 2011 als elektronische Datei inklusive aller Bilder und eine Datei mit allen Jahresinhaltsverzeichnissen sämtlicher Ausgaben von 1978 bis 2011 im Portable Document Format (PDF).



Das fadengeheftete A4-Spektrum-Artbook bietet Ihnen auf 160 Seiten Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



Das Buch »Die großen Fragen – Universum« behandelt grundlegende Probleme und Konzepte in der Wissenschaft, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



online: spektrum.de/abo



E-Mail: service@spektrum.com



Tel.: 06221 9126-743



Fax: 06221 9126-751



mit der Bestellkarte anbei



24. Oktober 2012

Besuchen Sie die Karrieremesse
für Wissenschaftler in Heidelberg!



Print Media Academy
Heidelberg
24. 10. 2012
10 – 17 Uhr

Die große Karrieremesse für Wissenschaftler aus den Bereichen Physik, Chemie, Medizin, Mathematik und Life Sciences von **Spektrum der Wissenschaft** und **nature** bieten Ihnen wertvolle Kontakte, ein exklusives Konferenzprogramm und zahlreiche Workshops. Treffen Sie Entscheider aus Forschung, Wissenschaft und Wirtschaft und lernen Sie deren Karrierewege kennen, wenn Sie

- **Student, Absolvent, Doktorand oder Postdoc sind**
- **sich beruflich verändern wollen**

Erfahren Sie aus erster Hand alles über aktuell freie Stellen und die besten Strategien für die Entwicklung Ihrer beruflichen Laufbahn. Der Eintritt zum Messebereich und zu den Workshops ist frei! Die Teilnahme am Konferenzprogramm kostet für Frühbucher bis zum 15. 09. 2012 € 25,-, danach € 40,-. Konferenzprogramm teilweise in englischer Sprache.

Für weitere Informationen und zur Anmeldung

www.spektrum.com/careerexpo

Wenn Sie Aussteller, Sponsor oder Referent werden möchten, kontaktieren Sie bitte:
Anke Walter · Tel.: +49 6221 9126-744 · walter@spektrum.com

naturejobs

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

präsentiert von:

academics **DIE ZEIT**

horizonte

Homo scientificus helveticus 6

Der SNF: Seit 60 Jahren für die Forschung 14

Wenn der Kuh das Milchgeben weh tut 18

Irrationales Peer-Review 30

Blaue Seide oder Was Grundlagenforschung nützt

Seit drei Jahren schon beschäftigt sich der junge Literaturwissenschaftler mit – sagen wir mal – dem deutschen Schriftsteller Carl Joachim Friedrich Ludwig von Arnim, schlichter bekannt als Achim von Arnim. Er hat die Romane und Dramen des Vertreters der Heidelberger Romantik vor- und rückwärts gelesen, mehrere Archive aufgesucht, um verschiedene Textvarianten zu vergleichen, und nach zwei schlaflosen Nächten den dritten tiefenpsychologischen Interpretationsversuch der «Melück Maria Blainville, die Hausprophetin aus Arabien» verworfen. Schliesslich beendet er seine Dissertationsschrift doch noch: ein vierhundert Seiten starkes, in kleiner Auflage gedrucktes Buch, das von der Romantik-Forschung interessiert aufgenommen und kontrovers diskutiert wird.



Die Geschichte wirft mindestens drei Fragen auf: Wer hat die Dissertation bezahlt? Was nützt sie? Und was hat Achim von Arnim

am blauseidenen Mantel gereizt, den Melücks magische Schneiderpuppe nicht mehr hergibt? Einfach zu beantworten sind nur die zwei ersten Fragen. Erstens: Bezahlt hat der Schweizerische Nationalfonds. Er finanziert hierzulande die Grundlagenforschung, die hauptsächlich um des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns willen betrieben wird, sei es in der Molekularbiologie, der Teilchenphysik, der Gewaltsoziologie oder der Literaturwissenschaft.

Zweitens: Auch wenn das Buch ausserhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft nicht viele Leser finden wird, die seinen verschlungenen Deutungssträngen folgen mögen: Es nützt der Gesellschaft. Ohne Kultur ist kein Zusammenleben möglich – Kultur im Sinne der menschlichen Fähigkeit, einander zu verstehen, einander zu widersprechen und einander etwas Interessantes mitzuteilen, auf dass man sich bilden und einen neuen Gedanken fassen kann. Auch die Entwicklung der innovativsten Maschine gründet in diesem Humus. Eines seiner Moleküle ist eine Monografie über einen adligen Seidenfetischisten in Preussen.

Urs Hafner
Redaktion «Horizonte»



Susi Lindig/ETHZ



Hans-Christian Wepler/Lab25



Andreas Voegelin/Antikenmuseum Basel



sr.ch



schwerpunkt forschungsplatz schweiz

6 Forschen in der Schweiz

Die Schweiz ist traditionell eine Hochburg der Ingenieurwissenschaften. Heute ist sie mit ihren vielen guten universitären Hochschulen ein Magnet für Forschende aller Disziplinen aus der ganzen Welt. Der einheimische Nachwuchs fehlt indes.



biologie und medizin

18 Forschung im Kuhstall

Kühe sind leistungsfähige Milchlieferantinnen – und leiden darunter.

20 Gefährliche Furchtlosigkeit

Aids gilt heute als heilbar. Gerade deshalb nimmt die Zahl der Neuinfektionen zu.

21 Trainieren gegen Autismus Sozial meckern Wohlfühlpille Ecstasy



gesellschaft und kultur

22 Mit der Zunge gegen böse Feinde

Eretria in Griechenland ist ein Zentrum der schweizerischen Archäologie.

24 Zeitlose Stirnlocke

Comics sind nicht simpel, sondern komplexe Kunstwerke mit Unterhaltungswert.

25 Qualität als gesundheitsmedizinische Floskel? Moldawien will Forschende zurückholen Dominantes Deutsch in der Bundesverwaltung



technologie und natur

26 Mut zur Prognose

Bern hat sich als Zentrum der internationalen Klimaforschung etabliert.

28 Tüfteln mit Atomen

Die Kernfusion: Ein alter Traum könnte die Energieerzeugung revolutionieren.

29 Schneller schwimmen mit Sensoren Quantenkryptografischer Wettkampf Heilige Bäume als Klimazeugen

4 snf direkt

Claire Jacob erhält den Marie Heim-Vögtlin-Preis 2012.

5 nachgefragt

Werden die nationalen Forschungsförderer überflüssig, Herr Imboden?

13 im bild

Die Unruh, das Herz der Uhr

14 porträt

Der Schweizerische Nationalfonds: seit sechzig Jahren für die Forschung

16 vor ort

Der Ökologe Lian Pin Koh untersucht auf Borneo, wie sich der Anbau von Ölpalmen auf die Umwelt auswirkt.

30 im gespräch

Das Peer-Review funktioniert nicht nach rein rationalen Kriterien, sagt der Soziologe Martin Reinhart.

32 cartoon

Ruedi Widmer

33 perspektiven

Didier Trono fordert die Begrenzung der Forschungsfreiheit.

34 wie funktioniert?

Der Fahrplan der SBB

35 für sie entdeckt

Teilchenphysik zum Aufklappen

Verantwortungsvolle Forschung

Annette Bouellier



Dass sich Schweizer Forschende in der Zusammenarbeit mit ökonomisch schwächeren Ländern engagieren, hat eine lange Tradition. Indem sich die Forschungsgemeinschaft weltweit für eine nachhaltige Entwicklung einsetzt, nimmt sie gesellschaftspolitische Verantwortung wahr. Die Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit und der SNF haben nun das Swiss Programme for Research on Global Issues for Development (r4d.ch) geschaffen. Das Programm verfolgt das Ziel, in den Entwicklungsländern Kenntnisse und Lösungen zu fördern, mit deren Hilfe globale Herausforderungen bewältigt werden können. Geforscht wird unter anderem zu folgenden Themen: gesellschaftliche Konflikte in schwachen Staaten, Armutsreduktion, landwirtschaftliche Produktionssysteme und Ernährungssicherheit, nachhaltige Nutzung von Ökosystemen sowie Versorgungssysteme im Gesundheitsbereich. Für die Laufzeit des Programms von 2012 bis 2022 stehen 97,6 Millionen Franken zur Verfügung.

Martin Vetterli für Dieter Imboden

Der Nationale Forschungsrat beurteilt jährlich mehrere Tausend dem SNF unterbreitete Projektgesuche und entscheidet über deren Unterstützung. Anfang März hat der Ausschuss des Stiftungsrats des SNF Martin Vetterli für die Amtsperiode 2013 bis 2016 zum Präsidenten des Nationalen Forschungsrats gewählt. Der Ingenieurwissenschaftler ist Professor für Kommunikationssysteme und Dekan der School of Computer and Communication Sciences an der ETH Lausanne (EPFL). Er tritt die Nachfolge von Dieter Imboden an, der diese Position Ende 2012 nach acht Jahren abgeben wird. Als langjähriger Vizepräsident der EPFL und ehemaliges Mitglied des Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierats kennt Martin Vetterli die Schweizer Hochschul- und Forschungspolitik bestens. Für seine eigene Forschung in den Bereichen Elektrotechnik, Computerwissenschaften und angewandte Mathematik wurde er mehrmals national und international ausgezeichnet, unter anderem 1996 mit dem Nationalen Latsis-Preis.

Gabriele Gendotti für Hans Ulrich Stöckling

Der Stiftungsrat des SNF hat den Tessiner Rechtsanwalt Gabriele Gendotti Ende Januar für die Amtsperiode 2012 bis 2015 zu seinem Präsidenten gewählt. Der ehemalige National- und Regierungsrat löst Hans Ulrich Stöckling an der Spitze des SNF ab. Gabriele Gendotti gehört dem Stiftungsrat bereits seit 2003 als Bundesvertreter an. Als langjähriger Erziehungsdirektor ist er mit bildungs- und forschungspolitischen Fragen vertraut. Von 2000 bis 2011 war er Mitglied der Schweizerischen Universitätskonferenz und der Schweizerischen Konferenz der kantonalen Erziehungsdirektoren.

Neue MHV-Preisträgerin



Der Marie Heim-Vögtlin-Preis 2012 geht an die Neurobiologin Claire Jacob. Mit dieser Auszeichnung würdigt der SNF die wissenschaftlichen Arbeiten und Karrieren von Forscherinnen. Claire Jacob

widmete sich zuerst insbesondere den Mechanismen chronischer Entzündungen. Später erweiterte sie ihr Forschungsgebiet auf die Neurobiologie. Mit ihren durch MHV-Beiträge unterstützten Arbeiten, die sie nach der Geburt ihres ersten Kindes an der ETH Zürich realisierte, gewann sie neue Erkenntnisse zur Rolle von Chromatinregulatoren (HDAC) für die Myelinisierung der Nervenzellen und das Überleben der Schwann-Zellen. Diese Ergebnisse könnten zu einer besseren Steuerung der Regeneration peripherer Nerven nach einer Verletzung beitragen. Die Neurobiologin führt ihre Forschung als Assistenzprofessorin an der Universität Freiburg fort. Der SNF vergibt seit 1991 MHV-Beiträge an Forscherinnen, deren wissenschaftliche Laufbahn aus familiären Gründen unterbrochen wurde.

Agora: Wissenschaft sucht Dialog

Der SNF finanziert mit dem Programm Agora 17 Kommunikationsprojekte mit insgesamt 2,1 Millionen Franken. Forschende können also ihre Arbeiten präsentieren. Der SNF hat weder bei der Themenwahl, der Form der Kommunikation noch bei den Zielgruppen – Familien, Kinder, Schülerinnen und Schüler, Jugendliche, Fachleute – Vorgaben gemacht. Die bewilligten Projekte regen daher den Dialog über sehr unterschiedliche wissenschaftliche Themen an, wie z.B. die Metaphysik von gewöhnlichen Objekten, die Geschichte der Gleichstellung der Geschlechter oder die sexuelle Fortpflanzung in der Natur.

horizonte

SCHWEIZER
FORSCHUNGSMAGAZIN

Erscheint viermal jährlich
auf Deutsch und Französisch.
24. Jahrgang, Nr. 93, Juni 2012

Herausgeber
Schweizerischer Nationalfonds
zur Förderung der wissenschaftlichen
Forschung (SNF)
Abteilung Kommunikation
Leitung Philippe Trinchan

Das «Horizonte»-Abonnement
ist kostenlos. Die Papierversion
wird nur in der Schweiz verschickt.
Die präsentierten Forschungsprojekte
werden in aller Regel vom SNF
unterstützt.

ISSN 1663 2710

Redaktion
Urs Hafner (uha), Leitung
Philippe Morel (pm)
Ori Schipper (ori)
Marie-Jeanne Krill (mjk)

Gestaltung
und Bildredaktion
Lab25, Laboratory of Design
Zürich
Isabelle Gargiulo
Hans-Christian Wepfer
Anita Pfenniger, Korrektorat

Übersetzung
Weber Übersetzungen

Druck und Litho
Stämpfli AG, Bern und Zürich

© alle Rechte vorbehalten.
Nachdruck der Texte
mit Genehmigung
des Herausgebers erwünscht.

Adresse
Schweizerischer Nationalfonds
Abteilung Kommunikation
Wildhainweg 3, Postfach 8232
CH-3001 Bern
Tel. 031 308 21 48
Fax 031 308 22 65
abo@snf.ch

 www.snf.ch/horizonte
> [facebook.com/
ForschungsmagazinHorizonte](https://www.facebook.com/ForschungsmagazinHorizonte)

Auflage
24 900 deutsch, 12 800 französisch

Umschlagbild oben: Die geplanten
Studentenwohnungen der ETH Zürich
(Hönggerberg). Bild: architekttick.ch

Umschlagbild unten: Die Sonne,
aufgenommen von einer Raumsonde
der Esa und Nasa (Januar 2012).
Bild: SoHo/NASA

Der SNF

Das Forschungsmagazin
«Horizonte» wird vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) herausgegeben, der wichtigsten Schweizer Institution zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung. Der SNF fördert im Auftrag des Bundes die Grundlagenforschung in allen wissenschaftlichen Disziplinen. Im Zentrum seiner Tätigkeit steht die wissenschaftliche Begutachtung der von den Forschenden eingereichten Projekte. Der SNF unterstützt jährlich mit 700 Millionen Franken fast 3500 Projekte, an denen rund 8000 Forschende beteiligt sind.



Annette Bouellier

«Ideen zählen, nicht die Nationalität»

Der europäische Forschungsraum soll nicht nur von oben, sondern auch von unten, von den einzelnen Nationen her, zusammenwachsen, sagt Dieter Imboden.

Herr Imboden, Europas Forschungsraum soll im globalen Wettbewerb gegenüber den USA und China bestehen. Wieso gibt es überhaupt Forschungsblöcke, die gegeneinander antreten?

Dieses Bild kommt aus der Politik, die der Wählerschaft die Investitionen in die Forschung schmackhaft machen muss. Das geht besser, wenn sie vom Erhalt von Arbeitsplätzen sprechen kann, die von internationaler Konkurrenz bedroht sind. Doch das Bild entspricht nicht der Realität der Forschenden. Wenn sich Wissenschaftler zu einem Team zusammenschliessen, zählen Ideen und Fachwissen, nicht ihre Nationalität.

Trotzdem: Hat Europa gegen China mit seinen immensen Mitteln eine Chance?

Auch in der Forschung kommt Qualität vor Quantität. Die besten chinesischen Wissenschaftler haben zumindest einen Teil ihrer Ausbildung im Ausland genossen. China investiert zwar enorme Summen, doch das Schulsystem fördert Fleiss und Auswendiglernen. Das kritische Denken, das Hinterfragen von momentan gültigem Wissen kommt zu kurz. Dieser Herausforderung muss sich China noch stellen.

Nun will Europa mit den sogenannten Flaggschiff-Projekten klotzen.

Ob der Kaiser wirklich Kleider trägt und dies der richtige Weg ist, den Stern der europäischen Forschung heller erstrahlen zu lassen, wird sich zeigen.

Wie kann die Forschung die nationalen Grenzen in Europa überwinden?

Einige Hürden, zum Beispiel solche arbeitsrechtlicher Natur, muss die Politik beseitigen. Andere Hindernisse können wir mit unsern Schwesterorganisationen selber aus dem Weg räumen. Beispielsweise sprechen wir schon seit vier Jahren Fördergelder für Projekte mit Schweizer Beteiligung, die eine andere Forschungs-förderungsorganisation geprüft und für gut befunden hat. Die Ausweitung des sogenannten Lead-Agency-Verfahrens gehört zu den Zielen von Science Europe: Der europäische Forschungsraum soll nicht nur von oben, von der EU, sondern auch von unten, von den einzelnen Nationen her, zusammenwachsen.

Die EU schießt immer mehr Geld in die Forschung ein und der europäische Forschungsraum wächst immer enger zusammen. Werden die nationalen Forschungsförderer überflüssig?

Nein, die europäische und die nationale Forschungsförderung ergänzen sich. Der Schweizerische Nationalfonds kennt beispielsweise keine Advanced Grants für erfahrene Forschende wie der europäische Forschungsrat. Dafür kann der SNF beispielsweise gezielt die klinische Forschung in der Schweiz fördern, wenn er will.

Verglichen mit dem Europäischen Forschungsrat, dem ERC, bewilligt der SNF eine höhere Quote der eingereichten Projekte. Gibt er sich mit dem Mittelmass zufrieden?

Nein, eine tiefe Bewilligungsquote ist kein Beweis für gute Qualität. Beim ERC geben im Verhältnis zu den verfügbaren Mitteln viel mehr Forschende ein Gesuch ein. Dadurch sinkt die Effizienz des Systems, denn die vielen Forschenden, die kein

«Ob der Kaiser wirklich Kleider trägt, wird sich zeigen.»

Geld bekommen, haben beim Verfassen ihres Gesuchs trotzdem einen beträchtlichen administrativen Aufwand betrieben. Deswegen kämpft der SNF für vernünftige Erfolgsquoten. Dass die Qualität nicht darunter leidet, zeigen Beispiele von Forschenden, die bei uns scheitern und später beim ERC mit ihrem Projekt durchkommen. Natürlich kommt auch das Umgekehrte vor. **Interview ori** ■

Dieter Imboden ist Professor für Umweltp Physik an der ETH Zürich und steht seit 2005 dem Nationalen Forschungsrat des SNF vor. Er war Ende 2011 massgeblich an der Entstehung von Science Europe beteiligt, dem Zusammenschluss europäischer nationaler Forschungsförderungsorganisationen.

Forschen in der Schweiz

Hey Studio





Fachhochschulen:

- Westschweiz (HES-SO)
- Bern (BFH)
- Zürich (ZFH)
- Zentralschweiz (FHZ)
- Nordwestschweiz (FHNW)
- Ostschweiz (FHO)
- Italienische Schweiz (SUPSI)
- ▲ **Forschungsinstitute
ETH-Bereich**

Physikalisch-
Meteorologisches
Observatorium
Davos

Forschungsplatz Schweiz: Das ist ein dichtes Netz von zwölf universitären Hochschulen, vier Instituten, die zum ETH-Bereich gehören, und sieben Fachhochschulen, das sind der Schweizerische Nationalfonds und die Kommission für Technologie und Innovation, das sind viele Labors privater Unternehmen aus der Schweiz und der ganzen Welt, das ist das internationale Cern in Genf. Forschungsplatz Schweiz, das sind viele eindruckliche Zahlen: rund 16 Milliarden Franken jährlich für Forschung und Entwicklung, der erste Platz des Innovation Union Scoreboard, der erste Platz punkto eingereicherter Patente, eine sehr hohe Anzahl Publikationen pro Einwohner.

Forschungsplatz Schweiz: Das sind die aufstrebende Romandie und das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos, das sind aber auch Mythen und Mängel. Nicht nur die Schweiz, auch die meisten westlichen Länder und sowieso das aufstrebende China sehen sich mittlerweile als Forschungsnationen. Verdankt die Schweiz ihren Reichtum dem Rohstoff Bildung? Was tut sie, um das Fehlen des akademischen Nachwuchses aufzufangen? uha ■

Ländliche Folklore vor industrieller Infrastruktur: Als Säumer verkleidete Wanderer am Speichersee im Grimselgebiet (2003). Bild: Urs Fiebler/Keystone



Bauernland in Ingenieurshand

Der Forschungsplatz Schweiz zeichnet sich durch hohe privatwirtschaftliche Investitionen und eine tiefe Hochschulabsolventen-Quote aus. Ohne Akademiker-Immigration hätte das Land ein grosses Problem. *Von Urs Hafner*

Ein Land ohne Rohstoffe und Bodenschätze ist auf Bildung und Wissen angewiesen, um seinen Wohlstand mehren zu können. Der Satz hat sich unter den westlichen Nationen als Topos etabliert. Auch die Schweiz führt ihn gern ins Feld. Kultivierte sie im 19. und noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts das Bild des selbstgenügsamen Bauernlands, sieht sie sich heute als Forschungsnation.

Vielleicht aber verhält es sich gerade umgekehrt – vielleicht ist die Schweiz nicht wohlhabend, weil sie mehr Gelder als Deutschland, Frankreich und England in die Forschung investiert, sondern weil sie sich als wohlhabendes Land den Ausbau dieses Sektors leisten konnte? Dieser Ansicht ist der Historiker Jakob Tanner von der Universität Zürich. «Die moderne Schweiz ist nicht aus Kargheit geboren. Sie hatte die Ressourcen für ihre frühkapitalistische Viehexportwirtschaft und die protoindustrielle Textilproduktion.»

Noch zu Beginn des 19. Jahrhunderts besass die republikanische Schweiz kaum Akademien und mit Basel nur eine Universität, die zudem als eine Art Familienbetrieb geführt wurde. Die umliegenden

Monarchien waren punkto Wissenschaften besser aufgestellt. Doch seit dem liberalen Aufbruch der 1830er Jahre entstand ein dichtes Netz von föderal gestützten Universitäten – und natürlich die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Sie ist heute die renommierteste Schweizer Hochschule.

Im Kindergarten anfangen

Dass sich der junge Bundesstaat ein Technikum leistete, ist bezeichnend. Erst war von der liberalen Elite eine Nationaluniversität geplant, doch diese hatte gegenüber der anwendungsorientierten ETH das Nachsehen. «Die aufstrebende Industrienation mit ihren Bergen, Tälern und Seen rief geradezu nach kühnen ingenieurlichen Konstruktionen, nach neuen Brücken, Eisenbahntunnels und Stau-mauern», sagt Jakob Tanner. Die schweizerische Forschung und die Wissenschaft sind stark durch den Industriegeist geprägt.

Das lässt sich an der Forschungsförderung ablesen. «Der hohe Anteil unternehmensfinanzierter Forschung ist ein Spezifikum des Forschungsplatzes Schweiz. Man kann dies als Dominanz

privatkapitalistischer Verwertungsinteressen oder aber als hohe Marktflexibilität der Schweizer Forschung bezeichnen – je nach Standpunkt», sagt Tanner. Fast siebenzig Prozent der Aufwendungen für die Forschung stammen aus der Privatwirtschaft, knapp fünfundzwanzig Prozent vom SNF, der fast ausschliesslich Grundlagenforschung fördert. In Europa liegt der staatliche Anteil an der Forschungsfinanzierung im Schnitt um zehn Prozent höher.

Trotz dem dichten Netz ihrer zwölf universitären Hochschulen leidet die Schweiz unter dem im internationalen Vergleich tiefen Anteil an Hochschulabsolventen. Diesen macht sie zurzeit wett mit dem günstigen Import hochqualifizierter Arbeitskräfte vor allem aus Deutschland. Auf die Dauer ist das jedoch keine Lösung. Der neuste Bericht des Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierates empfiehlt denn auch, den wissenschaftlichen Nachwuchs besser zu fördern. Die Förderung müsse bereits im Kindergarten und in der Volksschule anfangen. Schon hier würden Kinder aus unterprivilegierten und bildungsfernen Milieus benachteiligt. ■

Auf der Poleposition

Die universitären Hochschulen der Westschweiz haben in den letzten zehn Jahren ihre Zusammenarbeit intensiviert. Eine Erfolgsgeschichte? *Von Xavier Pellegrini*

Die Entscheidungsträger sind sich fast einig, zumindest auf der westlichen Seite der Saane: Die Zusammenarbeit zwischen der Universität Lausanne, der Universität Genf und der ETH Lausanne – mit ihrem charismatischen Präsidenten Patrick Aebischer, der die Unterstützung multinationaler Unternehmen wie Nestlé, Logitech oder Rolex gewinnen konnte – ist eine Erfolgsgeschichte. Wie hat sie begonnen?

Forschung als Wachstumsmotor

In den 1990er Jahren war die Rede vom «Projet triangulaire lémanique»: Nach einer langen Wirtschaftskrise und entsprechend knappen staatlichen Ressourcen wollten die Kantone Genf und Waadt sowie der Bund ihre universitären Hochschulen zum Sparen bringen, indem diese gewisse Fakultäten oder Disziplinen auf einen Standort konzentrierten. Das Ergebnis war wenig berauschend: Die akademischen Kreise sträubten sich mit Haut und Haar.

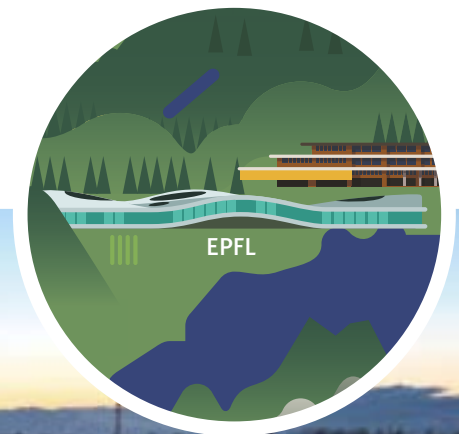
In den 2000er Jahren änderte sich dies radikal: Nun war Zusammenarbeit Trumpf; die Hochschulbehörden und Professoren überboten sich gegenseitig, als es darum ging, mit Vertretern anderer Hochschulen Kontakte zu knüpfen.

Weshalb dieser Gesinnungswandel? Eine neue Studie («Gouverner les universités. L'exemple de la coordination Genève–Lausanne», Lausanne 2012) spricht von einem «günstigen Zeitfenster zwischen 1998 und 2002»: Einerseits hatten sich die öffentlichen Finanzen wieder etwas erholt, andererseits vollzog sich auf europäischer Ebene ein Paradigmenwechsel – das Konzept der Wissensgesellschaft setzte sich durch. Plötzlich waren sich alle Akteure einig, auch die für Bildung und Forschung zuständigen Bundesbehörden, dass Lehre und Forschung gefördert werden müssten, weil sie Wachstumsmotoren seien. Seither gilt es nicht mehr zu sparen, sondern im Gegenteil zu investieren, zumindest in gewissen strategischen Disziplinen, was in vielen Fällen die Zusammenarbeit zwischen den Universitäten bedingt. Anklang hat der neue Ansatz besonders in der Genferseeregion gefunden.

Weshalb sind die Region Zürich mit ihrer Technischen Hochschule und ihrer Universität sowie die Universitäten Basel und St. Gallen dem Beispiel nicht gefolgt? Laut Jean-Philippe Leresche, Politologe an der Universität Lausanne und Mitautor von «Gouverner les universités», liegt einer der Gründe darin, dass die Deutsch-

schweiz stark vom Humboldtschen Ideal der Unabhängigkeit von Bildungsinstitutionen geprägt sei, während die Universitäten der Romandie in der Tradition napoleonischen Gedankenguts empfänglicher für politische Einflüsse seien. Die akademische Welt der deutschsprachigen Schweiz zeige sich auch skeptischer gegenüber einer Zusammenarbeit mit der Wirtschaft. Schliesslich: «Zürich sieht sich als Wissenschaftszentrum der Schweiz. Deshalb ist die Region weniger motiviert, etwas zu ändern.»

Ist also das «Projet triangulaire lémanique» eine Erfolgsgeschichte? Vorderhand ist das schwierig abzuschätzen. Jean-Philippe Leresche: «Die Euphorie der Westschweizer Medien scheint mir manchmal etwas übertrieben, doch die Signale sind positiv. Es sind keine kritischen Stimmen mehr zur Zusammenarbeit zu vernehmen, und diese wird weiter ausgebaut und langfristig ausgerichtet.» ■



Westschweizer Morgenröte? Das Rolex-Learning-Center der ETH Lausanne, entworfen vom japanischen Architekturbüro Sanaa (2010). Bild: Alain Herzog/EPFL





Im Bann der Sonne

Das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos ist weltweit führend in der Messung der Sonnenstrahlung. Es untersucht ihren Zusammenhang mit dem Klima. *Von Philippe Morel*

Das Licht ist gleissend hell. Es ist noch nicht Mittag, und doch brennt die Frühlingssonne bereits vom Himmel. «Wenn Sie den Zeigefinger vor die Sonne halten, sehen Sie keinen Halo-Effekt. Dies weist auf eine klare Atmosphäre hin, die für die Messung der Sonnenstrahlung ideal ist. Im Moment liegt die Intensität wohl bei einem Kilowatt pro Quadratmeter», erklärt der Astronom Werner Schmutz. Er leitet das Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos seit 1999.

Auf dem Dach provisorischer Baracken, in denen das Observatorium während der Renovation untergebracht ist, steht ein ganzes Arsenal von Instrumenten. Sieben Radiometer sind auf die Sonne gerichtet. «1971 hat die Weltorganisation für Meteorologie das Observatorium Davos zum World Radiation Center bestimmt. Die sieben Radiometer, die wir als Standardgruppe bezeichnen, sind die Referenz im Bereich der Sonnenstrahlung schlechthin. Sie dienen als eine Art Eichmass und werden zur weltweiten

Kalibrierung von Instrumenten verwendet», sagt der Astronom. Der Unterhalt und die Bewirtschaftung dieser Standardgruppe mit ihrer alternden Elektronik stehen im Mittelpunkt der Tätigkeit des Observatoriums, das gleichzeitig an der Entwicklung der zweiten Generation Geräte arbeitet.

Tuberkulose und Wissensdurst

Das Abenteuer Sonne begann in Davos Anfang des 20. Jahrhunderts. Damals wütete vielerorts die Tuberkulose. Carl Dorno, ein deutscher Geschäftsmann, brachte seine kranke Tochter in das Bündner Dorf, einen renommierten Kurort. Als begeisterter Anhänger der Naturwissenschaften fragte er sich, was die Gründe für das heilsame Klima sein könnten. Er interessierte sich insbesondere für die Sonnenstrahlung. Mit eigenen Mitteln gründete er 1907 das Physikalisch-Meteorologische Observatorium. 1908 führte er erste Messungen durch, die er 1909 publizierte. Seine Arbeit befasste sich im Wesentlichen mit der ultravioletten

Strahlung, die während einiger Zeit sogar Dorno-Strahlung genannt wurde.

1926 wurde das Observatorium Teil des Schweizerischen Forschungsinstituts für Hochgebirgsklima und Medizin, dessen Finanzierung die Gemeinde Davos originellerweise mit einem Teil der Kurtaxe sicherstellte. «Die Wissenschaft spielt in Davos seit jeher eine wichtige Rolle. Die Kleinstadt mit 13000 Einwohnern beherbergt fünf Forschungsinstitute, die rund 300 Mitarbeitende beschäftigen. Trotz gesundem Klima, Postkartenlandschaft und Skifahren ist es jedoch nicht immer einfach, Mitarbeitende zu finden», meint Werner Schmutz. Wäre es in unserer Zeit der Informatiknetzwerke nicht zweckmässiger, sich einem grossen Universitätszentrum anzuschliessen und Fernmessungen vorzunehmen? «Nach allem, was ich bisher inner- und ausserhalb der Schweiz beobachten konnte, ist das keine ideale Lösung. Das Interesse für die Instrumente erlischt schnell, und die Qualität der Messungen leidet darunter», ist Schmutz überzeugt. Die Sonnenstrahlung

Weltraumforschung im Kurort: Links das Herzstück des Davoser Observatoriums, ein Gerät zur Messung der Sonnenstrahlenintensität, geprüft von Werner Schmutz (März 2004). Unten: Mitarbeiter des Observatoriums in den dreissiger Jahren (rechts Wilhelm Gustloff, NSDAP-Mitglied, der 1936 in Davos erschossen wurde).
Bilder: Arno Balzarini/Keystone (links), Dokumentationsbibliothek Davos

ist bei Weitem die wichtigste Energiequelle der Erde und ein Schlüsselfaktor des Klimas. Bei einer gegebenen Oberfläche verändert sich dieser Energiefluss jedoch; zu regelmässigen Schwankungen kommt es durch die Exzentrizität der Erdumlaufbahn sowie durch die Neigung der Erdrotationsachse und deren Präzession (Kreiselbewegung). Diese Phänomene waren für die Eiszeiten während der letzten Million Jahre verantwortlich. Ausserdem kommen mehr oder weniger grosse Schwankungen auch von der Sonne selbst; das bekannteste Beispiel dafür sind die in einem elfjährigen Zyklus wiederkehrenden Sonnenflecken.

Die Veränderungen werden aber auch von den Gliedern am anderen Ende der Kette verursacht: von der Erde und ihrer Atmosphäre. Die Temperatur auf der Erdoberfläche hängt von der Strahlenbilanz ab. Diese ergibt sich aus der Menge der absorbierten und der ins All zurückgeworfenen Energie. Ist die Bilanz Null, bleibt die mittlere Temperatur der Erdkugel stabil. Wenn jedoch die Sonne etwas intensiver brennt, ein Vulkan einige Kubikmeter Aerosole in die Atmosphäre spuckt oder die Menschheit riesige Mengen fossiles CO₂ freisetzt, verändert sich

diese Bilanz – und somit die Erdtemperatur. «Am Boden messen wir nur die Strahlung, welche die Erdoberfläche erreicht. Wenn wir uns über die Atmosphäre und ihre Filterfunktion gegenüber der Sonnenstrahlung ins Bild setzen wollen, müssen wir höher hinaus», erklärt Werner Schmutz. Seit Ende der 1970er Jahre sind die Instrumente des Observatoriums an Bord von Ballonen, Raketen und Satelliten ins Weltall vorgeedrungen. «Diese Umgebung stellt enorme Ansprüche ans Material: Es muss äusserst robust und zuverlässig, aber auch leicht und platzsparend sein. Der Wissenstransfer zwischen Instrumenten für den Einsatz auf der Erde und solchen für das All ist bereichernd», sagt Schmutz.

Apokalyptische Explosion

Zur grossen Freude des Astronomen und seines dreissigköpfigen Teams gehört das Observatorium zu den wenigen Laboratorien, die ein Weltraumexperiment von A bis Z selbst planen und durchführen können. Das letzte Experiment fand 2010 an Bord des europäischen Satelliten Picard statt, der die Variabilität der Sonne und ihrer Wirkung auf das Erdklima untersucht. «So offensichtlich ein Zusam-

menhang zwischen Sonnenstrahlung und Klima auch ist, so schwierig bleibt er zu quantifizieren», gibt Werner Schmutz zu bedenken. Ende des 17. und Anfang des 19. Jahrhunderts traten beispielsweise zwei Phasen mit geringer Sonnenaktivität auf, die als Maunder- und Daltonminimum bezeichnet werden. Sie gingen jeweils mit einer Abkühlung des Weltklimas einher. Die Rolle des Gestirns ist jedoch schwierig zu bestimmen, da keine direkten Messungen seiner Strahlung vorliegen. Die Wissenschaft verfügt für diese Zeiträume nur über indirekte Messungen, beispielsweise die Anzahl Sonnenflecken. Überlagert wird das Bild ausserdem durch die apokalyptische Explosion des Vulkans Tambora im Jahr 1815. Auf der Grundlage aktueller Veränderungen und anderer Indikatoren versuchen die Wissenschaftler in Davos, die Geschichte der Sonne zu rekonstruieren und die Klimamodelle darauf abzustimmen.

«Die Sonne ist im Moment eher wenig aktiv. Die grosse Frage ist, ob sie ihre Aktivität verstärken und die Klimaerwärmung beschleunigen oder ob ihre Aktivität zurückgehen wird und sie uns mit einigen Zehntelgraden Abkühlung eine Gnadenfrist einräumt», sagt Werner Schmutz. ■



Am Spass arbeiten:
Disney-Research in Zürich (2010).
Bild: Philippe Hollenstein/ETH Zürich



Kluge Köpfe und politische Stabilität

Lang waren es Chemie und Pharma, die in der Schweiz privat finanzierte Forschung betrieben. Warum lässt sich nun die Hightech-Branche hier nieder? *Von Beate Kittl*

Einmal Prinzessin sein ... Kleine Mädchen erfüllen sich diesen Traum im Disney-World in Florida mit 3-D-Modellen, die ein in der Schweiz mitentwickelter Gesichtsscanner erstellt. Hinter der Kinderattraktion steckt eine komplexe Entwicklung der visuellen Informatik. Nur wenige verstehen so viel von dieser Materie wie das Team um Markus Gross von der ETH Zürich, das im Bereich Computergrafik und -animation forscht. Das war für den US-Unterhaltungskonzern vor vier Jahren Grund, eines seiner – weltweit drei – Forschungszentren an der ETH zu eröffnen.

Die Schweizer Forschungselite lockt auch andere globale Hightechfirmen an. Den Anfang machte IBM schon in den 1950er Jahren, als es ein Rechenzentrum in Rüschlikon eröffnete. Dort erfanden die IBM-Forscher Gerd Binnig und Heinrich Rohrer in den 1980er Jahren das Rastertunnelmikroskop. Damit öffneten sie den Zugang zu einer neuen, im Kleinsten verborgenen Welt, die unterdessen so intensiv

erforscht wird, dass IBM und ETH letztes Jahr gemeinsam das «Binnig und Rohrer Nanotechnology Center» gründeten – in der Schweiz das erste von Industrie und Hochschule gemeinsam betriebene Forschungszentrum. Die ETH-Forscher dürfen weiterhin frei ihre Themen wählen und Resultate veröffentlichen, nur die Informationen und Technologien, die IBM gehörten, müssten vertraulich behandelt werden, sagt Nanotechnikprofessor Andreas Stemmer, dessen Gruppe als eine der Ersten ins neue Nanotechnologiezentrum gezogen ist.

Die Art der Zusammenarbeit mit öffentlichen Forschungseinrichtungen ist von Unternehmen zu Unternehmen verschieden. Während beispielsweise Google in Zürich – seinem grössten Forschungs- und Entwicklungsstandort ausserhalb der USA – mit mehreren hundert Mitarbeitenden eigene Netz- und Geo-Produkte weiterentwickelt und nur für gezielte Projekte auf den starken Talentpool an den Hochschulen zurückgreift, betten sich die 40 Disney-Research-Angestellten in

die akademische Gemeinschaft der ETH Zürich ein. Die Firma finanziert Doktorarbeiten mit und ermutigt die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, ihre Resultate in akademischen Fachzeitschriften zu veröffentlichen. «Wir glauben, dass wir von den Ideen und dem Konkurrenzdruck in der freien akademischen Forschung profitieren können», sagt Stephan Veen von Disney Research in Zürich.

Hohe bürokratische Hürden

Die hohe politische Stabilität der Schweiz, ihre Lage mitten in Europa, die gute Infrastruktur mit dem Flughafen und nicht zuletzt auch die hohe Lebensqualität in der Stadt Zürich sorgen dafür, dass die internationalen Topkräfte gerne hierher ziehen. Auch wenn die Firmen oft hohe bürokratische Hürden überwinden müssen, um ausländische Arbeitskräfte anzustellen, wie Stephan Veen als Einziger einräumt, obwohl dieser Negativpunkt auch die anderen stören dürfte: Bei Google Schweiz arbeiten 750 Menschen aus 75 Ländern, bei IBM in Rüschlikon einige hundert Mitarbeiter aus 45 Nationen. «Kluge Schweizer Köpfe allein genügen für diese Stellen nicht», sagt Veen. «Wir buhlen um Topleute in der ganzen Welt.» ■

Perfektionierte Schwingungen

Das Herz einer Uhr ist ihre Unruh. Sie heisst so, weil sie dauernd in Bewegung ist: Sie dreht sich um ihre Achse zuerst in die eine, dann in die andere Richtung und gibt der Uhr damit den Takt an. Dass die Unruh aus speziellem Material gefertigt sein sollte, das sich bei unterschiedlichen Temperaturen weder zusammenzieht noch ausdehnt, hatte schon Charles Edouard Guillaume erkannt. Die von ihm entdeckte Eisen-Nickel-Legierung Invar – der Name steht für invariant gegenüber Temperaturschwankungen – brachte dem Sohn eines Uhrmachers 1920 (ein Jahr vor Einstein) den Nobelpreis für Physik ein.

Die im Bild zu sehende bläulich-violett und goldgelb schimmernde Unruh ist hingegen aus Silinvar gefertigt, aus invariantem Silizium. Dieses ist wesentlich leichter als Invar und lässt sich in einem Ätzverfahren, das ursprünglich für Halbleiter in Computerchips entwickelt wurde, auf den Bruchteil eines Millimeters genau herstellen, wie Tüftler am Centre Suisse d'Electronique et Microtechnique im Auftrag der hiesigen Uhrenindustrie herausgefunden haben. Dank der neuen Unruh laufen mechanische Uhren genauer und zuverlässiger als je zuvor. ori

Bild: Patek Philippe

Eine umworbene Selbsthilfeorganisation

Forschung und Politik: Das ist ein mitunter schwieriges Verhältnis, wie die Geschichte des Schweizerischen Nationalfonds zeigt. Und ein fruchtbares. Von Roland Fischer, Bild Annette Boutellier

Man kann die Geschichte mit Zahlen beginnen: Der Schweizerische Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (SNF) hat derzeit jährlich rund 700 Millionen Franken für die Forschungsförderung zur Verfügung. Vor sechzig Jahren, als er gegründet wurde, waren es zwei Millionen. 2500 Prozent mehr Mittel – und eine dementsprechend grössere Rechenschaftspflicht? So einfach geht die Rechnung nicht. Aber in den Zahlen steckt ein Teil des Dilemmas, das sich wie ein roter Faden durch die Geschichte des SNF zieht: Ist die Stiftung einzig der Forschung, also den Geldnehmern, verpflichtet oder auch beziehungsweise vor allem der Politik, also den Geldgebern?

Die Frage führt zurück vor das Jahr 1952, als die privatrechtliche Stiftung, welche die nach Erkenntnisgewinn strebende Grundlagenforschung finanziert, gegründet wurde. In der «Prähistorie» der Forschungsförderung engagierte sich der Bund kaum. Er gönnte sich zwar nach 1848 das Polytechnikum in Zürich – heute ETHZ –, doch für die Grundlagenforschung waren ausschliesslich die Kantone zuständig. Darum stellte sich auf Bundesebene die Frage nach dem Nutzen von Forschung ohne direkte Anwendung nicht. In den 1930er Jahren begannen sich Forscherkreise für mehr Bundesmittel einzusetzen. Der Bescheid aus Bern: Dafür gibts kein Geld, man müsse einen anderen Topf suchen.

Dieser Topf wurde prompt gefunden. Während des Zweiten Weltkriegs initiierte Bern eine Arbeitsbeschaffungspolitik. Die Forschergemeinde erhoffte sich einen

Anteil an der für die damalige Zeit riesigen Summe von fünf Milliarden Franken. Das Problem: Man handelte sich eine Zweckklausel ein und damit eine Diskussion über den Nutzen der Grundlagenforschung. Die Befürworter des Projekts versuchten zwar aufzuzeigen, wie die Forschung als Arbeitsbeschaffungsmassnahme taugen könne, doch so richtig glücklich mit der Allianz wurde niemand. Zudem sträubten sich die Hochschulkantone gegen eine zentrale Forschungsorganisation. So wurde die Idee 1942 sang- und klanglos begraben.

So forsch wie erfolgreich

Als die Forschergemeinde Ende der 1940er Jahre unter der Führung des Physikers und Mediziners Alexander von Muralt zu einem neuerlichen Versuch ansetzte, entging man der finanzpolitischen Bauchlandung auf erstaunlich offensive Weise: Diskussionen um die Angemessenheit der Mittel sollten von Anfang an vermieden werden, auf welchen Nutzen auch immer bezogen. Stattdessen wurde ebenso forsch wie erfolgreich die Freiheit der Forschung behauptet. Erst wenn man Wissenschaft an keinen Zweck binde, könne sie erfolgreich sein, befand man in den Anfangsjahren des SNF – auch in der Politik.

So konnte Bundesrat Philipp Etter 1952 bei der Gründung des SNF, sozusagen einer Selbsthilfeorganisation der Forschergemeinde, feierlich verkünden: «Wenn auch der Staat die Mittel vorschiesst – die Wissenschaft soll frei bleiben und nicht eine Dienerin des Staates werden! Die Freiheit ist ihr Lebenselement.» Ein Taufspruch, der nicht allzu lang

Gültigkeit haben sollte. In der Folge stiegen die Beiträge für den SNF kontinuierlich an, die Anzahl der Projekteingaben auch. Noch flog man unterhalb des Radars der politischen Aufmerksamkeit. Es waren gewissermassen die unbeschwerten Kindheitsjahre des SNF, bevor der Ernst des Lebens beginnt und man sich mit den von allen Seiten gestellten Ansprüchen herumschlagen muss.

«Die Wissenschaft soll frei bleiben und nicht eine Dienerin des Staates werden!»

Bundesrat Philipp Etter, 1952

In den siebziger Jahren spürte der Nationalfonds das erste Mal Gegenwind. Die Beiträge hatten inzwischen rund hundert Millionen Franken erreicht, doch es war nicht eine überschrittene Budgetgrenze, die den SNF in den Fokus der Politik rücken liess; es war vielmehr eine logische Folge des Erfolgs. Die Grundlagenforschung war zu nützlich geworden, ihre strategische wie wirtschaftliche Bedeutung zu offensichtlich, als dass sich die Politik weiterhin um sie hätte foutieren können. Nun wollten die Parlamentarier ihr Wörtchen mitreden. Es war eine für den Nationalfonds schwierige, doch für die Schweizer Forschungslandschaft entscheidende und fruchtbare Zeit: Nun entfaltete sich überhaupt erst eine Wissenschaftspolitik.

Diese turbulenten und von der Wirtschaftskrise geprägten Jahre führten für den SNF zu einschneidenden Änderungen: Erstens musste er sich vom «Reinheitsgebot» der autonom verwalteten Grundlagenforschung verabschieden. 1975 wurden die Nationalen Forschungsprogramme (NFP) eingeführt, deren Inhalte von der Politik bestimmt werden und die Lösungen für gesellschaftlich akute Problemfelder



Von Forschenden, für Forschende:

Der Forschungsrat der Abteilung Geistes- und Sozialwissenschaften des SNF entscheidet über Gesuche (8. Mai 2012).

liefern sollen. Zweitens mündete die Wissenschaftspolitik 1984 in ein vom Volk akzeptiertes Bundesgesetz über die Forschung, das den Auftrag an den Nationalfonds festschreibt, die Forschung und den wissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Der SNF ging gestärkt aus den Diskussionen um Sinn und Zweck der Forschungsförderung hervor: Ab 1985 stiegen die Beiträge steil an, bis auf deutlich über 300 Millionen 1993.

Neue Nützlichkeitsbegehren

In den 1990er Jahren bekam es der SNF neuerlich mit «Nützlichkeitsbegehren» zu tun; das New Public Management stellte die Förderpolitik des Bundes unter das Primat des Effizienzgedankens. Ein neues Fördermittel, mit dem die Politik auch auf die Struktur des Forschungsplatzes einwirken konnte, wurde eingeführt: die Schwerpunktprogramme, die heutigen Nationalen Forschungsschwerpunkte (NFS). Heidi Diggelmann, von 1997 bis 2004 Forschungsratspräsidentin, sieht rückblickend in diesen neuerlichen Querelen um den Einfluss der Politik auf die Forschungsinhalte einen Reifungsprozess, und zwar auf beiden Seiten: «Der gegenseitige Respekt hat zugenommen, sowohl auf Seiten der Politiker wie der Forschenden.» Das SNF-Budget stieg nochmals an, aber nicht nur das: Es sieht ganz so aus, als hätte man in den vergangenen sechzig Jahren auch gelernt, konstruktiv über den Nutzen primär «unnützer» Forschung zu streiten.

Und es wird weiter gestritten werden. Für 2013 bis 2016 stehen dem SNF insgesamt 3,65 Milliarden Franken zur Verfügung, was einem Zuwachs von jährlich 3,7 Prozent entspricht. Die «Nachfrage» von Seiten der Forschenden dagegen stieg in den letzten Jahren um durchschnittlich 13 Prozent. Der SNF, der jährlich über 8000 Forschende unterstützt, braucht mehr Geld für die Forschungsförderung. ■

Palmöl aus dem Regenwald

Der Ökologe Lian Pin Koh untersucht auf Borneo, wie sich der Anbau von Ölpalmen auf die Umwelt auswirkt. Mit Drohnen hält er die Veränderungen des Regenwalds aus der Luft fest.

« Die Palmölindustrie auf der Insel Borneo setzt den Regenwald unter Druck. Täglich wird Wald abgeholzt, damit Platz für neue Ölpalmen-Plantagen entsteht. Dabei gehen Lebensräume für Tiere und Pflanzen verloren. Seit mehreren Jahren untersuche ich, wie sich die Landnutzung im indonesischen Teil von Borneo ändert und wie sie die Artenvielfalt beeinflusst.

Es ist nicht einfach, aktuelle Landnutzungskarten herzustellen. Meist geschieht dies aufgrund von Satellitenbildern. Doch in den Tropen kann man Satellitendaten nicht immer auswerten, weil über den Regenwäldern oft eine hartnäckige Wolkendecke hängt, die den Blick auf den Boden versperrt. Deshalb habe ich ferngesteuerte Flugzeuge mit Kameras entwickelt. Gemeinsam mit Naturschutzbiologen nutze ich diese Drohnen zudem für Wildtierzählungen, etwa um in schlecht zugänglichen Gebieten die Zahl der Orang-Utans zu bestimmen. Meine Drohnen haben den Vorteil, dass sie kostengünstig aus Standardteilen gebaut sind. Sie sind daher bestens geeignet für die Arbeit in Entwicklungsländern.

Obschon mir daran gelegen ist, ursprüngliche Lebensräume zu schützen, verteuere ich den Anbau von Ölpalmen nicht. In Indonesien und Malaysia ist er ein wichtiger Wirtschaftszweig und Devisenbringer. Das Palmöl kommt weltweit als Bratfett und in der Nahrungsmittelindustrie zum Einsatz, etwa in Backwaren, Margarine und Süßwaren. Es ist das meistverwendete Pflanzenöl überhaupt. Indonesien und Malaysia produzieren gemeinsam 90 Prozent des Weltbedarfs.

Indonesien will die Palmölproduktion weiter steigern und bis ins Jahr 2020 verdoppeln. Das Land davon abhalten zu wollen ist illusorisch. Aber es ist möglich, die geplante Expansion so zu gestalten, dass der Einfluss auf die Umwelt möglichst gering ist. Dies ist der Fokus meiner



Forschungsarbeit. Wir entwickeln nicht nur Drohnen, sondern auch Computermodelle.

Für das Beispiel des Ölpalmanbaus in Indonesien haben wir verschiedene Szenarien und ihre wirtschaftlichen und ökologischen Folgen durchgerechnet. Am meisten Gewinn bringt es, fruchtbare Regenwälder für neue Plantagen zu roden. Eine Alternative dazu ist, die Palmen auf bereits vor längerer Zeit gerodeten Landwirtschaftsflächen anzubauen. Sie konkurriert allerdings die Lebensmittelproduktion. Eine dritte Möglichkeit ist schliesslich, Ölpalmen auf nicht mehr fruchtbarem, ungenutztem Ackerland zu pflanzen. Dafür ist ein höherer Düngereinsatz nötig, was die Wirtschaftlichkeit schmälert. Doch der Druck auf die Regenwälder ist bei dieser Variante am geringsten, und die



Nahrungsmittelsicherheit bleibt ausser Gefahr. Man muss ein Gleichgewicht von Wirtschaftlichkeit und Ökologie finden. Ich anerkenne beide Aspekte. Sie zu vereinen war schon immer mein Ziel. Ich komme aus Singapur, dem am stärksten entwickelten Land Südasiens, und konnte dort die Vorzüge der industriellen Entwicklung geniessen. Doch ich bin mir auch der ökologischen Kehrseite dieser Entwicklung bewusst.

Nach einem Aufenthalt in den Vereinigten Staaten bin ich vor vier Jahren an die ETH Zürich gekommen. Heute bin ich dort als SNF-Förderprofessor angestellt. Diese Stelle bietet mir eine grosse Freiheit. In vielen anderen Ländern hätte ich es mit meiner fächerübergreifenden Forschung wohl schwierig, da die Forschungsfinanzierung dort häufiger als

in der Schweiz an traditionelle Disziplinen geknüpft ist. Der Nachteil meiner Stelle ist, dass sie auf vier bis maximal sechs Jahre befristet ist. Der Weg zu einer Vollprofessur ist nicht vorgespurt. Ich werde mich also nach Ablauf dieser Zeit irgendwo auf der Welt auf einen offenen Lehrstuhl bewerben müssen. Ich finde es gut, dass die Schweiz junge Talente aus dem Ausland fördert. Doch sie tut zu wenig, um sie zu behalten.

Was die geografische Lage der Schweiz betrifft, so ist sie für meine Arbeit ideal, da sie zwischen den USA, wo ich immer noch Kontakte habe, und Asien liegt, wo der Schwerpunkt meiner Feldforschung ist. Bald wird möglicherweise noch Feldforschung in Afrika dazukommen. Ich möchte auch dort meine Drohnen für Wildtierzählungen einsetzen. Heute zählen dort Naturschutzbiologen Tiere, indem sie in bemannten Flugzeugen über die Savanne fliegen, was teuer ist. Mit den Drohnen könnte man das billiger machen. ■

Aufgezeichnet von Fabio Bergamin

Der Preis des Sonntagsbratens:

Mit seiner Drohne (oben im Test über dem Greifensee) kann Lian Pin Koh zeigen, wo der Regenwald für Palmölplantagen gerodet wird (links) und was die Folgen für die Wildtiere sind.

Bilder: Lian Pin Koh





Forschung im Kuhstall

Kühe sind zu leistungsfähigen Milchlieferrantinnen herangezüchtet geworden. Das überfordert oft ihren Stoffwechsel, besonders nach der Geburt eines Kalbes.

Von Ori Schipper

Negative Energiebilanz: Mit schlechter Aura hat das für einmal nichts zu tun. Denn der Fachbegriff aus der Ernährungslehre beschreibt den Sachverhalt, dass ein Organismus manchmal mehr Energie verbraucht, als er mit der Nahrung einnehmen kann. «Viele Frauen hoffen, beim Stillen die in der Schwangerschaft angereicherten Kilos loszuwerden. Kühe dagegen müssen ihren Stoffwechsel umstellen, um nicht abzunehmen. Die ersten Wochen nach der Geburt eines Kalbes sind deshalb für den Stoffwechsel der Kühe sehr belastend», sagt Rupert Bruckmaier.

Seine veterinärphysiologische Forschungsgruppe gehört zwar der Universität Bern an, betreibt aber eine Versuchsstation in Posieux im Kanton Freiburg. Die eidgenössische Forschungsanstalt für Nutztiere liegt ziemlich abgelegen: Um einen Parkplatz mitten im Grünen sind die Tierställe, ein Gästehaus und ein grosses Laborgebäude verteilt. In den mit modernen Analysegeräten eingerichteten Laboratorien untersucht die Forschungsgruppe den Energiehaushalt von Milchkühen.

Wenn nach dem Kalben die Milch einschiess, führt dies bei den Kühen zu einer Unterzuckerung

des Blutes und zu einer fundamentalen Umstellung des Stoffwechsels. Weil der in der Nahrung enthaltene Zucker kaum ins Blut gelangt, sondern von den Bakterien im Vormagen und im Magen der Kühe zersetzt wird, muss die Leber den grössten Teil des Blutzuckers neu herstellen. Dieser ist deshalb oft Mangelware – umso mehr, als der Bedarf in den letzten Jahrzehnten ständig gestiegen sei, weil die Züchtung auf eine immer höhere Milchleistung zielt, erklärt Bruckmaier.

Ein Todesfall

Seiner Forschungsgruppe steht ein Versuchsstall zur Verfügung, der ungefähr dreissig Kühen Platz bietet. «Das sind paradiesische Verhältnisse, um die weltweit viele Kollegen beneiden», sagt Bruckmaier. Im Moment steht der Stall jedoch leer. Das letzte Experiment ihrer Versuchsreihe haben die Forschenden abgebrochen, nachdem eine Kuh verstorben war. Bis Klarheit über die Todesursache herrscht, nehmen die Forschenden den Versuch nicht wieder auf. «So ein Verlust geht uns nahe», sagt Bruckmaier. «Wir forschen hier seit vielen Jahren und hatten noch nie einen Todesfall.»

Für die Versuche verabreichten die Veterinärphysiologen sechs Kühen jeweils zwei Tage lang Insulin. Eine Kontrollgruppe von weiteren sechs Kühen erhielt nur eine Salzlösung. Das Insulin senkt den Blutzuckerspiegel. Die Forschenden versetzten dadurch den Stoffwechsel der Kühe in den Zustand, in dem er sich ungefähr zwei bis drei Wochen nach dem Kalben befindet. Das ist nicht einfach, denn die Menge Insulin, die durch einen dünnen Plastikschlauch in die Halsvene träufelt, muss kontinuierlich an den Blutzuckerspiegel angepasst werden. Um diesen (und viele andere Werte) zu messen, entnehmen die Forschenden den Kühen alle fünf Minuten eine Blutprobe, rund um die Uhr. «Mehrere Doktoranden wechseln sich ab», sagt Bruckmaier. Damit sie mit den Proben nicht vom Kuhstall zu den Laborräumen der Versuchsstation auf der gegenüberliegenden Seite des Parkplatzes hasten müssen, hat die Forschungsgruppe ein Analysegerät in einer Kammer im Stall installiert. Auch eine Pritsche steht dort. Für die Ruhepause, wenn endlich die Ablösung an der Reihe ist.

Dass die Milchleistung der Kühe mit tiefem Blutzuckerspiegel in den zwei Behandlungstagen absinkt, überrascht nicht. «Wenn die Kuh weniger Zucker im Blut hat, kann sie weniger Milchzucker bilden», sagt Bruckmaier. Schwieriger zu interpretieren sind die molekularbiologischen Messwerte, welche die Forschenden beim Testen des Immunsystems der Kühe erhoben haben. Dieses spielt kurz nach der Geburt des Kalbes eine wichtige Rolle, weil sich dann oft Bakterien in den Euterzitzen der Kühe einnisten. Dadurch entzündet sich die Milchdrüse. Die Forschenden täuschten eine solche Infektion der Milchdrüse vor, indem sie Zellwandbestandteile von Bakterien in das Eutergewebe spritzten. Die darauf-



folgende Entzündungsreaktion führte zu einer vorübergehenden Insulinresistenz: Wenn sich die Körperzellen nicht mehr dazu bewegen lassen, den Zucker im Blut aufzunehmen, schießt der Blutzuckerspiegel wieder hoch. Damit schantzt sich das Immunsystem mehr Energie zu für seinen Abwehrkampf gegen die Erreger, vermuten die Forschenden.

Was sie in ihrem Projekt entdeckten, könnten die Landwirte nicht unmittelbar nutzen, es gehe um Grundlagenforschung, sagt Bruckmaier. Die Resultate sollten jedoch längerfristig dazu beitragen, den Stoffwechsel der Kühe zu stabilisieren und die Funktion des Immunsystems gezielt zu beeinflussen. So könne der Einsatz von Medikamenten hoffentlich reduziert werden. Zu diesem Ziel führten verschiedene Wege, sagt Bruckmaier. Erstens liessen sich vielleicht bessere Fütterungsstrategien entwickeln, auch wenn der komplizierte Verdauungstrakt der wiederkäuenden Kühe einfache Lösungen verhindere.

Zweitens könnte die Züchtung vermehrt auf einen anpassungsfähigen Stoffwechsel und ein gut funktionierendes Immunsystem achten. «Mit den heutigen Hochleistungskühen ziehen wir Menschen Profit aus dem Umstand, dass die Kühe in ihrer Evolution schon immer höchste Priorität auf das Überleben ihres Nachwuchses und damit die Milchproduktion gesetzt haben», sagt Bruckmaier. Den Kühen ist zu wünschen, dass sie dies in Zukunft wieder tun können, ohne ihre Gesundheit aufs Spiel zu setzen. ■

Im Dienst der Artgenossen – und des Menschen: Die Kuh links hält still für die Entnahme einer Blutprobe, die Kuh oben für die Ultraschallmessung.

Bilder: Hans-Christian Wepfer/Lab25

Tierversuche der anderen Art

Wer mit Kühen forschen möchte, muss wie bei Versuchen mit Mäusen beim kantonalen Veterinäramt ein Bewilligungsgesuch einreichen. Weitere Ähnlichkeiten sind jedoch kaum auszumachen. Um zu seinen Versuchskühen zu kommen, kauft Rupert Bruckmaier Bauern gesunde Kühe der Rasse Holstein oder Swiss Fleckvieh ab, die zur Schlachtung vorgesehen sind. Anstatt ihr Leben für unsere gedeckten Tische zu lassen, dienen sie der Forschung: Die Kühe kommen nach Posieux in den Versuchsstall, wo sie sich zwei Wochen lang an ihre neue Umgebung gewöhnen, bevor sie als Versuchskaninchen dienen. Nur weil Schlachttiere deutlich preiswerter sind als wertvolle Zuchttiere, kann sich die Forschergruppe Milchkühe als Versuchstiere leisten. **ori**



Gefährliche Furchtlosigkeit

Die HIV-Kohortenstudie ist als Reaktion auf Aids entstanden. Heute hat die Krankheit dank Medikamenten ihren Schrecken verloren. Gerade deshalb nimmt die Zahl der Neuinfektionen zu. *Von Vivianne Otto*

Die Angst war gross. Im Verhältnis zu ihrer Bevölkerung verzeichnete die Schweiz in den 1980er Jahren die meisten HIV-Infizierten in ganz Europa. Die Spitäler konnten den Andrang von Patienten, die an der damals noch unbekanntem Krankheit litten, kaum bewältigen. Die Ärzte waren ratlos, was sollten sie tun? Sie starteten die schweizerische HIV-Kohortenstudie, um mehr über das HI-Virus und seine Ausbreitung zu erfahren. Seit 1988 sammeln Infektiologen aller fünf Schweizer Universitätsspitäler sowie

Elend am Zürcher Lettensteg: Das Ausleihen der Spritzen unter den Drogenkonsumenten förderte die Ausbreitung von Aids (1993). Bild: Keystone

der Kantonsspitäler St. Gallen und Tessin Informationen über ihre HIV-Patienten sowie deren Blutproben. Entstanden ist ein weltweit einzigartiger Wissensfundus zu HIV.

Anfänglich waren die meisten HIV-Infizierten Drogenkonsumenten. Das Virus breitete sich dank regem Spritzenaustausch in der offenen Drogenszene auf dem Zürcher Platzspitz – dem berühmten und weltberühmten «Needle Park» – rasch aus. Die zweitgrösste Gruppe der Infizierten waren homosexuelle Männer, dicht gefolgt von Heterosexuellen. Von der Ansteckung bis zum Ausbruch von Aids dauerte es durchschnittlich neun Jahre. Im Schnitt erlagen die Erkrankten innerhalb von zwei Jahren ihrem Leiden.

Sextourismus und Migration

Dies änderte sich 1996, als neue Medikamente verfügbar wurden. In Kombination mit den älteren Wirkstoffen dezimierten diese die HI-Viren so sehr, dass sie im Blut nicht mehr nachweisbar waren. Behandelte Patienten waren kaum mehr ansteckend, ihre Lebenserwartung glich sich der der Allgemeinbevölkerung an. Auch die Prävention mit Kondomen und sauberen Spritzen trug Früchte. Die Zahl der HIV-Neuansteckungen sank deutlich und pendelte sich bei 700 bis 800 pro Jahr ein. Es schien, als hätte man das Virus im Griff.

Doch seit 2000 nimmt die Zahl der Neuinfektionen wieder zu. «Die Leute gehen wieder grössere Risiken ein», sagt Huldrych Günthard, Leiter der Schweizerischen HIV-Kohortenstudie. «Sie brauchen seltener Kondome und sind weniger bereit, sich HIV-Tests zu unterziehen. Deshalb sind auch andere sexuell übertragbare Krankheiten wie Syphilis und Hepatitis C auf dem Vormarsch.»

Aufgrund der Gensequenzen, die sich in den Blutproben bestimmen lassen, wissen die Ärzte um Günthard, wie sich die HI-Viren ausbreiten konnten. Die Infektionen der Drogenkranken gehen auf nur wenige infizierte Individuen zurück, welche die anderen ansteckten. Bei den Homosexuellen sind mehr unterschiedliche Virenfamilien in Umlauf. Und bei den Heterosexuellen treten öfter HI-Viren auf, die aus Südostasien oder Afrika stammen – ein Hinweis, dass auch Sextourismus und Migration zur Schweizer HIV-Epidemie beitragen.

Auch die Wirksamkeit und die Nebenwirkungen der Therapie bei unterdessen älteren Patienten, die diese Medikamente schon seit Jahren einnehmen, werden heute erforscht. Die HIV-Kohortenstudie dient somit drei Zwecken: dem medizinischen, die Therapie stetig zu verbessern, dem wissenschaftlichen, HIV und Aids zu erforschen, und einem gesellschaftlichen. «Wenn wir die Kontrolle über HIV verlieren, stehen wir bald wieder vor einer ebenso bedrohlichen Situation wie in den 1980er Jahren», warnt Günthard. ■

Trainieren gegen Autismus

Im Film «Rain Man» spielt Dustin Hoffman eine Person, der – wie allen Autisten – der soziale Instinkt fehlt. Während die Symptome des Autismus bekannt sind, geben die dafür verantwortlichen Mechanismen im Gehirn Rätsel auf. Nouchine Hadjikhani, SNF-Förderungsprofessorin an der ETH Lausanne, versucht sie zu lösen. Ihre Gruppe legte autistischen Versuchspersonen und einer Kontrollgruppe (je rund 20 Personen) Bilder von Gesichtern vor, die Gefühle ausdrücken. Die Forschenden nahmen die Hirnaktivitäten mit einem Computertomografen auf und zeigten, dass Hirnregionen mit Spiegelneuronen, die zum Erkennen von Absichten und Gefühlen anderer wichtig sind, bei Autisten nicht spontan aktiviert werden. Zudem wiesen sie nach, dass die Anomalien der weissen Substanz des Gehirns, die in anderen Studien bei autistischen Kindern bereits vor der Geburt festgestellt wurden, mit dem Alter abnehmen. Autismus entsteht also nicht durch eine «schlechte» Mutter-Kind-Beziehung, sondern ist eine entwicklungsneurologische Krankheit. Die geeignete Behandlung besteht demnach aus kognitiven Übungen und dem Erlernen von Verhaltensmustern. Gemäss Nouchine Hadjikhani sollten diese Übungen individuell so angepasst werden, dass Hirnregionen trainiert werden, die für die Imitation und das Verständnis von Gefühlen wichtig sind.

Anne Burkhardt ■



Christof Sonderegger

Unterschätzte Kommunikationsfähigkeit: Ziegen gleichen ihre Rufe untereinander an (Sertigtal, 2007).

Sozial meckern

Nach den Walen und den Fledermäusen ist es nun an den Ziegen, die Geheimnisse ihrer Sprache preiszugeben. Im Rahmen eines Postdoktorats an der Queen Mary (University of London) konnte Elodie Briefer zeigen, dass ein Zicklein seinen Akzent der Gruppe anpasst, in der es aufwächst. «Ziegengeschwister geben ähnlichere Laute von sich als Halbschwestern und -brüder, was eine genetische Komponente des Ziegenrufs belegt», sagt die Forscherin. Halbgeschwister jedoch, die in verschiedenen Gruppen aufwachsen, passen ihre Laute den Tieren an, mit denen sie zusammen sind. Junge Ziegen können also ihr Meckern dem sozialen Umfeld anpassen. Die Laute von 23 Zicklein wurden je nach einer Woche und nach fünf Lebenswochen aufgezeichnet. In der

Natur bleiben die Jungen in den ersten Tagen nach der Geburt vor Tieren versteckt, die ihnen gefährlich werden könnten. In dieser Zeit geben sie Kontaktschreie von sich, um ihre Mutter zu rufen. Mit fünf Wochen stossen sie zu Gruppen, die aus mehreren Zicklein bestehen. Ihre Rufe dienen nun der Bindung innerhalb der Gruppe. «Im Lauf der Zeit gleichen sich die Rufe immer mehr an», sagt Elodie Briefer. Bei Ziegen spielt die Verständigung eine wichtige Rolle, da die Tiere in einer komplexen Struktur leben: Sie verbringen den Tag in kleinen Gruppen und kommen am Abend wieder zusammen. Die Anpassungsfähigkeit ihrer Stimme ist ein Evolutionsschritt hin zu feineren sprachlichen Fertigkeiten, wie sie die Menschen besitzen.

Mirelle Pittet ■

Frank Heinzelmann/prismaonline.ch



Schau mir ins Auge, Kleiner: Unter dem Einfluss von Ecstasy nimmt man das Wohlwollen des Gegenübers besser wahr.

Wohlfühlpille Ecstasy

Wer unter dem Einfluss von Ecstasy steht, nimmt die positiven Gefühle der Mitmenschen um ihn herum besser, die negativen aber schlechter wahr. Im Licht dieser Resultate der Forschungsgruppe um Matthias Liechti vom Universitätsspital Basel ist die rasante Verbreitung der Partydroge in der Rave- und Technoszene gut nachvollziehbar. Die Forschenden verabreichten 48 freiwilligen Probandinnen und Probanden Pillen, die entweder MDMA – die chemische Bezeichnung für Ecstasy – oder Milchzucker, also ein Placebo, enthielten. Anderthalb Stunden später schauten die Versuchsteilnehmer auf einen Bildschirm, von dem ihnen nacheinander 36 verschiedene Augenpartien entgegenblickten. Die zusammengekniffenen oder weit aufgerissenen Augen hatten sie dahingehend zu deuten, was der Person zum Zeitpunkt der Fotoaufnahme

durch den Kopf gegangen war. Die neutralen Mienen konnten beide Gruppen gleich gut einordnen, während die Personen unter Ecstasyeinfluss etwa das Wohlwollen in den Augen besser, aber die Wut schlechter erkannten als ihre nüchternen Kollegen. Ähnliche Beobachtungen machten andere Wissenschaftler bei Versuchen, in denen sie den Teilnehmenden Oxytocin in die Nase sprühten, das Hormon, das beispielsweise die Mutter-Kind-Beziehung chemisch kittet, wenn es von der Mutter beim Stillen freigesetzt wird. Auch das Team um Liechti konnte einen Anstieg des «Kuschelhormons» im Blut der Personen messen, die versuchsshalber Ecstasy konsumiert hatten. Der Schluss, dass die neu entdeckten Wirkungen von Ecstasy durch Oxytocin verursacht werden, liegt nahe.

ori ■

Mit der Zunge gegen böse Feinde

Eretria in Griechenland ist ein Zentrum der schweizerischen Archäologie. Ihre Grabungen legen die mehrere tausend Jahre alte Geschichte der Stadt frei. *Von Elisa Hübel*

Stein an Stein reihen sich die Grundmauern antiker Gebäude. Wie mit dem Lineal gezogen zieht sich eine freie Schneise durch diese Steinquader. Vor etwa 2400 Jahren befand sich hier eine Strasse. In einer Toreinfahrt kann man sogar eine Steinplatte erkennen, auf der sich die Räder von Pferdekarren mit Rillen verewigt haben. Heute grenzt dieser Ort an das etwa 3000 Einwohner zählende Provinzstädtchen Eretria auf der Insel Euböa. Es liegt etwa 45 Kilometer Luftlinie von Athen entfernt.

Ausgegraben worden ist dieses Areal von der Schweizerischen Archäologischen Schule in Griechenland (Esag). Robert Arndt ist ihr wissenschaftlicher Sekretär. «Eretria ist unsere Vorzeigegrabung», sagt der gebürtige Berliner, der in Luzern aufgewachsen ist. Er steht vor Steinfunden, sein blondes Haar ist kurz geschnitten, er trägt ein lässiges dunkelblaues T-Shirt mit der Aufschrift der Esag. Mit der Hand weist er nach Westen, wo in antiken Zeiten die Stadtmauer stand. Dann zeigt er auf einen kleinen Hügel gen Norden, wo weitere Überreste des einst imposanten Walls das Landschaftsbild prägen. Der 33-jährige Archäologe, der bereits in Jemen, Kambodscha, Tunesien und auf Kreta gegraben hat, erklärt: «Die vier Kilometer lange Mauer begann am westlichen Teil des Stadthafens, lief über den Hügel weiter und endete östlich des Hafens.» Somit besetzte die antike Stadt ungefähr das Territorium, über das sich auch das heutige Eretria erstreckt.

Das luxuriöse Mosaikenhaus

Ein paar Minuten entfernt liegt eine weitere Ausgrabungsstätte. Hier haben die Schweizer Archäologinnen und Archäologen ihren vielleicht bedeutendsten Fund gemacht: das Mosaikenhaus. «Es handelt sich um das luxuriöseste Haus der Stadt, wenn auch nicht um das grösste», meint Arndt, der von 1998 bis 2004 in Bern klassische Archäologie studiert hat. Seinen Namen erhielt das 670 Quadratmeter grosse Gebäude, weil es mehrere kunstvolle Bodenmosaiken aufweist,



für die Meereskiesel verwendet wurden. Abbildungen von Fabelwesen und Pflanzen dominieren. Das Bildnis eines Gorgonenkopfs mit ausgestreckter Zunge soll vor Feinden schützen. Die Mosaiksteine schimmern in ihren Naturfarben weiss, schwarz, rot und gelb.

Direkt neben dem Mosaikenhaus liegt die aktuellste Ausgrabung: römische Thermen. Karl Reber, Professor für klassische Archäologie an der Universität Lausanne und seit 2007 Direktor der Esag, erklärt, dass diese Thermen vor zwei Jahren entdeckt wurden: «Daraus ergeben sich neue Erkenntnisse über das Weiterleben Eretrias in römischer Zeit.» Mit Nachdruck weist er darauf hin, dass die Esag ein gesamtschweizerisches Projekt sei, an dem sich alle Schweizer Universitäten beteiligten. In der Schweiz, so Reber, «arbeitet ein Team von festen Mitarbeitern an der Planung, Realisierung und Dokumentation unserer Forschungsarbeiten». Die Esag, fügt er stolz hinzu, sei das einzige archäologische Institut



Vergangenes in die Gegenwart holen:

Archäologen legen in Eretria eine römische Bäderanlage frei (2010). Rechts eine Preisamphora aus dem Museum, um 360 v. Chr.

Bild: unil.ch/esag, Archäologisches Museum, Eretria

graben. Die Esag legt diese Periode meist auf die Semesterferien der Schweizer Universitäten im Sommer. Dann kommen etwa 15 Studenten, die in Ausgrabungstechnik ausgebildet werden.

Ins Nationalmuseum von Athen

Zwischen den schweizerischen Universitäten und der Esag gibt es in Griechenland noch weitere Kooperationsprojekte, unter anderen auf der Insel Naxos und in der Argolis auf der Peloponnes. In zwei Jahren, wenn die Esag ihr 50-Jahre-Jubiläum feiert, soll ein weiteres Projekt in Angriff genommen werden: ein archäologischer Park, der die bei Eretria verstreut liegenden archäologischen Stätten miteinander verbindet.

Begonnen hat die Geschichte der Esag 1964. Nachdem Amerikaner, die in Eretria seit 1890 aktiv waren, das antike Theater ausgegraben hatten, übernahm die Schweizerische Archäologische Mission die Arbeit. Im Jahre 1975 entstand daraus die Esag. «Seither hat sich kein anderes ausländisches archäologisches Team an den Ausgrabungen von Eretria beteiligt», sagt Arndt. Er verweist darauf, dass die Esag zahlreiche wichtige Publikationen herausgegeben habe, inzwischen über zwanzig Bände, auch in diesem Jahr seien zwei Buchproduktionen vorgesehen.

Die Finanzierung wurde in den ersten 18 Jahren ausschliesslich vom Schweizerischen Nationalfonds (SNF) bestritten. Seit 1982 wird die Esag von der Universität Lausanne geleitet. Seither steuert der SNF jährlich einen festen Betrag bei. 1983 wurde die Stiftung der Schweizerischen Archäologischen Schule ins Leben gerufen, die bis heute die Finanzierung unterstützt. Auch private Stiftungen und Spender, die Universität Lausanne, in Griechenland ansässige Schweizer Firmen und seit einigen Jahren auch der Bund – nur um einige der Geldgeber zu erwähnen – investieren in die wissenschaftliche Arbeit im antiken Eretria. Ein grosser Erfolg war für die Esag, als sie 2010 als erste der insgesamt 17 in Griechenland ansässigen ausländischen Archäologischen Schulen ihre Funde im Archäologischen Nationalmuseum von Athen ausstellen durfte.

Die Rückreise von Eretria führt viele Besucher auf die Fähre. Möwen flattern über den Köpfen der Passagiere, ein kleiner Junge streckt die Hände nach den weissen Meeresvögeln aus. Weil er sie nicht berühren kann, zeigt er ihnen seine Zunge, wie der Gorgone im Mosaikenhaus. ■



der Schweiz mit festem Sitz im Ausland. Bewundern kann der interessierte Besucher die Funde im Museum von Eretria, das Kenner als eines der schönsten griechischen archäologischen Provinzmuseen bezeichnen. Hier ist es kühl, die Augen empfinden den Wechsel von der gleissenden Sonne in das Licht des Raumes als angenehm. Ausgestellt sind Statuen, Grabbeigaben, Urnen, Speerspitzen, Gefässe, Webgewichte, Öllampen und Münzen. «Natürlich sieht man hier nur einen kleinen Teil der Funde. Etwa 90 Prozent der Objekte liegen im Magazin», sagt Arndt.

Hier forschen die Schweizer fast das ganze Jahr über direkt an den Fundobjekten: «Auch Doktoranden von Schweizer Universitäten erhalten während der Wintermonate die Gelegenheit, die Funde aufzuarbeiten», sagt Arndt. Die Grabungszeit im Sommer sei leider sehr knapp bemessen. Archäologische Schulen aus dem Ausland dürfen laut den griechischen Gesetzen lediglich eineinhalb Monate im Jahr



Zeitlose Stirnlocke

Comics sind nicht simpel. Als komplexe Kunstwerke unterhalten sie einen Teil des Publikums – und verschaffen einem andern Teil mittels feiner Anspielungen zusätzlichen Genuss. *Von Rea Brändle*

Seit 1938 ist Superman, als ältester der klassischen Superhelden, Monat für Monat in Action. Er müsste – da seine Abenteuer konsequent in der Jetztzeit spielen – längst in Rente sein. Dies gilt auch für den nur wenig jüngeren Kollegen Sandman, der noch immer in menschlichen Träumen unterwegs ist; eine zeitlose Figur, auch wenn ihm ab und zu von neuen Zeichnern ein verändertes Outfit verpasst wurde, mal mehr Muskeln, mal ein kühnerer Haarschnitt, wie es dem Zeitgeschmack entsprach.

Dennoch behalten die Helden unverwechselbare Merkmale. Bei Superman ist es die Stirnlocke, bei

Sandman lustigerweise die Stimme: Wenn er spricht, geschieht dies immer in weisser Schrift auf schwarzem Grund. Solche Phänomene der Wiedererkennung untersuchen die Amerikanisten Stephanie Hoppeler und Lukas Etter in seriellen Comics aus den Jahren 1980 bis 2010. Ihre Dissertationen entstehen an der Universität Bern.

Auf Spielformen der Kontinuität konzentriert sich Stephanie Hoppeler. Dass Superhelden unabhängig von ihren Schöpfern zum Einsatz kommen, überrascht angesichts der Produktionsverhältnisse nicht; so besitzt der Verlag DC Universe die Rechte an sämtlichen im eigenen Imperium lancierten Figuren. Er verfügt somit über unzählige parallel laufende Serien und zudem über die Möglichkeit, einzelne Helden für eine gewisse Zeit als Gastfiguren in anderen Serien auftreten zu lassen. Dies ist nicht ganz einfach, denn in Superheldengeschichten darf es, um die Fans nicht vor den Kopf zu stossen, nie zu eklatanten Unstimmigkeiten zwischen Titel- und Gastrolle kommen. Also müssen einzelne Leute im Verlag stets die Übersicht behalten.

Spiel mit ästhetischen Mustern

Das brachte Stephanie Hoppeler auf die Frage, die auch für andere Populärmedien relevant ist: Wie erreicht man, dass Neueinsteiger jederzeit in eine Serie einsteigen können, ohne dass dies für die treue Fangemeinde langweilig wird? Ihr Ergebnis: Comics weisen die Komplexität von Kunstwerken auf, die einen Teil des Publikums schlicht unterhalten und einem andern Teil mittels feiner Anspielungen zusätzlichen Genuss verschaffen.

Lukas Etter beschäftigt sich mit ästhetischen Fragen anhand alternativer Comics der jüngsten Vergangenheit. Sein Corpus umfasst nur wenige Werke und zugleich eine grosse thematische und formale Vielfalt. Gemeinsam ist ihnen, dass sie je von der gleichen Person getextet und gezeichnet und zuerst ausserhalb des Mainstream-Marktes veröffentlicht wurden. Berühmtestes Beispiel ist das autobiografisch erzählte «Maus» von Art Spiegelman, dem Sohn eines Auschwitz-Überlebenden.

Auch Jason Lutes befasst sich mit Deutschland, genauer, mit dem Berlin der Weimarer Republik. Einen anderen Zugang zur Geschichte hat Chris Ware. Er spielt unter anderem mit ästhetischen Mustern der 1890er Jahre in «Jimmy Corrigan – The Smartest Kid on Earth», einer liebevoll gemachten Antihelden-Geschichte, wovon Teile ursprünglich im «New Yorker» erschienen sind. Für Szenenblätter schliesslich entstand «Dykes to Watch Out For» von Alison Bechdel, was ihr die Freiheit liess, formal zu experimentieren. Lukas Etter hat bei all diesen Comics, die eine unterschiedliche Aufmachung haben, auf der formalen Ebene «Aspekte der Serialität» gefunden. ■

Ausserhalb des Mainstreams: Aus Jason Lutes' «Berlin» (2008). Illustration: © Jason Lutes/ Image courtesy of Drawn & Quarterly



Heftige Definitionskämpfe: Anders als die Versicherer verstehen die Hausärzte unter Qualität die Lebenswelt ihrer Patienten. (Ohrenspülung im Entlebuch, 2006.)

Qualität als Floskel?

Wenn heute von der Hausarztmedizin die Rede ist, dann meist im Zusammenhang mit zu erhöhender «Effizienz» und zu berücksichtigender «Evidenz», mit notwendiger «Kostenminimierung», «patientenzentrierter Behandlung» und so weiter. Der Kernbegriff, um den diese Ausdrücke geradezu inflationär kreisen, ist die zu verbessernde oder zumindest zu sichernde «Qualität» der Medizin. Die Medizinanthropologin Andrea Abraham von der Universität Bern kommt zum Schluss, dass die verschiedenen Akteure des Gesundheitswesens – die Hausärzte, ihre Vereinigungen, die FMH, die Gesundheitspolitiker, die Krankenversicherungen – den Qualitätsbegriff hemmungslos benutzen, darunter aber etwas je anderes verstehen. Andrea Abraham betrachtet Qualität deshalb als Teil einer «rhetorischen Strategie», die zur Legitimation eigener Interessen und Positionierungen dient. Wenn etwa die Versicherer von guter Qualität redeten, meinten sie die tiefen Kosten, während die Hausärzte zusätzlich die Lebenswelt der Patienten im Blick hätten. Der Qualitätsdiskurs ist bereits anfangs des 20. Jahrhunderts in der US-amerikanischen und der japanischen Industrie entstanden, von dort unter neoliberalen Vorzeichen nach England und den Niederlanden gewandert und schliesslich in der Schweiz angelangt. Man stecke viel Zeit, Geld und Erwartungen in Qualitätsprogramme, wie etwa die aktuelle Qualitätsstrategie des Bundes im Gesundheitswesen zeige, obschon der reale Nutzen nur schwer zu definieren sei, sagt Andrea Abraham. **uha** ■

Moldawien will seine Forschenden zurück

Aus der osteuropäischen Republik Moldawien wandern massenhaft kluge Köpfe ab. Heute arbeiten in der ehemaligen Sowjetrepublik noch 5500 Menschen in der Bildung und der Forschung, vier Mal weniger als 1990. Die moldawische Regierung hat den Ernst der Lage erkannt und versucht, Gegensteuer zu geben. In dem vom SNF, von der Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit und der moldawischen Akademie für Wissenschaften unterstützten Scopes-Projekt arbeiten auch Forschende der ETH Lausanne mit. Sie untersuchen, ob die hoch qualifizierten Auswanderinnen und Auswanderer dazu beitragen können, der moldawischen Forschung wieder auf die Beine zu helfen. Das Team um Jean-Claude Bolay und Gabriela Tejada machte rund 200 moldawische Emigranten ausfindig und befragte sie. Die

Resultate zeigen, dass die meisten noch immer regelmässigen Kontakt mit der Heimat pflegen. Über 40 Prozent schicken Verwandten Geld, damit diese finanziell über die Runden kommen. Viele der ausgewanderten Forschenden haben auch schon mit Kollegen in Moldawien gemeinsame Projekte durchgeführt oder an Tagungen in der Heimat teilgenommen. Vielen fehlt aber schlicht die Zeit, um mehr für die Entwicklung der Wissenschaft in ihrem Heimatland zu tun. Und viele sind der Ansicht, dass die Regierung mehr für die Forschung unternehmen sollte. Eine Mehrheit würde gerne wieder nach Moldawien zurückkehren – angesichts der prekären finanziellen Lage und der schlechten Infrastruktur im Land glauben allerdings die wenigsten an akzeptable Berufsaussichten. **Simon Koechlin** ■



Keine Rückkehr: Viele moldawische Forschende wandern aus, würden aber gern in ihre Heimat zurückkehren (Staatliche Universität Comrat, 2007).

Dominantes Deutsch in der Bundesverwaltung

Die Schweiz kennt die drei Amtssprachen Deutsch, Französisch und Italienisch sowie die Teilmamtssprache Rätoromanisch. Die Mehrsprachigkeit schlägt sich auch in der Rechtsordnung nieder. So müssen die einzelnen Sprachfassungen der Erlasse des Bundes und der vier mehrsprachigen Kantone rechtlich gleichwertig und verständlich sein – keine einfache Aufgabe, wenn man sich nur schon die Eigenheiten der verschiedenen Sprachen und die mit ihnen verbundenen kulturellen Differenzen vergegenwärtigt. Die Aufgabe wird denn auch nur zum Teil zufriedenstellend gelöst, wie eine im Nationalen Forschungsprogramm «Sprachenvielfalt und Sprachkompetenz in der Schweiz» (NFP 56) erstellte

rechtswissenschaftliche Studie besagt, die nun als – selbstredend mehrsprachige – Publikation vorliegt. Das Deutsche nehme häufig eine allzu dominante Stellung ein, besonders wenn die für die Erarbeitung eines neuen Gesetzes zuständige Kommission nur einsprachig arbeite. Die Autoren empfehlen den zuständigen Stellen dringend, die Rückmeldungen der Übersetzer besser zu berücksichtigen und generell das Italienische und das Rätoromanische zu stärken. **uha** ■

Rainer J. Schweizer, Marco Borghi (Hg.): Mehrsprachige Gesetzgebung in der Schweiz – Législation plurilingue en Suisse – Legislazione plurilingue in Svizzera – La legislaziun plurilingua en Svizra. Dike-Verlag, Zürich, St. Gallen 2011. 519 S.

Mut zur Prognose

Bern ist auf der Landkarte der internationalen Klimaforschung eine wichtige Adresse. An der Abteilung für Umweltphysik der Universität rekonstruieren Thomas Stocker und sein Team aus uraltem Eis Klimaprozesse. *Von Felix Würsten*

Wir halten im Moment den Weltrekord», sagt der Berner Umweltphysiker Thomas Stocker stolz. 800 000 Jahre alt ist das Eis aus der Antarktis, das er mit seinem Team in den Labors der Abteilung für Klima- und Umweltphysik der Universität Bern analysiert hat. In aufwändiger Arbeit gelang es den Klimaforschern, die Konzentration der Treibhausgase CO₂ und Methan im Eis zu messen und damit einen wichtigen Datensatz für die Klimaforschung zu gewinnen. Die Messwerte zeigen, wie sich der Gehalt der Treibhausgase in der Atmosphäre im Laufe der Zeit veränderte. Und dies wiederum erlaubt wichtige Rückschlüsse, etwa wie sich Kohlenstoffkreislauf und Klima gegenseitig beeinflussen.

Zurzeit ist Thomas Stocker mit seiner Gruppe daran, die Daten aus einem zweiten Eisbohrkern aus der Antarktis auszuwerten. Dieser reicht zwar «nur» 230 000 Jahre zurück; doch da er näher am Atlantik entnommen wurde, liefert er besonders wichtige Daten. «Der Atlantik spielt im globalen Klima eine Schlüsselrolle, denn er prägt die weltweiten Meeresströme», sagt der Umweltphysiker. Die Messdaten bestätigen, dass es im Atlantik tatsächlich eine «Nord-Süd-Klimaschaukel» gibt. Rund 20 Mal habe diese Schaukel im Laufe der letzten Eiszeit hin und her geschwankt und damit immer wieder Klimaveränderungen ausgelöst. Die präzise Analyse von Umweltarchiven ist ein wichtiger Bereich von Thomas

Stocker's Abteilung. Sie setzt damit eine erfolgreiche Geschichte fort, spielen die Berner Klimaforscher doch in diesem Gebiet seit langem eine führende Rolle. Das Team, das inzwischen drei Professuren umfasst, entwickelte beispielsweise neue Techniken zur Extraktion von Treibhausgasen aus Eiskernen und erweiterte das Spektrum an chemischen Elementen und Isotopen, die untersucht werden können. Läuft alles nach Plan, werden die Berner Klimaforscher auch mit von der Partie sein, wenn in einigen Jahren mit einer Bohrkampagne 1,5 Millionen Jahre altes Eis in der Antarktis aufgespürt werden soll.

Zur Berner Crew stiess Stocker Anfang der neunziger Jahre allerdings aus einer anderen Richtung. Als Spezialist für Klimamodellierung versucht er, die vielschichtigen Wechselwirkungen des Systems Erde im Computer nachzubilden. Dazu setzt der Klimaphysiker in erster Linie Modelle mittlerer Komplexität ein. Diese können die physikalischen Vorgänge zwar nicht so präzise abbilden wie die grossen Modelle der spezialisierten Rechenzentren. Doch dafür kann man mit ihnen Vorgänge simulieren, die für die grossen Modelle zu aufwändig sind. «Man kann spielen damit», meint Thomas Stocker lachend. «Diesen Aspekt vermisste ich bei den grossen Modellen.» Allerdings müsse man sich beim Spielen stets auch die Grenzen vor Augen halten: «Meiner Meinung nach machen viele Forscher den Fehler, dass sie ihre Modelle überstrapazieren und damit fragwürdige Aussagen produzieren.»

Thomas Stocker ist begeisterter Klimaforscher. Dass er in seiner Abteilung zwei verschiedene Bereiche vereint, empfindet er als grossen Vorteil: «Bei uns arbeiten sowohl Kollegen, die Daten produzieren, als auch Leute, die mit ihren Modellen Hypothesen überprüfen oder Voraussagen machen.» Die enge Zusammenarbeit erleichtert nicht nur den Austausch, sondern fördert auch den gegenseitigen Respekt: Die Modellierer realisieren, wie anstrengend es ist, einen einzelnen Messpunkt zu gewinnen. Und umgekehrt sehen die experimentellen Forscher, dass auch das Modellieren ein anspruchsvolles Handwerk ist.

Offener Review

Was Stocker zurzeit am meisten auf Trab hält, sind jedoch weder Klimamodelle noch Eisbohrkerne, sondern der fünfte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Als Co-Vorsitzender der Arbeitsgruppe «Wissenschaftliche Grundlagen» koordiniert er nicht nur die Beiträge von über 200 Autoren, sondern hält er auch den Reviewprozess in geordneten Bahnen, an dem sich über 600 Experten beteiligen. Unter Stocker's Leitung wurde das Review möglichst weit geöffnet; auch kritische Journalisten



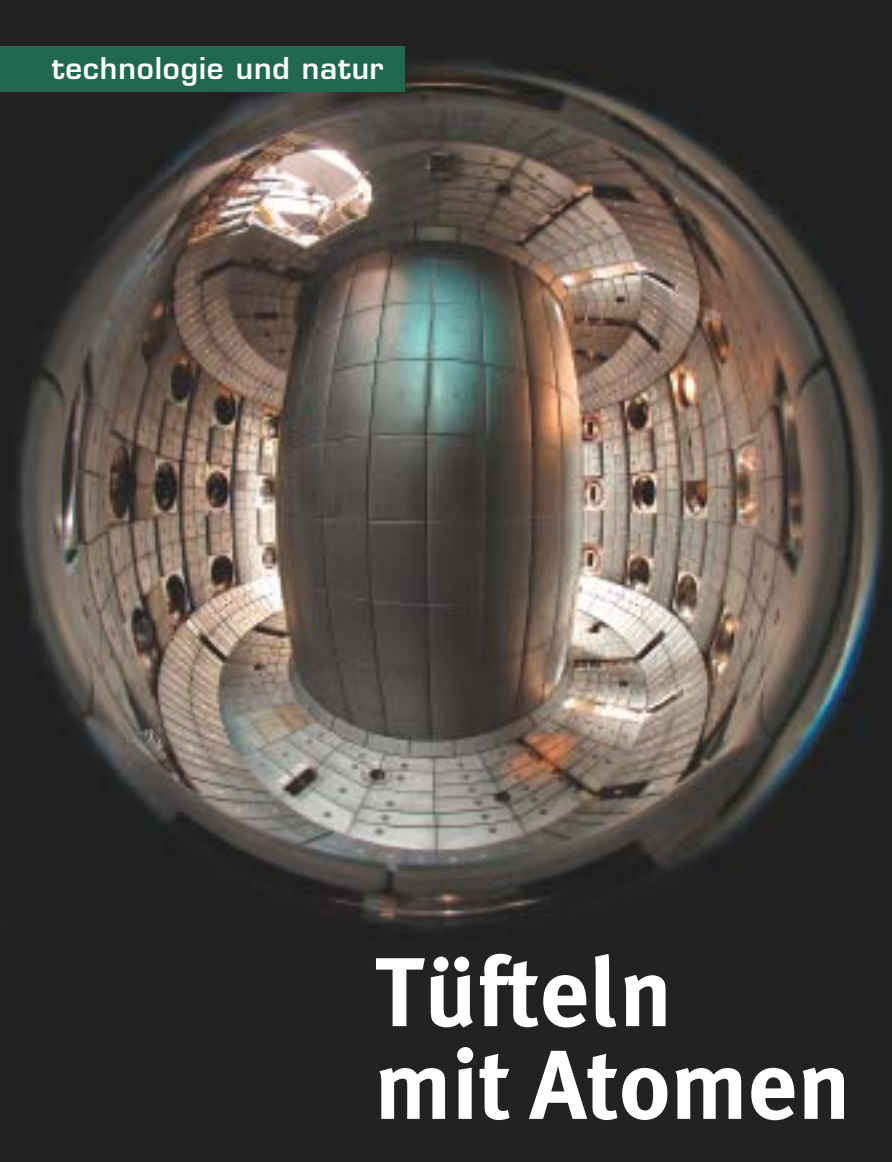
oder Blogschreiber können also ihre Stimmen einbringen. Amüsiert stellt Stocker fest, dass just die lautesten Kritiker des IPCC davor zurückschrecken, sich auf eine ernsthafte Debatte einzulassen. Die Tätigkeit als Vorsitzender der IPCC-Arbeitsgruppe ist zeitintensiv. «Ich kann das neben meiner wissenschaftlichen Arbeit nur bewältigen, weil ich in meiner Gruppe selbständige Mitarbeitende habe und mich ein tüchtiges achtköpfiges Team bei den IPCC-Aufgaben unterstützt.» Bis im Herbst 2013 sollen die Arbeiten am Hauptbericht abgeschlossen sein. Danach muss der Synthesebericht fertiggestellt werden.

Kleine Fortschritte

Der fünfte Sachstandsbericht werde keine fundamental neuen Erkenntnisse bringen, zieht Stocker ein erstes Fazit. «Aber wir werden zu vielen Einzelaspekten bessere Einschätzungen veröffentlichen, etwa zur Rolle der Wolken.» Ein wichtiges neues Element sind die kurzfristigen Voraussagen zum Klimawandel. Auch wenn es aufgrund der grossen Unsicherheiten schwierig sei, konkrete Aussagen über die nächsten zwanzig oder dreissig Jahre zu machen, müsse die Wissenschaft zeigen, was heute zu diesem Thema gesagt werden könne, ist Stocker überzeugt.

Der Berner Umweltphysiker spielt nicht nur im IPCC eine wichtige Rolle, sondern äussert sich auch regelmässig in der öffentlichen Debatte zu Wort. Dass er immer wieder die gleichen Argumente widerlegen müsse, sei zwar ermüdend, gehöre aber zu seinem Job. «Einzig auf beleidigende oder aggressive Anfragen reagiere ich nicht mehr.» Und er hat inzwischen auch gelernt, sich von den zäh erkämpften, aber nur kleinen Fortschritten der globalen Klimapolitik nicht mehr allzu sehr frustrieren zu lassen. «Wenn man die Vereinbarungen der letzten Klimakonferenzen im Detail studiert, sieht man durchaus Fortschritte», sagt Stocker. «Und hält man sich dann noch vor Augen, wie lang es in der Schweiz dauert, bis ein Gesetz verabschiedet ist, darf man sich nicht wundern, dass die Konsenssuche auf internationaler Ebene viel Zeit benötigt.» ■

Rohstoff für die Klimaforschung: Eisbohrkern in einer Station in der Ost-Antarktis (links). Oben: Thomas Stocker (Mitte) an einer Pressekonferenz des IPCC (Kopenhagen 2009). Bild: Franz Dejon/IISD (oben), Patrik Kaufmann/Uni Bern



Tüfteln mit Atomen

Das Forschungszentrum für Plasmaphysik der ETH Lausanne erforscht die Kernfusion. Diese könnte dereinst die Energieerzeugung revolutionieren.

Von Pierre-Yves Frei

D 1961 gründete der Schweizerische Nationalfonds das Forschungszentrum für Plasmaphysik (CRPP). Die Leitung des Zentrums war fest überzeugt: Die Kernfusion hat Zukunft. Fünfzig Jahre später leistet das CRPP einen wesentlichen Beitrag für Iter, ein internationales Projekt zum Bau eines thermonuklearen Reaktors im südfranzösischen Cadarache, das zeigen soll, dass eine Kernverschmelzung während mehrerer Minuten möglich ist.

Eine nicht weniger bedeutende Rolle wird das Schweizer Labor beim geplanten Nachfolgereaktor Demo spielen, der nachweisen soll, dass sich die Fusion wirtschaftlich nutzen lässt. «Unsere Arbeiten tragen zur Entwicklung, Modellierung und Umsetzung dieser Fusionsreaktoren bei», erklärt Minh-Quang Tran, Physikprofessor und seit 1999 Leiter des

CRPP. «Der Beitrag und der wissenschaftliche und technologische Input der Schweiz sind im Vergleich zur Grösse unseres Landes weit überproportional.» Was ist eigentlich Plasma? Das ist der energetische Zustand der Materie, wie er auf der Sonne vorliegt. Dieses Gas aus Deuterium und Tritium – das teilweise aus Lithium entsteht – wird auf die unvorstellbar hohe Temperatur von ungefähr 150 Millionen Grad Celsius gebracht, bei der die Atome ihre Elektronen verlieren. Wenn die Atomkerne dieser Schutzhülle beraubt sind, können sie sich so nahe kommen, dass sie unter gewaltiger Energiefreisetzung verschmelzen.

150 Millionen Grad Celsius

Hitze ist nicht die einzige Voraussetzung. Auch der Druck spielt eine entscheidende Rolle. Das Plasma wird deshalb mit einem ungeheuren Magnetfeld wie in einen Schraubstock gezwängt. «Unsere Physiker haben sich mit ihrem Wissen in der Modellierung der Plasma-Eigenschaften für eine erfolgreiche Fusion einen Namen gemacht», sagt Tran. «Ein Trumpf ist dabei unser Tokamak (TCV). Er erzeugt den Magnetfeldkäfig, der für die Kernverschmelzung erforderlich ist. Dank seiner variablen Geometrie lassen sich verschiedene Plasmaformen und deren Erhitzung untersuchen.»

Anfang Jahr hatte das CRPP erneut Anteil am Erfolg des Unternehmens Fusion. Für die Physiker sind Instabilitäten im Plasma störend, da diese nicht nur den Fusionsvorgang, sondern auch die Komponenten in der Nähe des hyperheissen Gases gefährden. Die Lausanner Forscher haben nun eine «Multifunktionsantenne» entwickelt, die elektromagnetische Wellen aussendet und damit sich anbahnende Instabilitäten «beruhigt». Zur Erzeugung dieser elektromagnetischen Strahlung war die Entwicklung ultraleistungsfähiger Quellen erforderlich.

Diese Erkenntnisse werden Iter zweifellos weiterbringen. Ebenso wie der Test der Supraleiter für Iter und Demo – eine Aufgabe, die dem CRPP vom europäischen Partner anvertraut wurde. «1978 unterzeichnete Bern das Assoziierungsabkommen mit Euratom», sagt Tran. «Die Mitwirkung an Jet gestern, Iter heute und Demo morgen verlieh der Fusionsforschung in der Schweiz entscheidende Impulse. Sie trägt dazu bei, dass der Menschheit vielleicht eines Tages eine erneuerbare, umweltfreundliche Energiequelle zur Verfügung steht.»

Vor dem ersten Fusionsexperiment mit Iter, das etwa für 2027 vorgesehen ist, steht noch viel Arbeit an. «Ich bin sicher, dass wir Fusionsreaktionen während etwa einer Stunde werden beobachten können und nicht nur während einiger Mikrosekunden wie zu Beginn meiner Laufbahn. Dies wird ein neues Zeitalter der Energiegewinnung einläuten», sagt Tran. ■

Wie ein Standbild aus einem Science-Fiction-Film: Der Tokamak (TCV) des Forschungszentrums für Plasmaphysik in Lausanne, von innen gesehen.
Bild: Alain Herzog/EPFL



Technisch unterstützte Koordination: Die Diskussion um die Zulässigkeit der Schwimmanzüge dürfte bald neuen Stoff erhalten (Tenero, 2009).

Schneller schwimmen mit Sensoren

In einem Schwimmwettkampf zählt jede Zehntelsekunde. Die Trainer dürfen bei der Vorbereitung der Athleten nichts dem Zufall überlassen. Ein Hightech-Sensor soll sie nun bei dieser Aufgabe unterstützen.

Das in den Schwimmanzug integrierte System «Physiolog@III» umfasst Beschleunigungsmesser und Gyroskope, deren Signale dem Trainer aufschlussreiche Informationen beispielsweise über die Geschwindigkeit und die Koordination der Bewegungen liefern. Die Forschenden des Laboratoriums für Bewegungsmessung und -analyse der ETH Lausanne und der Universität Lausanne, die das System entwickelten, mussten jedoch einige

Hürden bewältigen. «Im Wasser gibt es keine Stützphase. Modelle für die Fortbewegung auf dem Boden liessen sich deshalb nicht verwenden», sagt Kamiar Aminian, Direktor des Laboratoriums. «Ausserdem mussten die biomechanischen Besonderheiten beim Schwimmen berücksichtigt werden.» Das unter Mithilfe des Schwimmteams «Lausanne Natation» getestete System wird vor der Vermarktung weiterentwickelt. Es könnte sich nicht nur für das Schwimmtraining im Breiten- und Spitzensport als wertvoll erweisen, sondern auch im medizinischen Bereich bei der Rehabilitation im Wasser. **Elisabeth Gordon** ■

Quantenkryptografischer Wettkampf

Die Quantenkryptografie hat sich ihrer Unangreifbarkeit gerühmt – bis 2010 norwegischen Forschern das Undenkbare gelungen ist: zwei kommerziell angebotene Systeme auszuspielen, von denen eines vom Genfer Start-up IDQuantique vertrieben wird. Die Wissenschaftler nutzten eine Schwäche aus, um zusätzliche Informationen zu gewinnen und den geheimen Schlüssel zu knacken, wie ein Dieb, der einen Pin-Code aufgrund der Geräusche errät, welche die Finger auf der Tastatur des Bankomaten erzeugen. «Die Quantenkryptografie ist zu 100 Prozent sicher, aber nur theoretisch und mit idealen Geräten», erklärt Renato Renner von der ETH Zürich. «In der Praxis ist dies niemals der Fall. Die norwegischen Forscher haben die Tatsache genutzt, dass die verwendeten Fotondetektoren nicht perfekt sind. Indem sie diese mit einem Laser blendeten, gelang es ihnen, sich unbemerkt zwischen Sender und Empfänger des geheimen Schlüssels zu schleichen.»

Im Januar 2012 zeigte Renato Renner in «Nature Communications», dass ein kryptografisches System tatsächlich zuverlässig sein kann. «Es reicht, wenn die Detektoren ein bestimmtes Mass an Effizienz erreichen», sagt der Physiker. «Dann ist das System sicher, selbst wenn nicht alle anderen Einzelheiten der Geräte bekannt sind.» Einer der Autoren des Artikels, Nicolas Gisin von der Universität Genf, ist besonders daran interessiert, diese Detektoren zu verbessern: Er hat 2001 das Genfer Unternehmen gegründet. **Daniel Saraga** ■



Können Pflanzen hören? Ein Angehöriger der Maori führt Besucher durch den Waipoua-Wald, ein Musikinstrument spielend (Neuseeland, 2010).

Heilige Bäume als Klimazeugen

Der Kauri ist der grösste Baum Neuseelands. Manche Exemplare erreichen Durchmesser von fünf Metern oder mehr. Der Kauri spielt in der Mythologie der Maori eine wichtige Rolle. Die mitunter mehrere tausend Jahre alten Waldriesen werden als Gottheiten verehrt. Und sie erzählen auch für Klimaforscher äusserst interessante Geschichten. Der Kauri weist charakteristische Jahrringe auf und zeichnet damit die regionalen klimatischen Bedingungen exakt auf. Damit lassen sich Jahrringkalender rekonstruieren, die viele Jahrhunderte zurückreichen und klimatische Schwankungen detailliert aufzeigen. Ein internationales Forscherteam, an dem auch der Waldökologe Jan Wunder von der ETH Zürich beteiligt war, hat diese natürlichen Aufzeichnungen nun auf Zusammenhänge mit dem nur fragmentarisch

entschlüsselten El-Niño-Phänomen untersucht. Dieses Zirkulationssystem von Ozean und Atmosphäre im Pazifikraum – korrekt El Niño/Southern Oscillation (Enso) – sorgt für quasizyklische Veränderungen im Klima und kann verheerende Auswirkungen auf lokaler Ebene haben: Trockenheit mit Ernteeinbrüchen und Waldbränden, Wirbelstürme und Überschwemmungen. Man vermutet, dass die Klimaerwärmung die Enso-Aktivität verstärkt; nachweisen liess sich das bis anhin kaum. Die aus den Kauri-Stämmen gewonnenen Daten lassen nun tatsächlich darauf schliessen, dass das 20. Jahrhundert das Enso-aktivste der letzten 500 Jahre war. Zudem zeigen die Daten, dass mit einer noch stärkeren Enso-Aktivität gerechnet werden muss, wenn die Temperaturen weiter ansteigen. **Roland Fischer** ■



«Die Note reduziert die Transparenz»

eine Validität, unabhängig davon, wie gut es funktioniert. Auch ein schlechtes Peer-Review hat eine grosse soziale Kraft. Allerdings darf es nicht permanent schlecht sein, sonst würde die Wissenschaftlergemeinschaft aufbegehren.

Was ist ein schlechtes und was ein gutes Peer-Review?

Das kann ich nicht sagen. Das Verfahren hat sich seit dem Zweiten Weltkrieg stark formalisiert. Verbreitet ist heute das Modell, wonach es mindestens drei Gutachter aus dem engsten Fachbereich und einen Mehrheitsentscheid braucht. Vorher hat bei manchen Zeitschriften eine Fachgrösse allein über die Publikation eines Artikels entschieden.

Weshalb ist es zu dieser Formalisierung gekommen?

Der Staat steckt viel mehr Geld in Forschung und Wissenschaft als vor 1950. Damals existierte eine Art Sozialvertrag: Die öffentliche Hand sagte, wir geben der Wissenschaft Geld, lassen sie machen, da wir ohnehin nichts davon verstehen, und schauen, was sie an Positivem hervorbringt, das der Allgemeinheit dient. In den 1970er Jahren hat die Öffentlichkeit diesen Sozialvertrag aufgekündigt. Heute muss die Wissenschaft permanent belegen, was und warum sie etwas tut. Das hat zur Professionalisierung der Forschungsförderung und zur Formalisierung des Peer-Review geführt. Sie beschleunigt das Verfahren und erleichtert die Rechenschaftsablegung, weil Noten eine klare Sprache sprechen. Allerdings muss die Öffentlichkeit auch bereit sein, die steigenden Verwaltungskosten zu bezahlen. Ein Teil des Mittelzuwachses fliesst in die Kontrolle.

Bringt die Formalisierung des Peer-Review die Wissenschaften weiter?

Schwierig zu sagen. Das Peer-Review steckt in jeder Ritze des Wissenschaftssystems: Es entscheidet über Publikationen, die Forschungsförderung, die Besetzung

Das Peer-Review funktioniert nicht nach rein rationalen Kriterien – und garantiert damit den Betrieb des Wissenschaftssystems, sagt der Soziologe Martin Reinhart.

Von Urs Hafner, Bild Derek Li Wan Po

Herr Reinhart, das Peer-Review hat in der Wissenschaftswelt einen Fetisch-Status: Die von ihm gutgeheissene Forschung gilt allgemein als gut, die von ihm abgelehnte Forschung als schlecht. Beseitigt die Forschungsgemeinde mit diesem System Unsicherheiten über die schwierige und manchmal unmögliche Bewertung von Forschung?

Fetisch würde ich nicht sagen, auch wenn das Peer-Review in der Forschungsförderung eine fast unmögliche Aufgabe leistet,

nämlich dem Versprechen des Antragstellers zu glauben, in einem unbekanntem Gebiet etwas Neues herauszufinden. Das Verfahren gibt es schon seit über 350 Jahren und in allen Disziplinen und in allen Nationen. Diese Konstante ist erstaunlich für das sich permanent verändernde Feld der Wissenschaften, das sich durch die Entdeckung des Neuen auszeichnet. Das Verfahren verleiht den von ihm akzeptierten Objekten automatisch

von Stellen und so weiter. Man kann sich gar nicht vorstellen, wie das System ohne Review funktionieren könnte. Ein Problem der Formalisierung ist, dass ihr Gegenstand, die Wissenschaft, schwer formalisierbar ist, weil sie nach Neuem strebt.

Wissenschaft müsste idealerweise herrschaftsfrei funktionieren: Durchsetzen soll sich nicht, wer am meisten Macht besitzt, sondern wer das bessere Argument einbringt. Funktionierte das Peer-Review nach diesem Prinzip?

Zum Teil. Es kann nicht jeder Beliebige Mitglied eines Gremiums werden. Gewöhnlich sitzen dort Leute ein, die sich in ihrem Feld als zentrale Figuren haben etablieren können, die einen guten Ruf und eine grosse Publikationsliste haben, kurzum: die alten Herren. Das heisst aber nicht, dass diese keine rationalen Entscheide treffen.

Neigen diese dazu, Projekte abzulehnen, die der Ausrichtung ihrer Arbeit widersprechen, und so Innovation zu verhindern?

Empirisch belegt ist der Vorwurf des Konservatismus nicht, auch wenn tatsächlich eine Reihe von Nobelpreisträgern Schwierigkeiten hatte, durch die Peer-Review-Verfahren zu kommen, weil niemand das Neue ihrer Arbeit verstanden hat. Es ist verständlich, dass arrivierte Leute nicht einfach alles über Bord werfen, was sie als richtig erachten. Das Peer-Review sorgt für die Balance zwischen Altem und Neuem, die wohl nötig ist für die Stabilität des Systems.

Viele Geisteswissenschaftler reagieren skeptisch auf die Ausbreitung des Peer-Review in ihrem Gebiet.

Man ist schnell zur Hand mit der Aussage, dass Naturwissenschaftler aufgrund ihrer Arbeitsweise kein Problem damit hätten, dass ein Gutachter auf einem Formular

Noten von eins bis fünf verteile, den Durchschnitt berechne und eine Gesamtnote setze – diese Art von Objektivitätsproduktion entspreche ihrem Alltag. Und der Geisteswissenschaftler arbeite demgegenüber mit zusammenhängenden Texten, Argumenten und Ästhetik... Aber: Noch vor 15 Jahren basierten Begutachtungsverfahren in der Biologie und der Medizin nicht auf formalisierten Formulare, sondern auf frei verfassten Texten, zum Teil ist das noch heute der Fall.

Werden Texte der Komplexität eines Forschungsprojekts eher gerecht als ein Formular?

«Einige Nobelpreisträger hatten Schwierigkeiten, durch das Peer-Review zu kommen.»

Nicht unbedingt. In einer Note kann viel Wissen eines guten Gutachters stecken. Er reduziert damit die Komplexität. Aber sie reduziert die Nachvollziehbarkeit und Transparenz des Verfahrens.

Sie haben das Peer-Review des SNF im Bereich Biologie und Medizin untersucht und so Einblicke in möglicherweise brisante Dokumente erhalten. War es schwierig, eine Erlaubnis zu bekommen?

Überraschenderweise nicht. Wir haben es zuerst bei renommierten Journals versucht, sind dort aber nie weiter als in das Vorzimmer gekommen. Weil die Akten des SNF als Teil des Bundesarchivs gelten, sind sie – unter gewissen Bedingungen natürlich – zugänglich.

Vom SNF finanziert haben Sie das Peer-Review des SNF untersucht, und ich befrage Sie nun für das SNF-Forschungsmagazin über Ihre Resultate ... Gehe ich recht in der Annahme, dass Sie herausgefunden haben, dass beim SNF alles in Ordnung ist?

(Lacht.) Der SNF hat nicht die kleinste Beeinflussung unternommen, er hat nicht einmal ein besonderes Interesse an unseren Resultaten bekundet. Wir konnten in Ruhe arbeiten, das war optimal. Unsere Resultate zeigen, dass die Forschungsförderung des SNF im Bereich Medizin und Biologie weder einzelne Universitäten,

Peer-Review

Mit dem Peer-Review-Verfahren steuern die Wissenschaften sich selbst. Die Gutachter – allesamt Fachkolleginnen und Fachkollegen – begutachten anonym Forschungsgesuche und Papers und entscheiden über die Vergabe von Geldern und Publikationsraum.

Sprachregionen noch die Männer oder sonst eine Gruppe bevorzugt. Dieser Teil der Ergebnisse ist für den SNF positiv. Wir haben aber auch herausgefunden, was für jedes Peer-Review gilt: Es funktioniert nicht nach rein rationalen Kriterien, sondern leistet einen Ausgleich zwischen der Produktion gesicherten Wissens und den sozialen Notwendigkeiten des Wissenschaftssystems. Es dient also dessen Selbstregulation, der Verteilung von Macht, dem Eindämmen von Konflikten. Die Doppelfunktion rührt daher, dass es ein kollaboratives Verfahren ist, an dem mehrere Gutachter beteiligt sind.

Sechs Augen sehen mehr als zwei.

Das ist der Vorteil. Der Nachteil ist die Arbeitsteilung und die zeitliche Ausdehnung. Das heisst, dass nicht zwei oder drei Gutachter die ganze Arbeit prüfen, sondern die einzelnen Reviewer verschleierte Teile. Der eine Reviewer verlässt sich auf den anderen und umgekehrt – und so verlieren sie das Ganze aus dem Blick, was bei der Beurteilung eines Gesuchs zu blinden Flecken führt.

Das Peer-Review existiert sowohl in liberalen Demokratien als auch in autoritären Systemen. Kann es überall bestehen?

Noch Ende des 20. Jahrhundert dachte die Wissenschaftssoziologie, dass sich die moderne Wissenschaft, die unabhängig von konkreten Personen funktioniert, deren Wissen offen kommuniziert und von allen geprüft werden muss, nur in der modernen Demokratie entfalten kann. Aber diese Annahme ist unrealistisch. China hat ein sehr produktives Wissenschaftssystem. Das formalisierte Peer-Review scheint so flexibel zu sein, dass man es überall einsetzen und wohl auch zu anderen Zwecken als wissenschaftlichen benutzen kann. Das ist seine Stärke wie seine Schwäche. ■

Martin Reinhart

Der Soziologe Martin Reinhart arbeitet am Programm für Wissenschaftsforschung der Universität Basel. Auf Herbst 2012 tritt er eine Juniorprofessur an der Humboldt-Universität in Berlin an. Seine Dissertation «Soziologie und Epistemologie des Peer Review. Forschungsförderung im Schweizerischen Nationalfonds» erscheint dieser Tage im Nomos-Verlag.

Umgeben Sie Ihr Kind mit dem richtigen Spielzeug.

Damit Ihr Sprössling nicht Rapper, Model oder Publizistikstudent wird, sondern Chemiker, Physiker oder Ingenieur, sollten Sie schon früh eine wissenschaftliche Erziehung einleiten. Unsere Wissenschaftler-Puppen inspirieren ihr Kind. **WidmerPuppen™**



Die Grenzen der Forschungsfreiheit

Die Experimente, die zur Entwicklung gefährlicher Vogelgrippeviren führten, hätten nicht stattfinden dürfen. Sie zeugen von einer Verantwortungslosigkeit in der Forschung. Nun muss die Forschungsgemeinschaft reagieren, damit beim nächsten Mal rechtzeitig die Alarmglocken läuten.

Von Didier Trono

Zwei Labors, ein europäisches und ein US-amerikanisches, haben kürzlich neue Variationen des Vogelgrippevirus H5N1 entwickelt, die von Säugetieren übertragen werden. Die Entwicklung der möglicherweise pandemischen Erreger – der laut den Beteiligten «wahrscheinlich gefährlichsten Viren, die hergestellt werden können» – hat eine wichtige Diskussion ausgelöst. Einige Forschende weisen darauf hin, dass die wissenschaftliche Unabhängigkeit unantastbar sei und dass solche Versuche nützliche Erkenntnisse liefern könnten. Die Gegner bedauern, dass die Labors wenig Weitsicht gezeigt hätten und offenbar keine Mechanismen vorhanden sind, mit denen man solche Versuche verhindern könnte. Ich teile die Ansicht, dass diese Experimente nie hätten durchgeführt werden dürfen.

Zu ihrer Rechtfertigung wird aufgeführt, dass die vorgängige Kenntnis eines gefährlichen Mutanten seine Früherkennung erlaube, dass man dadurch Impfstoffe und bessere antivirale Mittel entwickeln könne und dass sich ein solcher Mutant früher oder später auch in der Natur entwickelt hätte. Alle diese Punkte sind widerlegbar. Erstens: Es gibt keine globale Strategie zur Überwachung von Grippeviren, nicht einmal für gängige Virenstämme. Zudem ist nicht davon auszugehen, dass hochansteckende H5N1-Mutanten dieselben Sequenzen aufweisen würden wie die im Labor entwickelten Viren. Zweitens: Der Schlüssel zu einem guten Impfstoff liegt in der Identifikation von massgeblichen Antigenen des Virus und nicht in der Kenntnis seiner Virulenzfaktoren. Drittens: Breit einsetzbare antivirale Mittel zielen auf zentrale Funktionen der Viren und nicht auf stamm-spezifische Eigenheiten.

Viertens: Seit mehr als fünfzehn Jahren hat sich der H5N1-Virus milliardenfach in Vögeln vermehrt. Millionenfach sind dabei alle lebensfähigen Kombinationen von Mutationen entstanden. Wieso ist nie ein Mutant mit den Eigenschaften des künstlich erzeugten Virus aufgetaucht? Die gleichzeitige Einführung verschiedener Mutationen mit gentechnischen Methoden ist etwas anderes als die schrittweise



Alain Herzog

Akkumulation von spontanen Mutationen, die in gewissen Kombinationen das Überleben des Virus verunmöglichen. Indem die Forschenden ein unnatürliches Umfeld schufen – nicht einmal in Aesops Fabeln sniffen Frettchen grössere Mengen von Hühnersekreten –, ermöglichten sie Entwicklungen, die unter normalen Umständen niemals stattfinden würden.

Die Befürworter führen zudem auf, dass die Ergebnisse und deren Verbreitung nicht zu einem erhöhten Risiko von Bioterrorismus beitragen, da die Virusstämme nur in hochspezialisierten Labors herangezüchtet werden könnten. Solche Labors sind aber nicht immer sicher, wie die Anthrax-Briefanschläge zeigten, die ein Angestellter eines führenden Forschungszentrums ausgeübt hatte. Zudem ist es in der Vergangenheit zu unbeabsichtigten Freisetzungen von Viren gekommen. Und wie gross wird das Risiko in zwanzig Jahren sein, wenn die molekulare Herstellung von Viren dank einfachen Laienbausätzen und Erbgut-Synthesefirmen trivial sein wird?

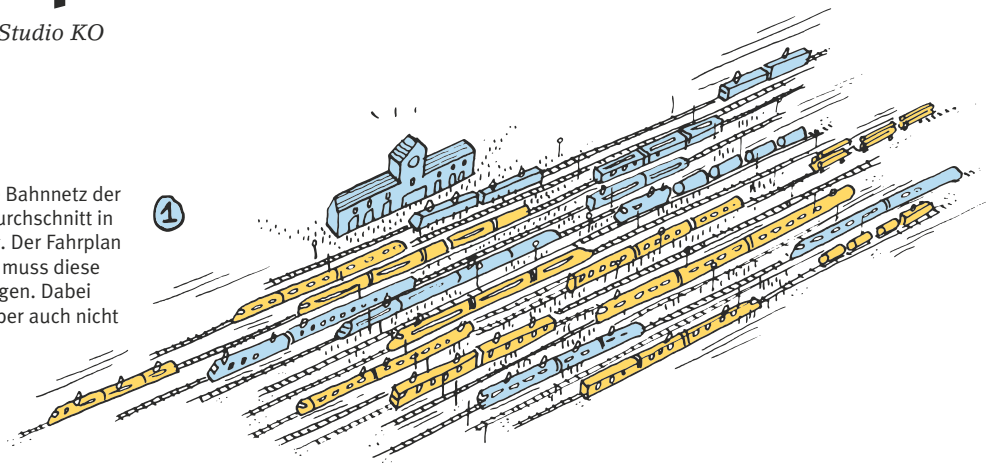
Auch wenn die neuen Virusstämme deutlich weniger tödlich sind als anfänglich angenommen, müssen nun die Forschungsgemeinschaft, die Förderorganisationen und die Aufsichtsbehörden weltweit entschlossen reagieren. Beim nächsten Vorhaben, das einen die Menschheit gefährdenden Krankheitserreger herstellen will, müssen die Alarmglocken läuten. Dass die Diskussion erst beginnt, nachdem die Beschreibungen der Erfolge zur Publikation eingereicht worden sind, zeugt von einer bedenklichen Unreife im Umgang mit dieser Art von Forschung. ■

Didier Trono ist Professor und Dekan der School of Life Sciences der ETH Lausanne. Er ist zudem Forschungsrat der Abteilung Biologie und Medizin des SNF. Er vertritt hier seine persönliche Meinung.

Das Fahren planen

Von Simon Koechlin, Illustrationen Studio KO

Die Schweiz hat das am meisten befahrene Bahnnetz der Welt. Zwischen Olten und Aarau fährt im Durchschnitt in beide Richtungen alle drei Minuten ein Zug. Der Fahrplan der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) muss diese Fahrten reibungslos aneinander vorbeibringen. Dabei dürfen an den Bahnhöfen nicht zu lange, aber auch nicht zu kurze Umsteigezeiten entstehen.



①

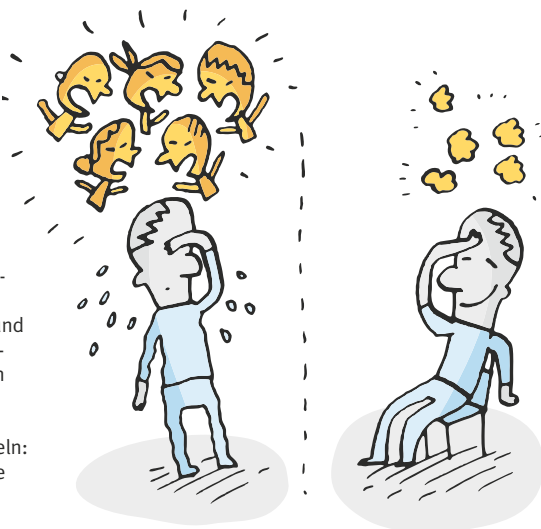
② Die Macher des Fahrplans müssen diverse Ansprüche befriedigen. Bund und Kantone stellen ihre politischen Anforderungen, die beteiligten Eisenbahnunternehmen aus dem Personen- und Güterverkehr äussern ihre wirtschaftlichen Interessen. Auch geplante Neubauten oder Unterhaltsarbeiten, die Streckensperrungen nötig machen, müssen berücksichtigt werden.



③

Erfahrene Planer bauen den Fahrplan auf. Priorität hat in der Regel der nationale Personenverkehr vor dem Transitgüterverkehr und dem Regionalverkehr. Der Planer nimmt Computersysteme zur Hilfe; es gibt keinen Supercomputer, der die Planung automatisch ausführt. Weil nie alle Bedürfnisse befriedigt werden können, suchen die Planer gemeinsam mit den Beteiligten nach Lösungen.

Der Planer muss während der Konstruktionsphase ein Auge darauf haben, ob der Fahrplan stabil sein wird. Für schwierige Fälle steht ihm ein Simulationsprogramm zur Verfügung. Die Simulationen sind aufwendig und benötigen viel Zeit. Eine Hauptprobe für einen neuen Fahrplan gibt es nicht. Deshalb sitzen die Fahrplaner am Tag des Fahrplanwechsels wie auf Nadeln: Erst jetzt zeigt sich, ob sich ihre Planung am Reissbrett in der Praxis bewährt.



④

20. Juni bis 5. August 2012

Jean Moeglé – Berner Fotopionier

Die in Zusammenarbeit mit der Burgerbibliothek Bern realisierte Ausstellung umfasst rund 120 Fotografien – zum grössten Teil Neuabzüge ab Glasplatten – des legendären Berner Porträtfotografen Jean Moeglé (1853–1938). Er fotografierte unter anderem in den Salons der Herrenhäuser am Thunersee und begleitete Touristen auf Bergwanderungen und Skitourern.

Kornhausforum Bernwww.kornhausforum.ch

Bis 31. Juli 2012

Kickstart – Coffein im Blut

Die Ausstellung thematisiert die Spannungen um die wachmachende Substanz Koffein. Sie zeigt, wie Kaffee und Tee in der westlichen Welt populär wurden, gibt einen Einblick in die Geschichte der Koffeinforschung und rückt aktuelle Phänomene wie Energy-Drink und Cellulitecreme in den Blick.

Pharmazie-Historisches Museum Baselwww.pharmaziemuseum.unibas.ch

Bis 31. Oktober 2012

Kleider in biblischer Zeit

Die Sprache der Textilien wurde auch im Altertum wahrgenommen und interpretiert. Die Ausstellung zeigt, welche Kleidertypen es in biblischer Zeit gab, aus welchen Materialien sie bestanden und welchem Zweck sie dienen.

Bibel + Orient Museum Freiburg i.Ue.www.bible-orient-museum.ch

Bis 19. August 2012

Beresina 1812

Die Geschichte von Napoleons Russlandfeldzug 1812 und seiner Schweizer Beteiligung: Rund 500 000 Soldaten mit 200 000 Pferden, dazu Ochsen, Kanonen und Karren, sind von Königsberg bis Moskau 1300 Kilometer durch dünn besiedeltes, kaum befahrbare Gebiet unterwegs, marschieren ebenso lange zurück – und werden aufgerieben.

Historisches Museum Luzernwww.historischesmuseum.lu.ch

Bis 2. September 2012

Krankenpflege in Deutschland

Die Ausstellung «Who cares?» thematisiert die Krankenpflege in Deutschland und zeigt deren lange und verzweigte Entwicklung: Von der Pflege des 19. Jahrhunderts, der Kriegsrankenpflege und der Krankenpflege in den beiden deutschen Staaten bis hin zum stationären Alltag heute.

Medizinhistorisches Museum der Universität Zürichwww.medizin-museum.uzh.ch

Teilchenphysik zum Aufklappen

Der Large Hadron Collider – kurz LHC – des Cern in Genf ist das bislang grösste wissenschaftliche Experiment. In diesem Beschleuniger mit 27 Kilometern Umfang werden zwei gegenläufige Protonenstrahlen beinahe mit Lichtgeschwindigkeit auf Kollisionskurs geschickt, wobei ähnliche Bedingungen entstehen, wie sie in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall geherrscht haben sollen. In «Voyage to the Heart of Matter» tauchen wir mit Anton Radevsky und Emma Sanders ab in die Tiefe des Experiments Atlas, eines 7000-Tonnen-Kolosses des LHC voller ausgeklügelter Technologie. Wo die Kollisionen stattfinden, befinden sich die Atlas-Detektoren. Sie sollen exotische Teilchen «fotografieren», die aus den energetischen Feuerwerken herausschiessen.

Mit dem ersten von vier umfassenden Bildern setzen die beiden Autoren das Experiment Atlas zuerst in den



Kontext des LHC. Im zweiten Bild begeben wir uns hundert Meter unter die Erdoberfläche in die Höhle des Löwen, der im dritten Bild seziiert wird, wobei die Detektoren, aus denen Atlas besteht, Schicht für Schicht freigelegt werden. Das vierte Bild befasst sich mit der Entwicklung des Universums – vom Urknall bis heute – und mit den Antworten, die uns Atlas geben könnte. Jedes Bild wird von kurzen, leicht verständlichen Texten zu den verschiedenen Facetten von Atlas begleitet: der Komplexität der Baustelle, der Verarbeitung der ungeheuren Datenmengen, die bei der Kollision der Teilchen anfallen, oder auch der Funktion und Bestimmung der verschiedenen Detektoren.

Die Texte erlauben eine spielerische Lektüre, die von den überraschenden Aufklappbildern begleitet wird. Die Bilder verleihen dem Werk einen Retro-Touch, den man mögen kann oder nicht. Dass die Autoren die Teilchenphysik auf einige Faltkonstruktionen reduzieren, hat aber den wunderbaren Vorteil, dass sie Normalsterblichen zugänglicher wird, vorzugsweise 17- bis 77-Jährigen. pm ■

Anton Radevsky, Emma Sanders: Voyage to the Heart of Matter: The Atlas Experiment at Cern. Papadakis Publishers, London 2010.

