

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Die neuen
Sintfluten
Überschwem-
mungen durch
Wasserdampf-
ströme

APRIL 2013

HÖHLENMALEREI
Das Kino der frühen
Menschen

PHYSIK
Was kommt
nach dem Higgs?

MEDIZIN
Alternde Zellen
verursachen Krebs

NEUE SERIE

Die größten Rätsel der Astronomie

TEIL I:
Kosmische Stürme,
Explosionen,
Teilchenströme

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



UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Ernährung: Gesund und lecker • Altern ist was für Mutige • Unsere Knochen und Muskeln – so bleiben sie in Form • Warum schlafen und träumen wir? • € 6,50



Neurofeedback: Live-Schaltung ins Gehirn • Implizite Tests: Das Unbewusste ergründen • Wie verlässlich sind psychologische Studien? • € 8,90 (EVT: 26.3.2013)



Besiedlung: Mit dem Boot in die neue Heimat • Amazonien: Versunkene Städte im Dschungel • Klima: Meeressedimente zeugen vom Ende einer Kultur • € 8,90 (EVT: 22.3.2013)



Higgs-Teilchen: Was findet der LHC als Nächstes? • Quantenphysik im Alltag: Schrödingers Katze auf dem Prüfstand • Quantengravitation: Auf dem Weg zu einer Theorie aller Naturkräfte • € 8,90

AUSGEWÄHLTE
SONDERHEFTE ALS
PDF ODER APP
ERHÄLTICH

www.spektrum.de/lesershop



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Der Himmel, groß, voll herrlicher Verhaltung,
ein Vorrat Raum, ein Übermaß von Welt.
Und wir, zu ferne für die Angestaltung,
zu nahe für die Abkehr hingestellt.

Rainer Maria Rilke (1875–1926)

Das große Ganze

An der Spitze der Lieblingsthemen unserer Leserinnen und Leser steht seit Jahr und Tag die Astronomie. Schon immer faszinierten die Geheimnisse des Himmels die Menschen, wie auch den Dichter Rainer Maria Rilke. Wir können uns quasi gar nicht von diesem kosmischen »Übermaß an Welt« abkehren, so lese ich die Zeilen seines Gedichts. Zum Glück fällt es uns Redakteuren leicht, auf diesem Forschungsgebiet regelmäßig Nahrung für Wissenshungrige zu liefern. Denn die international stark vernetzte Wissenschaft macht dank immer besserer Instrumente auf der Erde wie im All ständig neue – und oft überraschende – Beobachtungen. Weil sich die empirischen Befunde mitunter nicht ohne Weiteres erklären lassen, fordern die Messdaten regelmäßig die Theoretiker heraus. Neue Modelle müssen her und durch weitere Versuche überprüft werden. Dieses mustergültige Wechselspiel von experimenteller und theoretischer Forschung ist es, was auch mich persönlich an der Astrophysik fasziniert.

Beginnend mit diesem Heft stellen wir Ihnen ausgewählte Probleme der aktuellen Astronomie in einer neuen Serie vor. Konzipiert hat die sechsteilige Reihe mein Kollege Reinhard Breuer, selbst habilitierter Astrophysiker und ein langjähriger Beobachter der Szene. Die Autorinnen und Autoren, die er für »Spektrum« gewinnen konnte, gehören zu den internationalen Topexperten auf ihren Gebieten. Zum Start der Serie berichtet Gerhard Börner vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching ab S. 40 über die rätselhafte kosmische Strahlung: Welche verborgenen Prozesse in den Tiefen des Universums sind in der Lage, Partikel auf unvorstellbar hohe Energien von bis zu 10^{20} Elektronenvolt zu beschleunigen und durch das All zu schießen? Was sind die Quellen für derlei Extremphänomene – innerhalb und außerhalb der Galaxis? Mit gleich mehreren hochmodernen Messinstrumenten wie dem Pierre-Auger-Teleskop in Argentinien, dem H.E.S.S.-Observatorium in Namibia oder dem Fermi-Satelliten spüren Wissenschaftler diesen »Ultrateilchen« nach.

Auch auf die nachfolgenden »größten Rätsel der Astronomie« dürfen wir gespannt sein: Es geht um Schwarze Löcher, Galaxien- und Planetenentstehung, Exoplaneten, Sternentwicklung sowie Dunkle Energie und Dunkle Materie. Eine Übersicht über die Serie finden Sie im Kasten auf S. 40.

Viel Spaß bei der Lektüre wünscht Ihnen
Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Ur- und Frühgeschichtler und Filmemacher **Marc Azéma** von der Université de Toulouse untersucht, wie die prähistorischen Höhlenmaler in ihren Tierbildern Bewegungen darstellten. Er sieht darin sogar eine Vorahnung des Kinofilms (S. 66).



Der Nachweis des Higgs-Bosons ist ein Erfolg für die theoretische Physik, sagt **Dieter Lust**. Für ihn ist klar, dass auch die Stringtheorie Eigenschaften der Welt voraussagen kann (S. 54).



Der Hydrologe **Michael D. Dettinger** (links) und die Geowissenschaftlerin **B. Lynn Ingram** beschreiben ab S. 74, wie riesige Bänder aus Wasserdampf in der Atmosphäre zu katastrophalen Überflutungen führen können.

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Grönlands Gletscher erstaunlich stabil • Größe des Protons umstritten • Letzte Tage eines Sterns • Maulwürfe riechen stereo • Tuberkulosekeime im Knochenmark • Faser verfärbt sich unter Belastung

11 Bild des Monats

Scharfe Zähne

12 Forschung aktuell

Holzbein anno 300 v. Chr.
Die älteste Prothese

Gewaltiges Schwarzes Loch
Keine Laune der Natur?

Zeitpunkt der Geburt
Energiemangel entscheidet

DNA als Speichermedium
Daten für die Ewigkeit

Innere Uhr und Appetit
Fressen zur falschen Zeit macht Mäuse dick

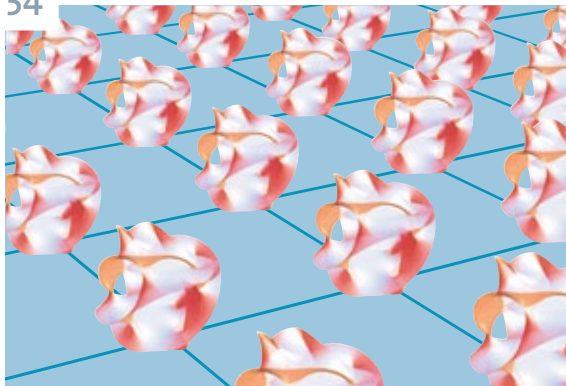
Strom erzeugende Viren
Piezoeffekt einmal anders

SPRINGER'S EINWÜRFE
Ein unnachahmlicher Wurm
Wie selbst primitive Gehirne Computer ausstechen

32



54



66



BIOLOGIE & MEDIZIN

24 Wege zum Minigehirn

William G. Eberhard, William T. Wcislo und Adelheid Stahnke
Viele nur millimetergroße Tiere zeigen ein überraschend komplexes, vielfältiges Verhalten. Die Leistungsfähigkeit ihrer winzigen Gehirne ist das Produkt einer langen evolutionären Optimierung.

▶ 32 Unheil durch nicht mehr teilungsfähige Zellen

David Stipp
Alternde Zellen hören auf sich zu teilen. Zudem scheiden sie Stoffe aus, die ihre Nachbarn schädigen und Entzündungsreaktionen auslösen. So fördern sie Alterskrankheiten und tragen zum Verfall des Organismus bei.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING

52 Das Geheimnis der Waschbrettspisten

H. Joachim Schlichting
Kaum eine Schotterpiste, die kein wellenförmiges Profil aufweist. Wie kommt es zu dem unerwünschten Effekt?

▶ 54 Vom Higgs-Teilchen zur Weltformel

Dieter Lüst
Noch fehlen den Stringtheoretikern experimentelle Erfolge. Doch der geglückte Nachweis des »Higgs« belegt eindrucksvoll, dass theoretische Berechnungen Eigenschaften der Natur vorhersagen können.

MENSCH & KULTUR

▶ 66 Höhlenkino in der Eiszeit

Marc Azéma
Schon Höhlenmaler versuchten, Bewegung in Bildern einzufangen. Vor über 30 000 Jahren nutzten sie Lichteffekte und Eigenheiten unseres Sehens, um wilde Tiere darzustellen: wie sie jagen, flüchten oder angreifen.



► TITELTHEMA

40 Heiße Stürme im Kosmos

Gerhard Börner

Das Universum ist kein gemütlicher Ort. Stürme toben, Sterne explodieren, Teilchen und Strahlen rasen mit sonst unerreichbaren Energien durchs All. Ihre Ursachen erforschen Astronomen mit den größten Teleskopen – auf der Erde und im Weltraum.

74



ERDE & UMWELT

► 74 Die nächste Sinflut

Michael D. Dettinger und B. Lynn Ingram

Gewaltige Ströme feuchter Luft ziehen über die Weltmeere und haben an Land in regelmäßigen Abständen große Flutkatastrophen ausgelöst. Der Klimawandel verstärkt solche »atmosphärischen Flüsse« und erhöht damit das Risiko weiträumiger Überschwemmungen.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

82 Moleküle aus dem mentalen Modellbaukasten

Roald Hoffmann

Sich ausgefallene neue Molekülstrukturen auszudenken ist ein Vergnügen an sich. Es bringt aber auch manchen Erkenntnisgewinn und Stoff für technische Innovationen.

88



TECHNIK & COMPUTER

88 Elektrischer Anschluss ans Nervensystem

D. Kacy Cullen und Douglas H. Smith

Ein neues Verfahren, Nervenimpulse in elektrische Signale umzusetzen, verspricht eine Revolution: Ein Mensch könnte damit eine Handprothese so präzise bewegen und so lebhaft spüren, als wäre es eine gesunde, natürliche Hand.

96 Rezensionen

E. Coen: Die Formel des Lebens • L. Frenz: Lonesome George • T. Sedláček: Die Ökonomie von Gut und Böse • M. Esfeld (Hg.): Philosophie der Physik • R. Béliveau, D. Gingras: Der Tod • H.K. Biesalski: Der verborgene Hunger • K. Lasn: No More Bull Shit • J. Echenoz: Blitze • H. U. Seitz: Sahara

105 Wissenschaft im Rückblick

Vom Eisenbeton zum Navigationssystem

106 Vorschau

Titelmotiv: NASA, JPL / Caltech / STScI / CXC / University of Arizona / ESA / AURA / JHU
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

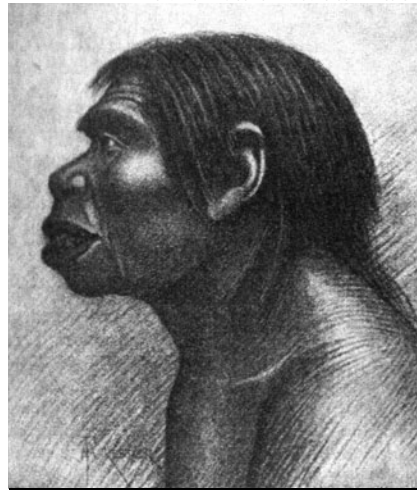
Der Fälscher des Piltown-Menschen

Den zitierten Text von 1913 ergänzte die Redaktion mit dem Hinweis, dass der Urheber des Betrugs noch unbekannt sei (»Der erste Engländer?«, Wissenschaft im Rückblick, März 2013, S. 97).

Elisabeth Kuster-Wendenburg, Gräberberg: Laut Jürgen G. Meyers Buch »Darwin, Mendel, Lamarck & Co« von Ende 2012 ist der Präparator Martin Hinton, der 1910 am Naturhistorischen Museum London als Lehrling in die Sektion Biologie aufgenommen wurde, der Schuldige. Er avancierte er zum Abteilungsleiter für Zoologie und wollte in die Paläontologie wechseln, was Sir Arthur Woodward aber verhindert hat.

Aus Rache hat Hinton den »Piltown«-Schädel aus verschiedenen Knochen zusammengesetzt, mit Chromsäure behandelt und schließlich mit Eisensalzen braun gefärbt und eines Nachts bei Mondschein in der Kiesgrube, wo Charles Dawson wiederholt nach fossilen Knochen gesucht hatte, vergraben. Dawson fand ihn später und legte ihn Sir Arthur vor, der die Fäl-

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFT- UND TECHNIKGESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS



Erfundener Vorfahr: der Sussex-Mensch

schung nicht erkannte. Vielmehr veröffentlichte er die Beschreibung des Schädels im »Quarterly Journal of the Geological Society« und erklärte ihn als »Bindeglied zwischen Affen und modernem Menschen« und somit England zur Wiege der Menschheit.

Anmerkung der Redaktion: Hinton gehört tatsächlich zu den Hauptverdächtigen, aber der Fall ist noch keineswegs eindeutig gelöst. Auch für Dawson finden sich Argumente, immerhin be-

deutete der Fund des Piltown-Menschen für ihn einen Karrieresprung. Eine Übersicht über den Stand der Ermittlungen finden Sie in Nature 492, S. 177–179, 13. 12. 2012 doi:10.1038/492177a.

Ausgeblendete Probleme

Zusammen mit Caroline Möhring erläuterte Christian Jung, Professor für Pflanzenzüchtung, wie schwierig es ist, Pflanzen per Gentransfer zu optimieren (»Pflanzen nach Maß«, Februar 2013, Spektrum extra, S. 10).

Edith Sachse, Burggrumbach: Die Ursachen und Auswirkungen von unbeabsichtigten Veränderungen in Transgenen sind wenig untersucht, aber es gibt sie! Bereits 1999 wurde nachgewiesen, dass Round-up-ready-Soja hitze- und stressempfindlicher ist, außerdem kleiner, verzweigter und mit einem niedrigerem Frischgewicht und Chlorophyllgehalt ausgestattet. Der Lignin- und der Hormonhaushalt der Pflanze verändern sich durch die Genmanipulation.

Die Autoren schreiben selbst vom »Zufallsprinzip«, nach dem bis vor Kur-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)

Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findekle (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

Editor-at-Large: Dr. rer. nat. habil. Reinhard Breuer

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann,

Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies,

Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistent: Erika Eschwei

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax: -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 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: Harald Floss,

Dr. Werner Gans, Dr. Claudia Hecker, Dr. Ingrid Horn, Dr. Sven Titz,

Kr. Ilse Tütter

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

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachfrage. 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. 34 vom 01. 01. 2013.

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung,

Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcombe, 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.



zem artfremde Gene in Pflanzengeno-
me integriert wurden, was unerhört ist,
wenn man weiß, dass gerade auch die
Abfolge der Gene und ihr Zusammen-
spiel wesentlichen Einfluss auf die Ei-
genschaften der Pflanze nehmen. Selbst
bei genauer Lokalisierung des Integra-
tionsorts bleiben unendlich viele Un-
wägbarkeiten: Sequenzänderungen, De-
letionen, Fragmentinsertionen und
Füll-DNA sind Veränderungen, die bei
Gentransfer häufig auftreten. Zudem
spielen die jeweiligen Umweltbedin-
gungen eine Rolle bei der Ausprägung
des Phänotyps der genveränderten
Pflanze. Das kann vor allem auf den
Sekundärstoffwechsel (Gifte, Harze, Ca-
rotinoide, Duftstoffe und andere) starke
Auswirkungen haben, die nicht sofort
als solche erkannt werden und erst viel
später zum Tragen kommen.

Zur eingebauten Schädlingsabwehr
mittels Bt-Genen in Mais wird folgen-
des verschwiegen: Das eingebaute Gift
wirkt leider auch auf so genannte
Nichtzielorganismen, wie verschiedene
Schmetterlinge, Motten und parasitäre
Insekten und kann sie beeinträchtigen
oder gar töten. Zudem ist das Gift in ho-
her Konzentration im Mais enthalten,
gelangt so ins Viehfutter und reichert
sich über Erntereste und Dung im Bo-
den an.

Auch Problemfelder der Agro-Gen-
technik wie Koexistenzfragen, Nicht-
rückholbarkeit und Bedrohung der Ar-
tenvielfalt werden im Artikel von Jung
und Möhring völlig außer Acht gelas-
sen. Es entsteht der Eindruck, die Gen-
technik bei Nutzpflanzen sei zwar mit
kleinen technischen Problemen behaf-
tet, aber dank »genauer Kenntnis der
Zielgene und ausgeklügelter Technik«
ein Segen für die Züchtung. Der Über-
gang zwischen biotechnologischen Me-
thoden in der konventionellen Züch-
tung und dem, was gemeinhin als Agro-
Gentechnik bezeichnet wird, nämlich
dem Einfügen artfremder Gene in das
Genom einer Nutzpflanze, wird irrefüh-
rend als fließend dargestellt.

Anmerkung der Redaktion: Das dem
genannten Artikel folgende Interview
mit Dr. Angelika Hilbeck von der ETH

Zürich geht auf mehrere der genannten
Kritikpunkte an der Pflanzengentechni-
k sowie noch einige weitere ein.

Längst überfällig

*Ed Yong nahm die Nachprüfbarkeit von
Studienergebnissen unter die Lupe
(»Jede Menge Murks«, Februar 2013,
S. 58).*

Till Schauen, Kirchheimbolanden: E-
iner der wichtigsten SdW-Artikel der
letzten Jahre! Die Falsifizierbarkeit ist
das einzige tragfähige Kriterium, das
wissenschaftliche Arbeit von Esoterik
und geschlossenen Weltbildern unter-
scheidet. Sie zu korrumpieren (gar zu
Gunsten publizistischer Gewohnhei-
ten) ist brandgefährlich. Ein System für
Wiederholbarkeit ist längst überfällig.

Ines Eue, per E-Mail: Wenn man über
Reproduzierbarkeit wissenschaftlicher
Daten spricht, ist es vielleicht weniger
ratsam, ein Fachgebiet wie die Psy-
chologie mit ihren semiquantitativen
Mess-, Auswerte- und Konklusionssys-
temen, die von diversen Unwägbarkei-
ten und Subjektivitäten beeinflussbar
sind, als Grundlage zu nehmen. Gen-
expressionsstudien, wie sie im Artikel
auch angeführt sind, halte ich für aus-
sagefähiger. Normalerweise sollte ja zu-
mindest eine In-vitro-Studie unter den
angegebenen Laborbedingungen über-
all die gleichen Daten liefern.

Inwiefern »kulturelle Eigenheiten«
in Fernost die Ursache für andere Er-
gebnisse als in westlichen Ländern sein
sollen, erschließt sich mir nicht. Dazu
kann ich nur meine Erfahrungen mit
chinesischen Kollegen aus meiner Post-
doc-Zeit in den USA beisteuern, wo es
(ohne ein großes Geheimnis daraus zu
machen) üblich war, aus einer Triplika-
te-Messreihe denjenigen Wert heraus-
zustreichen, der am weitesten von der
gewünschten These abwich. So viel zum
Thema »kulturelle Unterschiede«.

Unterstützen möchte ich dringend
die Idee eines internationalen Studien-
registers, bei dem jede Studie vor Be-
ginn registriert wird, mit dem Ziel, End-
punkt und Messparameter festzuhal-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

ten, und der Pflicht zur Publikation,
unabhängig davon, ob das Ergebnis po-
sitiv oder negativ ausfällt. Solange es
eine solche Objektivierbarkeit nicht
gibt, bleiben alle Publikationen be-
grenzt aussagefähig. Und in erster Linie
nicht dem Fortschritt oder dem Wohl
von Patienten dienend, sondern dem
eigenen Ego, der Karriere oder wissen-
schaftspolitischen Ränkespielchen.

Die Wissenschaftsgemeinde sollte
endlich ihrer Verantwortung für eine
belastbare und aussagefähige For-
schung nachkommen. Im Moment be-
obachte ich angesichts von Plagiats-
skandalen und Betrugsfällen in der
Wissenschaft einen grassierenden Mo-
ralverfall sowie eine Situation, in der
man sich nicht wundern muss, dass das
Ansehen von Medizinern und Natur-
wissenschaftlern inflationär verfällt.
Ändern können wir das nur selbst.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf
www.spektrum.de/leserbriefe

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

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

KLIMAFORSCHUNG

Grönlands Gletscher trotzten Warmzeit

Die Eispanzer Grönlands sind offenbar stabiler als bisher vermutet. Während der letzten großen Eisschmelze in der Eem-Warmzeit (zirka 130 000 bis 115 000 Jahre vor heute) steuerten sie nur zwei zu den acht Metern bei, um die der Meeresspiegel damals weltweit stieg. Und das, obwohl die Temperaturen auf

Grönland zu jener Zeit deutlich höher waren als heute. Dies legen Messungen eines internationalen Teams um Dorthe Dahl-Jensen von der Universität Kopenhagen nahe.

In einem zweieinhalb Kilometer langen Bohrkern identifizierten die Forscher uraltes Eis, das noch aus der Eem-Warmzeit stammt. Es enthält

ungewöhnlich viele Sauerstoffisotope vom Typ ^{18}O . Aus dessen Anteil lässt sich auf die damaligen Temperaturen an der Gletscheroberfläche rückschließen; sie lagen demnach um bis zu acht Grad Celsius höher als der Durchschnittswert der zurückliegenden 1000 Jahre. Untersuchungen von Luftblasen im Eis deuten darauf hin, dass der Eispanzer während des Eems etwa 400 Meter an Mächtigkeit verlor. Bisher war man von einem größeren Verlust ausgegangen.

Die Schichten aus dem Eem liegen etwa zwei Kilometer tief im grönländischen Eis. Sie sind durch Gletscherbewegungen stark gefaltet und schwer datierbar. Mit Hilfe von Georadar, Isotopenanalysen und chemischen Untersuchungen gelang den Wissenschaftlern nun erstmals eine lückenlose Altersbestimmung.

Nature 493, S. 489–494, 2013



Das Camp des Forschungsprojekts NEEM (North Greenland Eemian Ice Drilling Project) auf dem grönländischen Inlandeis. Hier wurde das Eis aus der Eem-Warmzeit geborgen. Die Aufnahme zeigt das Lager im Sommer 2009.

LARS MÖLLER, ALFRED WEGENER-INSTITUT

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Studien und Analysen lesen Sie jeden Donnerstag in

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

- **Unbekannte Tierarten:** Manchmal sieht man nur mit dem DNA-Test gut
- **Quantenphysik:** »Ich will die Natur verstehen«
- **Himmelskörper:** Kometen im Anflug

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

KERNPHYSIK

Wie groß ist das Proton?

Dem Pariser »Committee on Data for Science and Technology« zufolge beträgt der Ladungsradius des Protons 0,8775 Femtometer (billionstel Millimeter). Vor drei Jahren ermittelte ein internationales Forscherteam allerdings einen um vier Prozent kleineren Wert. Jetzt hat es das Ergebnis untermauert und zudem präzisiert.

Die Wissenschaftler um Aldo Antognini von der ETH Zürich nutzten myonischen Wasserstoff für ihre Messungen. In diesem exotischen Atom ist das Elektron durch ein Myon ersetzt, welches dieselbe negative Ladung trägt, jedoch rund 200-mal schwerer ist. Die Energieniveaus von myonischem Wasserstoff hängen stärker von der Protonengröße ab als die von herkömmlichem Wasserstoff. Das lässt sich nutzen, um den Protonenradius zu bestimmen.

Mit Hilfe von Laserpulsen mit präzise abgestimmter Wellenlänge ermittelten die Forscher Resonanzfrequenzen, bei denen myonischer Wasserstoff zwischen bestimmten Energieniveaus wechselt. Aus diesen Frequenzen errechneten sie den Unterschied zwischen den Niveaus und daraus wiederum indirekt den Ladungsradius des Protons. Das Ergebnis, 0,84087 Femtometer, stimmt gut mit dem 2010 erhaltenen Wert überein, ist jedoch wesentlich genauer.

Warum die Zahl so deutlich von den offiziellen Angaben abweicht, bleibt nach wie vor unklar. Um aus den Resonanzfrequenzen auf die Protonengröße schließen zu können, sind komplexe quantenelektrodynamische Berechnungen erforderlich – eine mögliche Fehlerquelle.

Science 339, S. 417–420, 2013

Aufflackern eines sterbenden Sterns

Supernovae und ihre Überreste werden von Astronomen sehr häufig beobachtet, doch die Vorgeschichte solcher Sternexplosionen bleibt meist unbekannt. Nun hat ein Team um Eran Ofek vom Weizmann Institute of Science (Israel) neue Einblicke in die letzten Entwicklungsstadien gewonnen, die der Vorläuferstern einer Supernova durchlief. Die Daten zeigen, dass das rund 500 Millionen Lichtjahre entfernte Gestirn bereits vor der Explosion große Materiemengen ausstieß.

Die Forscher um Ofek untersuchten Aufnahmen einer Region im Sternbild Herkules. Im August 2010 hatte ein Roboterteleskop dort eine so genannte Typ-II_n-Supernova registriert. Bei einem solchen Ereignis kollidieren die fortgeschleuderten Sternreste mit Material, welches das Gestirn zuvor ausgeworfen hat. Auf den Aufnahmen konnten die Wissenschaftler nun den Vorläuferstern der Supernova identifizieren. Knapp 40 Tage vor der finalen Explosion war es bei ihm zu einem Helligkeitsausbruch gekommen, der rund einen Monat andauerte. Der Stern, der möglicherweise einige Dutzend Sonnenmassen in sich vereinte, stieß dabei Material mit einem Hundertstel der Masse unserer Sonne aus. Es entfernte sich mit Geschwindigkeiten um 2000 Kilometer pro Sekunde, wurde aber kurz nach der Supernova von deren Explosionsfront eingeholt.

Besonders überraschend sei die kurze Zeit zwischen Ausbruch und Explosion, schreiben die Wissenschaftler.

KEN-JUNG CHEN, SCHOOL OF PHYSICS AND ASTRONOMY, UNIVERSITY OF MINNESOTA



Simulation eines Sterns vor der Explosion. Sie zeigt, wie ausgestoßenes Material unterschiedlicher Geschwindigkeit miteinander kollidiert.

Womöglich stünden beide Ereignisse in einem kausalen Zusammenhang, wie es auch eine Reihe theoretischer Modelle vorhersagt.

Nature 494, S. 65–67, 2013

Maulwürfe riechen stereo

Der Ostamerikanische Maulwurf (*Scalopus aquaticus*) nimmt Gerüche mit beiden Nasenlöchern getrennt wahr. Das ermöglicht ihm, die Richtung einer Duftquelle zu erschnüffeln – ähnlich, wie wir mit Hilfe zweier Ohren ermitteln, woher ein Geräusch kommt, oder räumliche Tiefe mit Hilfe zweier Augen wahrnehmen. Die besondere Riechfähigkeit des Maulwurfs nutzt ihm beim Aufspüren von Nahrung, wie der Biologe Kenneth Catania von der Vanderbilt University (USA) in Experimenten herausgefunden hat.

Wenn Catania den Tieren ein Nasenloch verstopfte, brauchten sie erheblich länger, um einen Regenwurm zu finden. Sie orientierten sich dann nicht in Richtung des Wurms, sondern des freien Nasenlochs. Wurden ihre Naseneingänge mit feinen Kunststoffröhrchen überkreuzt, verfehlten sie den Leckerbissen sogar völlig.

Offenbar ist das Stereoriechen vor allem auf den letzten fünf Zentimetern zur Beute wichtig: Hier wirkte sich das Blockieren der Nasenlöcher am stärksten aus. Das Konzentrationsgefälle des Geruchsstoffs scheint so nahe an

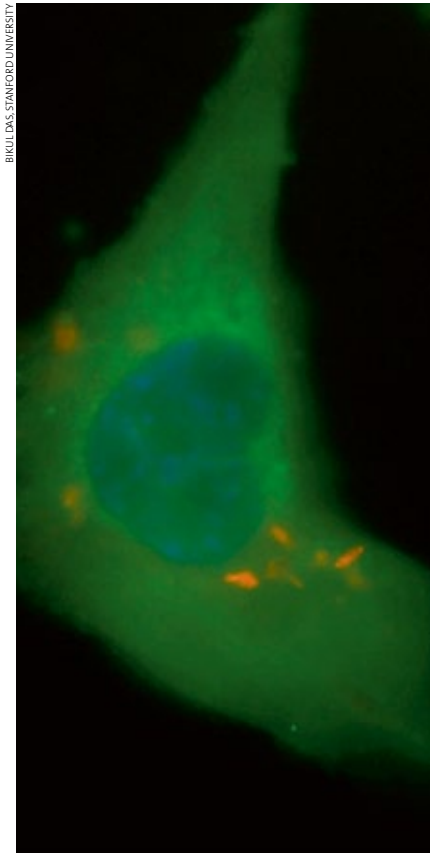
der Duftquelle groß genug zu sein, dass der Maulwurf es sogar mit seinen eng beieinander liegenden Naseneingängen wahrnehmen kann.

Ob auch andere Tiere räumlich riechen, ist umstritten. Experimente an Ratten hatten kürzlich gezeigt, dass die Nager einer Duftspur nur eingeschränkt folgen können, wenn ihre Nase einseitig verstopft ist. Auch beim Menschen gibt es Hinweise auf eine nach Nasenlöchern getrennte Geruchswahrnehmung.

Nature Communications 10.1038/ncomms2444, 2013

MEDIZIN

Tuberkulosekeime verstecken sich im Knochenmark



Die Erreger der Infektionskrankheit Tuberkulose können sich in Knochenmarksstammzellen einnisten. Dort hören sie auf, sich zu vermehren, und sind dann für lange Zeit sowohl vor Immunreaktionen als auch vor Antibiotika geschützt.

Forscher um Dean Felsher von der Stanford University (USA) brachten menschliche Knochenmarksstammzellen mit dem Tuberkulosebakterium *Mycobacterium tuberculosis* in Kontakt. Anschließend behandelten sie die Zellkulturen mit einem Antibiotikum. Dennoch ließen sich nach der Prozedur lebensfähige Erreger in den Stammzellen nachweisen; sie hatten die Zellen offenbar infiziert und darin Schutz vor dem Giftstoff gefunden.

Innerhalb der Stammzellen vermehren sich die Bakterien nur wenige

Tage lang und stellen die Teilung dann ein, wie die Versuche zeigten. Die Zellen erleiden dadurch offenbar keinen Schaden. Der Erreger befällt vor allem mesenchymale Stammzellen des Knochenmarks, aus denen Stütz- und Bindegewebe entsteht, während er Vorläufer von Blutzellen eher meidet.

An infizierten Mäusen konnten die Forscher zeigen, dass Tuberkulosekeime auch in lebenden Organismen das Knochenmark besiedeln. Selbst aus Tieren, die monatelang symptomfrei gewesen waren, ließen sich infektiöse Bakterien isolieren. Ähnliches scheint für Menschen zu gelten: Bei acht von neun ehemaligen Tuberkulosepatienten, die eine erfolgreiche Behandlung hinter sich hatten, war der Erreger in den mesenchymalen Stammzellen des Knochenmarks nachweisbar. Dort kann er unter bestimmten Umständen reaktiviert werden und neue Krankheitsausbrüche verursachen.

Science Translational Medicine 5, 170ra13, 2012

Diese Knochenmarksstammzelle (grün) enthält mehrere Tuberkulosebakterien (rot).

TECHNIK

Faser verfärbt sich unter Zugspannung

Britische Materialforscher haben eine Faser entwickelt, die mit wachsender Zugbelastung nacheinander alle Spektralfarben annimmt. Ihr Aufbau orientiert sich an den Oberflächenstrukturen der Früchte der tropischen Pflanze *Margaritaria nobilis*.

Die Zellen auf der Oberfläche der Margaritaria-Frucht enthalten Gebilde aus konzentrisch aufgerollten, nanometerdicken Schichten. Der regelmäßige Aufbau und die zylindrische Sym-

metrie dieser Strukturen führen dazu, dass das von ihnen zurückgeworfene Licht durch spezielle Beugungs- und Interferenzeffekte beeinflusst wird. Infolgedessen schimmert die Frucht der Pflanze intensiv blaugrün.

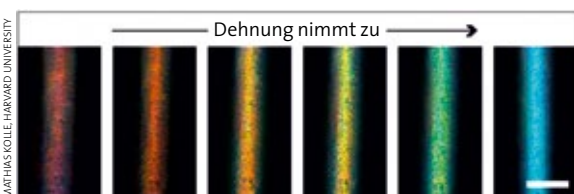
Um dieses Konstruktionsprinzip nachzubilden, erzeugten die Forscher um Peter Vukusic von der University of Exeter (England) dünne Kunststoff-Doppelschichten, die sie eng um einen Glasfaden herumwickelten. Anschlie-

ßend entfernten sie das Glas und erhielten so eine elastische Kunststofffaser mit zwiebelähnlichem Aufbau.

Wird die Faser in die Länge gezogen, verändert sich die Dicke der Kunststoffschichten und damit der Interferenzeffekt. Mit wachsender Zugspannung verfärbt sich die Faser deshalb kontinuierlich von rot nach blau.

Das Prinzip lässt sich unter anderem nutzen, um neue Belastungssensoren zu entwickeln, die auf Dehnung reagieren. Die Forscher gehen davon aus, dass sich die Eigenschaften der Fasern in einem weiten Bereich variieren lassen, indem man verschiedene Kunststoffe verwendet.

Advanced Materials 10.1002/adma.201203529, 2013



Das Auseinanderziehen der Faser verringert die Dicke ihrer Schichten, wodurch die Faser sich umfärbt. Balken: 50 Mikrometer.

SCHARFE ZÄHNE



Seeigel sind in der Lage, Schlupfwinkel in Steine zu nagen. Ihre aus Kalkplättchen aufgebauten Zähne schärfen sich dabei selbst nach, indem an Sollbruchstellen immer neue Kanten entstehen. Diese nachträglich eingefärbte elektronenmikroskopische Aufnahme offenbart, dass die Kalzit-

kristalle ungewöhnlich vielgestaltig und ineinander verzahnt sind. Pupa Gilbert von der University of Wisconsin in Madison gewann mit dem Bild die International Science & Engineering Visualization Challenge 2012.

Science 339, S. 510–511, 2013

ARCHÄOLOGIE

Der Mann mit dem Holzbein

Die älteste funktionale Beinprothese der Welt ist etwa 2300 Jahre alt und stammt aus Westchina.

VON HAKAN BAYKAL

Der athletisch gebaute Mann, der im Alter von etwa 50 bis 65 Jahren gestorben war, wurde im 3. Jahrhundert v. Chr. auf einer Gebirgsterrasse nahe der Oasenstadt Turfan in der heutigen Autonomen Region Xinjiang der Volksrepublik China bestattet – zusammen mit einer hölzernen Beinprothese. Am Fundort, genannt Friedhof Shengjindian, haben Archäologen seit 2006 insgesamt 31 Gräber freigelegt. Ein internationales Team führte nun zudem paläopathologische Untersuchungen an dem »Mann mit dem Holzbein« aus Grab 2007TSM2 durch und kam dadurch seiner Krankheitsgeschichte auf die Spur.

Der Verstorbene gehörte einst entweder zu einem Staatswesen, das die Chronisten des expandierenden chinesischen Kaiserreichs der Han-Dynastie als »Cheshi« bezeichneten, oder zur

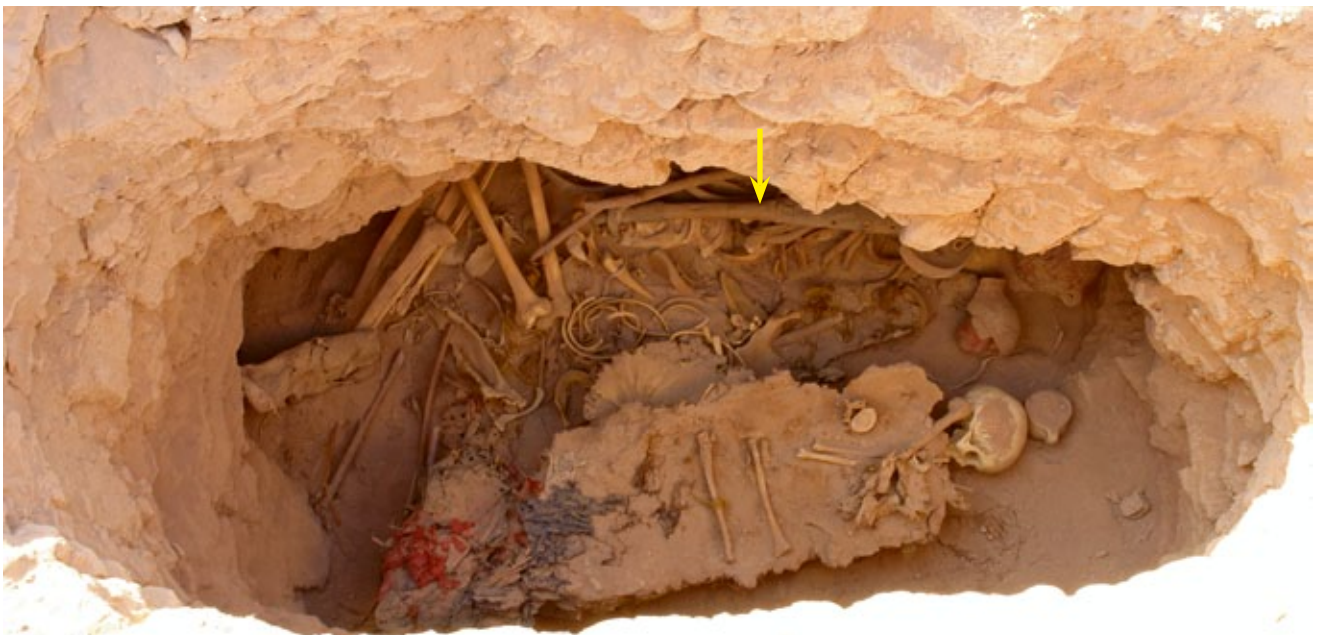
Konföderation von Stämmen der Xiongnu, die damals in die Turfan-Senke vorgedrungen waren. Diese lebten nomadisch von Viehzucht, unterhielten aber auch feste Siedlungen für den Ackerbau.

Ein Grund für die Prothese fand sich schnell: Das linke Kniegelenk des Mannes war stark deformiert. Ein Forscherteam um Mayke Wagner, Leiterin der Außenstelle Peking des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI), der Paläopathologin Julia Gresky von der Eurasienabteilung des DAI sowie Xiao Li von der Chinesischen Volksuniversität in Peking konnte mit Röntgenaufnahmen und Computertomografie mechanische Verletzungen als Ursache ausschließen. Da keines der anderen Gelenke ähnliche Missbildungen aufwies, kam auch eine rheumatische Arthritis nicht in Frage.

Im Nordwesten Chinas entdeckten Archäologen einen Friedhof aus dem 3. Jahrhundert v. Chr. In einem der Gräber fanden sie die bislang älteste funktionale Beinprothese (Pfeil).



BEIDE FOTOS: TURFAN ACADEMY



Verknöcherte Gelenkversteifungen sind aber als Folge von Infektionen mit Mykobakterien bekannt, den Erregern der Tuberkulose bei Menschen. Und tatsächlich deuteten Spuren von Knochenhautentzündungen an Rippen und an der Wirbelsäule darauf hin.

Der Mann hatte zwar überlebt, blieb aber stark behindert. Alle betroffenen Knochen – Oberschenkel, Kniescheibe sowie Schien- und Wadenbein – waren miteinander verwachsen, das Gelenk in einem Winkel von 135 Grad versteift und der Unterschenkel um 11 Grad nach innen verdreht. Somit konnte er sein linkes Bein nicht mehr durchstrecken und daher nur noch auf dem rechten aufrecht stehen. Die Krümmung nach innen machte es ihm wahrscheinlich unmöglich zu reiten, was in den Steppen Zentralasiens wohl ein großes Handicap darstellte.

Doch er wusste sich zu helfen und schnallte mit Lederriemen eine hölzerne Prothese an den Oberschenkel, nicht anders als Kriegsversehrte im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert. Das Stelzbein aus weichem Holz (wahrscheinlich Pappel) läuft oben in eine flache Platte aus, mit der die Konstruktion fixiert werden konnte. Das untere Ende bildete ein Schafs- oder Ziegenhorn, über das zusätzlich der Huf eines Pferds oder Esels gestülpt wurde, um ein Einsinken in weichem Untergrund zu verhindern. Dass die Prothese tatsächlich funktioniert hat, erwies sich anhand der Muskelansätze am Skelett – der Mann führte bis zu seinem Tod ein körperlich aktives Leben.

Der bisher älteste bekannte künstliche Unterschenkel war 1885 in Capua gefunden und anhand der Grabbeigaben auf rund 300 v. Chr. datiert worden. Das ebenfalls hölzerne, jedoch mit glänzender Bronze verkleidete Stück eines wohlhabenden Mannes wäre jedoch nicht voll belastbar gewesen und diente wohl eher als ästhetische Korrektur denn als Gehhilfe. Das Stelzbein aus Turfan ist damit das bislang älteste Beispiel einer funktionalen Beinprothese.

Hakan Baykal ist freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

ASTROPHYSIK

Beherrscht vom Schwarzen Loch

Astronomen haben im Zentrum der Galaxie NGC 1277 ein enorm massereiches Schwarzes Loch entdeckt. Ist es nur ein seltener Exot? Oder müssen die Forscher ihre Modelle der Galaxienentwicklung überdenken?

VON THORSTEN DAMBECK

Zu den wichtigsten astronomischen Entdeckungen der vergangenen Jahrzehnte gehört, dass im Zentrum vieler, vielleicht sogar aller Galaxien, extrem massereiche Schwarze Löcher existieren, so genannte supermassive black holes oder kurz SMBHs. Am genauesten vermessen hat man jenes im Zentrum der Milchstraße, das unter dem Namen Sagittarius A* bekannt ist; bereits in den 1970er Jahren wurde seine Radiostrahlung entdeckt. Anhand der Bewegung von Sternen, die es auf engen Umlaufbahnen umkreisen, ließ sich 2008 seine Masse genau bestimmen, sie beträgt rund vier Millionen Sonnenmassen.

Ein internationales Team um den Niederländer Remco van den Bosch vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie berichtete nun über ein extrem massereiches SMBH (*Nature* 491, S. 729–731, 29 November 2012; auch in einem englischen Video auf www.youtube.com/watch?v=12FJVvqN1YE spricht van den Bosch über seinen Fund). Es könnte nicht nur den bisherigen Rekordhalter von seinem Spitzenplatz verdrängen, sondern verblüfft die Astronomen vor allem dadurch, dass es seine Muttergalaxie so stark dominiert.

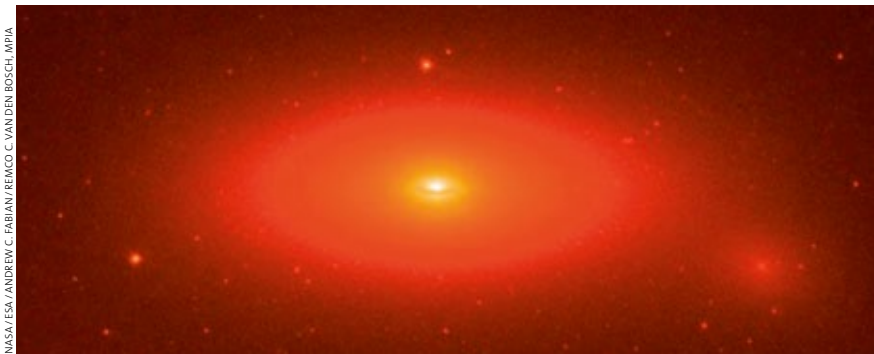
Heimat des Objekts ist das linsenförmige Sternsystem NGC 1277, das rund 220 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt in einem Galaxienhaufen im Sternbild Perseus liegt. Es umfasst rund 120 Milliarden Sonnenmassen; die Galaxie ist also ein vergleichsweise kleines Exemplar, höchstens ein Fünftel so groß wie unsere Milchstraße. Das Schwarze Loch in ihrem Zentrum erwies sich jedoch im Vergleich

zu ihrer Gesamtmasse als gewaltig. Mit seinen 17 Milliarden Sonnenmassen könnte es sich sogar um das massereichste Exemplar handeln, das man je entdeckt hat. Derzeitiger Rekordhalter ist das Objekt in der großen elliptischen Galaxie NGC 4889; es bringt zwischen 6 und 37 Milliarden Sonnenmassen auf die Waage. Bislang haben die Astronomen allerdings von weniger als 100 SMBHs die Masse bestimmt, typischerweise reicht sie von einigen hunderttausenden bis einigen Milliarden Sonnenmassen.

Schwarze Löcher auf der Waage

Wie gehen die Forscher bei solchen Untersuchungen vor? Weil es die Auflösung der Teleskope im Fall entfernter Galaxien nicht erlaubt, wie in der Milchstraße individuelle Sterne zu unterscheiden, verwenden sie stattdessen das verwandte Verfahren der Schwarzschild-Modellierung. Dazu vermessen sie typische Spektrallinien des Lichts, das aus den Zentralbereichen der untersuchten Galaxien stammt. Die Breite der Linien hängt dabei von der Verteilung der Geschwindigkeiten ab, mit denen die Sterne das Schwarze Loch umkreisen. Mit einem dynamischen Modell der Galaxie, das alle möglichen Sternumlafbahnen berücksichtigt, lässt sich dann ermitteln, zu welcher SMBH-Masse die Beobachtungen am besten passen.

Analysen dieser Art haben schon in den 1990er Jahren gezeigt, dass die Masse des zentralen Schwarzen Lochs und jene des Bulges, also der sternreichen Aufwölbung in der Mitte der Galaxien, miteinander zusammenhängen. Nach einer gegenwärtig allgemein



Im Zentrum der linsenförmigen Galaxie NGC 1277 ist das vielleicht massereichste Schwarze Loch beheimatet, das Astronomen je entdeckt haben. Überraschenderweise bringt es 59 Prozent der Masse des zentralen »Bauchs« der Galaxie auf die Waage – ein typischer Wert wären 0,1 Prozent. Das Bild nahm das Weltraumteleskop Hubble auf.

akzeptierten Faustregel besitzt das Schwarze Loch typischerweise nur etwa 0,1 Prozent der Masse des Bulges seiner Heimatgalaxie. Doch NGC 1277 ist offenbar anders als andere Galaxien: Ihr Schwarzes Loch macht 59 Prozent der Bulge-Masse aus und immerhin 14 Prozent der Gesamtmasse des Sternsystems aus.

Dass die Astronomen so verblüfft auf dieses Resultat reagieren, illustriert, wie wenig sie die Grundlagen der Galaxienentwicklung und insbesondere die Rolle der zentralen Schwarzen Löcher bislang noch verstehen. »Momentan gibt es mindestens drei ganz unterschiedliche Modelle, welche die Verbindung zwischen den Massen der Schwarzen Löcher und den Eigenschaften ihrer Heimatgalaxien erklären könnten«, erläutert van den Bosch.

Die einfachste Vorstellung geht von einer direkten Kopplung zwischen Galaxie und Schwarzen Loch aus; beide wachsen also im Gleichschritt. Die Forscher diskutieren über mehrere physikalische Prozesse, die dafür verantwortlich sein könnten.

Ein zweiter Ansatz erklärt die beobachtete Korrelation als Folge der Kollision von Galaxien. Während sie zu größeren Einheiten verschmelzen – was auf kosmologischen Zeitskalen häufig passiert –, fällt Materie in das neu entstehende Zentrum. Bulge und Schwarzes Loch teilen dann die einstürzende Masse in einem etwa konstant bleibenden Verhältnis untereinander auf.

Gemäß der dritten Vorstellung entwickeln sich Bulge und Schwarzes Loch praktisch unabhängig voneinander. Die Korrelation folgt dann lediglich aus dem Umstand, dass große Galaxien bereits zahlreiche Vorgänger verschluckt haben. Diese weisen ganz unterschiedliche, zufällige Verhältnisse von Bulge- und Loch-Masse auf – als Ergebnis der Verschmelzungen würde sich schlicht eine Art Mittelwert einstellen.

»Wir wissen aber noch nicht«, sagt van den Bosch, »welche dieser Erklärungen die beste ist.« Sein jüngster Fund verschärft das Problem eher noch, weil er von keinem der Szenarien vorhergesehen wurde. Auch die ohnehin

schwammig formulierte 0,1-Prozent-Faustregel steht nun wieder auf dem Prüfstand. Stützen die experimentellen Befunde sie tatsächlich? Oder ist sie eher dem Wunsch nach Übersichtlichkeit zu verdanken?

Überrascht von den Resultaten ist auch Lutz Wisotzki. »Ein sehr interessanter Fund«, so der Leiter des Bereichs Galaxien und Quasare am Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam. »Nun müssen weitere Untersuchungen zeigen, ob es sich um eine neue Klasse von Galaxien handelt, für die der empirische Zusammenhang zwischen den Massen von Bulge und SMBH nicht gilt. Oder ob NGC 1277 ein Ausreißer ist, wie er bei jeder statistischen Verteilung vorkommen kann.« In letzterem Fall wäre das gigantische Schwarze Loch von NGC 1277 lediglich eine seltene Laune der Natur.

Vorläufige Analysen scheinen jedoch in eine andere Richtung zu weisen. Die Heidelberger Astronomen haben nämlich bereits weitere Galaxien im Visier, von denen jetzt schon klar ist, dass sie ebenfalls recht klein sind – aber dennoch ungewöhnlich massereiche Schwarze Löcher beherbergen könnten.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und arbeitet als Wissenschaftsjournalist und Buchautor in Heidelberg.

STOFFWECHSEL

Rettende Geburt

Warum kommen menschliche Babys relativ unreif zur Welt? Weil später ihr Kopf zu groß für das Becken der Mutter sei, lautete die bisherige Lehrmeinung. Jetzt scheint sie widerlegt: Entscheidend ist demnach, dass die Mutter dann nicht mehr genug Energie für sich und das Kind zur Verfügung stellen kann.

VON PATRICK SPÄT

Eine werdende Mutter müsste ihr Baby ungefähr 18 bis 21 Monate lang in ihrem Bauch tragen, damit sein kognitiver Status bei der Geburt in etwa dem eines neugeborenen Schimpansen

entspricht. Warum kommen wir dann schon nach neun Monaten und nicht erst in einem weiter entwickelten Stadium zur Welt? In den Fachbüchern und den Köpfen der Biologen herrschte lan-

ge Zeit eine unangefochtene Lehrmeinung: Verantwortlich für den frühen Zeitpunkt sei vor allem der aufrechte Gang des Menschen. Als unsere Vorfahren vor Millionen von Jahren begannen, auf zwei Beinen zu laufen, sei das Becken allmählich schmaler geworden, da dies die aufrechte Fortbewegung vereinfachte. Die Frau müsse das Kind also wegen der anatomischen Form ihres Beckens nach neun Monaten zur Welt bringen, damit sein Kopf noch durch den Geburtskanal passe.

Holly Dunsworth, Anthropologin an der University of Rhode Island, und ihre Kollegen haben jedoch kürzlich eine andere Hypothese entwickelt, die für Aufruhr im anthropologischen Lager sorgte: Verantwortlich sei nicht die Beckenanatomie der Frau, sondern ihr Energiehaushalt (*Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, S. 15212–15216, 2012).

Spätestens nach neun Monaten kann die Schwangere demnach schlichtweg nicht mehr die zusätzlichen Kalorien erübrigen, um das Baby zu versorgen und in ihrem Bauch am Leben zu erhalten. Zum durchschnittlichen Zeitpunkt der Geburt bewegt sich die Schwangere schon in einer kritischen Phase ihres Stoffwechsels; für sie ist die Durchtrennung der Nabelschnur überlebensnotwendig. Ist der Säugling erst

einmal auf der Welt, verringert sich denn auch sein Wachstum – gemessen an der Geschwindigkeit zuvor im Mutterleib – deutlich. Das illustriert, wie sehr es von der Schwangeren zehrt.

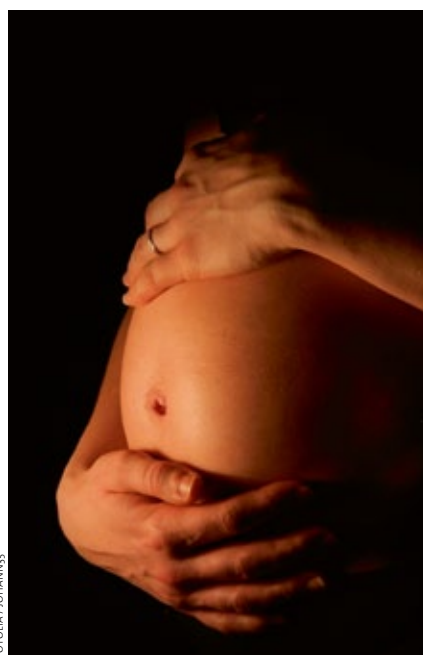
In Extremsituationen können Menschen ihren Stoffwechsel über mehrere Wochen auf etwa doppelte Intensität erhöhen. Der Körper arbeitet dann allerdings an der Grenze seiner Kapazität. Und auf ungefähr diesen Wert steigert sich auch der Metabolismus bei schwangeren Frauen ab dem sechsten Monat. Im neunten Schwangerschaftsmonat beginnt er sich dann weiter zu erhöhen, was bereits auf recht kurze Sicht lebensbedrohliche Züge annehmen kann.

Mama baut ab, Baby legt zu

Was genau geschieht im Körper der Mutter? Eine wichtige Rolle bei den hier ablaufenden Stoffwechselvorgängen spielt die so genannte Hypothalamus-Hypophysen-Nebennierenrinden-Achse (HPA) – die unter anderem Verdauung, Energiehaushalt, Stressregulation und Immunsystem beeinflusst –, und zwar vor allem das »Stresshormon« Cortisol. Es wirkt katabol, sorgt also dafür, dass beispielsweise Fettreserven abgebaut werden.

Gegen Ende der Schwangerschaft befinden sich der Stoffwechsel der Mutter und der ihres Kindes in komplett entgegengesetzten Zuständen: Während ersterer fast ausschließlich katabol arbeitet, also Vorräte abbaut, nutzt das Baby die dadurch reichlich vorhandenen Nährstoffe für anabole Prozesse, um sich ein Fettpolster für die harte Zeit nach der Geburt anzulegen. Die Plazenta dient dabei als Schranke zwischen den beiden Organismen, die das mütterliche Cortisol nicht in den Kreislauf des Babys passieren lässt. Dadurch sammelt sich in der Schwangeren Cortisol an, was ihren katabolen Zustand auf einem konstant hohen Niveau hält. Das zehrt die Mutter geradezu aus; nur

In den letzten Monaten der Schwangerschaft arbeitet der Stoffwechsel der Mutter am Rande seiner Kapazität.



FOTOLIA / JOHANNIS

AKTUELLES AUS DEM LESERSHOP



Sammelkassette

Die Sammelkassette von **Spektrum der Wissenschaft** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).



Jahrgangs-CD-ROM SdW 2012

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); Lieferung: Ende Februar 2013. ISBN 978-3-943702-22-4

www.spektrum.de/lesershop



die Geburt verhindert ihren körperlichen Zusammenbruch.

Die neue Auffassung wird durch die Beobachtung gestützt, dass eine Schwangerschaft durchschnittlich bei solchen Frauen kürzer ausfällt, die weniger Körperfett und einen langsameren Stoffwechsel haben. Das gleiche gilt für werdende Mütter, die in höheren Lagen leben: Da sie weniger Sauerstoff aufnehmen, können sie ihr Kind nicht so lange mit Energie versorgen wie solche auf Meeresspiegel-Niveau. Daher gebären die höher lebenden Schwangeren statistisch gesehen deutlich früher.

Holly Dunsworth fasst ihre Theorie, die sie auf den Namen EGG getauft hat (Energetics, Gestation, Growth – also Energie, Schwangerschaft und Wachs-

tum), in einem Satz zusammen: »Es ist physiologisch gar nicht möglich, ein reiferes Baby zu gebären – egal, wie der Beckenknochen anatomisch beschaffen ist.«

Bei seinen Untersuchungen konnte das Team auch zeigen, dass allein vom statistischen Energiehaushalt her – im Vergleich mit anderen Säugetieren – Babys sogar schon mit ungefähr acht Monaten zur Welt kommen müssten. Menschliche Mütter gebären ihre Kinder also eigentlich zu spät.

Die Forscher überprüften die bisherige Auffassung auch direkt: Sie schickten Frauen und Männer aufs Laufband, um ihre Beckenanatomie und deren Biomechanik zu studieren. Dabei wollten sie vor allem wissen, ob ein breiteres Becken tatsächlich einen evolutio-

nären Nachteil hat, indem es den aufrechten Gang beeinträchtigt. Mittels hochauflösender Kameras und bildgebender Verfahren vermaßen sie unter anderem den muskulären Kraftaufwand, die Beschleunigungskräfte und die Armbewegungen.

Das Resultat: Ein größeres Becken würde Frauen keineswegs daran hindern, aufrecht zu gehen. Im Gegenteil haben Frauen trotz ihres durchschnittlich breiteren Beckens einen energieparenderen Gang als Männer. Das dürfte die altehrwürdige Lehrmeinung endgültig ins Reich der wissenschaftlichen Legenden verweisen.

Patrick Spät ist promovierter Philosoph und arbeitet als freier Journalist und Autor in Berlin.

INFORMATIK

Datenspeicher für die Ewigkeit

Die Erbsubstanz DNA konserviert Informationen nicht nur langfristig, sondern auch mit ansonsten unerreichter Packungsdichte. 100 Millionen Stunden hoch aufgelöster Videos würden in einer Kaffeetasse Platz finden.

VON JAN DÖNGES

Auf den ersten Blick war das Postpaket aus den USA eine bittere Enttäuschung. Da hatten Ewan Birney und Nick Goldman vom European Bioinformatics Institute (EBI) in Hinxton (England) so reichlich Datenmaterial aufbereitet: Sämtliche Sonette von Shakespeare, ein Foto des Instituts, Watson und Cricks klassisches Paper über die Struktur von DNA, einen MP3-Auszug aus Martin Luther Kings Rede »I have a dream« und eine Datei mit Kodierungsvorschriften – insgesamt 739 Kilobyte – hatten sie in eine Folge aus den Zeichen A, C, G und T umgewandelt und per E-Mail an eine US-amerikanische DNA-Synthesefirma geschickt. Die sollte entsprechend der vorgelegten Zeichenfolge Stränge der Erbsubstanz aus den gleichnamigen Bausteinen (»Nukleotiden«) zusammensetzen, und zwar in

millionenfacher Ausfertigung, und in gefriergetrocknetem Zustand an die Forscher zurückschicken.

Die nahmen Anfang letzten Jahres das Probengefäß aus dem Postpaket und fanden – nichts. Erst nach längerem Hin- und Herwenden entdeckte der Informatiker Goldman das staubkorngroße Bröckchen, das an der Wand des Röhrchens klebte.

Erfolgreicher Probelauf

In Wirklichkeit war die vermeintliche Enttäuschung Kennzeichen eines großen Erfolgs. Als Datenspeichermaterial bietet DNA eine Informationsdichte, die gegenwärtige Speichermedien um Größenordnungen übertrifft und obendrein ohne nennenswerten Aufwand die Jahrtausende überdauert. Mit diesem »Probelauf« wollte das Team um

Goldman und den Genetiker Birney demonstrieren, dass die Erbsubstanz schon mit heutigen Mitteln für diesen Zweck verwendbar ist (*Nature* 494, S. 77–80, 7. Februar 2013).

Um zu überprüfen, ob ihr Verfahren funktioniert, machten sie sich gleich nach Empfang ans Auslesen der Daten: Die Probe wurde in wässrige Lösung gebracht, ein Teil davon abgezweigt und Kollegen vom Europäischen Molekularbiologie-Labor (EMBL) in Heidelberg zur Verfügung gestellt, die sie mit Hilfe von Standard-Gensequenziermaschinen entzifferten. Es entstand erneut eine Textdatei aus den Zeichen A, C, G und T, die sich mit dem Kodierungsverfahren in die Ausgangsdaten zurückübersetzen ließ. Der verbliebene Rest der Daten-DNA lässt sich wieder gefriertrocknen und aufheben.

Schon seit Ende der 1990er Jahre hatten Wissenschaftler mit digitalen Bits in DNA-Form experimentiert (Spektrum der Wissenschaft 11/1998, S. 70). Doch der Nachweis, dass sich das Verfahren auch im Großmaßstab anwenden lässt, gelang erst kürzlich – und dann gleich doppelt: Wissenschaftler um George Church von der Harvard University übersetzten zeitgleich mit den EBI-Forschern, aber ohne Wissen voneinander gut 700 Kilobyte in eine künstliche Erbgutsequenz und dekodierten sie wieder.

DNA weist gegenüber herkömmlichen Speichermedien drei wesentliche Vorteile auf: Erstens lassen sich, wie im Probelauf erlebt, die Daten in Form einer Kette aus Erbsubstanz phänomenal dicht packen. In einem Gramm DNA wären etwas über zwei Petabyte (10^{15} Byte), also rund 2,3 Millionen Gigabyte, unterzubringen. Das Volumen einer Kaffeetasse reicht für 100 Millionen Stunden hoch aufgelöster Videos. Zweitens ist die Technik im Wesentlichen ein Abfallprodukt der Genforschung und wird auch in Zukunft von deren

Fortschritten profitieren. Schon jetzt lassen sich alle erforderlichen Schritte mit standardisierten Laborgeräten ausführen. Mit einem handelsüblichen Probenroboter, wie er heutzutage auf den Tischen zahlloser Labors steht, lässt sich auch eine Datenmenge in der Größenordnung von Exabyte (10^{18} Byte) bewältigen.

Drittens unterscheidet sich DNA als Speichermedium von sämtlichen anderen Verfahren zur langfristigen Speicherung dadurch, dass bereits der Nachweis ihrer Dauerhaftigkeit vor-

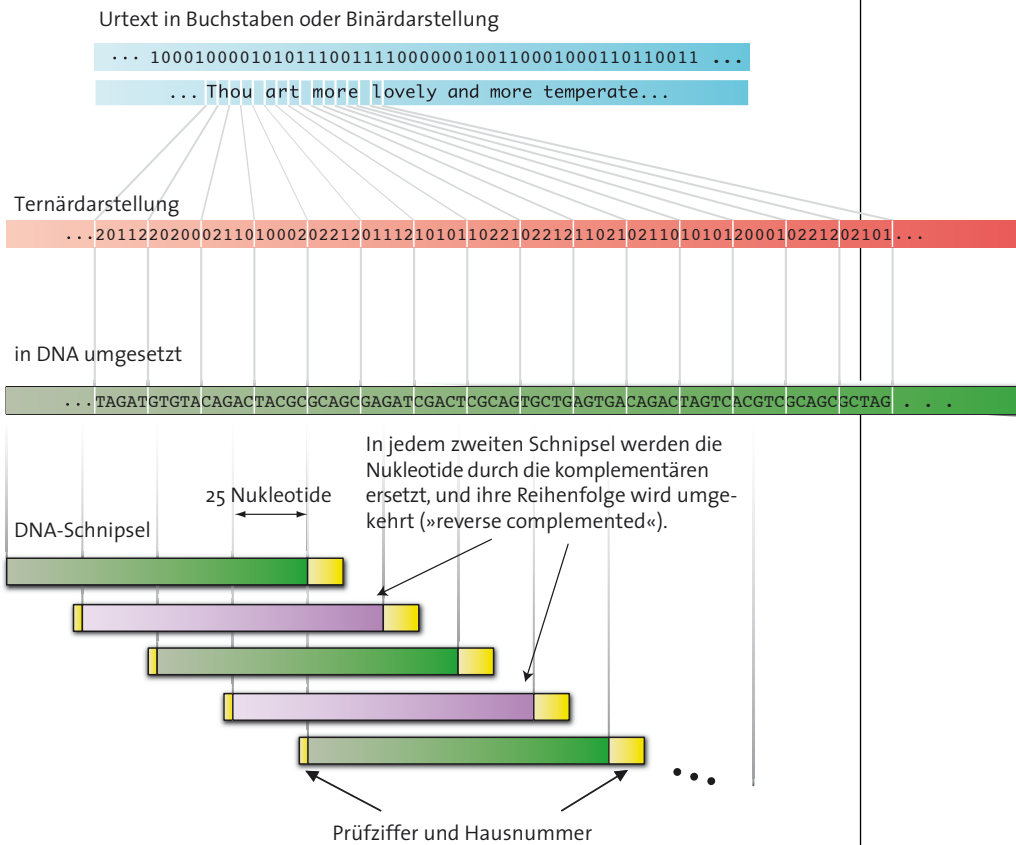
DNA-gerechte Datenkodierung

Eine Folge von Nullen und Einsen lässt sich als eine Zahl im Zweiersystem auffassen: 10011010 ist die Zahl, die wir in unserem gebräuchlichen Dezimalsystem als 158 schreiben. Man könnte jedem der vier DNA-Bausteine (Nukleotide) A, C, G und T ein Paar von Binärziffern zuweisen, zum Beispiel A=00, C=01, G=10 und T=11. Dann wäre die oben genannte Binärkette als GCGG zu kodieren; aber das doppelte G führt leicht zu Fehlern.

Alternativ könnte man zum Beispiel A oder T für die Binärziffer 0 schreiben, C oder G für die 1, und bei gleichen Ziffern in Folge immer von der einen Möglichkeit zur anderen wechseln. Das verhindert zuverlässig unmittelbare Wiederholungen im DNA-Strang, macht ihn aber doppelt so lang wie zuvor.

Platzsparender und trotzdem wiederholungsfrei geht es mit dem Verfahren von Goldman und Kollegen. Sie stellten die Folge der Binärziffern als Ternärzahl dar, das heißt im Zahlensystem zur Basis 3. Im Beispiel: 10011010 (binär) = 158 (dezimal) = $1 \cdot 3^4 + 2 \cdot 3^3 + 2 \cdot 3^2 + 1 \cdot 3^1 + 2 \cdot 3^0 = 12212$ (ternär). Eine Ternärzahl enthält nur die Ziffern 0, 1 und 2; die Forscher nennen sie »Trits« in Analogie zu den »Bits« (»binary digits«) des Binärsystems.

Jedes Trit wird nun durch eines der vier Nukleotide A, C, G und T kodiert, und zwar in Abhängigkeit vom Vorgängernukleotid (Tabelle rechts). Dadurch werden Dopplungen vermieden. Allerdings führt



ein einziger Lesefehler dazu, dass der ganze Rest des Textes falsch interpretiert wird. Fehlerhafte Fragmente sind also nicht einmal teilweise nutzbar, sondern müssen komplett verworfen werden – kein Problem bei der großen Anzahl von Kopien, von denen sich eine überwältigende Mehrheit fehlerfrei lesen lässt.

Vorgängernukleotid	nächstes Trit		
	0	1	2
A	C	G	T
C	G	T	A
G	T	A	C
T	A	C	G

liegt: Die Untersuchungen an Wollhaarmammuts aus dem sibirischen Permafrost oder gar an Neandertalerknochen zeigten, dass unter günstigen Bedingungen die Erbgutsequenz über mindestens 10 000 Jahre erhalten bleibt. Kühl, trocken und dunkel gelagert könnte sie locker die kommenden Generationen überdauern. Und solange die Menschheit ein wissenschaftliches Interesse für ihr Erbgut aufbringt, werden die passenden »Lesegeräte« zur Verfügung stehen.

Weltwissen im Einmachglas

Die biologische Natur des Speichermediums und die Grenzen der Synthese- und Analysegeräte erfordern allerdings einige Anpassungsmaßnahmen (siehe Kasten S. 17). Heutige DNA-Synthesemaschinen sind nicht in der Lage, besonders lange Ketten herzustellen. Das Forscherteam zerlegte daher die ermittelte Abfolge in über 150 000 Schnipsel mit je 114 Nukleotiden, darunter 100 für die eigentliche Nachricht und die restlichen 14 für eine »Hausnummer«, welche die Position des Fragments im Strang angibt, sowie einige Prüfwerte zur Fehlererkennung. Die DNA-Stückchen selbst sind nicht einfach hintereinander auf der Urtextkette angeordnet, sondern überlappen sich: Jedes beginnt nur 25 Nukleotide später als sein Vorgänger, so dass jedes Zeichen des Urtexts in vier verschiedenen Schnipseln vorkommt.

Die Wissenschaftler wählten die Abfolge der Nukleotide so, dass niemals zwei gleiche aufeinanderfolgen, da solche Dopplungen mit größerer Häufigkeit zu Lesefehlern führen. Zur Absicherung gegen systematische Fehler verwandelten sie darüber hinaus jedes zweite Schnipsel in sein komplementäres Gegenstück (das heißt, sie ersetzten A durch T sowie G durch C und umgekehrt) und schrieben es von hinten nach vorn (»reverse complemented«).

Schließlich bestellten sie von jedem Fragment 1,2 Millionen Exemplare. Selbst wenn man von der gelieferten Menge nur ein Promille zum Lesen abzweigt und den Rest für die Nachwelt übrig lässt, bleibt ausreichend Stoff,

um Lesefehler durch schlichte Mehrheitsentscheidung auszumerzen. In der Tat gelang es den Forschern, die ursprünglichen Daten vollständig und fehlerfrei zu rekonstruieren.

In dem Experiment dauerte das Schreiben zwei Tage und das Lesen fast zwei Wochen, und man hätte zu Marktpreisen etwa 10 000 Euro aufwenden müssen. Für den Alltagsbedarf ist diese Speicherethode also offensichtlich ungeeignet. Eher bietet es sich an, das gesamte Wissen der Menschheit in DNA-Form in handliche Einmachgläser abzufüllen und für den Fall einer globalen Katastrophe zum Beispiel in einem stillgelegten Salzbergwerk einzulagern, damit es in ferner Zukunft den Überlebenden zur Verfügung steht.

Aber schon bei der Lagerung der immensen Datenmengen, die beim Betrieb des Large Hadron Collider im Genfer Kernforschungszentrum CERN anfallen, kann die DNA-Technik mithal-

ten: Ab einer Lagerzeit von 600 bis 5000 Jahren ist sie billiger als das heute praktizierte Verfahren, die Daten auf Magnetbändern zu speichern; denn die müssen wegen der geringen Haltbarkeit alle paar Jahre umkopiert werden. Sinken die Synthesekosten um den Faktor 100 – das wäre noch einmal so viel wie im vergangenen Jahrzehnt –, dann ist die DNA-Lagerung bereits ab 6 bis 50 Jahren preisgünstiger.

In der sehr vorsichtigen Rechnung der britischen Forscher stecken noch weitere Reserven. So vermuten sie, dass man auch mit 10 000 statt 1,2 Millionen Kopien für jeden Schnipsel auskommt. Und schon steigt die Kapazität des Speichermediums auf das Hundertfache. Weitere Fortschritte in der DNA-Synthese und -Analyse würden sich ebenfalls vorteilhaft auswirken.

Jan Dönges ist Online-Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

APPETITREGULATION

Falsch tickende Uhren machen Mäuse dick

Wenn in ihren Fettzellen ein steuerndes »Uhrgen« fehlt, fressen Mäuse zu unnatürlichen Zeiten und nehmen dadurch zu. Bei Menschen könnte Ähnliches gelten.

VON GERLINDE FELIX

Jede Körperzelle besitzt eine innere Uhr. Die vielen Miniaturuhren laufen jedoch nicht im perfekten 24-Stunden-Takt und müssen deshalb immer wieder an den so genannten zirkadianen Rhythmus angepasst werden. Diese Aufgabe übernimmt das Zwischenhirn, genauer gesagt ein kleines Organ im Hypothalamus – der suprachiasmatische Kern. Wie ein Dirigent die Musiker eines Orchesters leitet, so steuert dieses Hirnareal den zirkadianen Rhythmus und gibt den Miniaturuhren den Takt vor. Zudem beeinflusst der Hypothalamus auch die Nahrungsaufnahme: Er produ-

ziert Botenstoffe, die den Appetit entweder stimulieren oder zügeln. Daher liegt die Vermutung nahe, dass sich zirkadianer Rhythmus und Nahrungsaufnahme gegenseitig beeinflussen.

Ein Team um Georgios Paschos und Garret FitzGerald von der University of Pennsylvania in Philadelphia hat dies nun an so genannten Knock-out-Mäusen genauer untersucht: Die Forscher hatten die Nager genetisch so manipuliert, dass deren Fettzellen ein spezielles »Uhrgen« namens Arntl fehlte. Die Tiere fraßen entgegen ihrer Natur vor allem tagsüber und legten trotz gleicher

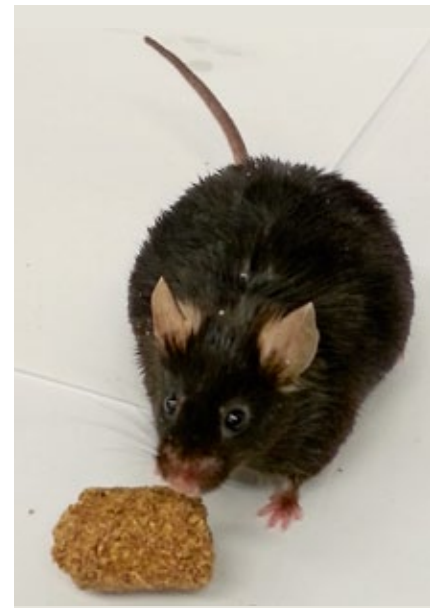
Nahrungsmenge gegenüber der Vergleichsgruppe an Gewicht zu, wenn beide Gruppen Futter mit hohem Kaloriengehalt bekamen. Es scheint also eine Rückkopplung zwischen den zellulären Uhren und dem den Appetit regulierenden Hypothalamus zu geben.

Auf die Fettzellen kommt es an

Dabei sind zwei Faktoren ausschlaggebend: Zum einen steuern offensichtlich speziell die Fettzellen das Fressverhalten. Schalteten die Forscher das Uhrgen zu Vergleichszwecken nämlich in anderen Geweben – etwa in der Leber oder der Bauchspeicheldrüse – gentechnisch aus, fraßen die Mäuse trotzdem normal. Zum anderen kommt es bei der Gewichtszunahme offensichtlich darauf an, wann die Tiere die Nahrung zu sich nehmen: Auch nicht manipulierte Mäuse nahmen zu, wenn die Forscher sie dazu brachten, tagsüber zu fressen. Wie regelt die innere Uhr der Fettzellen

das Appetitgefühl? Unter anderem steuert sie die Produktion von langkettigen, mehrfach ungesättigten Fettsäuren sowie den Zeitpunkt, zu dem diese Fettsäuren von den Zellen freigesetzt werden. Tagsüber gelangen dabei etwa Eicosapentaensäure (EPA) und Docosapentaensäure (DHA) in großer Menge aus den Fettzellen ins Blut und durch die Blut-Hirn-Schranke zum Hypothalamus. Dort verstärken sie die Wirkung der Hormone Leptin und Insulin, die den Appetit dämpfen. Das Zwischenhirn interpretiert diese Substanzen also als Stoppsignal zur Nahrungsaufnahme. Nachts ist die Konzentration der Fettsäuren bei Mäusen geringer, was ihren Appetit wieder ansteigen lässt.

In ihrem Versuch verstellten die Forscher um Georgios Paschos diese natürliche Uhr. Entfernten sie das Arntl-Gen aus dem Mäusegenom, bildeten die Fettzellen der Tiere weniger EPA und DHA, die entsprechend auch in niedri-



GEORGIOS PASCHOS, UNIVERSITY OF PENNSYLVANIA

In den Fettzellen dieser eindeutig übergewichtigen Maus hatten Forscher ein Gen ausgeschaltet, das die innere Uhr steuert. Der manipulierte Nager hat eine gestörte Appetitregulation und nahm deutlich zu.

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 – Die Woche**, Deutschlands erstem wöchentlichem, digitalem Wissenschaftsmagazin



Produkt des Monats

gerer Konzentration im Blut vorkamen. Damit erhielt das Zwischenhirn nun während der natürlichen Ruhephase der Mäuse kein ausreichend starkes Stoppsignal mehr. Die Tiere fraßen folglich auch tagsüber. Obwohl sie insgesamt nicht mehr Nahrung zu sich nahmen, legten sie an Gewicht zu.

Laut den Forschern könnte das darauf zurückzuführen sein, dass die Mäuse mit dem verschobenen Rhythmus Energie eher speichern als verbrauchen, worauf einige Daten hindeuten. Mit einem recht einfachen Trick lässt sich dies jedoch verhindern: Fütterten die Forscher die manipulierten Mäuse mit besonders EPA- und DHA-reicher Nahrung, zeigten die Tiere ein natürliches Fressmuster und keine Neigung zu Gewichtszunahme.

Ein Mittel gegen Essattacken und Übergewicht?

Die veränderten Fresszeiten der Mäuse erinnern an nächtliche Essattacken von Menschen. Dass diese in Zusammenhang mit Übergewicht stehen, wies der seinerzeit ebenfalls in Pennsylvania forschende Psychiater Albert Stunkard bereits 1955 nach. Die Wissenschaftler um Paschos vermuten daher, dass die Fettzellenuhr bei manchen Menschen eine ähnliche Störung aufweist, wie sie in ihrem Tierversuch auftrat.

Diese Hypothese wollen sie nun in genetischen Untersuchungen prüfen. Sollten sie fündig werden, könnte möglicherweise die Einnahme von EPA und DHA – die unter anderem häufig in Fischölen vorkommen – übergewichtigen Patienten helfen.

Als sicher kann bisher jedoch nur gelten: Nicht allein der Hypothalamus regelt den Appetit, sondern ein ausgefeilter Rückkopplungsmechanismus mit dem Fettgewebe. Und bereits geringfügige Verschiebungen der Essgewohnheiten können zu Übergewicht führen. Bis die Forscher hieraus verbindliche Ernährungsempfehlungen ableiten können, so schreiben sie, sei es noch ein langer Weg.

Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Markt Wartenberg.

BIOTECHNIK

Strom erzeugende Viren

Mit Hilfe spezieller Viren bauten amerikanische Wissenschaftler ein winziges Gerät, das Elektrizität produziert – dank Piezoeffekt.

VON DANIELA ZEIBIG

Viren genießen keinen besonders guten Ruf. Sie befallen lebende Zellen und infiltrieren diese mit ihrem Erbgut. Krankheiten bis hin zu Pandemien können die Folge sein. Manche Viren haben sich auf Bakterien als Wirte spezialisiert, sind also für den Menschen ungefährlich. Eine ganz neue Anwendungsmöglichkeit für solche Bakteriophagen entdeckten Byung Yang Lee und seine Kollegen von der University of California in Berkeley: Sie nutzten sie zur Stromerzeugung (*Nature Nanotechnology* 7, S. 351–356, 2012).

Die Schlüsselrolle dabei spielte der Phage M13, ein etwa 900 Nanometer langes und sieben Nanometer breites Virus. Seine Hülle aus im wesentlichen rund 2700 Exemplaren des Proteins pVIII umschließt einen einzelnen DNA-Strang. Forscher nutzen die besondere Fähigkeit dieser Phagen, sich selbstständig zu dünnen Schichten anzuordnen.

Durch genetische Manipulation der Hüllproteine bringen die Wissenschaftler die Viren dazu, sich spezifisch an Substanzen anzuheften, und können sie sogar mit Werkstoffen wie Gold ummanteln. So lassen sich dann beispielsweise Fabrikationsfehler in bestimmten Materialien aufspüren (siehe SdW 12/2006, S. 66).

Auch in der Nanoelektronik ist man bereits auf den Phagen gekommen: So fertigten Forscher vom Massachusetts Institute of Technology 2008 die erste virenbasierte Elektrode – eine dünne, mit Kobalt überzogene Phagenschicht (*Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, S. 17227–17231, 2008).

Lee und seinen Kollegen brachten die Viren dazu, Strom zu produzieren. Dazu nutzten sie den so genannten

Piezoeffekt: In manchen Festkörperkristallen verschieben sich unter äußerem Druck die Ladungsschwerpunkte, so dass mikroskopische Dipole entstehen. Geschieht dies flächendeckend, ist eine makroskopisch messbare elektrische Spannung die Folge.

Zu den piezoelektrischen Materialien gehören Kristalle wie Quarz. In den vergangenen Jahren konnten Forscher diese Eigenschaft aber auch an organischen Substanzen wie Knochen oder Kollagenfasern nachweisen. M13 erschien viel versprechend, da die pVIII-Proteine bereits ein Dipolmoment aufweisen, das vom Amino- zum Karboxylende weist.

Elektrische Spannung verändert die Gestalt – und umgekehrt

Die Forscher tasteten einen Virenfilm, bestehend aus einem Mikrometer breiten Streifen auf einer Goldoberfläche, in einem Rasterkraftmikroskop mit einer nur wenige Atome dicken, elastisch aufgehängten Metallnadel ab. Sodann legten sie über diese Nadel eine Spannung an und vermaßen anschließend anhand ihrer Auslenkung, ob sich die Oberflächenstruktur der Probe verändert hatte. Offenbar beeinflusste das Feld tatsächlich die Ausrichtung der Hüllproteine; M13 zeigte den umgekehrten piezoelektrischen Effekt, bei dem sich Ladungsschwerpunkte unter dem Einfluss einer elektrischen Spannung verschieben, was zu einer Gestaltänderung führte.

Das Dipolmoment der pVIII-Moleküle entsteht hauptsächlich, weil sich positive Ladungen an jenen Proteinen ansammeln, die in das Innere des Phagen weisen, negative dagegen an den nach außen gerichteten. An letztere hängten die Forscher nun noch die

WEGWEISEND FÜR IHRE KARRIERE.



**JETZT AM
KIOSK.**

**Finden Sie den Job,
der 100 % zu Ihnen passt:**

In Zusammenarbeit mit XING hat FOCUS-SPEZIAL die Top-Arbeitgeber Deutschlands identifiziert. Über 13.000 Mitarbeiter wurden zu ihrem eigenen Unternehmen befragt – zu Entwicklungsmöglichkeiten, Gehalt, Arbeitsplatz und Arbeitszeit. Das neue FOCUS-SPEZIAL nennt die 370 besten Arbeitgeber Deutschlands.

Plus: Ratgeber für Bewerbung, Assessment-Center und den besten Start in den neuen Job.

Extra: Wer verdient wie viel. Die aktuellen Gehälter von 150 Berufen im Überblick.

FOCUS-SPEZIAL gibt es auch unter:
Tel. 0180 5480 1000*, Fax 0180 5480 1001*,
www.focus-spezial.de

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

**ALLES ZU EINEM THEMA.
IN EINEM HEFT.**

**FOCUS
SPEZIAL**

Ein unnachahmlicher Wurm

Warum stechen schon primitive Lebewesen modernste Computer aus?

Ray Kurzweil ist nicht nur ein höchst erfolgreicher Erfinder von Synthesizern, Muster- und Spracherkennungssoftware sowie seit Kurzem Chefingenieur bei Google, sondern auch ein Technikprophet. Er hat öffentlich darauf gewettet, dass spätestens im Jahr 2029 erstmals Computer den so genannten Turingtest bestehen und somit in punkto Intelligenz nicht mehr von Menschen zu unterscheiden sein werden. Ab dieser »Singularität« beginnt für Kurzweil und seine Adepten die Ära des Transhumanismus: Maschinen übernehmen die Führung der Evolution, die sich danach unvorstellbar rasend beschleunigen wird.

In seinem neuen Buch »How to Create a Mind« (Wie man einen Geist schafft) nimmt Kurzweil die von ihm prognostizierte Singularität quasi schon vorweg, indem er kühn behauptet, er habe das Geheimnis des menschlichen Denkens enthüllt. Das Gehirn funktioniert wie Spracherkennungsprogramme: Lernfähige Algorithmen, so genannte verborgene hierarchische Markow-Modelle, seien auch in unserer Hirnrinde am Werk, wenn wir ein Gesicht oder ein Wort erkennen.

Der prominente Neurowissenschaftler Christof Koch hält davon gar nichts. Da Kurzweil von Hirnanatomie nichts verstehe, mache er sich mit seinem Anspruch, das Geheimnis des Denkens zu offenbaren, eher zum Narren als zum Propheten. Mathematiker und Ingenieure neigten eben dazu, das Gehirn mit einem Computer zu verwechseln, meint Koch. Dabei seien Neurowissenschaftler auch nach Jahrzehnten nicht einmal fähig, das Zusammenwirken der 302 Nervenzellen des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans* im Modell zu simulieren (*Science* 339, S. 759, 2013).

Mit *C. elegans* beschäftigt sich die amerikanische Neurobiologin Cornelia Bargmann seit 25 Jahren. Sie will an diesem primitiven Modell ergründen, welche Mechanismen dem Verhalten von Organismen zu Grunde liegen. Doch sie sucht die Antwort nicht in der Verdrahtung der 302 Neurone des Fadenwurms, sondern in deren biochemischer Steuerung durch Hormone (*Nature* 494, S. 296, 2013).

Das Verhalten jedes Lebewesens wird laut Bargmann von denselben Grundprinzipien beherrscht: Hunger, Furcht und Vermehrung. Letztere kommt beim Fadenwurm aufs tragikomischste durcheinander, wenn durch Mutation eines bestimmten Gens der von Bargmanns Team entdeckte Botenstoff Nematocin fehlt. Das Männchen windet sich dann orientierungslos um den Sexualpartner und torkelt schließlich un verrichteter Dinge von dannen.

Nematocin erweist sich als eng verwandt mit dem Oxytozin – jenem Hormon, das bei höheren Tieren für die Steuerung des Sozial- und Sexualverhaltens wichtig ist. Bargmann findet das bemerkenswert: Von Wurm bis Mensch werden vergleichbare Verhaltensweisen trotz höchst unterschiedlicher Komplexität offenbar durch fast identische Botenstoffe gesteuert. Sie haben quasi die Oberaufsicht über die neuronalen Module; Bergmann bezweifelt darum, dass bloße Netzwerkmodelle ausreichen, um höhere Nerventätigkeiten zu erklären.

Angesichts solcher Befunde halte ich es für ausgeschlossen, dass der Weg zu Kurzweils Singularität nur mit Drähten und Strömen, Computerbefehlen und Netzdiagrammen gepflastert sein wird. Das Leben ist eine feuchte, chemische Angelegenheit, und auch das Denken kommt nicht ohne die biochemischen Botschaften der Neurotransmitter aus, die an den Schaltstellen zwischen den Neuronen ihre Wirkung entfalten. Sie erst scheinen die komplexen Phänomene zu ermöglichen, die wir an Tieren als gezieltes Verhalten beobachten und in uns als unterschiedliche Stimmung erleben.



Michael Springer

negativ geladene Aminosäure Glutamat. Tatsächlich verstärkte das den Effekt. Als besonders effektiv erwies sich das Hinzufügen von zwei dieser Aminosäuren zusätzlich zu den beiden Glutamatresten, über die das Hüllprotein von Haus aus verfügt.

Gestapelte Virenschichten zwischen Goldelektroden

Anschließend stapelten die Forscher mehrere Schichten des Virenfilms übereinander und erreichten bei 20 davon – das entspricht einer Filmdicke von gut 0,1 Mikrometer – eine Sättigung des piezoelektrischen Effekts. Dann war die Stromausbeute bei Ausübung von Druck optimal.

Etwa ein Quadratzentimeter des Films wurde zwischen zwei Goldelektroden und – zur mechanischen Stabilisierung – zwischen zwei Silikonmatrizen eingebettet. Unter Druck erzeugten die Phagen genug Strom, um die Ziffer 1 auf einem LCD-Display aufleuchten zu lassen. Die Spannung entsprach knapp 0,4 Volt, also rund einem Viertel der Spannung einer handelsüblichen AA-Batterie.

Der Vorteil des Phagengenerators liegt vor allem in seiner Umweltfreundlichkeit. Denn viele piezoelektrische Materialien sind giftig oder benötigen toxische Vorstufen für die Herstellung. Auch sind die Fertigungsprozesse häufig aufwändig und an hohe Temperaturen oder Drücke geknüpft.

Der Phage M13 dagegen lässt sich in kürzester Zeit ohne große Kosten biotechnisch millionenfach vermehren. Nun wollen Lee und seine Kollegen die Energieproduktion weiter verbessern, beispielsweise durch Kombination mit anderen Viren, die über Molekülstrukturen mit piezoelektrischen Eigenschaften verfügen. Auf lange Sicht können sie sich vorstellen, dass man die briefmarkengroßen Generatoren etwa in Schuhsohlen einsetzt, um so beim Gehen beispielsweise das Handy oder den MP3-Player aufzuladen.

Daniela Zeibig ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hochqualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.org

Wege zum Minigehirn

Viele nur millimetergroße Tiere zeigen ein überraschend komplexes, vielfältiges Verhalten. Die Leistungsfähigkeit ihrer winzigen Gehirne ist das Produkt einer langen evolutionären Optimierung. Dabei schreckten manche Arten nicht einmal davor zurück, die Zellkerne aus ihren Neuronen hinauszuerwerfen.

Von William G. Eberhard, William T. Wcislo und Adelheid Stahnke

Je kleiner eine Art, umso größer ist das Gehirn im Verhältnis zum Körper. Diesem Prinzip gehorchen sogar noch die winzigsten Insekten und Spinnen. Der Schweizer Arzt und Naturforscher Albrecht von Haller (1708–1777) beobachtete die später nach ihm benannte Regel allerdings bei den Wirbeltieren. Er bemerkte aber auch schon, dass die Größenbeziehung nur innerhalb einzelner Tierklassen oder näher verwandter Arten zutrifft, also innerhalb von taxonomischen Einheiten.

Denn zwei gleich große Organismen aus ganz verschiedenen Tiergruppen müssen durchaus nicht gleich große Gehirne besitzen. Jedes Taxon richtet sich gewissermaßen nach einem eigenen Grundwert. Für die zusammengehörigen Arten ergibt sich dann aus den Relationen zwischen Körper- und Hirngröße jeweils eine »allometrische« Gerade. Diese Linien für die verschiedenen Gruppen liegen zueinander versetzt (siehe Bild S. 26): manche sind gegen andere mehr nach links beziehungsweise nach rechts verschoben.

Bisher haben Biologen für die hallersche Regel keine wirklich zufrieden stellenden Erklärungen gefunden – also dafür, dass die Hirngröße relativ zunimmt, wenn Tiere schrumpfen. Noch weniger verstehen sie das Phänomen der vonein-

ander abweichenden allometrischen Linien im Tierreich. Wieso konnten so viele Evolutionslinien der wirbellosen Tiere deutlich kleinere Gehirne erfinden, als es ihrer Herkunft entsprach? Neuere Studien an ihnen haben manche früheren Auffassungen widerlegt – und zugleich neue Fragen aufgeworfen.

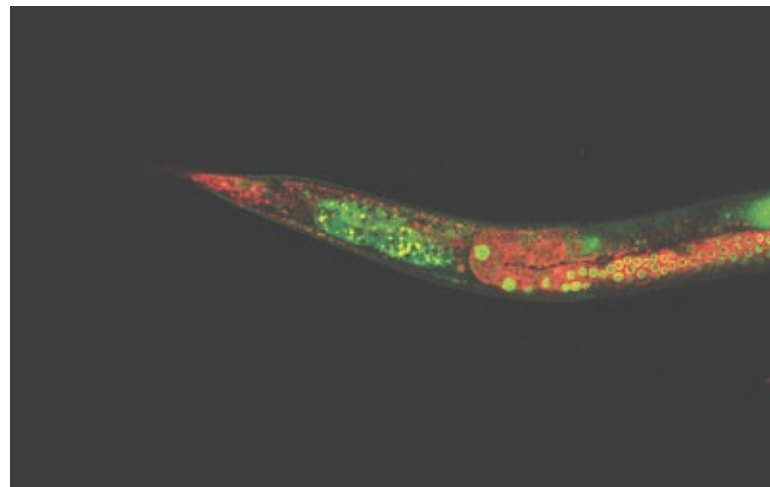
Diese Untersuchungen wecken den Verdacht, dass die unterschiedlichen Zentralnervensysteme des Tierreichs in mancher Hinsicht weniger gleichartig funktionieren als bisher geglaubt. Winzlinge mit einem relativen Riesenhirn sind schon aus energetischen Gründen anderen Zwängen ausgesetzt als größere Arten. Deswegen müssen sie Kompromisse schließen und Einsparungen machen oder auch neue Wege finden – nur wo und wie und mit welchen Folgen für Lebensweise und Verhalten?

Die meisten Forscher haben sich bisher eher von der Faszination leiten lassen, die von der Größenzunahme von Gehirnen in der Evolution ausgeht – vor allem natürlich, weil sie sich für die Entwicklung von Intelligenz und anderen geistigen Leistungen interessieren. Umgekehrte Prozesse fanden kaum Beachtung. Doch auch millimeterkleine Zwerge unter den Würmern oder Gliederfüßern finden sich in ih-

AUF EINEN BLICK

IM REICH DER ALLERKLEINSTEN

- 1** Sehr kleine Tiere haben auch **winzige Gehirne**. Trotzdem erbringen sie teils erstaunliche **Verhaltensleistungen**.
- 2** Besondere Anpassungen ermöglichen dies: Mikroskopisch kleine parasitische Wespen etwa lassen ihr **Hirn schrumpfen**, indem sie die Kerne der meisten ihrer wenigen Nervenzellen hinauswerfen. Andere Tiere verzichten auf einige Muskeln oder verkleinern Organe – so dass das Hirn im Körper Platz findet.
- 3** Die **Leistungsfähigkeit** von Minigehirnen mit vergleichsweise wenigen Neuronen haben Forscher bisher unterschätzt. Sogar Fadenwürmer mit ihren gerade einmal 302 Neuronen können lernen. Millimetergroße Spinnen bauen ebenso exakte Netze wie viel größere Verwandte.



rer Umwelt zurecht, äußern vielseitiges, durchaus flexibles Verhalten und pflanzen sich erfolgreich fort. Sogar manche nur staubkorngroßen Jugendstadien leben selbstständig.

Zunächst: Wie bringt ein kleiner Körper ein vergleichsweise großes Gehirn überhaupt unter? In Extremfällen macht die Hirnmasse annähernd 16 Prozent der Körpermasse aus. Bei Wirbeltieren liegt das Gehirn in der Schädelkapsel. Sehr kleine Salamander oder Fische geben ihm mehr Raum, indem sie einige der entsprechenden Knochen verkleinern oder ganz weggelassen haben. Insekten und Spinnen kapseln das Gehirn nicht ein, besitzen aber ein festes Außenskelett. Bei winzigen

erwachsenen Spinnen sowie den noch sehr kleinen Jungspinnen größerer Arten erstreckt sich die Hirnmasse oft bis weit in den dann deutlich ausgebuchteten Brustbereich. Mitunter, wie auch bei einigen Milben, reicht sie sogar bis in die Beine. Es gibt staubkorngroße Jungspinnen, deren Kopfbruststück zu 80 Prozent von Hirn ausgefüllt ist. Auch einige kleine Käfer verlagern ihr Gehirn teilweise, manche sogar ganz, aus dem Kopf in den Brustraum oder selbst in den Hinterleib. Bei manchen anderen winzigen Insekten schmiegt es sich in seiner Form eng an Muskeln und andere Strukturen an.

Zwangsläufig schränken solche Verhältnisse den Platz für die übrigen Organe ein. So weist ein kleiner Faulholzkäfer der Gattung *Sericoderus* in Kopf und Brust weniger Muskeln auf als größere verwandte Arten, und junge Springspinnen der Art *Phidippus clarus* besitzen einen geschrumpften Verdauungstrakt. Vermutlich haben solche Anpassungen, die das Überleben erschweren, Grenzen – und damit auch die Miniaturisierung von Tieren.

Ein Ausweg wäre, das Gehirn selbst zu verkleinern: etwa durch weniger oder kleinere Nervenzellen oder weniger beziehungsweise kürzere Verbindungen für neuronale Verschaltungen. Nach bisherigem Wissen besitzen die Winzlin-

ge eines Taxons gewöhnlich weniger Neurone als die größeren Arten. Dass sie die Zellen verkleinern, tritt offenbar nur begrenzt auf. Beliebig lassen sich Nervenzellen ohnehin nicht schrumpfen. Axone – die langen Ausläufer, über die Nervenzellen Signale aussenden – dürfen wohl nicht dünner als ungefähr 0,1 Mikrometer (tausendstel Millimeter) sein. Die Signale würden sonst im »Rauschen« der sie weiterleitenden Membranen verschwimmen (siehe auch SdW 5/2012, S. 26).

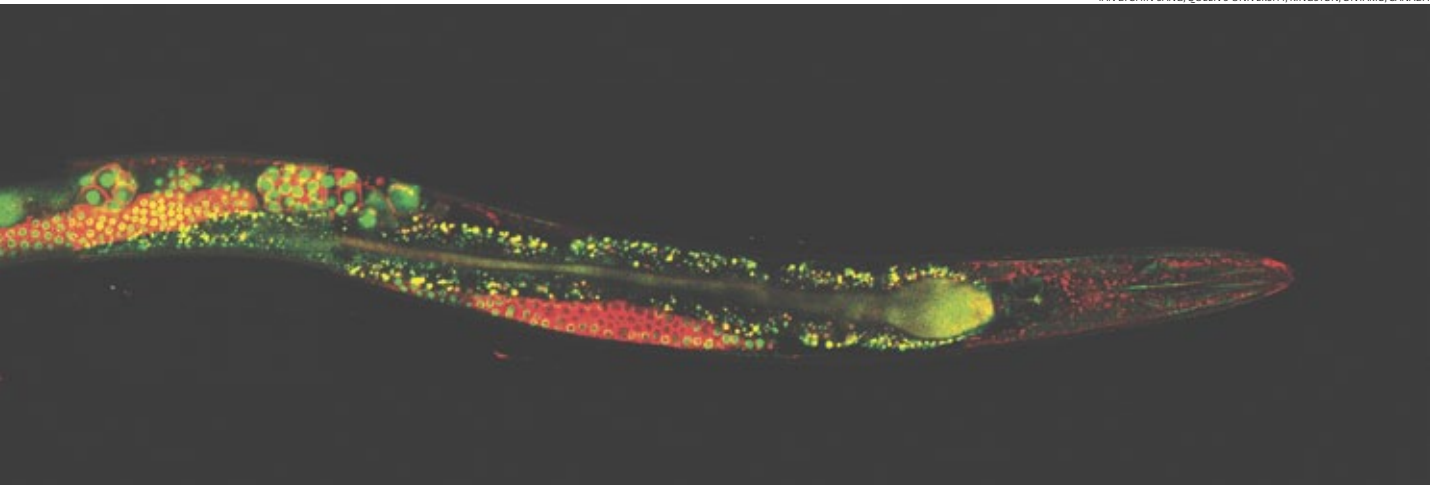
»Bei winzigen Spinnen erstreckt sich die Hirnmasse oft in den Brustbereich oder sogar bis in die Beine«

Die unterste Größe eines Nervenzellkörpers gibt der Zellkern vor, dessen Mindestmaße wiederum von der Genomgröße abhängen. Bei den winzigsten Insekten

kann der Kern bis zu 90 Prozent des Zellkörpers einnehmen. Bis vor Kurzem wusste jedoch niemand, ob manche Wirbellose zur Platzersparnis die Erbmasse dichter packen beziehungsweise auf einige Chromosomen, ja sogar den Zellkern selbst verzichten. Doch Letzteres entdeckte kürzlich Alexy Polilov von der Lomonossow-Universität Moskau bei parasitischen Wespen der Gattung *Megaphragma*: Diese kaum 0,2 Millimeter langen Insekten haben als erwachsene Tiere fast nur noch kernlose Neurone. Im Zentralnervensystem ihrer Puppen zählte der russische Forscher noch rund 7400 Zellkerne, aber die meisten davon lösen sich kurz vor dem Schlupf auf. Der erwachsenen Wespe bleiben insgesamt nur etwa 350 Neurone mit Zellkern, davon liegen bis zu zwei Drittel im Gehirn. Die übrigen rund 7000 Neurone arbeiten ohne Kern. Das Hirnvolumen schrumpft dadurch auf fast die Hälfte.

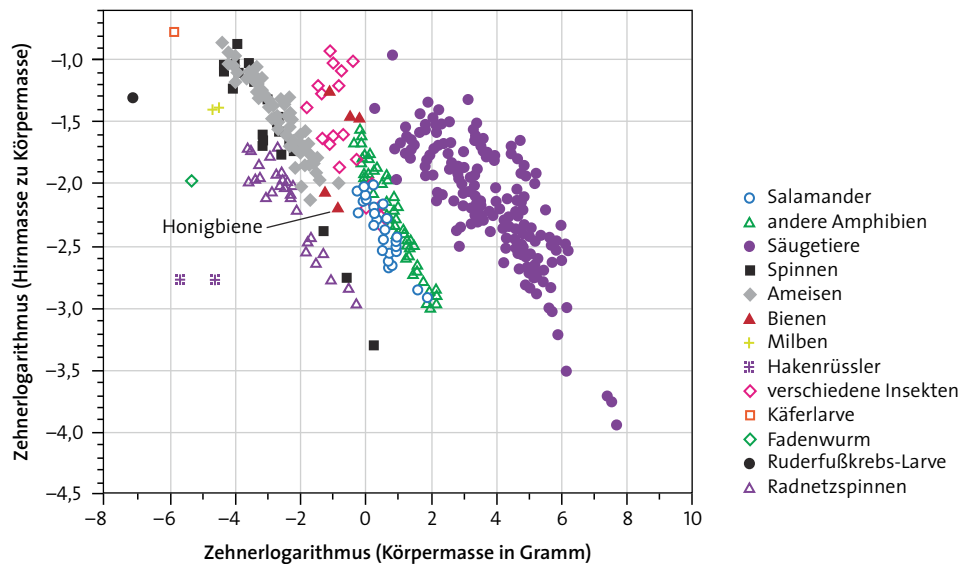
Der Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* ist gerade einmal rund einen Millimeter lang, besitzt nur 302 Nervenzellen und beherrscht doch ein vielseitiges Verhaltensrepertoire. Auf dieser Fluoreszenzaufnahme liegt der Kopf des Wurms rechts.

IAN D. CHIN-SANG, QUEEN'S UNIVERSITY, KINGSTON, ONTARIO, CANADA



Hirngröße folgt eigenen Regeln

Kleinere Tiere haben verhältnismäßig große Gehirne, größere Tiere relativ kleine. Außerdem richten sich die einzelnen Tiergruppen aber nach eigenen Grundbeziehungen aus. Hieraus ergeben sich für die verschiedenen Taxa getrennte allometrische Geraden. Bei der hier gewählten Darstellungsweise liegen sie zueinander nach links beziehungsweise rechts versetzt.



AMERICAN SCIENTIST, NACH STRIEDER, G.F.: PRINCIPLES OF BRAIN EVOLUTION 2005, UND AUS QUELLEN IN EBERHARD, W.G., WCISLO, W.T.: GRADE CHANGES IN BRAIN-BODY ALLOMETRY. IN: ADVANCES IN INSECT PHYSIOLOGY 40, S. 155–214, 2011

Ohnehin sind 7000 Neurone für ein Insekt sehr wenig. Stubenfliegen besitzen 340 000 Stück, und eine etwas größere verwandte Art der genannten Wespen trägt allein im Oberschlundganglion, einem wesentlichen Hirnteil, 37 000 Zellen. Die Zwergwespe scheint ihre karge Ausstattung allerdings nicht anzufechten. Zwar wissen wir noch nicht, mit welchen besonderen Mechanismen diese Miniwespen den Mangel wettmachen, aber sie weisen alles wesentliche Verhalten auf: zum Beispiel herumfliegen, sich paaren oder passende Wirte für die Eiablage finden.

Nervengewebe sind energetisch gesehen Spritfresser. Das Gehirn des Menschen, nur gut zwei Prozent seiner Körpermasse, beansprucht über 15 Prozent der vom Grundstoffwechsel bereitgestellten Energie. Kleinere Gehirne sind sogar pro Volumen für gleiche Leistungen noch aufwändiger zu unterhalten als größere, weil die Informationsverarbeitung verdichtet abläuft. Vermutlich existiert deswegen für kleine Arten sowie die kleineren Arten innerhalb einer Tiergruppe ein höherer Selektionsdruck auf Energieeffizienz neuronaler Leistungen.

Um Energie einzusparen, könnten Winzlinge ihre Hirnmasse schrumpfen, indem sie ihre Verhaltenskapazitäten einschränken. So ein Verzicht wäre nicht erforderlich, wenn die Tiere stattdessen den Aufbau ihres Nervensystems ökonomisierten. In der Realität dürfte beides ineinandergreifen.

Für mehr Ökonomie im Energiebedarf bestehen im Prinzip eine Menge Möglichkeiten. Wie häufig winzige wirbellose Tiere einzelne dieser Wege nutzen, wissen wir aber noch nicht. Offensichtlich verlagern Wirbellose aber generell mehr von der Informationsverarbeitung auf ihre Sinnesorgane als Wirbeltiere, so dass sie damit bereits Hirnmasse einsparen, ganz abgesehen davon, dass diese Sinnesorgane Reize von vornherein sehr spezifisch filtern.

Ausgeklügelte architektonische Sparmaßnahmen im Nervensystem verwenden vor allem die Fadenwürmer (Nematoden), denen nur eine sehr kleine, streng abgezählte Anzahl von Zellen zur Verfügung steht. Sie können zum Beispiel über einen einzigen Nervenzellkontakt gleichzeitig mehrere Muskeln aktivieren. Und sie verstehen sich darauf, ein und dieselbe Nervenzelle für mehrere Aufgaben einzusetzen: Dann vermag dasselbe Neuron sowohl Sinnesinformationen zu empfangen als auch Befehle an die Muskulatur zu geben. Strukturell geradezu vorbildlich sind bei ihnen die »Verbindungskabel«, also die Nervenzellausläufer, möglichst kurz ausgelegt (siehe Bild rechte Seite).

Keine lange Leitung im Gehirn

Allgemein ist die Signalübermittlung über ganz kurze Distanzen kostengünstiger als die über lange Leitungen, schon weil sie physiologisch anders ablaufen kann. Diesen Effekt dürften viele Winzlinge noch zusätzlich ausreizen, indem sie zwecks kürzerer Wege Neurone und deren Schaltstellen verlagern. Oft kommen kleinere Hirne zudem mit weniger zwischengeschalteten Neuronen aus, die Informationen von einer Stelle zur anderen übermitteln, etwa vom Ort des Sinneseingangs zu einer Befehlszentrale. Oder ganze Schaltkreise erfüllen zu verschiedenen Zeiten andere Zwecke, je nachdem, welches chemische Milieu an Signalstoffen dort aktuell herrscht. Dass im Zentralnervensystem winziger Insekten Nervenknotten (Ganglien) mehr verschmelzen als bei größeren Arten und ihre Gehirne weniger gegliedert wirken, mag gleichfalls eine Effizienzmaßnahme sein.

Schon dem spanischen Mediziner und Histologen Santiago Ramón y Cajal (1852–1934) war aufgefallen, wie viel kunstvoller ein Insektengehirn wirkt, wie viel klarer und stärker strukturiert die Zellen und ihre Verbindungen unter dem Mi-

kroskop erscheinen im Vergleich zu den Gehirnen von Wirbeltieren mit ihren unübersichtlich vielen Zellen, Zellausläufern und dicken Verbindungssträngen. Der Spanier war ein Pionier der Neuronenlehre (der Einsicht, dass das Nervensystem aus einzelnen Zellen und deren Fortsätzen besteht) und erhielt mit anderen zusammen 1906 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin. Die Neuroanatomie von Insekten verglich er mit der Feinmechanik von Taschenuhren, die von Wirbeltieren hingegen mit dem eher grobschlächtigen Innenleben alter Standuhren. Tatsächlich haben zumindest bei manchen Wirbellosen die kleineren Neurone auch kürzere Empfängerantennen (Dendriten) und sind wohl gleichfalls weniger komplex und damit übersichtlicher gestaltet. Was solche Unterschiede funktionell besagen, ist noch nicht wirklich klar. Vermutlich weisen sie aber auf wesentliche Eigenschaften hin, in denen sich die verschiedenen Nervensysteme im Tierreich voneinander abheben.

Darüber, ob manche Winzlinge ihr Verhalten zwecks Energieeinsparung einschränken, wissen wir noch recht wenig. Es könnte sich lohnen, zu untersuchen, ob sie beispielsweise Aktionen stärker in getrennte, einfache Verhaltensschritte untergliedern, die nacheinander ablaufen und aufeinander aufbauen, ähnlich wie Ingenieure Roboter programmieren: Die komplexe Aufgabe, ein irgendwo im Raum befindliches Objekt zu greifen, ist leichter umsetzbar, wenn sich die Maschine zunächst in dessen Richtung wendet, sich ihm dann bis auf einen bestimmten Abstand nähert – und erst im letzten Schritt aus der definierten Distanz zufasst.

Vergleichende Hirnforschungen zu Verhaltensleistungen haben sich bisher vorwiegend mit Hintergründen für Größenzunahme und steigende Leistungsfähigkeit befasst, dagegen wenig mit umgekehrten Entwicklungen. In beiden Evolutionszusammenhängen geht es um die grundlegenden Unterschiede der Hirn-Körper-Größenrelationen, also der verschobenen allometrischen Geraden, zwischen den Tiergruppen (Bild linke Seite). Viele Wirbellose sind geradezu Meister der Miniaturisierung: Sie mussten Lösungen dafür finden, ihre Gehirne ohne allzu viele Einbußen dem winzi-

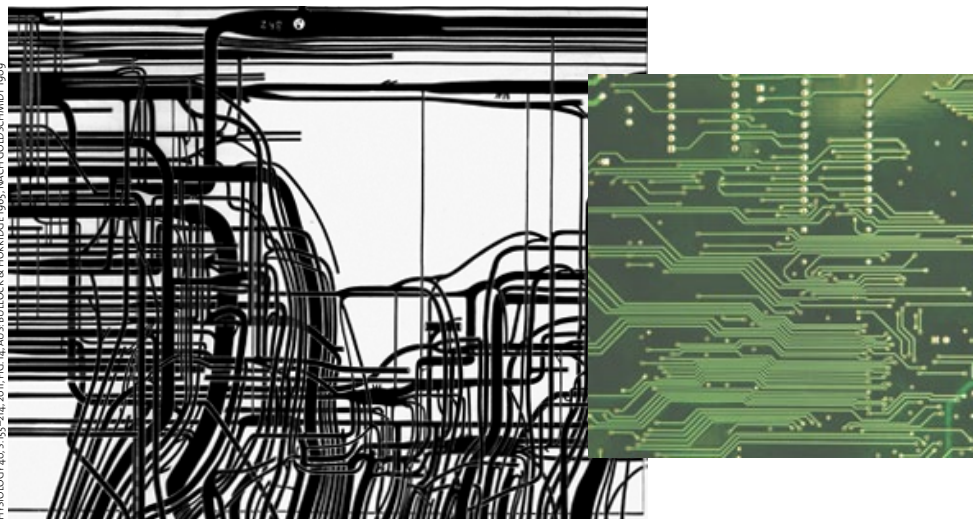
gen Körper anzupassen. Vielleicht ließ erst ein Sprung nach unten in der Hirngröße neue Evolutionslinien mit sehr kleinen Arten entstehen. Das ging manchmal anscheinend mit grundlegenden Abwandlungen im Aufbau des Nervensystems und seiner neuronalen Mechanismen einher.

Sparsamkeit versus Überfluss

Eindrucksvoll ist insbesondere der riesige Unterschied zwischen den Fadenwürmern und den Wirbeltieren – die auch ganz verschiedenen evolutionären Wurzeln entsprungen. Erstere sind mit Nervenzellen äußerst knauserig ausgestattet, letztere schwelgen in einem riesigen Angebot. Der einen Millimeter lange Wurm *Caenorhabditis elegans* besitzt erwachsen genau 302 Nervenzellen, manche anderen Nematoden haben noch weniger. Und jedes Neuron dieses Wurms bildet nur um die 25 Synapsen, also Kontakte mit anderen Nervenzellen. Diese wenigen Verschaltungen sind nach recht einfachen Mustern angelegt und gleichen sich von Tier zu Tier frappierend – denn die Lage und Funktion der einzelnen Zellen und ihrer Verbindungen sind genau vorgegeben. Der große Nachteil: Für einen Nematoden kann der Verlust einer einzigen Nervenzelle eine Katastrophe bedeuten. Unter Umständen fallen dann ganze Verhaltensbereiche aus.

Der Kontrast zum Hirn des Menschen könnte nicht dramatischer sein. Es verfügt über rund 100 Milliarden Nervenzellen. Jedes Neuron bildet ungeheuer viele Synapsen – die Pyramidenzellen in der Großhirnrinde schätzungsweise je 10 000. Das ergibt eine astronomische Anzahl an Kontakten und möglichen Schaltkreisen. Beim Menschen sind die Aktivitäten von großen Neuronengruppen entscheidend, nicht die einzelner Zellen. Da macht es nichts, wenn ein Neuron versagt. Sogar größere Ausfälle lassen sich unter Umständen kompensieren.

Schon das Ausreifen des Gehirns geschieht bei Fadenwürmern und Wirbeltieren nach völlig anderen Regeln. Bei Letzteren herrscht in der Jugend zunächst ein großes Überangebot an Neuronen. Nicht gebrauchte Zellen und Verbindungen werden während des Heranreifens in beträchtlichem



EBERHARD, M.C.; WIGSLO, W.F.: GRADE CHANGES IN BRAIN-BODY ALLOMETRY. IN: ADVANCES IN INSECT PHYSIOLOGY 40, S. 237-274, 2011. FIG. 4.1.2.5. ILLUSTRATION COURTESY OF WIGSLO, W.F. (2011). DOI: 10.1016/B978-0-12-385199-9.00015-9

ISTOCKPHOTO / STAS FERDY

Nach einem völlig anderen Prinzip als in einem Wirbeltiergehirn ordnen sich die neuronalen Leitungen beim Pferdespulwurm (linkes Bild). Das Arrangement erinnert an einen Computerchip (rechtes Bild). Zu sehen sind die Verbindungen von 70 der 134 Fasern im ringförmigen »Gehirn« des Fadenwurms nahe der Stelle, wo der bauchwärtige Nervenstrang, das Bauchmark, entspringt.



FOTOLIA / VALERY KIRSANDY

Honigbienen besitzen ein großes und flexibles Verhaltensrepertoire. Dazu gehört, einen passenden Ort für ein neues Nest zu finden und dieses zu konstruieren. Ebenso legen sie unterschiedliche Waben für die männliche und weibliche Brut, für Honig sowie für Vorräte an. Vor dem Stock bewachen sie den Eingang und kontrollieren zurückkehrende Arbeiterinnen.

Ausmaß eliminiert. So verschwinden in der Netzhaut (einer Ausstülpung des Gehirns, die bereits komplizierte Verrechnungen durchführt) von Primaten rund zwei Drittel der zunächst vorhandenen retinalen Ganglienzellen. Katzen verlieren sogar 80 Prozent davon wieder. Im krassen Gegensatz dazu sondert *C. elegans* lediglich 8 seiner anfangs 310 Neurone aus – noch dazu immer genau die gleichen. Dafür, dass ein Gebrauch oder Nichtgebrauch dies mitbestimmen würde, gibt es keinerlei Anhaltspunkte.

Trotz solcher Riesenunterschiede spricht wenig für die verbreitete Ansicht, das Verhalten »niederer« Tierklassen sei naturgemäß einfacher, also die »Höhe« von Verhalten steige zwangsläufig mit dem Organisationsgrad ihres Gehirns. So gibt es winzige Salamander, die nicht größer als Honigbienen sind. Betrachtet man die allometrischen Geraden zu Hirn- und Körpergröße, gehören die Bienen in eine »tiefere« Gruppe. Dabei leisten sie Erstaunliches: Sie orientieren sich an Landmarken und am von der Tageszeit abhängigen pola-

risierten Sonnenlicht; sie lernen komplexe Muster und können dazu verschiedene Sinne einbeziehen; sie lernen zwischen gleich und verschieden, zwischen oben und unten zu unterscheiden; sie bauen hochorganisierte Nester und richten ihr Verhalten nach dem aktuellen Bedarf im Stock aus; und nicht zuletzt beherrschen sie die »Biensprache«, den Schwänzeltanz, mit dem sie Stockgenossinnen von guten Futterquellen erzählen – einschließlich Richtungs- und Entfernungsangabe.

Selbst das Verhaltensrepertoire und die Umweltreaktionen von Fadenwürmern mit ihren überschaubaren Neuronen sind nicht grundlegend verschieden von denen vieler reicher ausgestatteter Tiere. Sie bemerken, wenn sie ein Objekt berühren, und registrieren, ob es hart ist oder weich. Sie nehmen die Lichtverhältnisse und die Temperatur, die Sauerstoffkonzentration und den Säuregrad des Milieus wahr, und neben Pheromonen – Signalstoffen von Artgenossen – erkennen sie viele weitere Substanzen und deren Konzentration. Aus solchen Informationen schließen sie zum Beispiel auf Geschlecht und Anzahl von Artgenossen und reagieren passend. Sie beherrschen verschiedene Bewegungen des Schwimmens und Kriechens, sie können umkehren, die Richtung abändern oder eine Aktion nach einiger Zeit wieder einstellen. Sie sind fähig, sich nach einem kleinflächigen Reiz zu orientieren und entweder gezielt dorthin oder davon wegzuschwimmen. Zu ihrem Verhaltensrepertoire gehören Fresen – mit Nahrungssuche, Verschlingen und rhythmischen Schluckbewegungen – und situationsangepasstes Ausscheiden der Verdauungsreste. Die Miniwürmer finden Paarungspartner, kopulieren und legen Eier. Sie sind sogar lernfähig, das heißt verhalten sich erfahrungsabhängig.

Anhand welcher Werte sollte man die Fähigkeiten von ganz verschiedenen Tieren vergleichen? Woran lässt sich etwa Intelligenz sauber messen? Manche Forscher nehmen als Maß für geistige Komplexität den Umfang des Verhal-



tensrepertoires einer Art. Die Klassifizierung von Verhaltensweisen ist allerdings subjektiv: Mancher sieht viele einzelne Elemente, wo ein anderer sie zusammenfasst. Außerdem beruht der Vergleich so gewonnener Zahlen auf unbewiesenen Annahmen. Danach müsste jede Verhaltensweise das Nervensystem gleich stark beanspruchen, was sicherlich nicht zutrifft. Dasselbe würde für funktionell gleichwertiges Verhalten gelten. Und sehr seltene Verhaltensweisen, die deswegen oft gar nicht registriert werden, würden als unwichtig für die Gehirnevolution abgetan. Solche Zahlenvergleiche implizieren auch, dass die verschiedenen Tiere ein als gleich betrachtetes Verhalten ähnlich schnell und genau ausführen. Umwelteinflüsse auf die Ausführung vernachlässigen sie ohnehin. Überdies dürften für Forschungszwecke gehaltene Tiere unter den künstlichen Lebensbedingungen in der Regel nicht ihr volles Verhaltensrepertoire ausspielen.

Wie misst man Verhaltensleistungen?

Wegen dieser Schwierigkeiten ersannen Wissenschaftler andere Vergleichsebenen. Sie erfassen zum Beispiel die Fehlerquote bei erforderlichen Entscheidungen oder die Genauigkeit von situationsangepasstem Verhalten sowie, ob ein Tier das gleiche Verhalten jedes Mal gleich präzise hervorbringt. Für kleinere Tiere wären hierbei Einbußen denkbar, unter anderem weil sie weniger Sinnesrezeptoren besitzen und dadurch nicht so differenziert über ihre Umwelt informiert sind. Zudem könnte bei ihnen die neuronale Verarbeitung unter einer verminderten Anzahl von Verschaltungen leiden. Auch Rückmeldungen ans Gehirn über die Genauigkeit des Verhaltens dürften auf Grund von weniger Sensoren unpräziser sein – ganz abgesehen davon, dass Signale bei solchen Winzlingen neurophysiologisch leichter verrauschen könnten.

Nach unseren eigenen Studien finden sich dergleichen Einbußen zumindest nicht bei den von uns untersuchten winzigen Radnetzspinnen – jedenfalls nicht für deren Netzbau. Manche dieser Zwergarten, die ein im Verhältnis zu ihrem Körper auffallend großes Gehirn besitzen, dürften an Kleinheit etwa die Untergrenze für Spinnen darstellen. Sie schaffen es dennoch, ihre Fangnetze mit derselben Präzision zu konstruieren wie wesentlich größere verwandte Arten (siehe Bilder rechts). Dabei orientieren sie sich genauso an den örtlichen Bedingungen wie die größeren Spezies und verfügen, wenn nötig, auch über Alternativen. Weitere gleich gründliche Vergleichsstudien gibt es für die kleinsten wirbellosen Tiere bisher leider nicht. Aufschlussreich wären insbesondere Untersuchungen zu den Lern- und Gedächtnisleistungen.

Eigentlich sollte man bei Verhaltensvergleichen zwischen Arten und Taxa nicht nur die gesamten Gehirne betrachten, sondern vor allem jeweils die für einen Akt direkten Abschnitte. Fledermäuse etwa weisen vergleichsweise riesige Regionen zur Verarbeitung von Hörreizen auf: Die subkortikalen Bereiche dafür sind relativ gesehen 100-mal größer als beim Menschen.



Selbst kleinste Radnetzspinnen bauen perfekte Netze. Die winzige *Anapisona*-Art (unten) produziert alle wesentlichen Details ebenso exakt wie die viel größere *Allocyclosa*-Art (oben), ungeachtet ihres deutlich kleineren Gehirns.

Für detaillierte vergleichende funktionale Untersuchungen durch Verhaltens- und Hirnexperten gelten für Wirbellose leider bisher ähnliche Einschränkungen wie für Wirbeltiere. Nach einer neueren Zählung verwenden die meisten Neurowissenschaftler nur ganz wenige und immer dieselben Tierarten. Rund 75 Prozent der Forschungen erfolgten an nur drei Modellarten, und zwar Säugetieren: der Labormaus, der Laborratte – und am Menschen. Forscher, die das Verhalten von Spezies vergleichen, müssen dagegen eine wesentlich breitere Artenpalette betrachten. Angesichts von schät-



DIRK VAN DER MADE / CC-BY-SA-3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENCES/CC-BY-SA/3.0/)

Weibchen der Goldenen Seidenspinne erreichen bis zu vier Zentimeter Körperlänge. Die Männchen (Tier oben) sind dagegen Zwerge. Noch viel winziger sind die Jungspinnen, die trotzdem schon selbst Netze bauen und Beute fangen.

Noch fehlen eingehende Studien darüber, inwiefern mit dem Aufkommen neuer Evolutionslinien mit Zwergarten Energie sparende Neuerungen des Gehirns einhergingen, so dass sich die Hirn-Körper-Relationen für diese Taxa nach »unten« verschoben. Sind die äußerst artenreichen Rüsselkäfer etwa ein gutes Beispiel hierfür? Sie stellen mit weltweit wohl über 60 000 Spezies rund 15 Prozent aller Käferarten, sind somit vermutlich die größte Käferfamilie überhaupt. Allein in Deutschland kommen fast 1000 Spezies vor. Diese kleinen Käfer besitzen im Vergleich zu anderen Insekten ungewöhnlich wenig Hirnmasse und sind ökologisch dennoch äußerst erfolgreich. Viele ihrer Arten messen wenig mehr als einen Millimeter. Hirn- und Verhaltensstudien an den aller kleinsten Tieren – und zwar an möglichst vielen verschiedenen – versprechen zu den erwähnten offenen Fragen neue Einsichten. Mehr Einblicke in die Evolutions- und ökologischen Zusammenhänge werden nicht nur erhellen, wieso manche Tiere so klein werden konnten, sondern auch, wie andere immer größer wurden. Die Hirnevolution dürfte jedenfalls in allen Fällen eine zentrale Rolle gespielt haben. ~

zungsweise 7,7 Millionen Tierspezies, die meisten davon Wirbellose, untersuchen sie aber immer noch einen verschwindend kleinen Bruchteil – viel zu wenig, um die Evolution von Gehirnen wirklich ergründen zu können.

Zu den kleinsten bisher bekannten Insekten gehören parasitische Wespen, die in Insekteneiern heranwachsen. Sie scheinen es auszunutzen, dass ihre Larven ein hochwertiges Nährstoffkonzentrat vorfinden und deswegen noch nicht besonders für Futtersuche gerüstet sein müssen, also anfangs mit sehr wenig Hirnmasse auskommen. Die eigenen Eier müssen darum kaum Energievorräte enthalten und dürfen äußerst winzig sein – wie dank dessen auch die Erwachsenen.

Womöglich loteten überhaupt oft die Jugendstadien die Evolutionsgrenzen der Miniaturisierung aus. Selbst der Nachwuchs von manchen viel größeren Arten ist anfangs oft extrem klein. Ausgewachsene Weibchen der amerikanischen Goldenen Seidenspinne *Nephila clavipes* wiegen rund zwei Gramm (Bild oben). Die frisch geschlüpften Jungspinnen bringen es auf nur 0,7 Milligramm und verstehen es doch, sich selbstständig zu behaupten und Fangnetze für winzigste Insekten zu bauen. Ihr Gehirn verursacht eine Ausbeulung an der Brust und reicht sogar bis in die Beine. Es ist anzunehmen, dass die besonderen ökologischen und energetischen Ansprüche des Nachwuchses sowie dessen physiologische Einschränkungen sich auch auf den Lebensraum und die Verbreitung der Erwachsenen auswirken, denn die Jungtiere oder Larven dürften vor allem auf Extrembedingungen und Mangelzeiten höchst empfindlich reagieren.

DIE AUTOREN



William G. Eberhard (links) und **William T. Wcislo** sind Forscher am Smithsonian Tropical Research Institute in Panama-City (Panama). Eberhard hat eine Biologieprofessur an der Universidad de Costa Rica in San José. Beide erforschen seit Jahrzehnten Insekten und andere

Arthropoden (Gliederfüßer) der Tropen. Adelheid Stahnke ist Redakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

QUELLEN

Eberhard, W.G.: Are Smaller Animals Behaviourally Limited? Lack of Clear Constraints in Miniature Spiders. In: *Animal Behaviour* 81, S. 813–823, 2011

Eberhard, W.G., Wcislo, W.T.: Grade Changes in Brain-Body Allometry: Morphological and Behavioural Correlates of Brain Size in Miniature Spiders, Insects, and other Invertebrates. In: *Advances in Insect Physiology* 40, S. 155–214, 2011

Manger, P.R. et al.: Is 21st Century Neuroscience too Focused on the Rat/Mouse Model of Brain Function and Dysfunction? In: *Frontiers in Neuroanatomy* 2, S. 1–7, November 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184758

© American Scientist
adaptiert und gekürzt nach American Scientist 100, S. 226–233, 2012

Deutschlands großes Reisemagazin gegen Fernweh.



5 Ausgaben
+ Geschenk
für nur 19,-€



NEU! 4-tlg. Reisetaschen-Set „Sahara“

Trolley mit 2 stabilen Rollen, Teleskop-Ziehgriff und vielen Innentaschen. Maße: ca. 57 x 30 x 26 cm.

Schulertasche mit verstellbarem Tragegurt und vielen Innenfächern. Maße: ca. 45 x 32,5 x 18,5 cm.

Kulturtasche mit Tragegriffen und Tragegurt. Maße: ca. 28 x 22,5 x 12 cm.

Kosmetikbeutel mit praktischer Netz-Innenaufteilung. Maße: ca. 22 x 14,5 x 6,5 cm.

Bitte ausfüllen, ausschneiden oder kopieren und gleich senden an:
abenteuer und reisen Aboservice, Postfach 1201, 61175 Karben oder per Fax an + 49(0)6187/90 568-29, per E-Mail: Aboservice@abenteuer-reisen.de

- ✦ Faszinierende Reportagen und grandiose Fotosessions
- ✦ Verlässliche echte Insider-Tipps
- ✦ Vor Ort überprüfte Adressen von Hotels und Restaurants
- ✦ Individuelle Städte-Touren, Traum-Reiseziele und Outdoor-Action
- ✦ Sie erhalten jeweils die kommenden 5 Ausgaben und sparen über 20%
- ✦ Weitere Angebote finden Sie unter: www.abenteuer-reisen.de/shop

Ja, ich bestelle 5 Ausgaben abenteuer und reisen.

5 Hefte zum Preis von nur 3,80 € statt 5,- € pro Ausgabe (Ausland nur 4,30 €/Schweiz nur 7,30 sfr) inkl. Zustellung und MwSt. **Ich spare über 20%**. Wenn ich abenteuer und reisen nicht mehr lesen möchte, teile ich das spätestens 6 Wochen vor Ablauf der Bezugszeit mit. Andernfalls verlängert sich das Halbjahres-Abo (5 Hefte) automatisch. Ich erhalte das Reisetaschen-Set „Sahara“ als Geschenk. Mein Geschenk kann ich auf jeden Fall behalten.

Vertrauensgarantie: Die Bestellung kann ich innerhalb von 14 Tagen ohne Begründung beim abenteuer und reisen Aboservice, Postfach 1201, 61175 Karben, widerrufen. Zur Fristwahrung genügt die rechtzeitige Absendung.

Name	Vorname

Straße	Hausnummer

PLZ	Ort

Datum	Unterschrift

Unheil durch nicht mehr teilungsfähige Zellen

Auch Zellen setzen sich mit fortschreitendem Alter zur Ruhe. Sie hören auf, sich zu teilen. Früher interpretierten Mediziner dies als sinnvolle Vorkehrung gegen Krebs. Nun aber stellt sich heraus, dass solche seneszenten Zellen schädliche Stoffe abgeben. Dadurch beschleunigen sie nicht nur den körperlichen Verfall, sondern begünstigen sogar die Entstehung von Krebs.

Von David Stipp

Ende 2011 berichteten Jan M. van Deursen und seine Kollegen an der Mayo Clinic in Rochester (Minnesota) über den gelungenen Versuch, Alterungsvorgänge bei Mäusen zu verlangsamen. Ihr Trick war, dafür zu sorgen, dass in den Tieren alle Zellen, die ihre Fähigkeit zur Teilung einbüßten und damit in den Zustand der Seneszenz übergangen, sofort zerstört wurden. Van Deursens Ergebnisse bedeuteten einen Wendepunkt in der Altersforschung; denn sie hauchten einer umstrittenen, schon mehr als ein halbes Jahrhundert alten Hypothese neues Leben ein. Demnach ist der Verlust der Teilungsfähigkeit von Zellen die Ursache für den allmählichen Verfall des Körpers im Alter.

Zum negativen Bild der zellulären Seneszenz passen auch jüngste Erkenntnisse über ihre Rolle bei der Entstehung von Krebs. Lange galt sie als Schutz davor, dass gealterte

Zellen, in denen sich mutmaßlich viele schädliche Mutationen angehäuft haben, unkontrolliert zu wuchern beginnen. Wie sich nun zeigte, fördern solche Zellen in mancher Hinsicht jedoch das Tumorstadium, indem sie ihre Nachbarn zur Teilung anregen.

Diesen neuen Erkenntnissen zufolge könnte ein verlangsamer Eintritt der Körperzellen in die Seneszenz unter Umständen helfen, Krebs und andere alterstypische Krankheiten hinauszuzögern. Zwar erscheint die Be-

Senescente Zellen, die ihre Teilungsfähigkeit verloren haben, lassen sich mit einem einfachen Farbttest erkennen: Bei Zusatz einer bestimmten Chemikalie verfärben sie sich blau.

AUF EINEN BLICK

WARUM WIR ALTERN

- 1** In den 1960er Jahren erkannten Forscher, dass Körperzellen nach einer gewissen Zeit aufhören, sich zu teilen. In dieser zellulären **Seneszenz** sahen Mediziner lange die eigentliche Ursache für das **Altern**, da sie das Regenerationsvermögen von Gewebe beeinträchtigt.
- 2** Als biologischer Sinn der Seneszenz galt, dass sie **Krebs** vorbeugt. Denn sie hindert Zellen, die im Lauf des Lebens mutmaßlich viele **Mutationen** angehäuft haben, an der unkontrollierten Vermehrung.
- 3** Wie sich inzwischen herausstellte, bleiben die meisten Zellen jedoch lange genug teilungsfähig, um auch im hohen Alter noch eine **Regeneration** von Gewebe zu ermöglichen.
- 4** Zudem fördern seneszente Zellen Krebs, statt ihn zu verhüten: Sie sondern Stoffe ab, die ihre Nachbarn schädigen und zur Teilung anregen sowie **Entzündungen** auslösen.
- 5** Wurden sie im Tierversuch eliminiert, verlangsamte das den Alterungsprozess und linderte altersbedingte **Gebrechen**.



seitigung seneszenter Zellen für Menschen in absehbarer Zeit nicht als realistische Option – erforderte sie bei den Mäusen des Mayo-Teams doch komplizierte genetische Eingriffe. Vielleicht führen einfachere Maßnahmen aber zum gleichen Ergebnis.

Altern als Preis für Schutz gegen Krebs?

Die Geschichte der Forschung über die zelluläre Seneszenz ist von Aufsehen erregenden Entdeckungen und spektakulären Kehrtwendungen geprägt. Der US-Gerontologe Leonard Hayflick erkannte schon 1961, dass menschliche Zellen nach rund 50 Teilungszyklen die Fähigkeit zur Vermehrung einbüßen. Auf diesen Mechanismus führte er letztlich die Alterung des gesamten Körpers zurück: Das Abschalten der Zellteilung mache es unmöglich, geschädigtes Gewebe zu erneuern. Laut Hayflick sind Zellen darauf programmiert, nach einer festen Anzahl von Replikationszyklen in den Ruhezustand überzugehen, damit sie sich nicht unkontrolliert vermehren und krebsartig wuchern können. Den Beitrag der zellulären Seneszenz zum Altern hielt der Forscher für den Preis, den wir dafür bezahlen, besser gegen Krebs geschützt zu sein.

Untersuchungen ab den 1970er Jahren stützten diese Vorstellung. Demnach steckt eine molekulare Uhr hinter der »Hayflick-Grenze«. Jedes Mal, wenn sich eine Zelle teilt, verkürzen sich die so genannten Telomere. Dabei handelt es sich um Abschnitte am Ende der Chromosomen, die aus repetitiven DNA-Sequenzen samt den zugehörigen Proteinen bestehen. Sind sie unter eine bestimmte Länge geschrumpft, stellt die Zelle die Teilung ein.

Spätere Studien weckten jedoch Zweifel an dieser Theorie. So berichteten mehrere Forschungsgruppen Ende der 1990er Jahre, dass die Fähigkeit von Hautzellen, sich zu vermehren, mit dem Alter nicht wesentlich nachlässt. Offenbar erreichen im Leben eines Menschen nicht genug Zellen die Hayflick-Grenze, um die Geweberegeneration deutlich einzuschränken. Im Einklang mit diesen Befunden fanden sich bei Mäusezellen sehr lange Telomere, was anscheinend verhindert, dass ihre zelluläre Uhr abläuft, bevor sie sterben. 2001

erklärten die beiden Gerontologen Harriet und David Gershon vom Technion in Haifa (Israel) in einem Übersichtsartikel die Telomer-Theorie des Alterns deshalb für »irrelevant«.

Damit rückte die zweite mögliche Funktion der zellulären Seneszenz ins Zentrum des Interesses: die Schutzwirkung gegen Krebs. Schon Anfang der 1990er Jahre war bekannt, dass bestimmte Arten von Zellschädigungen – insbesondere Mutationen – unkontrolliertes Wuchern und andere Veränderungen hervorrufen können, die für Tumoren typisch sind. Wie sich außerdem zeigte, lösen solche gefährlichen Zellschäden in der Regel die Seneszenz aus – vermutlich, um die nicht mehr normal funktionierenden Zellen daran zu hindern, bösartig zu werden. Beispielsweise bewirkt die Zugabe mutagener Oxidationsmittel zur Nährlösung von Zellkulturen den Übergang in das Ruhestadium.

Passend dazu entdeckte 1997 die Arbeitsgruppe von Manuel Serrano, heute am spanischen nationalen Krebsforschungszentrum in Madrid, dass auch eine lang anhaltende Stimulation zur Teilung die Seneszenz auslöst. Mutierte Gene, die das Wachstum von Tumoren antreiben, sind bekannt dafür, solche andauernden Teilungssignale auszusenden.

Wie diese und weitere Entdeckungen nahelegten, gibt es eine Art Antikrebsmechanismus innerhalb der Zelle. Er beinhaltet die kontinuierliche Suche nach Zeichen einer Schädigung, die eine unkontrollierte Vermehrung in Gang setzen könnte. Wenn sich solche Hinweise häufen und einen Grenzwert überschreiten, wird in schweren Fällen das Apoptoseprogramm gestartet, in dessen Verlauf sich die Zelle selbst auflöst. In anderen Fällen ist die Reaktion nicht so drastisch: Die entartete Zelle tritt in den Zustand der Seneszenz ein, in dem sie sich nicht mehr teilen kann. Das erlaubt ihr, quasi im Ruhestand weiterzueexistieren.

Doch dann versetzten neue Befunde auch dieser Theorie einen schweren Schlag: Forscher entdeckten, dass seneszente Zellen zwar nicht selbst wuchern, aber trotzdem Krebs auslösen können. Eine prominente Rolle spielte dabei Judith Campisi, die inzwischen am Buck Institute for Research on Aging in Novato (Kalifornien) arbeitet. Ihre Untersuchungen erschütterten die Vorstellung, wonach seneszente Zellen nur in aller Ruhe ihren Lebensabend verbringen, und lieferten Indizien dafür, dass sie sowohl das Tumorstadium fördern als auch weiteres Unheil in ihrer Umgebung anrichten können.

Die ersten Hinweise auf eine solche heimtückische Wirkung tauchten in den späten 1990er Jahren auf. Es handelte sich um Befunde, wonach seneszente Zellen das umliegende Gewebe – ihre »Mikroumgebung« – schädigen könnten und es so in eine »üble Gegend« verwandeln, in der Tumoren gedeihen. 2001 erhärtete das Team von Campisi diesen Verdacht. Wie eine bahnbrechende Studie zeigte, können seneszente Zellen in einer Zellkultur Nachbarn, die sich in einem Krebsvorstadium befinden, dazu anregen, außergewöhnlich aggressive Tumoren zu bilden, wenn man sie später Mäusen injiziert.

Dieser schlechte Einfluss rührt offenbar von der Tendenz vieler alternder Zellen her, einen Mix potenziell gefährlicher Moleküle abzusondern. Einige davon begünstigen die ungethemmte Vermehrung oder lösen Proteine auf, welche die Zellen eines Gewebes umgeben und an ihrem angestammten Platz halten. Metastasierende Tumorzellen scheinen dieselben abbauenden Enzyme einzusetzen, um sich gleichsam durch die Hülle des jeweiligen Gewebes zu fräsen.

Zusammenhang mit der Wundheilung

Campisi prägte für das Phänomen den Begriff »seneszenz-assoziiierter sekretorischer Phänotyp« oder kurz SASP. Weitere Belege dafür, dass alternde Zellen unter bestimmten Umständen schädliche Moleküle abgeben, veröffentlichte die Forscherin im Jahr 2008. Damit stürzte sie viele Wissenschaftler in große Verwirrung. Warum sollten Zellen in ei-

nem Zustand, der offenkundig zur Verhinderung von Krebs dienete, ihn auf andere Weise aktiv fördern? Das schien keinen Sinn zu ergeben. Doch Campisi lieferte eine mögliche Lösung des Rätsels, indem sie auf Untersuchungen zur Wundheilung verwies.

Diese scheint nämlich in mancher Hinsicht dem Krebs zu ähneln. Beispielsweise sind Tumoren und teilweise geheilte Wunden mit Faserproteinen überzogen, die entstehen, wenn Vorläufer von Gerinnungsproteinen aus Blutgefäßen entweichen und sich zu einem Maschennetz verbinden, das die Reparatur des verletzten Gewebes unterstützt. Unter dem Eindruck solch auffälliger Gemeinsamkeiten vermutete der Pathologe Harold Dvorak von der Harvard Medical School in Boston schon 1986, dass Tumoren die Wundheilungsmechanismen des Körpers für ihr entartetes Wachstum missbrauchen. Sie wirken auf unseren Körper, so seine da-

Wie gute Zellen zu bösen wurden

Ursprünglich galt Seneszenz bei Zellen – also der dauerhafte Verlust der Teilungsfähigkeit – als Ruhezustand mit einer positiven und einer negativen Seite (links unten): Einerseits unterbindet sie die unkontrollierte Selbstvermehrung und beugt damit Krebs vor. Andererseits behindert sie die Regeneration von Gewebe, da diese teilungsfähige Zellen erfordert, und ist damit ein Grund für den Verfall des Körpers im Alter. Heute erscheint die zelluläre Seneszenz ausschließlich negativ (rechts). So hat sich gezeigt, dass seneszente Zellen schädliche Stoffe ausscheiden können. Diese fördern chronische Entzündungen, die vielen Alterserscheinungen zu Grunde liegen. Zudem regen sie Nachbarzellen zur Teilung an und fördern damit das Tumorwachstum.

FRÜHERE SICHT

FOLGEN

gut:
Die Zelle verhindert ihre eigene unkontrollierte Vermehrung.

prä-
kanze-
röse Zelle

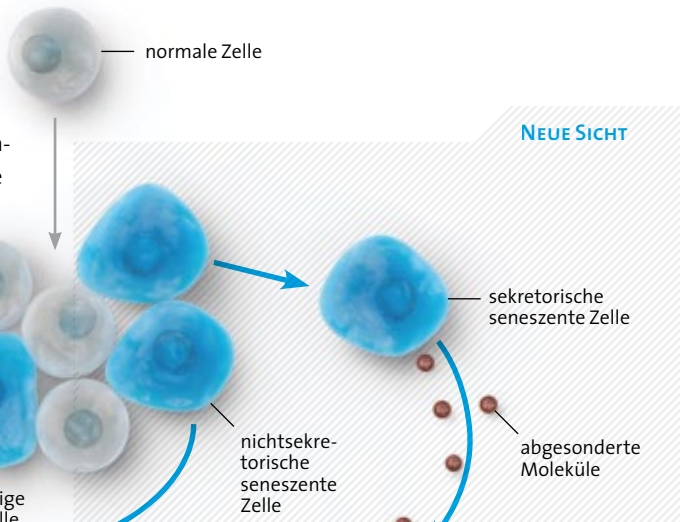


Entartete Zellen bleiben ungefährlich, weil sie nicht wuchern können.

schlecht:
Die zelluläre Seneszenz fördert die Alterung des Gewebes.



Die Zellen können sich nicht mehr teilen, was für die Erneuerung des Gewebes notwendig wäre.



NEUE SICHT

FOLGEN

schlecht:
fördert Krebs in anderen Zellen

präkanzeröse Zelle

Tumor

Die abgesonderten Stoffe regen Zellen zum Wuchern an.

schlecht:
verursacht Entzündungen

aktivierte Entzündungszellen im Gewebe

Chronische Entzündungen können zur Entstehung von Krebs sowie zu altersbedingten Erkrankungen wie Morbus Alzheimer, Diabetes oder Arteriosklerose beitragen.

GERT NIELSEN

malige Aussage, wie »eine endlose Reihe von Wunden, die dauernd eine Heilung einleiten, aber nie wirklich abheilen«.

Neueren Untersuchungen zufolge spielt die Zellalterung dabei eine Rolle. Wenn Gewebe verletzt wird, gehen Zellen im Wundbereich in den Zustand der Seneszenz über. Dadurch regen sie eine Entzündung an, die den Heilungsprozess anstößt. Unter anderem schütten sie dazu chemische Botenstoffe aus – so genannte Zytokine, die Immunzellen anlocken und aktivieren, um mögliche Infektionen zu bekämpfen sowie tote Zellen und Unrat zu entfernen. Später vermehren sich gesunde Zellen, um die verlorenen zu ersetzen. Schließlich sondern seneszente Zellen abbauende Enzyme ab, um Proteinfasern, die zunächst ein Stützgerüst gebildet hatten, wieder zu zerlegen; dieser Abbau begrenzt die Narbenbildung.

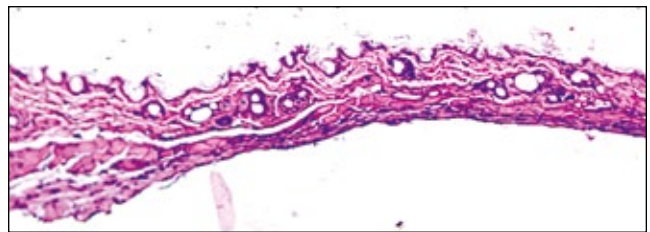
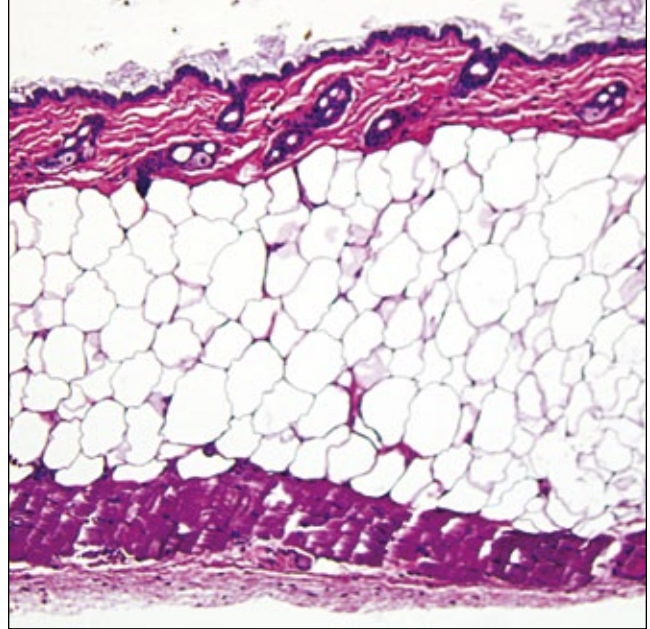
Indem Campisi alle diese Puzzleteile zusammensetzte, gelangte sie zu der Schlussfolgerung, dass die zelluläre Seneszenz im Verlauf der Evolution nicht nur dazu diente, übermäßigem Wachstum geschädigter Zellen vorzubeugen, sondern zugleich eine Rolle bei der Wundheilung übernahm. Dadurch aber musste sie SASP in ihr Repertoire aufnehmen. Leider macht der sekretorische Betriebsmodus seneszente Zellen jedoch zu ausgezeichneten Komplizen für Tumoren, die den Wundheilungsprozess für ihr eigenes Wachstum ausnutzen. Außerdem kann die Fähigkeit solcher Zellen, eine Entzündung auszulösen, letztendlich den gesamten Körper in eine »üble Gegend« verwandeln. Einiges spricht nämlich dafür, dass schwache Entzündungen nicht nur Krebs, sondern überdies Arteriosklerose, die Alzheimerdemenz, Typ-2-Diabetes und weitere altersbedingte Krankheiten begünstigen.

Wie seneszente Zellen zum Altern beitragen

Nachdem die unrühmliche Rolle seneszenten Zellen bei der Entstehung von Krebs aufgedeckt war, begannen Forscher auch wieder nach Zusammenhängen mit dem Altern zu suchen. Dabei zeigte sich, dass die Ruheständler mit verdächtiger Häufigkeit überall dort vorkommen, wo etwas schiefgelaufen ist. Auch im alternden Körper insgesamt finden sie sich auffallend zahlreich. So gelang 2006 der Nachweis, dass sich die Immunabwehr bei betagten Mäusen im selben Maß abschwächt, wie die Seneszenz bei jenen Stammzellen zunimmt, die normalerweise stetig die diversen Zelltypen des Immunsystems produzieren.

Hilfreich für solche Experimente war die Entdeckung von Erkennungsmerkmalen für seneszente Zellen. Zu den wichtigsten solchen Seneszenzmarkern gehört die erhöhte Konzentration eines Proteins namens p16, das von dem Gen *p16^{Ink4a}* kodiert wird. David Beach von der Queen Mary University in London hat es 1993 entdeckt. Wie sich später herausstellte, wirkt es dabei mit, Zellen an der Vermehrung zu hindern, wenn bestimmte Arten von Schädigungen auftreten.

Norman E. Sharpless und seine Kollegen von der University von North Carolina in Chapel Hill konnten mit einer Reihe von Untersuchungen bei Nagetier- und menschlichen Zellen einen statistischen Zusammenhang zwischen Alterung und p16-Spiegel nachweisen. Letzterer erhöht sich demnach mit



VAN DEUREN LABORATORY

Normalerweise schwindet mit dem Alter das Fettgewebe unter der Haut (unten). Bei genetisch veränderten Mäusen, die seneszente Zellen unverzüglich eliminieren, bleibt die Fettschicht, die hier weiß erscheint, dagegen erhalten (oben). Das spricht für eine Beteiligung der zellulären Seneszenz am Alterungsprozess.

den Lebensjahren, während zugleich die Fähigkeit der Zellen abnimmt, sich zu vermehren und verletztes Gewebe zu reparieren. Wie die Gruppe von Sharpless 2004 berichtete, gilt dies für fast alle Zelltypen. Interessanterweise lässt sich der p16-Spiegel durch verminderte Kalorienzufuhr senken. Das passt zu der seit den 1930er Jahren bekannten Tatsache, dass bei einer Reihe von Tierarten eine strenge Diät die Lebensspanne verlängern und ein gesundes Altern fördern kann.

Im Jahr 2009 lieferte das Labor von Sharpless ein weiteres Puzzleteil. Demnach steigt auch in den T-Zellen des menschlichen Immunsystems der p16-Spiegel steil mit dem Alter an. Besonders ausgeprägt ist dieser Anstieg bei Rauchern und körperlich wenig aktiven Menschen – ein Anhaltspunkt dafür, dass beide Verhaltensweisen die zelluläre Seneszenz begünstigen. Sharpless ist ein jung aussehender Mann von 45 Jahren. Trotzdem hat er, wie er mir lachend erzählte, bereits einen doppelt so hohen p16-Spiegel wie seine Doktoranden. Das stellte er fest, nachdem sein Labor einen leicht anwendbaren Test zur Messung des Markers entwickelt hatte.

Sharpless und seine Kollegen wiesen aber nicht nur eine statistische Beziehung zwischen dem p16-Spiegel und Merkmalen des Alterns nach. Sie belegten mit einer Reihe von Untersuchungen auch einen direkten kausalen Zusammenhang. Demnach ist die zelluläre Seneszenz nicht etwa eine bloße Begleiterscheinung des Alterns von Geweben und des gesamten Organismus, sondern trägt aktiv dazu bei. Das

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!

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projektes nicht möglich und deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebritzer Agrarbetriebsgesellschaft mbH | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | 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 Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Sternwarte am Wallgarten | Förderverein des Thomas-Mann-Gymnasium Stutensee | Förderverein der Leibnizschule e. V. | KIT Karlsruhe

ergaben Versuche, über die das Team 2006 berichtete. Dabei hatten die Forscher in betagten Mäusen das p16-Gen blockiert, so dass die Tiere nur in stark vermindertem Maß seneszente Zellen bilden konnten. Daraufhin vermochten die Nager abgestorbene Pankreaszellen nach einer Giftgabe fast genauso gut zu regenerieren wie jüngere Artgenossen. Außerdem waren sie besser als normale Gleichaltrige dazu im Stande, Nervenzellen in bestimmten Regionen ihres Gehirns zu erneuern. Und auch die Regenerationsfähigkeit der Blutzustammzellen lag über dem alterstypischen Wert.

Anderen Untersuchungen aus den letzten fünf Jahren zufolge liefern genetische Unterschiede in der Menge an p16, die verschiedene Menschen produzieren, möglicherweise einen Hinweis auf ihr persönliches Risiko, verschiedene altersbedingte Krankheiten wie Arteriosklerose oder Morbus Alzheimer zu entwickeln. Laut Sharpless haben diese Ergebnisse große Beachtung bei Medizinern gefunden, die sich mit solchen Altersleiden befassen.

Gibt es ein Mittel gegen den körperlichen Verfall?

Noch aufregender sind die eingangs erwähnten Forschungsarbeiten an der Mayo-Klinik, die beweisen, dass sich durch Eingriffe in die zelluläre Seneszenz typische Alterserscheinungen hinauszögern lassen. Das Team von van Deursen erzeugte Mäusestämme, die gleich doppelt genetisch verändert waren. Zum einen hatten die Tiere einen Defekt im Erbgut, der in verschiedenen Geweben zu einer vorzeitigen zellulären Seneszenz führte. Zum anderen trugen sie ein Gen, das dafür sorgte, dass ein bestimmter Wirkstoff jede Zelle abtöte, in der das p16-Gen angeschaltet wurde. Eine lebenslange Behandlung mit dieser Substanz entfernte also kontinuierlich sämtliche Zellen, die ins Seneszenzstadium übergangen.

Das hatte eminente positive Auswirkungen, wie die Forscher berichteten. Gewisse altersbedingte Störungen wie etwa grauer Star, die bei unbehandelten Mäusen schon in jungen Jahren eintraten, verzögerten sich deutlich. So blieb das Unterhautfettgewebe länger erhalten, und der Muskelabbau setzte nicht so früh ein. Selbst wenn die Behandlung später im Leben der Mäuse begonnen wurde, verlangsamte sich der altersbedingte Verlust von Fett- und Muskelgewebe.

So spektakulär die Befunde des Mayo-Teams sind, ist damit noch nicht gesagt, ob es generell – und auch bei uns Menschen – von Vorteil wäre oder sich lebensverlängernd auswirken könnte, seneszente Zellen regelmäßig aus dem Verkehr zu ziehen. Campisi weist etwa darauf hin, dass die Mäuse unter künstlich induziertem, vorzeitigem Altern litten, weshalb die Ergebnisse nicht ohne Weiteres auf das normale Altern übertragbar seien. Zudem bewahrte das rasche Entfernen der seneszenten Zellen die Nager keineswegs vor ihrer Haupttodesursache: vorzeitigem Herz-Kreislauf-Versagen. Deshalb lebten sie auch nicht wesentlich länger.

Aber einmal angenommen, irgendwann käme der Beweis, dass eine Blockade der zellulären Seneszenz tatsächlich das Altern bis zu einem gewissen Grad verlangsamten oder wenigstens gegen Falten wirken und andere altersbedingte Ge-

brechen lindern könnte – wie ließe sich diese Erkenntnis medizinisch nutzen? Das Verfahren der Mayo-Forschungsgruppe auf Menschen zu übertragen hieße, Genmanipulationen an befruchteten Eizellen vornehmen zu müssen. Das erscheint aus ethischen Gründen ausgeschlossen. Das p16-Gen medikamentös auszuschalten, wäre auch problematisch. Dadurch stiege womöglich das Krebsrisiko. Dennoch bieten sich einige erstaunlich einfache Optionen.

Da ist einmal die Erkenntnis, dass Raucher und Menschen mit Bewegungsmangel im Allgemeinen erhöhte p16-Spiegel haben. Demnach könnten Abstinenz vom Glimmstängel und körperliche Bewegung helfen, jene Art molekularer Schädigungen zu verhindern, welche die zelluläre Seneszenz fördern. Einen ähnlich positiven Effekt hätte wohl auch das Abnehmen. Wie van Deursen und sein Kollege James Kirkland vermuten, können Vorläufer von Fettzellen, so genannte Präadipodizyten, bei übergewichtigen Menschen und Tieren einen Zustand auslösen, der dem beschleunigten Altern stark ähnelt. Eine große Anzahl dieser Zellen wird nämlich seneszent und fördert somit gemäß Campisis Theorie chronische leichte Entzündungen im gesamten Körper.

Es gibt auch vorläufige Hinweise, wonach ein Wirkstoff namens Rapamycin der zellulären Seneszenz vorbeugen könnte, ohne Krebs zu begünstigen. Interessanterweise hat die Substanz die Lebensspanne von Mäusen verlängert, denen sie dauerhaft verabreicht wurde (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2012, S. 22). Wie die Forschungsgruppe von Campisi außerdem unlängst nachwies, unterdrücken einige entzündungshemmende Medikamente die Sekretion schädlicher Stoffe durch seneszente Zellen.

Es scheint also nicht ausgeschlossen, dass sich irgendwann ein wirksames Mittel gegen das Altern und seine Beschwerden findet. Bis dahin aber rät Sharpless allen, die sich eines langen Lebens in Gesundheit erfreuen möchten: »Nicht rauchen, vernünftig essen und sich bewegen!« ~

DER AUTOR



David Stipp ist Wissenschaftsjournalist, lebt in Boston und hat sich auf Gerontologie spezialisiert. Sein Buch »The Youth Pill: Scientists at the Brink of an Anti-Aging Revolution« erschien 2010 bei Penguin. Stipp schreibt einen englischsprachigen Blog zur Alternforschung unter www.davidstipp.com.

QUELLEN

Baker, D.J. et al.: Clearance of p16^{INK4a}-Positive Senescent Cells Delays Ageing-Associated Disorders. In: Nature 479, S. 232–236, 2011
Rodier, F., Campisi, J.: Four Faces of Cellular Senescence. In: Journal of Cell Biology 192, S. 547–556, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184762

Sie wissen, dass Sport gesund ist:
Wir erklären Ihnen, warum.

GEOkompakt Nr. 34
Die Grundlagen des Wissens

GEOkompakt Sport und Gesundheit

Sport und Gesundheit

Die Heilkraft der Bewegung



DOSSIER
Welcher Sport ist gut für mich? Wie trainiere ich optimal?

RÜCKEN
Woher der Schmerz im Kreuz kommt – und wodurch man ihn vermeiden kann

PSYCHOLOGIE
Mit welchen Tricks man sich motivieren kann, Sport zu treiben

KINDER
Wie Eltern das sportliche Talent ihres Nachwuchses erkennen und fördern

GEOkompakt DVD
Training für einen starken Rücken
Empfehlungen für eine gesunde Rückenmuskulatur



Heft 9,00 € –
mit DVD 16,50 €*

* Heft ohne DVD: 9,00 € (A: 10,50 €/CH: 17,60 sfr),
Heft mit DVD: 16,50 € (A: 18,80 €/CH: 33,00 sfr).

Unversehens steht man auf einer weiten Hochebene in Argentinien vor einer bemerkenswerten Konstruktion: Mitten in der Pampa Amarilla, auf einer Fläche von etwa 60 mal 50 Quadratkilometern, so groß wie das Saarland, stehen 1600 gedrungene, 1,2 Meter hohe zylindrische Bunker – regelmäßig in Abständen von 1,5 Kilometern. Bei genauerem Hinsehen entpuppen sie sich als Wassertanks aus Plastik. Jeder fasst 12 000 Liter und trägt auf dem Dach Solarzellen sowie eine Antenne. Etwas erhöht auf dem hügeligen Rand der Pampa richten Kameras von vier Stationen ihre Teleskopaugen in den Himmel.

Ein Landeplatz für UFOs? Natürlich nicht. Hier steht eines der modernsten und im Durchmesser größten astronomischen Beobachtungsgeräte der Welt – das Pierre Auger Cosmic Ray Observatory. Wissenschaftler aus den 17 Ländern, die an diesem Projekt beteiligt sind, erhoffen sich mit seiner Hilfe Aufklärung über die Natur von Teilchen mit extrem hohem Energiegehalt, die vom Weltraum aus auf die Erde treffen (siehe SdW 1/2006, S. 12). Der friedliche Nachthimmel mit seinen leicht funkelnden Sternen am Firmament, den wir mit bloßen Augen sehen, verrät nichts von dem wilden Geschehen, das sich permanent im Weltraum abspielt. Das tritt erst im Bereich sehr kurzweiliger und energiereicher Strahlung in Erscheinung.

Ab und zu trifft ein geladenes Teilchen mit höchster Energie auf die Lufthülle der Erde und erzeugt eine Kaskade von weiteren Partikeln (»Sekundärteilchen«), von denen ein Teil schließlich bis zur Erdoberfläche dringt. Diese »kosmische Strahlung« – wie sie etwas unzutreffend heißt, denn es handelt sich ja um einen Strom aus Korpuskeln – entdeckte Victor Hess Anfang des 20. Jahrhunderts bei spektakulären Ballonflügen. 1936 erhielt der österreich-amerikanische Physiker dafür den Physiknobelpreis. Inzwischen hat man Teilchen der kosmischen Strahlung mit Energien entdeckt, die



DIE SERIE IM ÜBERBLICK



DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER ASTRONOMIE

Teil 1	▶ Heiße Stürme im Kosmos <i>Gerhard Börner</i>	April 2013
Teil 2	▶ Die Suche nach Schwarzen Mini-Löchern <i>Marek Abramowicz und Julia Becker</i> ▶ Schwarze Löcher und Galaxienentstehung <i>Gerhard Börner</i>	Mai 2013
Teil 3	▶ Die Entstehung der Planeten <i>Thomas Henning</i>	Juni 2013
Teil 4	▶ Super-Erden – die Jagd nach Exoplaneten <i>Lisa Kaltenegger</i>	Juli 2013
Teil 5	▶ Geburt und Tod von Sternen <i>Ralf Launhardt</i>	August 2013
Teil 6	▶ Dunkle Energie und Dunkle Materie <i>Volker Springel</i>	September 2013

10^{20} Elektronvolt (eV) überschreiten – höhere wurden in der Natur noch nie entdeckt. Offensichtlich gibt es irgendwo da draußen Teilchenfabriken, die Partikel mit 100 Millionen Mal mehr Energie erzeugen, als der größte Beschleuniger der Erde zu Wege bringt: der Large Hadron Collider am CERN in Genf. Diese Objekte können in der Erdatmosphäre Kernreaktionen mit Atomkernen auslösen, in denen (im Ruhesystem der Teilchen) immerhin noch das 50-Fache der LHC-Energie verfügbar ist. Kosmische Strahlen mit solch riesigen Energien geben den Wissenschaftlern einige Rätsel auf: Was sind das überhaupt für Objekte? Woher stammen sie? Was hat sie auf derart hohe Werte und Geschwindigkeiten gebracht?


Zumindest über letztere Frage besteht Einigkeit: Höchstwahrscheinlich werden solche geladenen Partikel in großräumigen kosmischen Magnetfeldern beschleunigt; dabei wird stets auch hochenergetische Strahlung ausgesandt. Diese Gammastrahlung erreicht zwar die Erde, kann aber die Atmosphäre nicht durchdringen. Deshalb versuchen die

TITELTHEMA: ENERGIEREICHE TEILCHEN

Heiße Stürme im Kosmos

Das Universum ist kein gemütlicher Ort. Stürme toben, Sterne explodieren, Teilchen und Strahlen rasen mit sonst unerreichten Energien durchs All. Ihre Ursachen erforschen wir mit den größten Teleskopen – auf der Erde und im Weltraum.

Von Gerhard Börner



Von dem zentralen Schwarzen Loch der aktiven Galaxie »Herkules A« werden zwei »Jets« herausgeschleudert, die jeder etwa eine Million Lichtjahre in den Raum reichen. In der Aufnahme überlagert sichtbares Licht Radiowellen.

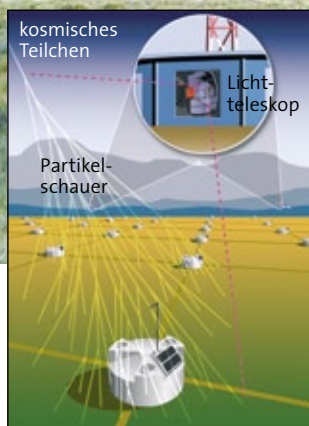
Forscher, sie mit Satelliten außerhalb der Lufthülle zu registrieren. Die hochenergetischen Gammaphotonen sind allerdings so selten, dass sie mit Satelliten allein fast nicht zu beobachten sind. Deren Einfangflächen sind einfach viel zu klein, so dass nur alle paar Jahre ein Photon mit einer Energie von 1 Teraelektronvolt (TeV, entspricht 10^3 Gigaelektronvolt, GeV, also der 1000-fachen Ruhemassenenergie des Protons) von ihnen aufgefangen würde. Daher beobachten die Astroteilchenphysiker Gammaphotonen im TeV-Bereich, indem sie deren Reaktionen mit den Atomen der Erdatmosphäre ausnutzen – die ganze irdische Lufthülle als Detektorfläche! Sobald sie auf die Erdatmosphäre treffen, erzeugen sowohl Gamma- als auch kosmische Strahlen Kaskaden von Kernreaktionen.

Einschläge mit Überlichtgeschwindigkeit

Bei jeder Kollision mit einem Atomkern, typischerweise in 15 bis 20 Kilometer Höhe, schleudert die mikroskopische Ex-

plosion über 50 Sekundärteilchen von sich, meist so genannte Pi-Mesonen, die fast mit Lichtgeschwindigkeit weiter in Richtung Erdoberfläche rasen. Pi-Mesonen sind elektrisch positiv oder negativ geladen und relativ langlebig, haben also genügend Zeit, unterwegs mit weiteren Atomkernen zusammenzustoßen, bevor sie schließlich selbst zerfallen. Diese Kettenreaktion setzt sich einige Millisekunden lang fort und erzeugt eine Kaskade von Teilchen, den so genannten »hadronischen Schauer« (HAS).

Der Prozess hält an, bis die mittlere Energie der Schauerpartikel nicht mehr ausreicht, um neue Teilchen zu erzeugen. Danach gehen diese allmählich in der Atmosphäre auf. Nur die besonders langlebigen Korpuskel, vor allem My-Mesonen, dringen bis zur Erdoberfläche vor und lassen sich hier einfangen. In großen Wassertanks erzeugen sie so genannte Tscherenkow-Strahlung, denn sie fliegen mit »Überlichtgeschwindigkeit« – schneller als das Licht im Wasser – durch die Tanks. Diese Emissionen werden mit Photoverstärkern aus



Mitten in der Pampa Westargentiniens stehen die Wassertanks des Pierre Auger Telescope. Schlagen Luftschauerteilchen in diese Detektoren ein, können Forscher Richtung und Energie der kosmischen Primärpartikel rekonstruieren. Im Hintergrund sichtbar ist eines der Teleskope, die simultan UV-Licht angeregter Luftmoleküle registrieren (siehe auch kleines Bild links).

drei Richtungen registriert, was es erlaubt, annähernd Energie und Richtung der Primärteilchen zu ermitteln.

Den Beobachtern kosmischer Strahlung hilft noch ein zweiter Effekt: Die Partikelschauer regen bei ihrem Flug zur Erde Luftmoleküle zu ultravioletter Fluoreszenz an, vor allem Stickstoff. Bei Dunkelheit lässt sich die Spur des schwachen Leuchtens mit Bodenteleskopen auffangen, also vor allem in Neumondnächten.

Ein kosmischer Schauer erscheint den Fluoreszenzdetektoren dann wie eine winzige UV-Lampe, die nahezu mit Lichtgeschwindigkeit durch die Atmosphäre zur Erde rast. Dieser Effekt wird in modernen Observatorien wie dem argentinischen Auger-Teleskop eingesetzt, um solche Ereignisse außer mit den Wassertanks noch mit einem zweiten, unabhängigen

Verfahren nachzuweisen. Die Fluoreszenzmethode eignet sich hervorragend zum Aufspüren der seltenen energiereichen Schauer: Noch aus 20 Kilometer Entfernung und bis in 20 Kilometer Höhe können die vier Teleskope das schwache UV-Leuchten aufzeichnen. Das erhöht die Wahrscheinlichkeit, ein Ultrahochenergie-Ereignis zu registrieren.

Das Auger-Observatorium ist für den Nachweis kosmischer Strahlung optimal eingerichtet: In den 1600 Wassertanks, die über die Hochebene verteilt rund um die Uhr auf die Sekundärteilchen von Hochenergie-Ereignissen warten, ist es immer dunkel, außer wenn ein geladenes Teilchen (meist ein My-Meson) hindurchfliegt und einen Tscherenkow-Blitz erzeugt. Die Aufschlagzone des trichterförmigen Teilchenschauers (Grafik oben) kann je nach Einfallswinkel nahezu gleichzeitig Lichtblitze in mehr als fünf Behältern erzeugen. Daraus ermitteln Forscher die Energie des Primärteilchens. Hinweise auf dessen Bahn entnehmen sie den Zeitdifferenzen beim Einschlag in verschiedene Wasserbehälter.

Insgesamt liefert die Kombination der beiden Beobachtungsmethoden präzise Informationen über Energie, Flugrichtung und Art der Primärteilchen – also ob beispielsweise ein Proton, ein geladener Eisenkern oder ein Gammaquant aus dem All einschlug.

Um Photonen mit solch hoher Energie zwischen 50 GeV und 50 TeV zu registrieren, nutzt man ebenfalls die Reaktionen der Partikel mit der Erdatmosphäre. Es entstehen Elektron-Positron-Paare, die wiederum Photonen hoher Energie durch die so genannte Bremsstrahlung erzeugen. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrfach. Ein derartiger elektromag-

AUF EINEN BLICK

KOSMISCHE BESCHLEUNIGER

1 Seit einem Jahrhundert registrieren Astronomen eine Art heißen, hochenergetischen Wind, der durch das Weltall fegt: Gammastrahlen und schnelle Teilchen, die »**kosmische Strahlung**«.

2 Astrophysiker rätseln, was die Partikel auf so hohe Energie beschleunigt. Bisher reichen die Beobachtungen nicht aus, um die **Quellen** am Himmel eindeutig zu lokalisieren.

3 Die **Modelle für die kosmischen Beschleuniger** variieren von klassischen bis zu exotischen Mechanismen. Doch auch da sind sich die Forscher noch lange nicht einig. Denn es geht um Prozesse, die das Leistungsvermögen irdischer Teilchenbeschleuniger bei Weitem übertreffen.

netischer Luftschauer erzeugt eng gebündelte Tscherenkow-Strahlung, die als blauer Lichtblitz von optischen Teleskopen am Boden entdeckt und gemessen wird.

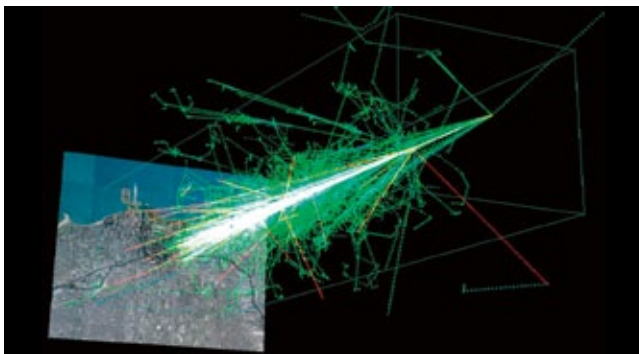
Das H.E.S.S.-Teleskop in Namibia ist ein solches Teleskop für Tscherenkow-Gammastrahlen. Es besteht aus fünf Einzelteleskopen, vier davon mit einer Spiegelfläche von 108, das fünfte mit 600 Quadratmetern, die in einem Quadrat von 120 Meter Seitenlänge aufgestellt sind. Da die Leuchterscheinungen eines Schauers in etwa zehn Kilometer Höhe entstehen, überlappen sich die Sichtwinkel der einzelnen Teleskope weit gehend. Die Unterschiede sind gerade so groß, dass sich die Ereignisse stereoskopisch rekonstruieren lassen, darunter Richtung, Typ und Energie des Primärteilchens. H.E.S.S. und verwandte bodengebundene Detektoren machen für uns den Himmel im TeV-Bereich sichtbar.

Eine Reihe galaktischer und extragalaktischer Quellen, deren Emissionen bis zu TeV-Energien reichen, wurden von den Tscherenkow-Teleskopen bereits aufgespürt. Zwar sind erst etwa 100 dieser Objekte identifiziert, doch es werden ständig mehr. In einigen davon dominiert die hochenergetische Strahlung über alle anderen Energiebereiche. Damit wird deutlich, dass hier extreme Prozesse am Werk sind, die Teilchen mit fast 100-prozentiger Effizienz auf ungeheure Energien beschleunigen.

Ortsbestimmung: Je weiter weg, desto besser

Die meisten der galaktischen TeV-Quellen weisen von der Erde aus gesehen eine Winkelausdehnung von einigen Bogenminuten bis zu mehreren Grad auf. Das erschwert ihre Identifizierung, weshalb die Astronomen sie oft auf eine lange Liste nicht genauer bekannter Gammaquellen setzen.

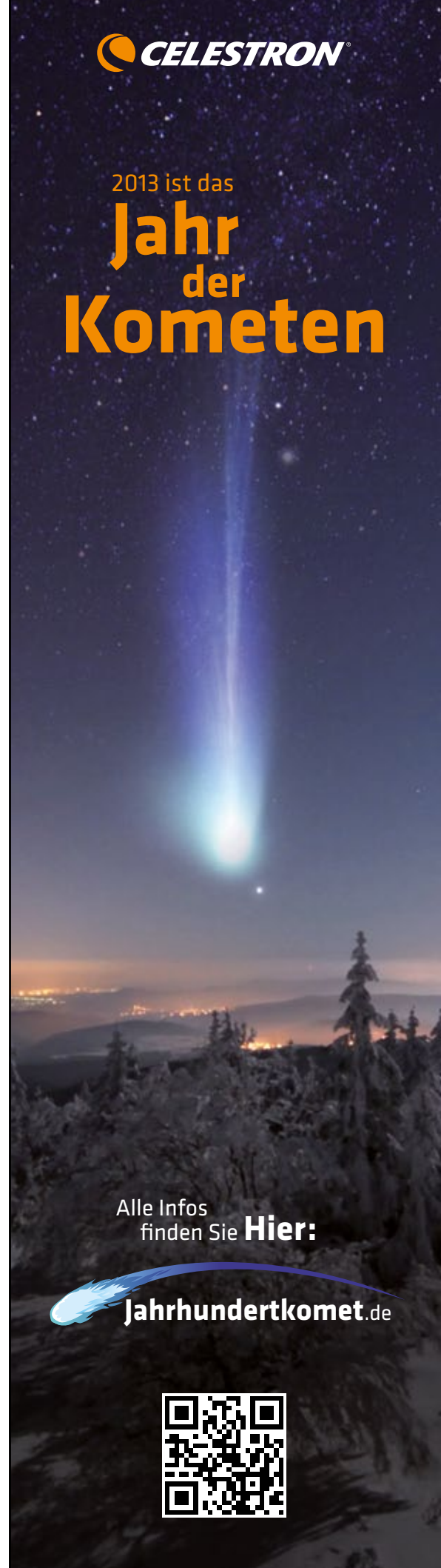
Besser lassen sich die extragalaktischen Gammastrahlenquellen bestimmen – je weiter weg, desto einfacher. Denn dann ist ihr Durchmesser am Himmel klein, und ihre Strahlung variiert im Einklang mit den Lichtkurven, die bei anderen Wellenlängen des gleichen Objekts gemessen werden. Bis jetzt gehört die Mehrzahl solcher Quellen zu den so genannten Blazaren (abgekürzt von englisch: von blazing quasi stellar objects). Dabei handelt es sich um die Zentren junger, Energie speiender Galaxien, die aktiven galaktischen Kerne (AGNs: ac-



UNIVERSITY OF CHICAGO, MAXIMO AVE. DINO SURENDRAN, TOKONATSU YAMAMOTO, RANDY LANDSBERG UND MARK SUBBARAO / CCBP-2.5; ERSTELLT MIT SERGIO SCIUTTO'S AINES

Partikelschauer entstehen, wenn Hochenergeteilchen in rund 20 Kilometer Höhe mit Luftmolekülen kollidieren – hier in einer Simulation von Forschern der University of Chicago.

2013 ist das Jahr der Kometen



Alle Infos
finden Sie **Hier:**

 Jahrhundertkomet.de



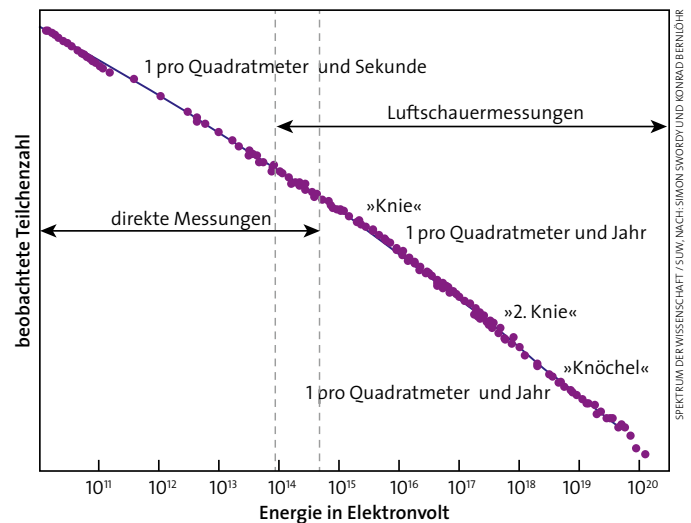
tive galactic nuclei). Diese stoßen eng gebündelte »Jets« aus, in denen geladene Teilchen auf relativistische Energien – bis fast auf Lichtgeschwindigkeit – beschleunigt werden. Zu den prominenten Vertretern dieser Gammastrahlenobjekte zählen die Radiogalaxien Messier 87 und Centaurus A. Wie diese Jets und mit ihnen die Hochenergeteilchen erzeugt werden, ist unter Theoretikern umstritten, wenn auch viele ihren Ursprung in großen Schwarzen Löchern sehen.

Zahlreiche solche Quellen konnten die Astronomen detailliert beobachten, simultan über fast alle Wellenlängen: von den Radiofrequenzen über optische und Röntgenstrahlung bis hin zu den GeV- und TeV-Bereichen. Dennoch streiten sie nach wie vor über den Mechanismus, wie die großen Schwarzen Löcher, die im Zentrum jedes AGN vermutet werden, so mächtige, relativistische Jets ausstoßen können. Grob lässt sich die Gammastrahlung wohl durch die Wechselwirkung energiereicher Elektronen mit den vor Ort vorhandenen Magnetfeldern erklären. Die Photonen der dabei ausgesandten so genannten Synchrotronstrahlung stoßen wieder mit denselben energiereichen Elektronen zusammen und werden dadurch in vielen Schritten über den Röntgenbereich hinweg bis auf Gammaenergien gebracht. Entsprechend sollten diesem Modell zufolge beide Strahlungsformen zugleich auftreten.

Gammablitz statt Wasserstoffbomben

Gammastrahlen mit Energien zwischen einigen hundert Kiloelektronvolt und Dutzenden von Gigaelektronvolt lassen sich mit Satelliten außerhalb der Erdatmosphäre beobachten. In diese Kategorie gehören die berühmten Gammastrahlenausbrüche (gamma ray bursts, kurz GRBs): rasch aufflackernde Strahlungsereignisse, die innerhalb von zehn Sekunden mehr Energie verpulvern, als unsere Sonne während ihrer gesamten Existenz über zehn Milliarden Jahre hinweg abgibt. Forschungssatelliten haben solche astronomischen Phänomene zunehmend detailliert aufgezeichnet. Diesen kosmischen Ausbrüchen kamen in den 1960er Jahren erstmals militärische Satelliten vom Typ Vela auf die Spur. Die Erdtrabanten sollten eigentlich den internationalen Verzicht auf Tests mit Wasserstoffbomben in der Atmosphäre überwachen. Zwar wurden keine Hinweise auf terrestrische oder lunare Explosionen gefunden – sogar Tests auf der Rückseite des Mondes wurden seinerzeit nämlich für möglich gehalten. Doch immer wieder registrierten die Sensoren kurze extraterrestrische Signale von Gammastrahlung, offensichtlich mit extrasolarem Ursprung.

Diese Entdeckung erschien den Astronomen zunächst völlig rätselhaft. Sie setzten in den folgenden Jahrzehnten viel Fantasie und technisches Gerät ein, um dem Geheimnis der Gammablitz auf die Spur zu kommen. Als neuesten Forschungssatelliten haben die Himmelspäher seit 2008 das Fermi-Observatorium der NASA im Einsatz, mit seinen beiden Hauptinstrumenten: dem Large Area Telescope, das den Himmel nach Punktquellen und diffusen Emissionsgebieten durchsucht, sowie dem Gamma-ray Burst Monitor (GBM).



Je höher die Energien der kosmischen Teilchen, desto seltener sind sie. Knicks in der Kurve sind das 1. und das 2. »Knie« sowie der »Knöchel«, oberhalb dessen kaum noch Teilchen auftreten sollten.

Die Sensoren zeichnen im Schnitt täglich eines dieser merkwürdigen Ereignisse auf. Manche dauern nur 15 Millisekunden wie der GRB 950917A, andere leuchten bis zu 1000 Sekunden (etwa GRB 971208, ein am 8. Dezember 1997 registrierter Ausbruch). Bei einigen der Langzeitereignisse gelang es, durch Zuschalten weiterer Teleskope ein optisches Nachleuchten zu entdecken. Damit konnten die Astronomen Spektrallinien der Objekte und deren Rotverschiebung bestimmen und daraus ihre Entfernung ableiten. GRB 050904 etwa weist eine Rotverschiebung von 6,18 auf. Generell liegen die Werte zwischen 0,085 und 6,18, was im kosmischen Standardmodell 7,4 beziehungsweise 17,5 Milliarden Lichtjahren Abstand entspricht. Die GRBs finden also nicht in unserer näheren Umgebung statt und auch nicht irgendwo in der Milchstraße; vielmehr erreichen sie uns aus den fernsten Regionen des Universums. Entsprechend hoch muss die Leuchtkraft der Gammablitz sein.

Ihre Energiemenge erscheint selbst Astrophysikern fantastisch. Nicht nur das: In der sehr kurzen Zeit des Ausbruchs konzentrieren sich die riesigen Energien im Gammabereich des Strahlungsspektrums. In ihrer ersten Verblüffung meinten manche Astronomen sogar, diese Ereignisse würden den Rahmen der physikalischen Gesetze sprengen.

Seitdem haben sich die Wissenschaftler von dem Schrecken erholt und zahlreiche Modelle erdacht, die das Phänomen erklären könnten. Die unterschiedlichen Zeitverläufe legen nahe, dass wohl zwischen zwei verschiedenen Typen von Gammablitz unterschieden werden muss: Lange GRBs, die zwischen 2 und 1000 Sekunden dauern, könnten in gigantischen Supernova-Explosionen entstehen, die gelegentlich als Hypernovae bezeichnet werden. Dabei kollabiert ein besonders schwerer Stern (fachlich: Wolf-Rayet-Stern), während zeitgleich eine Stoßwelle nach außen läuft, die in einer heiß glühenden Explosionswolke (»Feuerball«, siehe

Grafik S. 50) die äußeren Sternschichten in den Weltraum schleudert. Dabei können die Gase entlang der Rotationsachse des kollabierenden Sterns zu engen Strahlen – den Jets – gebündelt sein und auf Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden.

In dieser dramatischen Situation höchster Energie und Temperatur könnte ein kurzer Puls aus Gammastrahlung entstehen. Da wir diese GRBs immer nur dann beobachten, wenn der Strahl aus relativistischen Teilchen zufällig auf die Erde gerichtet ist, werden die Energieanforderungen etwas abgeschwächt. Denn in diesem Fall wird die Energie gebündelt nur in eine spezielle Richtung abgestrahlt – und nicht gleichmäßig über den ganzen Himmel.

Wie lässt sich das Hypernova-Modell überprüfen? Ihm zufolge würde gleichzeitig mit dem Gammapuls eine große Menge Neutrinos entstehen. Wenn sich diese beobachten ließen, wäre das also ein handfester Beleg. Erste Resultate vom H.E.S.S.-Teleskop passen allerdings nicht zu dieser Vorhersage. Das Modell stützt sich auf die Erklärung für die begleitende Lichterscheinung: Der Feuerball der Hypernova erzeugt demnach über viele Sekunden unweigerlich auch ein optisches Leuchten. Ein solches Nachglühen wurde bereits mehrfach beobachtet.

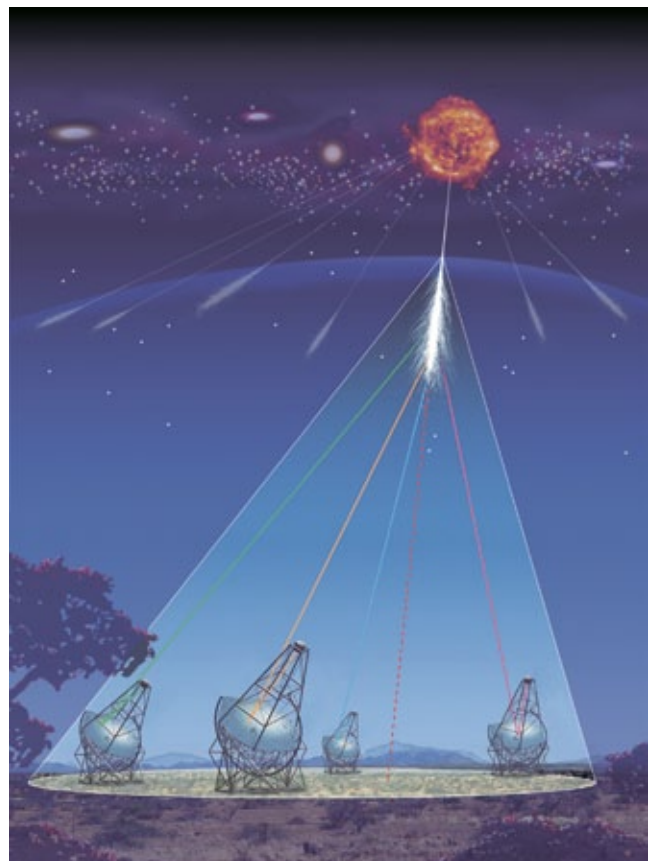
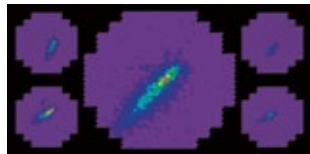
Für kurze GRBs, die nach weniger als zwei Sekunden vorbei sind, favorisieren die Theoretiker ein anderes Szenario. Wenn zwei Neutronensterne oder ein Neutronenstern und ein Schwarzes Loch miteinander kollidieren, könnten durch die extreme Verdichtung und Erhitzung der Materie Gammablitz entstehen. Mit einem optischen Nachglühen ist

hier zwar nicht zu rechnen (man hat auch noch keines entdeckt), solche Ereignisse sollten aber von Gravitationswellenpulsen begleitet sein, die womöglich mit den derzeit geplanten Detektoren wie Advanced LIGO nachweisbar wären.

Eines ist klar: Der Gammastrahlung liegt in allen Fällen ein Prozess zu Grunde, bei dem elektrisch geladene Teilchen auf relativistische Energien beschleunigt werden – das heißt auf Werte, die viel höher sind als die Ruhemasseenergie $E=mc^2$ der Partikel. Energiereiche Gammaquanten werden unterwegs kaum abgelenkt, geben also unmittelbar Auskunft über ihren Ursprung. Ein schönes Beispiel liefert Messier 87 (kurz: M87), eine gigantische Radiogalaxie in nur etwa 55 Millionen Lichtjahren Entfernung. Mit dem H.E.S.S.-Teleskop konnte Gammastrahlung im TeV-Bereich nachgewiesen werden, die

Die fünf Einzelteleskope des H.E.S.S., des High Energy Stereoscopic System in Namibia, registrieren Gammastrahlen höchster Energie.

Diese lösen Teilchenschauer aus, deren Spuren in den Teleskopen eingefangen werden (kleines Bild). Der größte Spiegel (unten Mitte) wiegt 600 Tonnen und hat einen Durchmesser von 25 Metern. Er ist damit das derzeit größte Spiegelteleskop der Erde.



FÜNFEITLIGE MESSUNG LINKS OBEN: H.E.S.S. COLLABORATION; FOTO UNTEN: H.E.S.S. COLLABORATION, ARNIM BALZER



von einem sehr kleinen Bereich im Zentrum stammen. Dort vermuten die Forscher schon seit Langem ein Schwarzes Loch mit einer Masse von sechs Milliarden Sonnenmassen. Offensichtlich stammt die Gammastrahlung aus der unmittelbaren Nähe des Schwarzen Lochs. In diesem Gebiet muss somit auch die Beschleunigung der geladenen Teilchen stattfinden.

Geschosse auf der Volcano Ranch

Besonders rätselhaft ist der Ursprung der Teilchen mit Energien zwischen 10^{15} eV und mehreren 10^{18} eV (Exaelektronvolt, EeV). Falls sie von einem galaktischen Beschleuniger ausgespien würden, dann müsste dieser von bislang unbekannter Bauart sein: sehr speziell und besonders effizient. Wahrscheinlich stammen die Hochenergiegeschosse und alle mit noch höherer Energie aber von unbekanntem Quellen in fernen Galaxien.

Einen Schauer kosmischer Strahlung mit einer Energie größer als 10 EeV entdeckten erstmals der Astrophysiker John Linsley (1925–2002) und seine Mitarbeiter am 22. Februar 1962. Sie arbeiteten damals mit einem Teilchenmultiplikatordetektor auf der Volcano Ranch in der Nähe von Albuquerque im US-Bundesstaat New Mexico. Die 19 Kunststoffszintillationszähler des Volcano Air Shower Array überdeckten eine Fläche von acht Quadratkilometern. Zwei Jahre später meldete Linsleys Arbeitsgruppe sogar die Entdeckung eines Ereignisses mit einer Energie von etwa 100 EeV. Mit ständig wachsenden Detektorflächen bei neueren Teleskopen registrierten die Forscher in den folgenden Jahrzehnten immer wieder isolierte Einschläge dieser Art. Weil sie jedoch so selten auftraten, blieben sie für die Astrophysiker bisher nur schwer einzuordnen. Mit einer derart geringen Anzahl ist eine statistische Auswertung einfach nicht sinnvoll.

Wie viele dieser »Ultrarteilchen« erwarten die Wissenschaftler? Bei Energien von zehn EeV, also 10^{19} eV, rechnen sie mit einem Primärteilchen pro Quadratkilometer und Jahr, bei 100 EeV (10^{20} eV) sogar nur mit einem pro Quadratkilometer und Jahrhundert. Erst mit den Tausenden von Quadratkilometer großen Detektorsystemen wie dem beschriebenen Auger Southern Observatory oder dem High Resolution Fly's Eye der University of Utah (HiRes) ließ sich in den letzten Jahren eine größere Anzahl von Ereignissen registrieren.

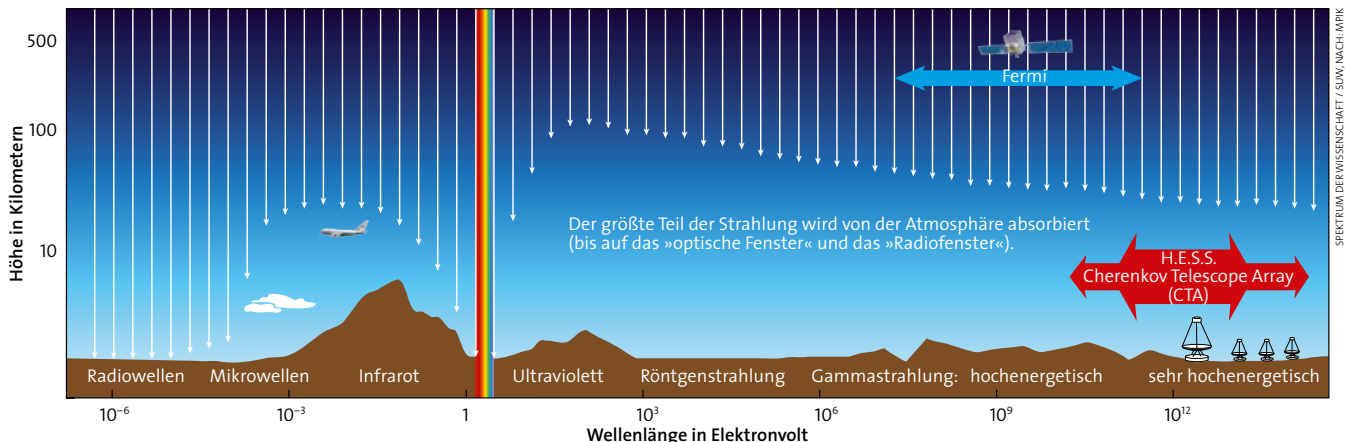
Solche seltenen Vorkommnisse werfen zwei grundsätzliche Fragen auf:

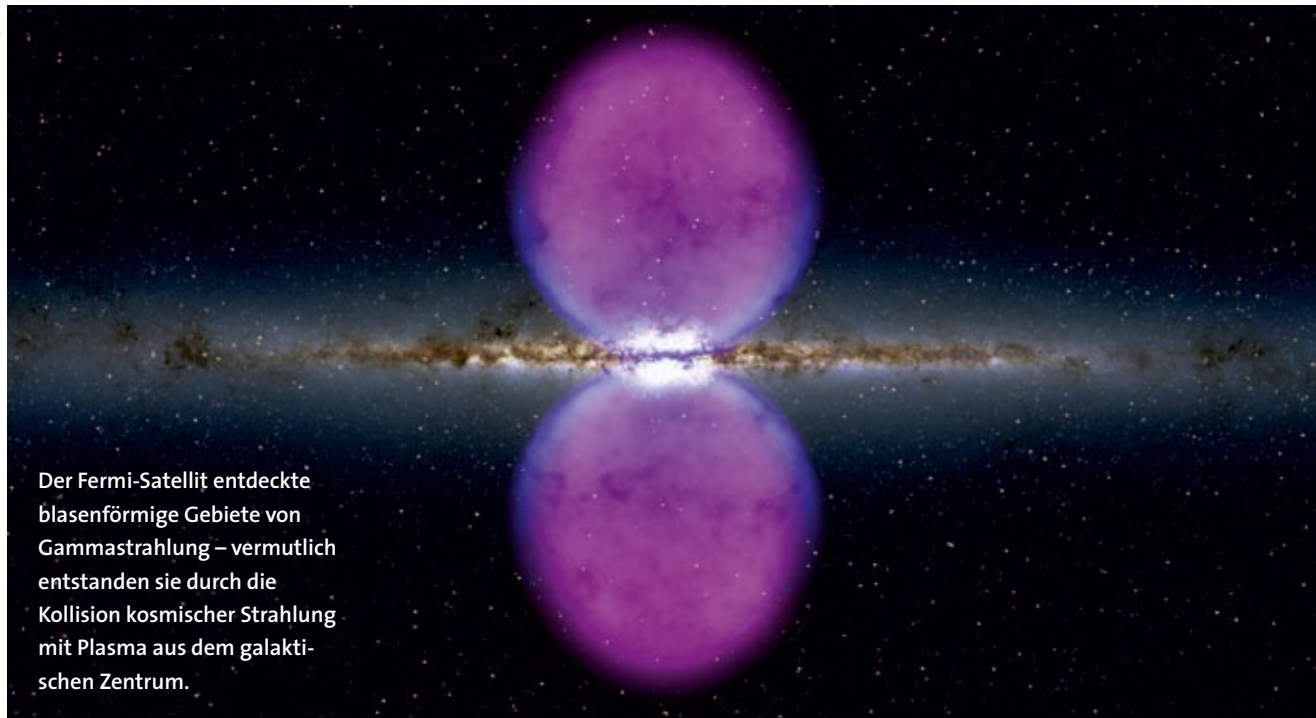
- Wie ändert sich die Energie der Teilchen auf dem Weg von weit entfernten Orten im Kosmos bis zu uns?
- Welcher Mechanismus kann Primärteilchen der kosmischen Strahlung auf Energien von 100 EeV beschleunigen, also zehn Millionen Mal stärker, als sie im Large Hadron Collider erreicht werden?

In der ersten Frage geht es um die Wechselwirkung der ultrahochenergetischen kosmischen Strahlung (UHECR) mit den Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrunds (cosmic background radiation, CMB). Mit dieser Reststrahlung des Urknalls stoßen die Teilchen – zumeist sind es Protonen – auf ihrer Reise durchs All unentwegt zusammen. Oberhalb einer Schwelle von etwa 50 EeV erzeugen Protonen beim Zusammenprall Pi-Mesonen und verlieren dadurch enorm an Energie. Atomkerne werden bei derartigen Kollisionen hingegen in kleinere Teilstücke zertrümmert: Eisenkerne zerlegen sich erst oberhalb von 50 EeV, leichtere Atomkerne bereits darunter. Zuerst berechnet haben diese Effekte die Astrophysiker Kenneth Greisen, Georgiy Zatsepin und Vadim Kuzmin. Im Jahr 1966 sagten sie einen steilen Abfall des Spektrums der kosmischen Strahlung oberhalb von 50 EeV voraus. Fachleute sprechen vom GZK-Effekt oder der GZK-Schwelle (in der Grafik S. 44 als »Knöchel« bezeichnet), oberhalb derer sich nur noch wenige Teilchen finden.

Daher herrschte helle Aufregung, als in den 1990er Jahren mit dem japanischen Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) UHECR-Teilchenschauer gemessen wurden, die nicht die erwartete Abnahme zeigten. Außerdem trafen sie am Himmel nur gebündelt aus ganz bestimmten Richtungen ein. Dies führte zu interessanten Spekulationen: War vielleicht neue Physik jenseits des Standardmodells zu erwarten? Widersprachen sie womöglich bestimmten Grundannahmen der speziellen Relativitätstheorie? Um die Verwirrung noch zu steigern, fand die amerikanische Konkurrenz am HiRes Er-

Das Spektrum elektromagnetischer Wellen umfasst über 16 Größenordnungen. Hochenergiwellen können nur mit Satelliten oder am Boden indirekt über Luftschauer eingefangen werden.





Der Fermi-Satellit entdeckte blasenförmige Gebiete von Gammastrahlung – vermutlich entstanden sie durch die Kollision kosmischer Strahlung mit Plasma aus dem galaktischen Zentrum.

eignisse, die den AGASA-Resultaten glatt widersprachen: Sie bestätigten die erwartete GZK-Schwelle des Energiespektrums und wiesen zudem auf keinerlei Häufung in bestimmten Himmelsrichtungen hin.

Die Ultrateilchen bis zu 100 EeV, ihre Ankunftsrichtungen und die Zusammensetzung sind mittlerweile von HiRes und vor allem vom Pierre Auger Observatory hinreichend häufig beobachtet worden, so dass die Fachleute auch eine akzeptable Statistik über Himmelsrichtungen und die Energieverteilung erstellen konnten. Die Ergebnisse bestätigen eindeutig den GZK-Effekt. Unterhalb von 40 EeV passen die Beobachtungen gut zu dem Potenzgesetz $\sim E^{-2,69}$. Oberhalb dieses Werts registrierten die Detektoren nur etwa 40 Prozent der gemäß einer Extrapolation des Potenzgesetzes zu erwartenden Ereignisse, und oberhalb von 100 EeV sogar weniger als drei Prozent – in Übereinstimmung mit »GZK«.

Gibt es eine Fundamentallänge?

Damit ließen sich die Abweichter des AGASA-Teleskops als Messfehler der Anlage ad acta legen. Die Bestätigung des GZK-Abfalls entzog auch den Spekulationen über neue Physik und exotischen Szenarien die Grundlage. Trotzdem bleiben solche Überlegungen für Theoretiker weiterhin attraktiv, denn es könnten ja bei Energien deutlich oberhalb von 100 EeV immer noch neue Effekte auftreten. Da die Ultrateilchen mit Energien von weit mehr als einem EeV durchs All rauschen, kann man eigentlich fast erwarten, dass ihre physikalischen Eigenschaften nicht allein dem Standardmodell der Elementarteilchen entsprechen.

Stringtheorien oder auch die Quantengravitation (siehe SdW 4/2012, S. 34) legen es nahe, dass bei sehr hohen Energien eine fundamentale Länge ins Spiel kommt, die als Planck-

Länge bekannt ist. Bei dieser winzigen Dimension von 10^{-33} Zentimetern sind Raum und Zeit nicht mehr sinnvoll definiert, da Effekte der Quantengravitation dominieren sollten. Die Physik dieser »Planck-Ära« ist weit gehend unbekannt. Zwar haben Theoretiker zahlreiche Modelle entworfen, doch diese müssen Spekulation bleiben, solange sich daraus keine Vorhersagen ableiten lassen, die in realistischen Experimenten geprüft werden sollten.

Die Existenz einer fundamentalen Länge könnte die Beziehung zwischen Energie und Impuls eines Teilchens ändern, was sich mathematisch durch einen energieabhängigen Zusatzterm beschreiben lässt. Damit ließe sich die Schwelle von 50 EeV verschieben, oberhalb derer durch Kollisionen von Protonen und Hintergrundstrahlungsphotonen Pi-Mesonen entstehen. Das würde auch das Energiespektrum der kosmischen Strahlung verändern. Mit solchen Modifikationen gelingt es, die Theorie mit den beobachteten Pi-Mesonen in Einklang zu bringen. Damit werden einerseits die – zum GZK-Effekt passenden – Ergebnisse des Pierre Auger Cosmic Ray Observatory reproduziert, andererseits taucht jenseits von 100 EeV wieder ein Anstieg im Energiespektrum auf.

Die Beobachtung des von Theoretikern vorhergesagten GZK-Effekts motiviert die Astronomen, nach den Quellen dieser Strahlung zu suchen. Kosmisch gesehen sollten diese relativ nahe liegen. Oberhalb der GZK-Schwelle eintreffende Ultrateilchen können der Theorie nach nur aus einem Bereich von maximal 300 Millionen Lichtjahren Radius stammen, aus der so genannten GZK-Sphäre oder dem GZK-Horizont. Wie erwähnt werden Partikel aus größerer Entfernung vorher ausgebrems.

Innerhalb dieses Radius sind aber die Galaxien nicht gleichmäßig verteilt. Deshalb könnte man auch eine unre-



regelmäßige (»nichtisotrope«) Verteilung der Richtungen erwarten, aus denen Teilchen eintreffen. Die Beobachtungen mit dem Auger-Observatorium deuten auf eine solche Anisotropie hin, die vielleicht zu der Verteilung aktiver Galaxien in Beziehung steht. Allerdings sind diese Befunde noch vorläufig, da bisher statistisch nicht besonders signifikant. Der Grund: Kosmische Magnetfelder lenken die geladenen Teilchen auf ihrem Weg zu unseren Detektoren ab, weshalb man keine direkten Informationen über ihre Herkunftsrichtung gewinnt. Modelle für das galaktische und das extragalaktische Magnetfeld erlauben es, diese Abweichungen von der Ursprungsrichtung abzuschätzen – typischerweise höchstens zwei Grad, in anderen Theorien bis zu zehn.

Woher stammen die hohen Energien?

Die aktive Galaxie Centaurus A, die in einer Entfernung von zwölf Millionen Lichtjahren liegt, sendet offenbar besonders viele Ultrateilchen aus. Innerhalb eines Öffnungswinkels von 18 Grad in Richtung Centaurus A entdeckten die Beobachter 13 Ereignisse (Stand September 2011).

Der gleichfalls aktiven Galaxie Messier 87 ließ sich bisher hingegen kein einziges Hochenergiepartikelchen zuordnen. Doch wegen der größeren Entfernung von etwa 60 Millionen Lichtjahren und der kürzeren Zeit, in der M87 für das Auger-Teleskop auf der südlichen Halbkugel sichtbar ist (ein Drittel der Zeit, die Centaurus A zu sehen ist), erwartet man von dort auch etwa 75-mal weniger Ereignisse. Dies würde den Unterschied in den Daten erklären, falls M87 etwa ähnlich viele Ultrateilchen ausstößt wie Centaurus A. Insgesamt beruht die Anisotropie also im Wesentlichen auf einem Überschuss von Partikeln von Centaurus A.

Zurück zur Preisfrage: Wie kommen die kosmischen Strahlungspartikel nun auf diese hohen Energien? Anders gefragt, wie kann eine makroskopische Energie von 20 Joule durch natürliche Prozesse auf ein mikroskopisches Teilchen übertragen werden?

In einer ihrer kühnen Ideen versuchten Theoretiker, den Zerfall eines exotischen, bislang unbekanntes Teilchens großer Masse als Erklärung heranzuziehen und diesen Prozess in der Umgebung eines Schwarzen Lochs zu berechnen.

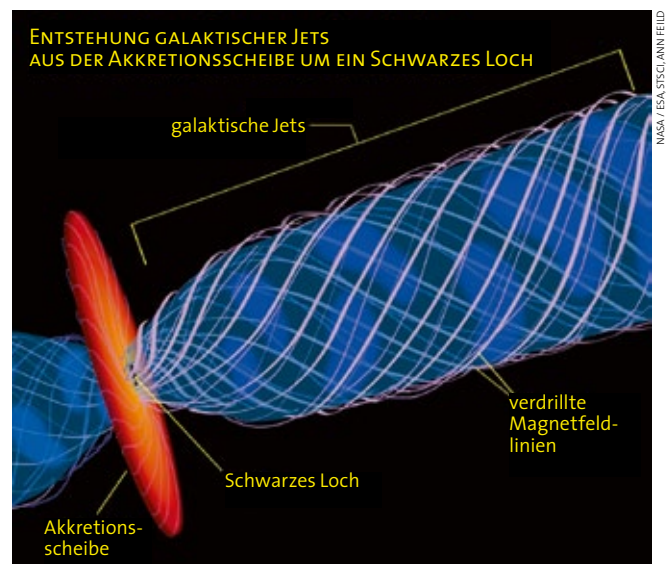
Galaktische »Jets« (Düsenstrahlen) könnten bei rotierenden Schwarzen Löchern zusammen mit verdrehten Magnetfeldern entstehen.

Solch ein hypothetischer Zerfall würde Quarks und Leptonen hervorbringen; diese wiederum würden eine große Kaskade weiterer Tochterobjekte erzeugen – energiereiche Photonen, Neutrinos, leichte Leptonen sowie Spuren von Protonen und Neutronen. In dem Modell würden kosmische Strahlen mit ultrahoher Energie direkt aus der Zerfallskaskade entstehen. Allerdings sind weder die Existenz derartiger Teilchen noch die von Monopolen, Strings oder weiteren hochspekulativen Phänomenen gesichert, wie sie bei der Entwicklung des Kosmos entstehen könnten. Hinzu kommt: Auch die Mechanismen, die den Zerfall der fiktiven Teilchen steuern, sind nicht bekannt. Und zum Ende der Zerfallskaskade sagen solche Modelle einen sehr hohen Anteil an Photonen und Neutrinos voraus. Beobachtungen speziell des Auger-Observatoriums konnten jedoch unter den primären Ultrateilchen nur einen sehr geringen Anteil von Photonen entdecken. All das spricht gegen exotische Zerfallsmodelle.

Wenn also das Exotische ausscheidet, bleibt nur der Rückgriff auf das Bewährte – die Beschleunigung geladener Teilchen auf extrem hohe Energien. Im Prinzip könnte dies durch zwei verschiedene Mechanismen geschehen:

- Stoßwellen oder
- elektrische Felder sehr schnell rotierender, kompakter, mit starkem Magnetfeld ausgestatteter Himmelskörper, etwa junger Neutronensterne.

Die erste passende Vorstellung stammt von dem Kernphysiker Enrico Fermi (1901–1954). Er postulierte, dass sich geladene Teilchen oft an magnetischen Unregelmäßigkeiten streuen, in unzähligen Zickzackbewegungen durch eine Stoßfront irren und dabei immer schneller werden. Die Details dieses Mechanismus haben Theoretiker inzwischen weiter ausgearbeitet – und eine Reihe von Bedingungen festgelegt, die erfüllt sein müssten, um die Spitzenenergien zu erreichen. Unter den Kandidaten befinden sich Neutronensterne oder ähnliche Supernova-Explosionen, ausgedehnte Stoßfronten in Kollisionen von Galaxien und Galaxienhaufen, die heißen Emissionsgebiete von Radiogalaxien und die



ALLVIEW™

Multi-Purpose Computerized Mount

Sky-Watcher®

Be amazed.

Die innovative und äußerst vielseitige computergesteuerte Sky-Watcher Allview Montierung mit Handbox und Stativ ist ein unverzichtbarer Begleiter für alle fotografischen- und visuellen Beobachtungsbedürfnisse. Die Allview kann für Panorama- oder Zeitrafferaufnahmen, Videoaufnahmen, für die „Go-To“-Astronomie oder einfach nur als eine stabile motorisierte Plattform für die Montage eines Spektivs oder Fernglases verwendet werden. Die Allview Montierung bildet auch eine nützliche Basis für Sicherheits- und Überwachungsanwendungen.



kompatibel mit seriellen Bluetoothadaptern zur drahtlosen Fernsteuerung der Montierung

PANORAMA

UVP € 439,-

Neu ab 2013



f64-tours

WORKSHOP PANORAMAFOTOGRAFIE

Vom Weitwinkel zum Panorama – vom Tag zur Nacht mit der Skywatcher Allview Montierung
Weitere Infos unter: www.f64-tours.de

- Skyline und Citylights - Ort: Frankfurt / Main - Termin: 20.04.13 / 2 Tage
- Landschaft und Sternenhimmel - Ort: Moseltal - Termin: 27.04.13 / 2 Tage
- Landschaft und Sternenhimmel - Ort: Moseltal - Termin: 12.10.13 / 2 Tage
- Skyline und Citylights - Ort: Frankfurt / Main - Termin: 19.10.13 / 2 Tage
- Fernsicht und Sternlicht - Ort: Schnalstal / Südtirol (I) - Termin: 24.01.14 / 4 Tage

Workshop Trainer:

Gernot Meiser



Gerd Jütten



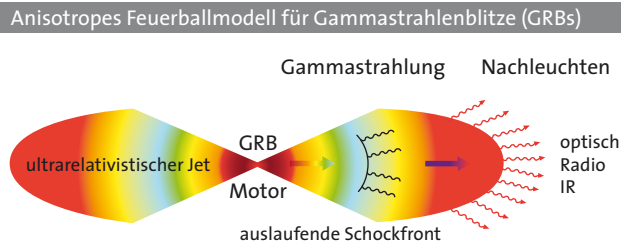
Optical Vision Ltd. - UK
Vertretungsbüro & Warenlager
Duracher Str. 11
D - 87437 Kempten

Tel: +49+831-697 28 82 - 10
Fax: +49+831-697 28 82 - 20
eMail: info@optical-vision.de
www.optical-vision.de

Hintergrundbild:

Haus der Astronomie in Heidelberg;
Aufnahme von Gernot Meiser mit
Skywatcher Allview Montierung und Nikon D4

Die abgebildete Kamera ist nicht im Lieferumfang enthalten.



Gammastrahlenblitze (GRBs) im »Feuerballmodell«: Heißes Gas strömt aus einer Akkretionsscheibe in ein massereiches Schwarzes Loch (GRB-Motor). Dort bilden sich Jets senkrecht zur Scheibenebene und erzeugen den Gammablitz.

bereits erwähnten Zentren und Jets aktiver Galaxien sowie die Gammastrahlenblitze. Dabei spielen nach heutigem Wissen die Jets eine zentrale Rolle – sie sind der Schlüssel für die Teilchenbeschleunigung.

In den Zentralbereichen aktiver Galaxien befinden sich rotierende Schwarze Löcher mit Milliarden Sonnenmassen, die Gas und Staub aus der Umgebung ansaugen. Die Materie stürzt ins Schwarze Loch und erhitzt sich dabei, worauf diese Energie mit hoher Intensität wieder abgestrahlt wird, während Teilchen und Strahlung längs der Rotationsachse des Schwarzen Lochs in einem Strahl innerhalb eines relativ engen Trichters nach außen geschleudert werden.

Irgendwie schaffen es die Magnetfelder, die in dem heißen Plasma mitgerissen werden, diesen inneren Jet zu bündeln. Erst in größerem Abstand vom Schwarzen Loch bilden sich dann die riesigen äußeren Jets, die von den Astronomen in den aktiven galaktischen Zentren beobachtet werden. Die Theoretiker haben jedoch noch viel Arbeit vor sich, bis sie dieses an sich plausible Szenario im Detail erklären können.

Gleichwohl sind sich die Forscher darin einig, dass die Ultrateilchen in Jets mit Dimensionen von Lichtjahren und einem Magnetfeld von wenigen Gauß Stärke auf einige zehn EeV beschleunigt werden können. Auch im Innenbereich eines galaktischen Zentrums, also direkt in der Nähe des Schwarzen Lochs, mit einem Durchmesser von wenigen Lichtminuten und einem Magnetfeld von 1000 Gauß, scheinen solche Maximalenergien erreichbar.

Die genauen Eigenschaften der Jets in Radiogalaxien sind noch nicht genügend bekannt. Doch glauben die Astrophysiker, dass dort Umstände herrschen, die Teilchen oder Atomkerne auf mehr als 100 EeV beschleunigen. Auch die Gammablitze wurden von manchen Forschern als Ursache für die Ultrateilchen vorgeschlagen. Dazu müsste es zuallererst eine gewaltige Explosion geben, die einen großen Feuerball aus schleudert. Wenn dieser fast mit Lichtgeschwindigkeit expandiert, könnten dabei geladene Teilchen bis auf 100 EeV beschleunigen. Die Häufigkeit der GRBs reicht wohl aus, um die beobachteten UHECR-Ereignisse zu produzieren, falls jeder GRB ähnliche Energien in kosmischer Strahlung wie in seiner Gammastrahlung liefert. In diesem Modell würden

die Quellen selbst unsichtbar bleiben. Denn die kosmischen Strahlen würden ja von verschiedenen Ausbrüchen stammen und die Erde erst lange – 1000 bis zehn Millionen Jahre – nach dem Gammaausbruch selbst erreichen.

Viele Fragen sind noch zu klären, bevor die Astronomen halbwegs sicher sein können, dass sie die Prozesse erfasst haben, die zu den Teilchen mit höchster Energie im Kosmos führen. Den Kreis der Verdächtigen können sie immerhin eingrenzen: Schwarze Löcher als die grundlegende Energiequelle, Stoßwellen von galaktischen Dimensionen sowie nahezu mit Lichtgeschwindigkeit expandierende Feuerbälle produzieren das gigantische Schauspiel des ultraheißen Kosmos.

Die diversen, mehr oder minder spekulativen Modelle der kosmischen Beschleuniger müssen erst durch Experimente bestätigt oder verworfen werden. Dies kann gelingen, wenn die Astronomen das Spektrum der kosmischen Strahlung weiterhin im Detail registrieren und möglichst bis zu ihrem Ursprungsort zurückverfolgen.

Mit weiteren Beobachtungsstationen im Weltraum könnte ein großer Teil der Erdatmosphäre überwacht werden. So ließe sich ein beachtlicher Bruchteil der geschätzten etwa fünf Millionen Ereignisse pro Jahr beobachten, bei denen geladene Teilchen mit 100 EeV auftreffen. Damit wäre eine wirkliche Teilchenastronomie etabliert, und es würde möglich, die Herkunft der energiereichsten Partikel im Kosmos zu enträtseln – weit über das hinausgehend, was Physikern auf der Erde möglich ist. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

- Hofmann, W.:** The Non-Thermal Universe, 2012. Abrufbar unter www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/physics/
- Lemoine, M., Sigl, G.:** Physics and Astrophysics of Ultra-High-Energy Cosmic Rays. Lecture Notes in Physics 576. Springer, Heidelberg 2010
- Letessier-Selvon, A., Stanev, T.:** Ultrahigh Energy Cosmic Rays. In: Reviews in Modern Physics 83, S. 907–942, 2011

WEBLINKS

- www.mpi-hd.mpg.de/HESS
www.auger.de
fermi.gsfc.nasa.gov
 Websites der Hochenergie-Teleskope H.E.S.S., Pierre Auger Observatory sowie des Gamma-Satelliten Fermi

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184763



Freie Stellen!

- Fachberater/in Astronomie
- Leiter/in Produktsourcing und Lieferantenbeziehungen
- Mitarbeiter/in im Content Management - Kategorien Astronomie und Mikroskopie

weitere Informationen finden Sie auf unserer Unternehmensseite nimax.de

Teleskope und Ferngläser

■ Omegon Einstiegteleskope

Die Teleskope von Omegon sind gerade für den Einstieg in die Astronomie besonders zu empfehlen. Unsere Marke Omegon steht für ausgewählte Produkte und geprüfte Qualität zum kleinen Preis, oft günstiger als vergleichbare Modelle anderer Marken.



Unser Kauf Tipp

	Artikel-Nr.	Preis
1	60/700 AZ-1	11267 69,90 statt 79,-
2	114/900 EQ-1	11266 149,- statt 159,-
3	130/920 EQ-2	13762 199,-
4	150/750 EQ-4	22465 329,- statt 349,-

■ Omegon Nightstar 20x80

Ein sehr schönes Fernglas, mit hoher Auflösung. Mit 80mm Öffnung sammelt es fast 20% mehr Licht als eine 70mm Öffnung. Erkennen Sie mehr Himmelsobjekte und entdecken somit weit entfernt liegende Galaxien und Einzelsterne. Nicht selbstverständlich ist eine volle Multivergütung auf allen optischen Flächen, aber bei dem 20x80 ist auch dies gegeben. Damit haben Sie eine hervorragende Bildhelligkeit bei hohem Kontrast.



Artikel-Nr.: 12461 Preis: 129,-

■ Omegon Nightstar 25x100 mit Tasche

Das Omegon Nightstar 25x100 ist ein leistungsfähiges Großfernglas für Naturbeobachtungen und ein lichtstarkes Instrument für astronomische Übersichtsbeobachtungen. Es eignet sich aufgrund der eingebauten Filtergewinde auch ausgezeichnet für großflächige Nebelregionen. Es bietet mit 4mm Austrittspupille auch dem Naturbeobachter bei zunehmender Dämmerung eine helle und kontrastreiche Abbildung. Durch überdimensionierte BaK-4 Prismen ist eine große Ausleuchtung gewährleistet.



Artikel-Nr.: 14698 Preis: 299,-

Empfehlungen

■ Kosmos Himmelsjahr 2013

Dieses Jahrbuch beinhaltet alle Mondphasen, einen monatlichen Überblick von Planeten, Sternbildern und besondere Ereignisse am Firmament sowie Berichte über astronomische Phänomene und die Rätsel des Weltalls.



Artikel-Nr.: 25453 Preis: 16,99

■ Oculum Verlag Fernrohr Führerschein in 4 Schritten

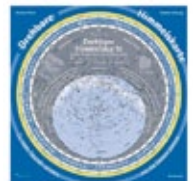
Dieses Buch bringt anfangersfreundlich alle Antworten auf Fragen rund um die Optik, Mechanik und Benutzung eines astronomischen Teleskops. Erstmals wurden alle wichtigen Definitionen und Formeln zur Fernrohrtechnik zusammengefasst.



Artikel-Nr.: 1486 Preis: 16,90

■ Oculum Verlag Drehbare Himmelskarte

Diese drehbare Sternkarte ist ein Basis-Instrument für das Hobby Astronomie. Hiermit lernen Sie umfassend den kompletten Sternenhimmel kennen.



Artikel-Nr.: 4893 Preis: 14,90

■ Sega Toys Homestar Planetarium

Holen Sie sich 60.000 funkelnde Sterne vom Himmel an Ihre Zimmerdecke. Stellen Sie sich vor Sie könnten den Sternenhimmel beobachten während Sie bequem auf der Couch sitzen. Mit Homestar, dem hochauflösenden 3 Watt LED Heimplanetarium mit Rotationsbewegung, das das Bild des Himmelsgewölbes dem Jahresverlauf getreu wiedergibt, wird dieser Traum Wirklichkeit.



Artikel-Nr.: 26925 Preis: 119,-

Persönliche Beratung

@ Service@Astroshop.de

+49 8191 94049-1

+49 8191 94049-9

Astroshop.de
c/o nimax GmbH
Otto-Lilienthal-Str. 9
86899 Landsberg am Lech
Direkt an der A96 und B17,
ca. 30min von Augsburg
und München.

Damit wir uns genug Zeit für Sie nehmen können, rufen Sie bitte immer vor Ihrem Besuch bei uns an und vereinbaren einen Termin. >>>Danke<<<

Wir sind Mo-Fr von 9-17 Uhr und jeden 1. Sa im Monat von 10-16 Uhr für Sie da!

Das Geheimnis der Waschbrettpisten

Kleine Ursachen können große Wirkungen haben. Aber warum führen sie auf unbefestigten Straßen zu so regelmäßigen Strukturen?

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Vor einigen Jahren, beim Urlaub auf einer Insel, liehen wir Fahrräder aus und wunderten uns zunächst über die knallhart aufgepumpten Reifen. Doch nicht lange: Als wir auf dem Weg zu unserer Herberge auf eine staubige Waschbrettpiste gerieten, waren wir regelrecht froh darüber. Wegen der harten Stöße gegen den Boden mussten wir die Zähne zusammenpressen, um sie am hochfrequenten Klappern zu hindern. Nur der hohe Luftdruck in den Reifen verhinderte, dass die Felgen dabei auf dem Untergrund aufsaßen.

Das Phänomen der Waschbrettpisten war vor einiger Zeit sogar Thema im angesehenen Fachmagazin »Physical Review Letters« (siehe Quelle). Eine Gruppe von Physikern aus Frankreich, Großbritannien und Kanada hatte sich zu seiner Untersuchung zusammengesetzt. Allerdings beantwortete auch ihre Publikation nicht alle Fragen.

Merkwürdig an den ausgeprägten Querrillen auf unbefestigten Fahrwegen ist nicht nur, dass die ursprünglich ebene Form des Wegs – die man eigentlich für stabil halten würde – verloren geht, sondern dass eine sehr regelmäßige neue Struktur entsteht, die kaum auf



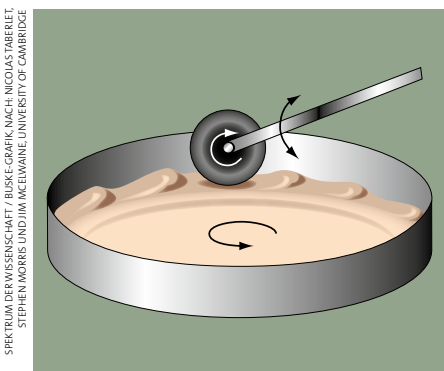
Die einzelnen Sandrippel auf dieser Waschbrettpiste besitzen regelmäßige, fast identische Abstände. Welcher Mechanismus lässt sie entstehen?

natürliche Art zu Stande gekommen zu sein scheint. Zudem mündet die Verformung offenbar geradezu zwangsläufig in ein Waschbrettmuster – ein Endzustand, den auch weitere passierende Fahrzeuge nicht mehr verändern.

Allerdings handelt es um keinen statischen Endzustand. Mit einiger Geduld kann man sich davon überzeugen, dass die Bodenwellen ständig in Fahrtrich-

tung weiterwandern. Jedes Fahrzeug baut vorne an, was es hinten abhebt. In seiner Asymmetrie ähnelt das entstehende Wellenprofil jenem von Sandrippeln in der Wüste: In Fahrt-beziehungsweise Windrichtung fallen die Erhebungen steiler ab als in Gegenrichtung. Dagegen beobachtet man auf einspurigen Straßen, die in beiden Richtungen befahren werden, weit gehend symmetrische Formen. Auch auf ihnen bewegen sich die Rippel, aber in ständig wechselnde Richtung.

Verhindern lässt sich die Entstehung einer Waschbrettpiste kaum. Auf unserer Ferieninsel, so erfuhren wir, werden die Bodenwellen von Zeit zu Zeit mit einigem Aufwand abgetragen und durch eine neue Schotterschicht ersetzt. Jedes Mal ist damit erneut die Hoffnung verknüpft, glatte und lineare Verläufe zu erzwingen – mit anderen Granulatmi-



Müsste sich das Entstehen der Sandrippel nicht quantifizieren lassen? Forscher um Nicolas Taberlet von der École normale supérieure de Lyon fanden mit Hilfe eines sandgefüllten Drehtellers heraus: Je schwerer das darüberlaufende Rad, desto stärker wächst die Amplitude des periodischen Wellenmusters und desto mehr nimmt die Wellenlänge ab.

Primo Levi (1919–1987)

BENEFACITOR123 / CC-BY-3.0 (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BBY/3.0/)

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BILDE-GRAFIK NACH NICOLAS TABERLET, STEPHEN MORRIS UND JIM MCKEIVAN/UNIVERSITY OF CAMBRIDGE



Diese Asphaltstraße wurde zur Ausbesserung großzügig mit Splitt bedeckt. Der Autor wollte wissen, was anschließend geschehen würde, und beobachtete, dass schon 20 darüberfahrende Autos genügten, damit sich ein Waschbrettmuster zu entwickeln begann.

sungen und besseren Verfahren, sie aufzubringen. Aber stets zeigt sich nach einiger Zeit dasselbe alte Bild. An häufig befahrenen Strecken ist man inzwischen dazu übergegangen, das Problem unter einer Asphaltdecke zu begraben.

Wie also kommt das Muster zu Stande? Am besten schaut man sich das vor Ort an, etwa an einer nur notdürftig ausgebesserten Nebenstraße. Ihre Löcher werden zunächst geteert und dann mit einer recht dicken Splittschicht bedeckt. Die ersten passierenden Fahrzeuge, so könnte man erwarten, walzen den Splitt nieder und sorgen dafür, dass er sich mit dem Untergrund verbindet. Stattdessen beginnt sich schon nach rund 20 Überfahrten eine Waschbrettpiste zu entwickeln (Foto oben).

Absprung von der Rampe

Ausgangspunkt des Effekts ist offenbar eine zufällige kleine Erhöhung im Granulat. Sie hebt die Räder der darüberfahrenden Fahrzeuge zunächst etwas an, so dass diese anschließend auf den Untergrund zurückfallen und dabei nach einigen Überfahrten eine Delle erzeugen. Deren Flanke wirkt dann wie eine kleine Rampe, auf der nachfolgende Räder nach oben beschleunigt werden, um abermals mit Wucht in der Granulatschicht zu landen – diesmal allerdings eine »Wellenlänge« weiter vorn. Wieder entsteht nach einigen Überfahr-

ten eine Delle und so weiter. Die anfänglich kleine Vertiefung vervielfältigt sich also allmählich und überzieht schon bald den ganzen ausgebesserten Bereich. Eine kleine Ursache führt in diesem Fall zu einer großen Wirkung – und das geradezu zwangsläufig.

Straßenbauingenieure wissen seit Langem, dass unbefestigte Straßen zur Ausbildung eines nichtlinearen Profils neigen und sich ein Waschbrettmuster immer dann bilden kann, wenn die Fahrzeuge schneller als etwa vier Kilometer pro Stunde fahren – was praktisch stets der Fall ist. Was fehlt, ist allerdings weiterhin eine Theorie, die beispielsweise die Abhängigkeit der Musterbildung vom Gewicht der Fahrzeuge, der Größe ihrer Räder, der Beschaffenheit des Granulats und so weiter vorherzusagen vermag.

Die erwähnte Forschergruppe um Nicolas Taberlet von der École normale supérieure de Lyon hat sich daher experimentell und mit Hilfe von Computersimulationen mit dem Problem befasst. Sie wollten zunächst das einfachste System verstehen lernen, das in der Lage ist, ein Waschbrettmuster hervorzubringen. Zu diesem Zweck konstruierten die Forscher ein mechanisches Modell, das im Wesentlichen aus einem mit Sand gefüllten Drehteller besteht, an dessen Rand ein Rad unter seinem Eigengewicht über den Sand rollt (siehe

Skizze linke Seite). Solange es die Geschwindigkeit von 5,4 Kilometer pro Stunde nicht überschritt, blieb die Oberfläche glatt. Erst bei höherem Tempo und auch erst nach vielen Passagen des Rads bildet sich zunächst ein einzelner Rippel, von dem dann relativ schnell weitere in Vorwärtsrichtung ausgingen, bis sie schließlich entlang des gesamten Tellerrands ein periodisches Muster im Sand hinterließen.

Mit diesem Modell konnten die Physiker unter anderem zeigen, dass die Waschbrettmuster weder von der mittleren Größe der Granulatteilchen noch vom Durchmesser des Rads abhängen. Nur dessen Eigengewicht macht sich bemerkbar: Je schwerer das Rad, desto stärker wächst die Amplitude des periodischen Wellenmusters und nimmt die Wellenlänge ab. Eine umfassende Theorie, die das Phänomen quantitativ beschreibt, lässt aber weiterhin auf sich warten.

Bis es so weit ist, hilft nur eins: Reifen aufpumpen und Zähne zusammenbeißen. ∞

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting

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

QUELLE

Taberlet, N., Morris, S., McElwaine, J.: Washboard Road: The Dynamics of Granular Ripples formed by Rolling Wheels. In: Physical Review Letters 99, S. 068003, 2007

WEBLINKS

<http://perso.ens-lyon.fr/nicolas.taberlet/washboard/>

Mit Fotos, Skizzen, Videos und einem englischsprachigen Text berichten die Forscher um Nicolas Taberlet von ihren Experimenten.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184765

Vom Higgs-Teilchen zur Weltformel

Das Higgs-Boson, das Physiker letztes Jahr am Großbeschleuniger LHC gefunden haben, komplettiert das Standardmodell der Teilchenphysik. Der experimentelle Erfolg bestätigt vor allem auch die Theoretiker, die das Partikel lange vorausgesagt haben. Lässt der LHC auch Fortschritte bei der Stringtheorie erhoffen?

Von Dieter Lüst

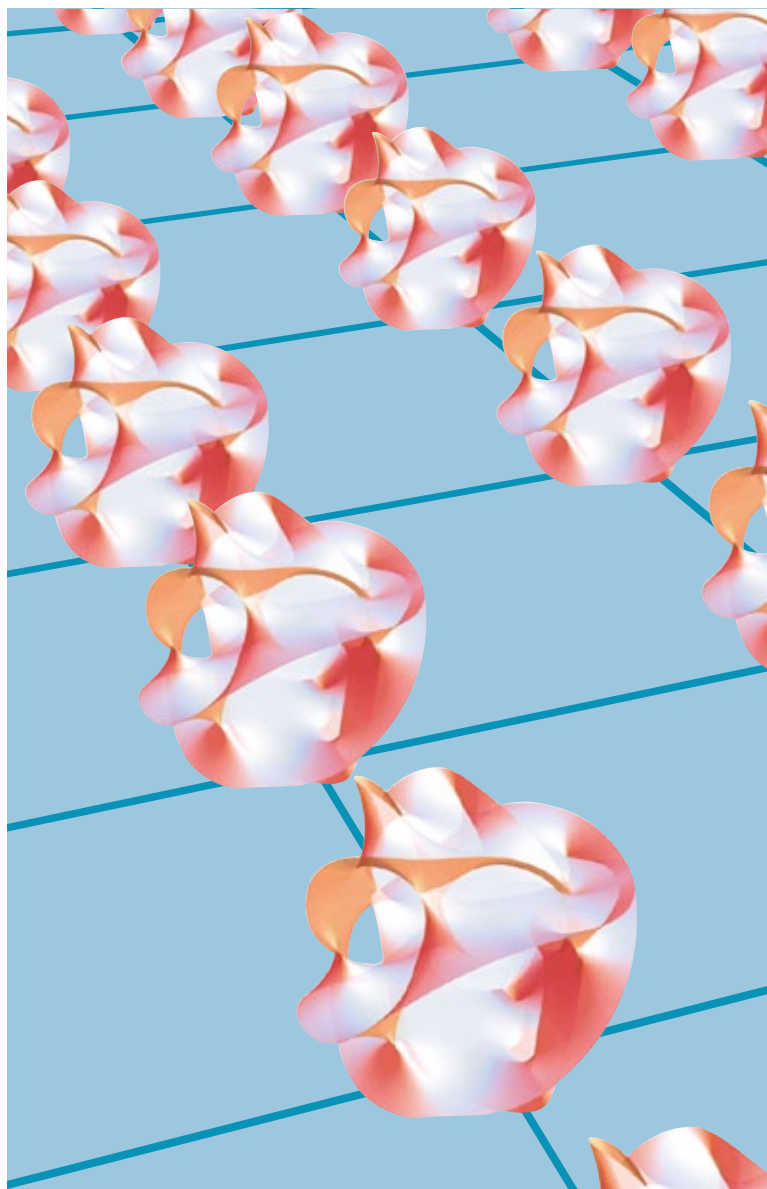
Der 4. Juli 2012 war ein denkwürdiger Tag für die Elementarteilchenphysik. Bei einem eigens anberaumten Seminar verkündeten die Sprecher der beiden Großexperimente ATLAS und CMS am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN die lang ersehnte und von vielen Physikern erwartete Entdeckung des Higgs-Teilchens. Zahlreiche Zuhörer hatten die ganze Nacht vor dem großen Hörsaal verbracht, um das für die Physik so wichtige Ereignis persönlich zu erleben. Auch der theoretische Physiker Peter Higgs, der Namensgeber und einer der »Erfinder« des Teilchens, war unter den Zuhörern und wurde mit riesigem Applaus begrüßt.

Obgleich einige wichtige Eigenschaften des neuen Teilchens noch nicht experimentell ausgemessen sind – das wird noch Monate oder gar Jahre dauern –, sind die meisten Teilchenphysiker doch sicher, dass es sich dabei um das von Peter Higgs vorhergesagte Boson handelt. Es verleiht den meisten anderen Elementarteilchen ihre Massen und ist der letzte Baustein im Standardmodell der Teilchenphysik, das höchst erfolgreich fast alle Elementarteilchen und ihre

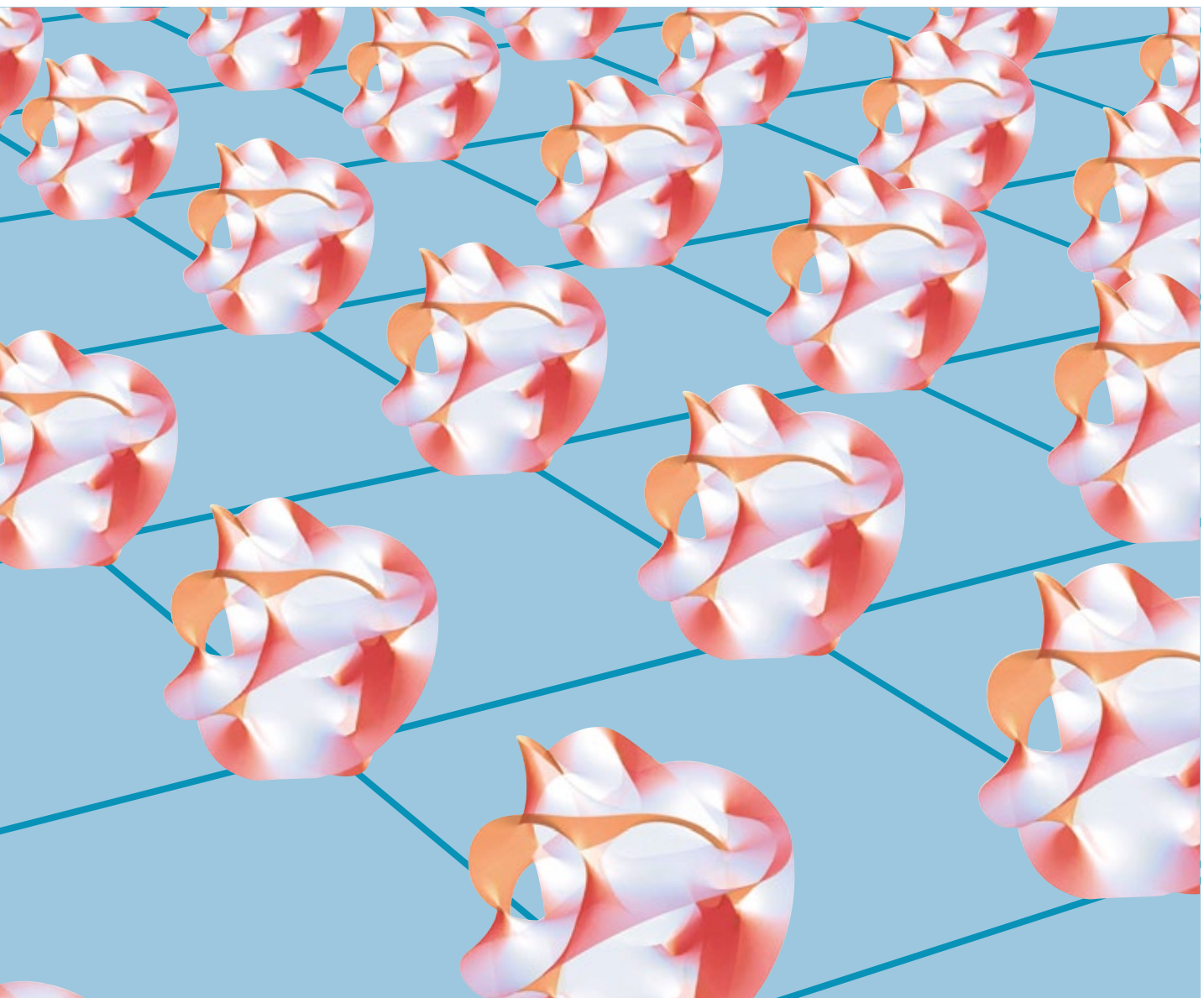
AUF EINEN BLICK

JENSEITS DES HIGGS

- 1 Der Nachweis des Higgs-Teilchens ist nur einer der Gründe, warum der Large Hadron Collider (LHC) gebaut wurde. Der Beschleuniger könnte außerdem **Hinweise auf eine neue Physik** jenseits des **Standardmodells** der Teilchenphysik liefern.
- 2 Möglicherweise finden die Wissenschaftler auch Indizien für **zusätzliche Raumdimensionen**. Sie würden das Gedankengebäude der **Stringtheorie** stützen, die das Potenzial zu einer »Theorie für alles« hat, in der sämtliche Grundkräfte der Natur vereinigt sind.
- 3 Auch weitere neue Teilchen erhoffen sich Theoretiker. Beispielsweise wäre der Fund des noch hypothetischen Gluino ein Beleg für die so genannte **Supersymmetrie**. Ihr zufolge besitzt jedes bekannte Elementarteilchen einen »Superpartner«.



Die Welt besitzt neun Raumdimensionen, vermuten Stringtheoretiker. Wären die sechs Extradimensionen (angedeutet durch rötlich-weiße Objekte, mehr dazu auf S. 62) nicht so winzig, könnte man sich an jedem Punkt des Raums (hier durch ein zweidimensionales Gitter repräsentiert) in sie hineinbegeben. Solche Ideen halten manche zwar für abwegig. Doch sind derartige mathematische und theoretische Methoden prinzipiell in der Lage, grundlegende Eigenschaften der physikalischen Welt korrekt vorherzusagen, wie der Fund des Higgs-Teilchen belegt.



CALABI-YAU-TU WIEN; COMPOSING: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BLISKE-GRAFIK

Wechselwirkungen untereinander beschreibt. Nicht wenige Kollegen in der Physik-Community erwarten daher, dass Higgs und die anderen beteiligten Theoretiker – wie der Belgier François Englert und möglicherweise weitere Physiker in den USA – für ihre grandiose Vorhersage schon im Dezember 2013 mit dem Physiknobelpreis geehrt werden könnten.

Mit der Entdeckung des Higgs hat nicht nur ein Teilbereich der Physik seinen krönenden Abschluss gefunden. Nun steht uns auch der Weg in Richtung einer neuen Physik offen, deren Effekte wir ebenfalls am LHC zu finden hoffen. Dabei können wir aus dem Vergangenen viel lernen.

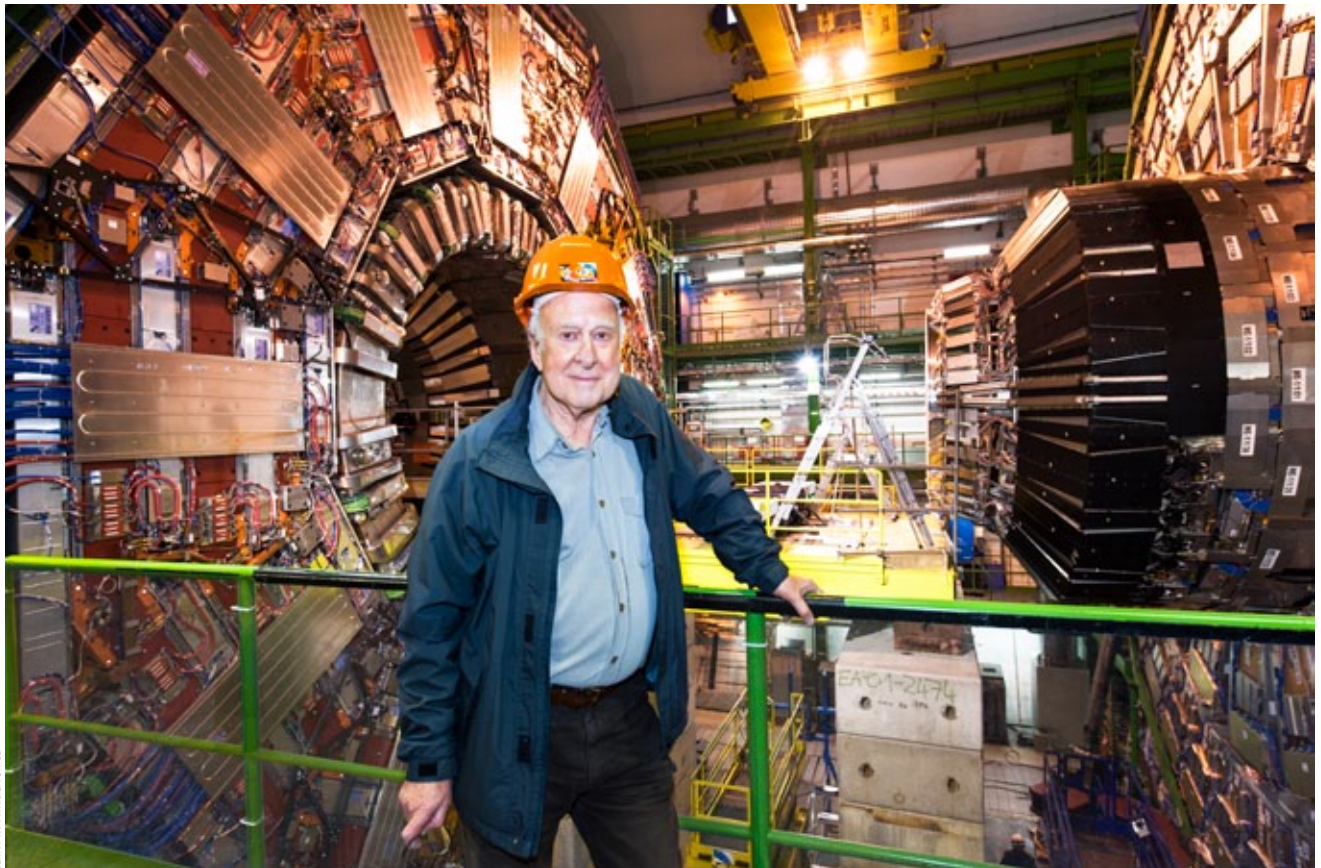
Der jüngste Erfolg ist der fantastischen Ingenieurskunst und dem unglaublichen Geschick der Experimentalphysiker am Genfer CERN geschuldet. Der LHC ist nun schon seit 2009, nach 15-jähriger Bau- und Entwicklungsarbeit, kontinuierlich in Betrieb. Dass die Messungen zum Nachweis des Higgs trotzdem fast drei Jahre in Anspruch nahmen, hängt damit zusammen, dass es bei den Teilchenkollisionen im Beschleuniger nur sehr selten entsteht. Seine von den Detektoren ATLAS und CMS gemessenen Zerfälle gehen in der unge-

Physik-Nobelpreis noch im Jahr 2013? Nicht wenige Forscher erwarten, dass der britische Physiker Peter Higgs einer der Ausgezeichneten sein könnte. Das Foto zeigt ihn in Genf vor dem CMS-Detektor des Teilchenbeschleunigers LHC.

heuren Datenflut von vergleichsweise uninteressanten Ereignissen fast unter.

Für die meisten theoretischen Physiker war die Sache jedoch schon vorher ziemlich klar. Denn mathematisch und theoretisch konsistent ist das Standardmodell der Teilchenphysik nur dann, wenn in der Natur ein Spin-null-Teilchen wie das Higgs existiert. Unklar war lediglich, welche Masse das neue Teilchen besitzen würde. Die Theoretiker konnten nur einen Massenbereich angeben, in dem man das Higgs-Teilchen mit großer Wahrscheinlichkeit finden würde.

Genau dieser Bereich ließ sich mit den am LHC verfügbaren Beschleunigerenergien gut untersuchen. So wurde eine Theorie überprüfbar, die Peter Higgs, aber auch Robert Brout und François Englert 1964 begründet hatten. Sie war nötig geworden, weil Elementarteilchen in den damaligen Theorien stets als masselos beschrieben wurden, obwohl sie den Beobachtungen zufolge eben doch eine Ruhemasse besitzen. Unabhängig voneinander zeigten die beiden Arbeiten – Brout und Englert veröffentlichten ihre Publikation sogar einige Wochen vor Higgs – einen Weg auf, wie sich Elementarteilchen im Rahmen so genannter mathematischer Eichtheorien als Objekte mit Ruhemasse beschreiben lassen. Ihre Grundidee war die Annahme, dass das Vakuum nicht leer ist, sondern dass der gesamte Raum mit einem so genannten Higgs-Feld erfüllt ist. Dieses wäre zwar nicht direkt messbar, doch eine seiner Anregungen würde als Higgs-Teilchen in Erscheinung treten.



CERN / MAXIMILIEN BRICE

Um die theoretischen und nicht sehr anschaulichen Überlegungen der Forscher auch nur ansatzweise zu verstehen, muss man wissen, dass das Higgs ein besonderes, nämlich ein so genanntes skalares Teilchen ist: Es trägt anders als die anderen Elementarteilchen keinen Spin, sein Eigendrehimpuls ist also null. Ein solches Teilchen hat die mathematisch interessante Eigenschaft, dass es sich bei Drehungen im Raum in keiner Weise verändert. Besäße es hingegen einen Spin (oder eine andere richtungsabhängige Eigenschaft), würde dieser nach einer Drehung in eine andere Richtung zeigen.

Ein solches skalares Teilchen kann, wie sich mathematisch beweisen lässt, spontan aus dem Nichts, das heißt aus dem Vakuum entstehen. Ebenso spontan kann es wieder im Nichts verschwinden, es wird dann vom Vakuum gewissermaßen wieder verschluckt. Entscheidend ist, dass es bei diesem Prozess gleichsam Energie aus dem Vakuum herausaugt – und sie anschließend an andere Elementarteilchen abgibt, die auf diese Weise ihre Masse erwerben.

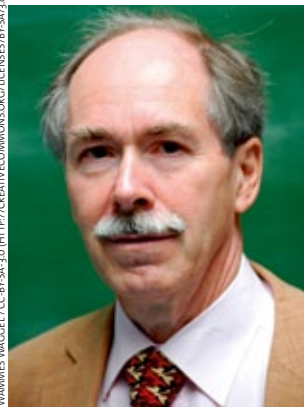
Nicht nur das Higgs-Teilchen ist skalar, sondern auch das mit ihm assoziierte Higgs-Feld. Darum nimmt es selbst im Vakuum einen bestimmten Wert an, den so genannten Vakuumerwartungswert. Man kann also sagen, dass das Higgs-Feld durch seinen Vakuumerwartungswert die Massen der anderen Elementarteilchen erzeugt. Es lässt sich durchaus mit einem allgegenwärtigen Äther vergleichen, weil es überall im Raum und selbst im Vakuum vorhanden ist. Nur an Photonen – Lichtteilchen – und an Gluonen – die Austauschteilchen der starken Kernkraft – kann das Higgs nicht koppeln, weshalb diese keine Masse besitzen.

Es gibt noch eine etwas anschaulichere Art, die Erzeugung der Teilchenmassen zu verstehen. Dazu muss man nur wissen, dass masselose Teilchen im Vakuum stets mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs sind. Bei der Wechselwirkung mit dem Higgs-Feld werden sie, ein bisschen wie in einem zähen Kuchenteig oder in Honig, auf Unterlichtgeschwindigkeit abgebremst und nehmen dadurch automatisch Masse an.

Für die Existenz des Higgs-Teilchens gab es sehr gute theoretische Gründe

Das bemerkenswerte theoretische Modell, das Higgs, Englert und Brout zunächst abstrakt und visionär beschrieben, erfuhr erst einige Jahre später, nämlich 1967, durch Steven Weinberg (siehe Interview in SdW 12/2010, S. 34), Abdus Salam und Sheldon Glashow im Standardmodell der Elementarteilchen seine konkrete Realisierung. Dies war ein sehr wichtiger Schritt, denn jedes neue theoretische Modell muss auch konkrete, mathematische Berechnungen ermöglichen und experimentell überprüfbare Vorhersagen treffen. Genau das leistet das Standardmodell seither: Es lieferte unzählige Voraussagen, die sich im Experiment als korrekt erwiesen. Und weil es seinerseits auf dem Higgs-Mechanismus basiert, lieferte es durch seine erfolgreichen Vorhersagen auch gute Gründe für die Existenz des Higgs.

Einen weiteren guten Grund formulierten zehn Jahre später die beiden Physiker Gerard 't Hooft und Martinus Velt-



Die Physik-Nobelpreisträger von 1999, Martinus Veltman (oberes Bild) und sein ehemaliger Student Gerardus 't Hooft (darunter), haben maßgeblichen Anteil an der Entwicklung des Standardmodells der Teilchenphysik. Erst dank ihrer Erkenntnisse wurden konkrete Berechnungen und experimentell überprüfbare Vorhersagen möglich. Der Higgs-Mechanismus spielte dabei ebenso eine wichtige Rolle wie die so genannte Renormierbarkeit des Modells. Dank dieser lassen sich unendlich große Zahlenwerte auf physikalisch sinnvolle zurückführen.

man. In aufwändigen Berechnungen zeigten sie, dass das Standardmodell der Teilchenphysik mathematisch nur dann »funktioniert«, wenn der Higgs-Effekt darin eine wichtige Rolle spielt. Er muss nämlich die Massen bestimmter Kraftteilchen erzeugen – derjenigen Teilchen, die die so genannte schwache Kernkraft vermitteln. Erst dann ist das Modell »renormierbar«, wie es in der Fachsprache heißt. Dies bedeutet, dass sich die bei den Berechnungen auftretenden unendlich großen Zahlenwerte auf physikalisch sinnvolle Werte zurückführen lassen. Vor allem dank 't Hooft und Veltman also lieferte das Standardmodell konkrete Berechnungen und Vorhersagen – und damit auch Vorhersagen vieler Eigenschaften des Higgs-Teilchens.

Sein Fund ist damit der jüngste Beleg dafür, dass theoretische und mathematische Überlegungen große Erklärungskraft besitzen und sogar neue Teilchen und neue physikalische Mechanismen vorhersagen können – sicherlich ein großer Triumph für die theoretische Physik! Ihre Überzeugungskraft entfalteten diese Überlegungen schließlich auch bei öffentlichen Geldgebern und der Politik: Sie wurden so ernst genommen, dass ein milliardenschweres Großexperiment bewilligt wurde. Zu Recht – der mit dem LHC erzielte Erkenntnisgewinn für unser allgemeines Naturverständnis kann gar nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Nun können wir also die nächsten Aufgaben in Angriff nehmen. Denn sicherlich ist das Standardmodell der Elementarteilchen keine endgültige Beschreibung von Teilchen und Wechselwirkungen in der Natur. Der LHC könnte uns

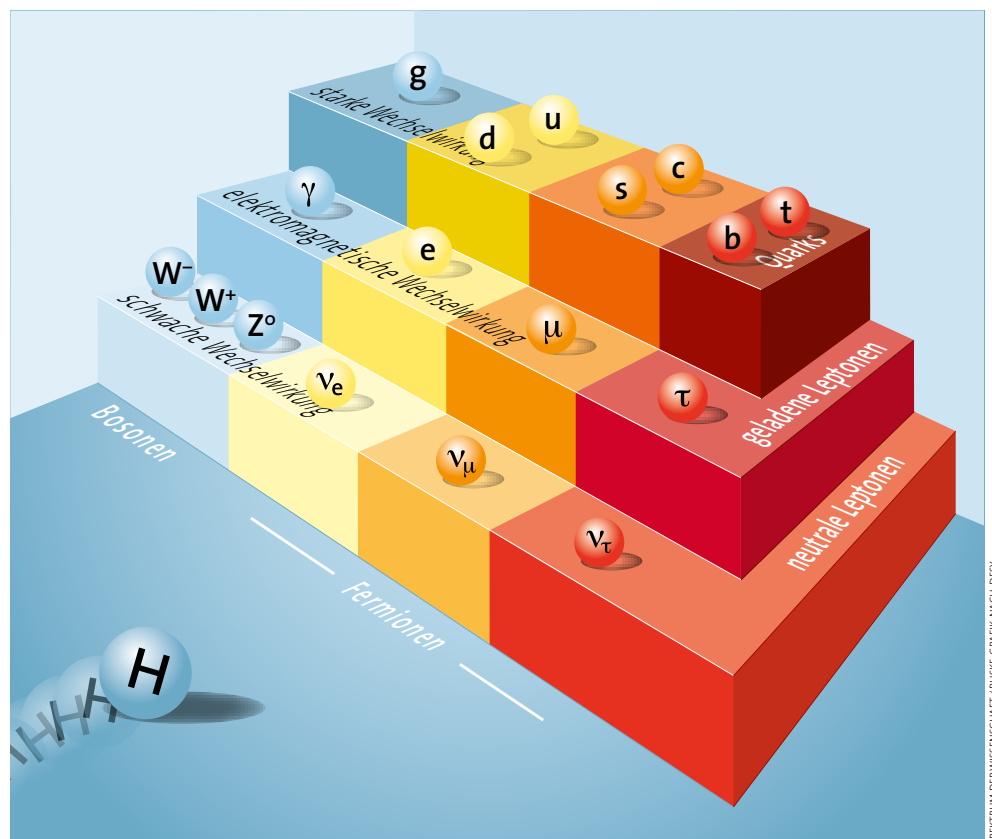
schon in den nächsten Jahren Einblicke in Phänomene jenseits dieses Modells gewähren, beispielsweise in die Physik des frühen Universums. Insbesondere haben Theoretiker auch die Existenz weiterer neuer Teilchen vorhergesagt, die Experimentalphysiker nun ins Visier nehmen. Ganz oben auf der Wunschliste der Theoretiker steht der Nachweis so genannter supersymmetrischer Teilchen. Denn theoretische und mathematische Überlegungen legen nahe, dass zu sämtlichen bekannten Teilchen des Standardmodells jeweils ein supersymmetrisches Partnerteilchen gehört, das so genannte Superteilchen. Ist dies der Fall, gäbe es in der Welt doppelt so viele Partikel wie bislang bekannt!

Einen Hinweis auf die Existenz der Supersymmetrie, kurz SUSY, gibt auch das Higgs-Teilchen selbst. Es ist das erste skalare Teilchen mit Spin null, das in der Natur gefunden wurde, und wahrscheinlich fundamental, also nicht mehr teilbar ist. SUSY-Theorien sagen die Existenz noch anderer solcher Teilchen voraus. Sie setzen dabei eine fundamentale, aber bislang hypothetische Symmetrie in der Natur voraus. Der Begriff »symmetrisch« bezieht sich hier auf die mathematische Form von Naturgesetzen: Unterzieht man die sie beschreibenden Formeln bestimmten Symmetrieoperationen – Verschiebung, Drehung, Spiegelung und anderen – und bleiben sie dabei unverändert, sprechen die Physiker von einem symmetrischen Gesetz. Dann sind auch die physikalischen Systeme, die von diesem Gesetz regiert werden, symmetrisch: Würde man etwa das gesamte Sonnensystem um 180 Grad drehen, herrschten darin dieselben Naturgesetze.

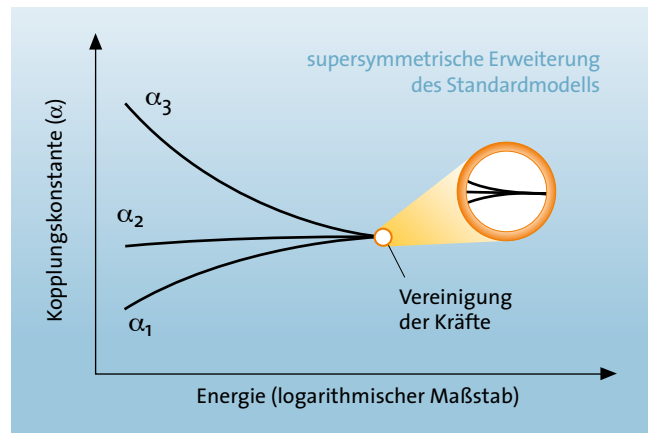
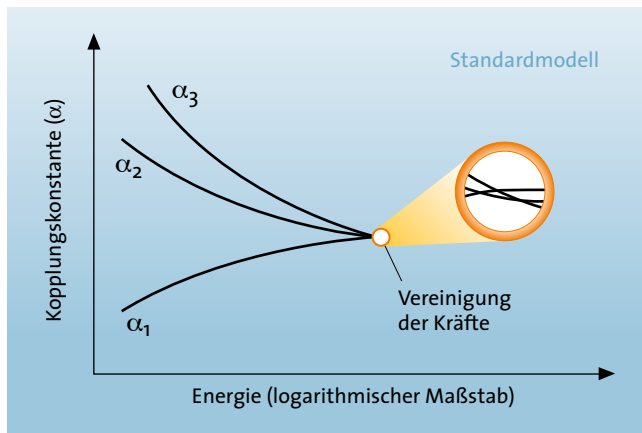
Theoretiker erkennen in diesen Diagrammen ein Indiz für die Existenz der Supersymmetrie. Dargestellt ist die Energieabhängigkeit der Kopplungskonstanten, die im Standardmodell als Maß für die Stärke der Fundamentalkräfte dienen. Erwartet wird, dass sich die drei Kräfte bei höheren Energien zu einer einzigen Kraft vereinigen (vergrößerter Ausschnitt). Im Standardmodell ist dies nur ungefähr der Fall (linkes Diagramm). Erweitert man das Modell um die Supersymmetrie, treffen sich die Kurven tatsächlich fast genau in einem Punkt (rechtes Diagramm).

Die Supersymmetrie beschreibt nun eine solche symmetrische Operation, die Partikel mit ganzzahligem Spin (Bosonen; also diejenigen Teilchen, die Kräfte vermitteln) mathematisch in solche mit halbzahligem Spin (Fermionen; Teilchen, aus denen Materie besteht) »umwandelt«. Damit verspricht sie, ein schwer wiegendes Problem der Teilchenphysik zu lösen, das so genannte Hierarchieproblem. Eigentlich würden die Physiker aus theoretischen Gründen erwarten, dass die Masse des Higgs-Teilchens in der Nähe der so genannten Planck-Masse angesiedelt ist. Tatsächlich liegt aber seine Masse ungefähr 16 (!) Größenordnungen darunter. SUSY erklärt dieses Phänomen ganz zwanglos: Die problematischen Terme, die eine solch hohe Masse voraussagen,

Das Grundinventar an Elementarteilchen ist bislang recht übersichtlich: Es besteht aus Leptonen und Quarks, die zu den Fermionen zählen, sowie aus Bosonen. Erstere sind die Teilchen, aus denen die Materie besteht, während letztere Kräfte vermitteln. Hinzugekommen ist nun das Higgs-Boson (H). Es verleiht fast allen Teilchen ihre Masse, nicht aber den Photonen (γ) und Gluonen (g). Der Supersymmetrie zufolge, die eine grundlegende mathematische Beziehung zwischen Fermionen und Bosonen herstellt, existiert zu jedem fundamentalen Teilchen zudem ein so genannter Superpartner (nicht dargestellt).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH DESY



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

heben sich darin im Wesentlichen weg. Außerdem könnte sie das Rätsel der so genannten Dunkle-Materie-Teilchen lösen, mit denen Astrophysiker bestimmte Phänomene im Universum erklären. Auch bei diesen handelt es sich möglicherweise um SUSY-Teilchen, und vielleicht lassen sie sich sogar am LHC nachweisen. Neben der Suche nach dem Higgs spielten also auch diese Probleme der modernen Physik – die Frage nach der Supersymmetrie und die nach der Natur der Dunklen Materie – eine entscheidende Rolle beim Bau des LHC.

Einige theoretische Vorhersagen geraten zunehmend unter Druck

Leider gestaltet sich die Suche nach den Superteilchen ausgesprochen schwierig, denn wir können ihre Massen nicht genau vorhersagen; unter Umständen könnten sie sich einer Entdeckung am LHC komplett entziehen. Die direkte Messung eines SUSY-Teilchen im ATLAS- oder CMS-Experiment des LHC gelang bis heute nicht. Immerhin konnten für einige dieser Teilchen, wie etwa für das Gluino, den Superpartner des Gluons, die unteren Massenschranken immer weiter nach oben in den Teraelektronvolt-Bereich getrieben werden.

Im Moment scheint es jedoch, dass wir auf den Nachweis der Superteilchen am LHC noch warten müssen. Im Messbereich, dem der erste LHC-Durchlauf in den vergangenen drei Jahren galt, sind sie wohl nicht mehr zu finden. Nun aber beginnt die etwa zweijährige Wartungspause, in der der Beschleuniger auf noch höhere Energien umgerüstet wird. Man hofft, anschließend doch noch Hinweise auf die Supersymmetrie zu entdecken. Allerdings geraten schon jetzt einige der theoretischen Vorhersagen immer mehr unter Druck, insbesondere jene, die sich auf die einfachsten supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells beziehen. Unter den theoretischen Physikern macht sich darum eine gewisse Nervosität bemerkbar, ob die Entdeckung der Supersymmetrie gelingt.

Auch durch indirekte Messungen will man SUSY auf die Spur kommen. Wenn bestimmte Elementarteilchen, nämlich schwere B-Mesonen, zerfallen, könnten sich dabei vorübergehend so genannte virtuelle Superteilchen bilden. Sie würden sehr kleine, aber im Prinzip nachweisbare Auswir-

kungen auf den Zerfall haben – genauso wie man indirekte experimentelle Hinweise auf die Existenz des Higgs-Teilchens schon lange vor dessen Entdeckung gewonnen hatte, und zwar durch die Berechnung so genannter Strahlungskorrekturen im Standardmodell. Doch die indirekte Suche nach SUSY ist bis jetzt ebenfalls ohne Befund. Zwar meldete das Team des LHCb-Detektors am CERN im November 2012 Hinweise auf den sehr seltenen Zerfall solcher B-Mesonen in zwei Myonen. Vielen SUSY-Theorien zufolge müssten dabei Superteilchen in Erscheinung treten. Offenbar läuft der Zerfall aber genau so ab, wie dies vom Standardmodell vorhergesagt wird – Superteilchen scheinen dazu keine Beiträge zu liefern.

Die theoretischen Physiker sehen sich darüber hinaus mit einer konzeptionell noch weit schwierigeren Herausforderung konfrontiert. Sie suchen nach einer mathematisch korrekten Formulierung einer Theorie, die sowohl die drei Fundamentalkräfte umfasst, die im Standardmodell eine Rolle spielen und als so genannte Quantenfeldtheorien beschrieben werden, als auch die vierte Fundamentalkraft, die Gravitation. Anders gesagt: Das Standardmodell soll mit Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie unter einem gemeinsamen theoretischen Dach, der Quantengravitation (siehe »Auf dem Weg zur Quantengravitation« in SdW 4/2012, S. 34), zusammengeführt werden. Einsteins Relativitätstheorie beschreibt die von der Gravitation bestimmte Entwicklung des Universums seit der Zeit kurz nach dem Urknall – in großer Übereinstimmung mit allen Beobachtungen – und sagt darüber hinaus sein Schicksal bis in die ferne Zukunft voraus. Das Standardmodell gilt hingegen für die Welt des Mikrokosmos. Es beruht insbesondere auf den Gesetzen der Quantenmechanik, wie sie Max Planck, Werner Heisenberg und Paul Dirac in den 1920er Jahren aufstellten.

Weil sich aber allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik gegenseitig ausschließen, stürzen sie die theoretische Physik in ein Dilemma. Besonders offensichtlich wird dies am Beispiel des Urknalls. Damals war das Universum mikroskopisch klein, weshalb neben der Gravitation auch Quanteneffekte eine wichtige Rolle spielten. Berücksichtigt man beide Effekte, gelangt man zu widersprüch-

lichen Ergebnissen. Ohne eine Theorie der Quantengravitation wird man die Vorgänge während des Urknalls also nicht berechnen und verstehen können.

Die Krise der theoretischen Physik wird aber auch an Schwarzen Löchern sichtbar. Das Problem ist als Informationsparadoxon bekannt. Der Relativitätstheorie zufolge verlieren Objekte, die in ein Schwarzes Loch stürzen, jegliche physikalische Information – sie behalten nur ihre quantenmechanischen Eigenschaften. Doch laut Quantenmechanik bleibt Information stets erhalten. Um diese Widersprüche aufzulösen, benötigt man auf jeden Fall eine Theorie der Quantengravitation, die mathematisch saubere und konkrete Berechnungen zu den Quanteneigenschaften von Schwarzen Löchern ermöglicht. Das Problem ähnelt also jenem, dem sich 't Hooft und Veltman vor rund 40 Jahren stellen mussten.

Zahlreiche theoretische Physiker sind heute aber davon überzeugt, bereits eine mathematisch korrekte Lösung gefunden zu haben, nämlich in Form der so genannten Stringtheorie. Von Haus aus ist diese Theorie eine wie viele andere. Sie besteht aus einem Satz mathematischer Gleichungen und macht Aussagen über physikalische Größen wie beispielsweise über die Energie des Vakuums. Doch in einem wichtigen Punkt weicht sie von etablierten Theorien ab: Mathematisch konsistent ist sie nur, wenn die Welt zehn Raumzeitdimensionen besitzt – neun Dimensionen des Raums und eine Zeitdimension.

Spätestens Mitte der 1980er Jahre stellte sich überdies heraus, dass in einem solchen zehndimensionalen Raum gleich fünf verschiedene Stringtheorien existieren können, von denen jede einzelne eine Theorie der Quantengravitation liefert. Dies war allerdings ein unerwünschter Nebeneffekt, schließlich hoffte man doch auf eine einzige Fundamentaltheorie. Sie sollte auf eindeutige Weise alle bekannten physikalischen Phänomene erklären und dazu noch neue Vorhersagen treffen, die sich heute oder in Zukunft auch experimentell überprüfen lassen.

Im folgenden Jahrzehnt gelang es den Physikern jedoch, dieses Problem zu beheben. Indem sie den Modellen noch eine weitere Raumdimension hinzufügten, konnten sie die fünf Theorien zu einer einzigen vereinigen, der so genannten M-Theorie. Dieser bemerkenswerte Umstand ließ die Theoretiker wieder Mut schöpfen. Zwar verstehen wir die M-Theorie noch nicht genau, auch lässt sie noch keine sehr konkreten Rechnungen zu. Andererseits beschreibt die Stringtheo-

rie einen bestimmten Grenzfall der M-Theorie, in dem wir sehr gut konkrete Berechnungen anstellen können. Kann also die Stringtheorie vielleicht doch aus einem Satz fundamentaler Gleichungen eindeutige Vorhersagen über unser Universum ableiten? Kann sie tatsächlich unser Universum beschreiben, also beispielsweise die Physik des Urknalls und der Schwarzen Löcher, oder sogar das Spektrum an Elementarteilchen voraussagen, wie wir sie kennen?

Zunächst scheint eine zehndimensionale Theorie allerdings kaum geeignet, ein Modell der vierdimensionalen Welt zu liefern, wie wir sie kennen. Dies ist nur sinnvoll, wenn man sich die sechs Extradimensionen als kompaktes, sehr kleines räumliches Gebilde vorstellt, wenn man die Welt also, wie Physiker sagen, von zehn auf vier Raumzeitdimensionen kompaktifiziert. An jedem Raumzeitpunkt der vierdimensionalen Welt – entsprechend einem beliebigen Ort mit seinen drei Raumkoordinaten zu einem bestimmten Zeitpunkt – »hängen« dann sechs Raumdimensionen, die allerdings so klein sind, dass wir sie nicht wahrnehmen oder beobachten können.

Einfluss besitzen sie dennoch. Es gibt extrem viele Möglichkeiten für Mathematiker, zehn Raumzeitdimensionen so zu kompaktifizieren, dass daraus ein Modell eines vierdimensionalen Universums entsteht. Allerdings führt die Art der Kompaktifizierung zu ganz unterschiedlichen Universen, in denen unterschiedlich viele Teilchenarten existieren und in denen unterschiedliche Kraftgesetze regieren. Einige Kompaktifizierungen – und das ist ermutigend – passen gut zum Standardmodell der Elementarteilchen und zu seiner mathematischen Struktur. Viele andere Lösungen ähneln ihm allerdings nur sehr entfernt. Wie wir unter den sehr vielen Lösungen die richtige oder auch nur annähernd richtige finden können, wissen wir allerdings noch nicht. Vorhersagen der Stringtheorie bezüglich der Elementarteilchen und ihrer Eigenschaften sind im strengen Sinn daher noch nicht möglich.

Deswegen werden zunehmend kritische Stimmen laut. Mit der Weiterentwicklung der Stringtheorie gelingen zwar beachtliche theoretische Fortschritte auf dem Weg zu einer Theorie der Quantengravitation. Doch die meisten Naturwissenschaftler halten sich nach wie vor an die von dem österreichisch-britischen Wissenschaftsphilosophen Karl Popper aufgestellte Forderung nach direkter Falsifizierbarkeit: Damit eine Aussage als wissenschaftlich gelten kann, muss sie so formuliert sein, dass sie sich durch Beobachtungen widerlegen lässt. Doch weder Extradimensionen noch die parallelen Universen, welche die Stringtheorie postuliert, lassen sich gegenwärtig – und möglicherweise nicht einmal in ferner Zukunft – beobachten. Mancher wird sich also mit der Stringtheorie im Moment nicht anfreunden können.

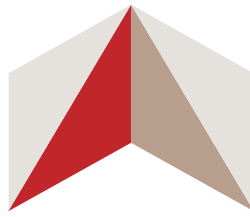
Gibt es aber nicht vielleicht doch Gründe, ihre Postulate ernst zu nehmen – auch wenn sie allein aus mathematischen Formalismen resultieren und bislang noch nicht aus Beobachtungen der Natur? Der wohl beste Grund ist das ungeheure Potenzial der Stringtheorie, konkrete und mathematisch wohldefinierte Berechnungen zu bislang unlösbaren Proble-

W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht
zum Thema »Die Stringtheorie in der Schule«
kostenfrei heruntergeladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/stringtheorie



GEORG VON HOLTZBRINCK PREIS FÜR WISSENSCHAFTSJOURNALISMUS

AUSSCHREIBUNG 2013

Der Preis wurde anlässlich des 150jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung wissenschaftlicher Sachverhalte, insbesondere aus den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis für Bewerber, die nicht älter als 29 Jahre sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit 5.000 EUR dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 EUR dotiert.**

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter www.vf-holtzbrinck.de.

Bewerben Sie sich mit drei Arbeitsproben und einem Kurzlebenslauf bis zum 1. April 2013.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
der Verlagsgruppe
Georg von Holtzbrinck GmbH

Taubenstraße 23
10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20
Telefax +49/30/27 87 18 18

gvhpreis@vf-holtzbrinck.de
www.vf-holtzbrinck.de

Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK (Vorsitz)
Vorsitzender der Geschäftsführung,
Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck GmbH

PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER
Sprecher der Unternehmensleitung,
Boehringer Ingelheim GmbH

ULRICH BLUMENTHAL
Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

PROF. DR. ANGELA FRIEDERICI
Direktorin, Max-Planck-Institut für
Kognitions- und Neurowissenschaften

PROF. DR. PETER GRUSS
Präsident, Max-Planck-Gesellschaft zur
Förderung der Wissenschaften e.V.

PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

JOACHIM MÜLLER-JUNG
Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,
Frankfurter Allgemeine Zeitung

ANDREAS SENTKER
Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und
Herausgeber ZEIT Wissen

RANGA YOGESHWAR
Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co.“,
„Wissen vor acht“ u. a.

men zu liefern. Insbesondere war es in der Stringtheorie zum ersten Mal möglich, exakte Berechnungen zu den Quanteneigenschaften von Schwarzen Löchern durchzuführen, die nicht im Widerspruch zur Quantenmechanik stehen.

So gelang es 1996 Andy Strominger und Cumrun Vafa, die mikroskopischen »Quantenbausteine« – nämlich die von der Stringtheorie postulierten D-Branen und offenen Strings – so genannter extremer, elektrisch geladener Schwarzer Löcher zu identifizieren. Für einen bestimmten Grenzfall leiteten sie daraus mathematisch her, wie groß eine bestimmte Eigenschaft dieser Schwarzen Löcher ist, nämlich die Entropie. Das Resultat der beiden Physiker stimmt genau mit der berühmten Vorhersage von Jacob Bekenstein und Stephen Hawking überein, der zufolge die Entropie eines Schwarzen Lochs exakt einem Viertel der Oberfläche seines so genannten Ereignishorizonts entspricht.

Was erwarten Stringtheoretiker vom LHC?

Dieses Verhalten ist zudem nicht von der jeweiligen Kompaktifizierung abhängig, sondern universeller Natur. Das heißt: Es gilt für alle Lösungen der Stringtheorie – für diejenige, die unser Universum beschreibt, aber auch für alle anderen. Würde es hingegen nur für bestimmte Arten der Kompaktifizierung gelten, könnte sich erweisen, dass diese in der Natur gar nicht vorkommen – damit wäre das Resultat irrelevant geworden. Ich denke, dass man die Wichtigkeit dieses Ergebnisses durchaus mit jener der Resultate von 't Hooft und Veltman vergleichen kann.

Welche konkreten neuen Ergebnisse erhofft sich die Zunft der Stringtheoretiker in den nächsten Jahren vom LHC? Am spektakulärsten wäre sicherlich der Nachweis von mikroskopischen Schwarzen Löchern, da man durch die Rate ihrer Produktion und die Geschwindigkeit ihres Zerfalls am direktesten Aufschlüsse über die Quantengravitation bekommen könnte. Ebenso bahnbrechend wäre der Nachweis, dass es in der Natur mehr als drei Raumdimensionen gibt.

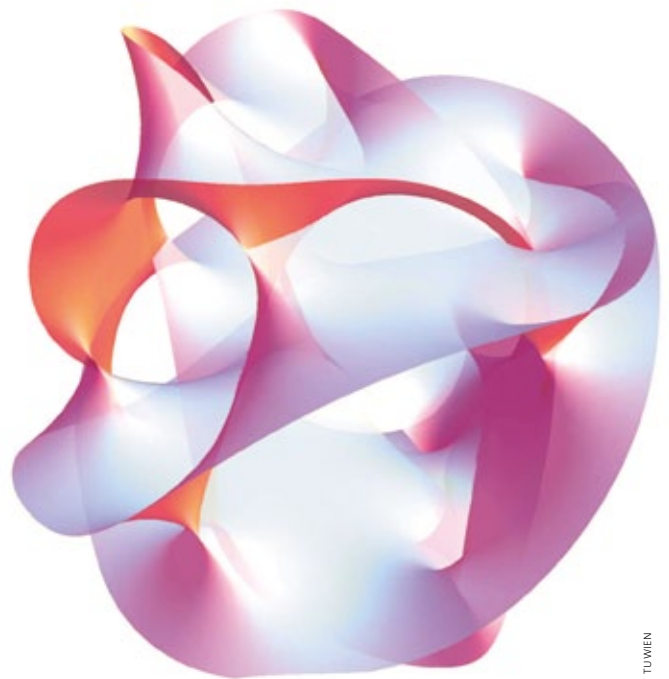
In den letzten Jahren haben wir uns deshalb zusammen mit einigen Kollegen intensiv Gedanken darüber gemacht, wie man Teilchen, wie sie die Stringtheorie vorhersagt, am LHC nachweisen kann. Die fundamentalen Bausteine der Theorie sind vibrierende eindimensionale Objekte, so genannte Strings oder Fädchen. Jedes Elementarteilchen, das wir kennen, ist in der Theorie letztlich ein String, der auf unterschiedliche Weise zum Schwingen angeregt wurde; Stringtheoretiker sprechen deshalb auch von massereichen Stringanregungen.

Bestimmte Stringanregungen zerfallen auf sehr charakteristische Weise, nämlich in zwei Jets aus Quarks. Quarks sind die Teilchen, die man als Bestandteile von Protonen und Neutronen kennt; in diesem Fall entstehen sie am Zerfallsort einer Stringanregung und werden dann von dort als gebündelter Strom von Teilchen, als Jet, weggeschleudert. Die von der Theorie vorhergesagte Zerfallsrate solcher Stringanregungen ist ebenfalls unabhängig von der betrachteten Kom-

paktifizierung. Die Massen der Stringanregungen lassen sich jedoch nicht vorhersagen, sondern hängen von einem bestimmten, noch unbekanntem Parameter in der Stringtheorie ab, der so genannten Stringlänge.

Bislang sind aber alle Messungen am CERN, die sich direkt auf diese Berechnungen berufen, ohne positiven Befund geblieben: Weder am ATLAS- noch am CMS-Detektor ließ sich eine Stringanregung nachweisen, man konnte lediglich schärfere untere Grenzen für die Massen dieser Teilchen angeben. Es ist zwar noch immer denkbar, dass am LHC der direkte Nachweis von Schwarzen Löchern, Extradimensionen und den dazugehörigen Stringanregungen gelingt, zumal der Beschleuniger künftig bei höheren Energien arbeitet. Es kann aber auch sein, dass sich die Massen dieser Objekte in Bereichen bewegen, die weit jenseits der am LHC zur Verfügung stehenden Energie liegen. Sollten sie gar in der Nähe der Planck-Masse zu suchen sein, müsste die LHC-Energie um den Faktor 10^{16} gesteigert werden; dann ist der Nachweis entsprechender Teilchen praktisch unmöglich.

Weiterhin denkbar bleibt der zumindest indirekte Nachweis supersymmetrischer Teilchen, auch wenn etwa die B-Mesonen bislang noch keine Hinweise geliefert haben. Denn in die zehndimensionale Stringtheorie ist die Supersymmetrie



TUMIEN

Was kann man tun, um sich einen sechsdimensionalen Raum anschaulich vorzustellen? Leider gar nichts. Aber auf dieselbe Weise, wie der zweidimensionale Grundriss eines Hauses dessen dreidimensionale Form wenigstens erahnen lässt, gibt dieses Bild einen (sehr) eingeschränkten Blick auf eine Struktur im 6-D-Raum. Doch während ein Grundriss zwei Koordinaten darstellt und nur die dritte, also die Höhe, gewissermaßen unterschlägt, lässt diese Darstellung gleich drei von sechs Koordinaten unter den Tisch fallen.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier zum Thema
»Teilchenphysik« finden Sie unter

www.spektrum.de/teilchenphysik

rie automatisch eingebaut; die Kompaktifizierung der zusätzlichen Raumdimensionen führt in vielen Fällen wie von selbst zu einem supersymmetrischen Teilchenspektrum.

Fast ebenso wichtig wie experimentelle Hinweise auf die Richtigkeit der Stringtheorie erscheint mir jedoch folgende Feststellung: Der Nachweis des Higgs-Teilchens hat beeindruckend gezeigt, mit welchem großem Erfolg theoretische Überlegungen zur mathematischen Widerspruchsfreiheit sowie zur Berechenbarkeit bislang ungelöster physikalischer Probleme den Weg zu einer neuen physikalischen Theorie aufzeigen können. Dies war nicht nur im Standardmodell von zentraler Bedeutung, sondern ist es auch für die Stringtheorie. Als bislang einzige Theorie erlaubt sie sehr konkrete Berechnungen zu grundsätzlichen Problemen der Quantengravitation. Zuletzt belegten dies zum Beispiel Arbeiten von Ashoke Sen und anderen. Die Forscher zeigten darin, dass man die Entropie von Schwarzen Löchern mittels so genannter holografischer Methoden berechnen kann, sogar unter der Einbeziehung von Quantenkorrekturen zum erwähnten Flächengesetz von Bekenstein und Hawking (Details unter anderem in »Das holografische Universum« von Jacob Bekenstein in SdW 11/2003, S. 34). Sollte es also gelingen, im LHC Schwarze Löcher herzustellen, dann ließe sich die Quantengravitation auf diese Weise experimentell überprüfen.

Des Weiteren gelangen in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte bei stringtheoretischen Branen-Modellen. Branen kann man sich als Erweiterung von Strings in mehrere Dimensionen vorstellen (siehe auch »Universen auf der kosmischen Achterbahn«, SdW 2/2008, S. 26). Sie haben uns bei der Vereinigung der Naturkräfte zu einer Quantengravitation vorangebracht, aber auch bei der nachträglichen Herleitung des Standardmodells aus noch fundamentalen Gesetzen. Die Vielzahl der möglichen Kompaktifizierungen steht zwar auch hier eindeutigen Vorhersagen im Weg; sie deutet sogar auf die Existenz eines Multiversums hin. Dennoch erlauben die Gleichungen konkrete Berechnungen zum Teilchenspektrum, zu den Wechselwirkungen der Teilchen untereinander und zur Stringkosmologie. Ob die daraus resultierenden Vorhersagen »unserem« Universum entsprechen, ist noch offen; prinzipiell lassen sie sich jedoch experimentell überprüfen und sind damit falsifizierbar.

Nicht zuletzt sei erwähnt, dass stringtheoretische Erkenntnisse zum holografischen Prinzip auch sehr erfolgreich bei Berechnungen etwa des Quark-Gluon-Plasmas (der Zustand der Materie kurz nach dem Urknall, siehe »Die Jagd nach dem Quark-Gluon-Plasma«, SdW 5/2011, S. 86), der Hy-

drodynamik und auf bestimmten Gebieten der Festkörperphysik eingesetzt werden.

Letztlich stellt vermutlich selbst die Stringtheorie, und mit ihr verknüpft die Hypothese über das Multiversum, keine endgültige Theorie, keine universelle Weltformel dar. Wichtig ist jedoch, dass wir mit ihr konkret rechnen und physikalische Probleme bearbeiten können. Die meisten Physiker sind sich ohnehin einig darin, dass jede Theorie über kurz oder lang einer experimentellen Überprüfung bedarf. Bis diese gelingt, brauchen wir aber sicher noch viel Geduld und vermutlich auch viel Zeit; auch dies hat uns die lange, fast 50-jährige Zeitspanne von der theoretischen Entdeckung des Higgs-Teilchens bis zu seinem experimentellen Nachweis gelehrt.

Es sollte sich also niemand allzu sehr wundern, wenn die experimentellen Belege für die Stringtheorie erst in einigen Jahrzehnten gefunden werden. Falls der direkte Nachweis von Effekten der Stringtheorie und der Quantengravitation tatsächlich nur auf der Planck-Skala möglich sein sollte, ist er noch weitaus schwieriger als der Nachweis des Higgs-Teilchens am LHC. Wir können deswegen sehr gespannt in die Zukunft blicken, ob sich eines Tages das Wunder vom CERN wiederholt und wir erneut eine noch fundamentalere Ebene der Wirklichkeit enthüllen. ~

DER AUTOR



Dieter Lust erforscht, wie sich Quanten- und Gravitationsphysik mittels Stringtheorie und supersymmetrischen Feldtheorien zusammenführen lassen. Seit 2003 ist er Direktor am Münchner Max-Planck-Institut für Physik, seit 2004 leitet er auch das Arnold-Sommerfeld-Zentrum für theoretische Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Lust erhielt hohe Auszeichnungen. Zuletzt erkannte ihm der Europäische Forschungsrat einen Advanced Investigator Grant zu Erforschung der »Fundamentalen Aspekte von Strings und Gravitation« zu.

QUELLEN

- Anchordoqui, L.A. et al.:** LHC Phenomenology and Cosmology of String-Inspired Intersecting D-Brane Models. <http://arxiv.org/abs/1206.2537v2>, 22. August 2012
- Anchordoqui, L.A. et al.:** Vacuum Stability of Standard Model**. <http://arxiv.org/abs/1208.2821v2>, 23. Januar 2013
- Blumenhagen, R. et al.:** Four-Dimensional String Compactifications with D-Branes, Orientifolds and Fluxes. <http://arxiv.org/abs/hep-th/0610327v3>, 19. April 2007
- Lüst, D. et al.:** The LHC String Hunter's Companion. <http://arxiv.org/abs/0807.3333v2>, 29. Juli 2008

LITERATURTIPP

Lüst, D.: Quantenfische: Die Stringtheorie und die Suche nach der Weltformel. C.H.Beck, München 2011
Populärwissenschaftlich und gut verständlich, allerdings noch vor dem Higgs-Fund verfasst

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184764



Unser besonderer Tipp:

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan



WISSENSBECHER ASTRONOMIE

Bestell-Nr. 3786 € 9,95

WISSENSBECHER BIOLOGIE

Bestell-Nr. 3787 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE

Bestell-Nr. 3432 € 9,95

WISSENSBECHER INFORMATIK

Bestell-Nr. 3788 € 9,95

WISSENSBECHER MATHEMATIK

Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK

Bestell-Nr. 3431 € 9,95



Alle Wissensbecher mit weiteren Ansichten finden Sie unter: www.science-shop.de/wissensbecher



NEU

MIKROSKOP IMAGER

MP-Kameraauflösung, mit USB 2.0-Kabel, Celestron

Bestell-Nr. 3774 € 50,00

Mit dem Digital Microscope Imager können digitale Bilder der meisten biologischen und Stereo-Mikroskope problemlos festgehalten oder auf einem Monitor dargestellt werden. Die Kamera wird anstelle des Mikroskop-Okulars eingesetzt, sodass die Bilder auf einem Computermonitor angezeigt werden können. Das ist perfekt, um die Bilder bequem alleine oder in einer kleinen Gruppe zu betrachten. CD-ROM mit Software zum Betrachten und fotografieren; benötigt Windows XP, Windows Vista oder Windows 7.



Thomas Riegler

DAS GROSSE RETRO-RADIO-BAUBUCH

2012, 32seitiges Buch und alle Bauteile für ein Mittelwellenradio im Retro-Stil, ohne Löten, Franzis

Bestell-Nr. 3757 € 29,95

Das dekorative Retro-Gehäuse lässt Ihr fertiges Radio fast wie ein original Grundig-Gerät Modell 2012 aussehen. Zusätzlich brauchen Sie nur noch eine 1,5-V-Batterie Typ AA (nicht enthalten), und schon kann es losgehen! Und im Begleitbuch: Alles, was zum Bau Ihres Radios und zum Verständnis seiner Technik notwendig ist, auf 30 Seiten mit großen, farbigen Abbildungen und Grafiken.



SPARDOSE SESAM

Material: Aluminium, Gewicht: ca. 475 g, Höhe, Breite und Tiefe: je 8 cm, Verschlussmechanismus: Fliehkraft, Troika, Bestell-Nr. 2718 € 32,90 (3)

Weder Schlüssel, Werkzeug noch Gewalt sind nötig. Wer wissen will, wie sich die Spardose öffnen lässt, muss ganz schön tüfteln. Der Verschluss basiert auf einer Fliehkraft-Kupplung. Nur wer den Trick kennt, kann sie scheinbar mühelos öffnen: Sesam öffne dich!



FLEDERMAUSDETEKTOR ZUM SELBERBAUEN

Inhalt: Buch und alle Bauteile, zusätzlich benötigt werden: LötKolben für den Aufbau, 9-V-Batterie (nicht enthalten), Franzis

Bestell-Nr. 1929 € 29,95

Belauschen Sie die Natur mit moderner Elektronik! Die Platine des Bausatzes ist bereits mit zahlreichen SMD-Bauelementen bestückt. Sie müssen nur noch wenige Teile selbst einlöten und die Platine mit Mikrofon, Lautsprecher und den Einstellreglern verdrahten. Moderne integrierte Schaltungen sorgen für hohe Empfindlichkeit und Lautstärke. Mit dem fertigen Detektor lassen sich die Ultraschall-Rufe von Fledermäusen hörbar machen. So können Sie diese faszinierenden Flugkünstler in der Dunkelheit auch dort aufspüren, wo sie sonst völlig unbemerkt auf der Jagd nach Insekten sind.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



DIE DAMPFMASCHINE – KARTONBAUSATZ

Kartonbausatz für eine vollfunktionsfähige Dampfmaschine

komplett mit Zubehör, Länge

30 cm, Breite 21 cm, Höhe 21 cm, SunWatch

Bestell-Nr. 3769 € 32,90

Eine Dampfmaschine als Kartonbausatz, die von richtig kochendem Dampf angetrieben wird – kann das gut gehen? Aber ja! Überzeugen Sie sich selbst: Dieses Modell ist nicht nur prächtig anzuschauen, es funktioniert auch prächtig. Der Kessel aus korrosionsfestem Aluminium hat ein magnetisches Überdruckventil, das Feuer aus 5 Teelichtern wird durch ein verzinktes Drahtgitter abgeschirmt und der Dampf wird durch ein geschlossenes Schlauch- und Foliensystem geleitet und über einen Kamin ins Freie entlassen. Die Kraftentfaltung bleibt zwar bescheiden, der sicherheitsrelevante Kesseldruck dafür aber auch. Bauzeit je nach Bastelerfahrung 10–15 Stunden.



KLEINSTES SOLARAUTO DER WELT

Auto-Maße: L 3,3 x B 2,2 x H 1,4 cm, in Acryldose, Ø Dose: 4,8 cm, InproSolar

Bestell-Nr. 2816 € 12,95

Fällt Sonnenlicht auf das Dach des Autochens, braust es los – im Schatten bleibt es ebenso unvermittelt stehen! Das Solarauto wird in einer Acryldose geliefert, die bequem in jede Jackentasche passt. Begeistern Sie Ihre Mitmenschen mit dem kleinsten Solarauto der Welt!



CLACK – SCHLAGFERTIGER EIERÖFFNER

Eieröffner der anderen Art

Edelstahl mit Kunststoffgriff, Gewicht: ca. 100 Gramm, Höhe: ca. 22 cm, Ø der Eieröffnung: 36 mm, 12 Monate Garantie, Take2-Design

Bestell-Nr. 2716 € 18,90

Clack ist der aussagekräftige Name für den ultimativen »Eierschalensollbruchstellenverursacher«, der nach folgendem Prinzip funktioniert: Kappe auf das Ei setzen, Schlagkugel herunterfallen lassen. Clack! So erhält die Schale eine ringförmige Bruchstelle, an der sich der »Eierkopf« mit einem Messer fein säuberlich abheben lässt.

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



NANODOTS 216 ORIGINAL
Das Magnetspielzeug der anderen Art 216 Neodym-magnetkügelchen, Aufbewahrungssäckchen, Anleitung, ab 14 Jahren.

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

Bestell-Nr. 3261 € 39,95

Dieses faszinierende Magnetspiel werden Sie so schnell nicht mehr aus der Hand geben Nanodots sind Bausteine aus Neodym-Supermagneten, den stärksten Permanentmagneten überhaupt. Die Kugeln sind mit verschiedenfarbigen Legierungen beschichtet und präzise gearbeitet, so dass sie sich zu komplexen Formen zusammensetzen lassen. ACHTUNG! Bitte beachten Sie, dass das faszinierende Produkt nicht in die Hände kleiner Kinder gelangt.



SANDUHR PARADOX

Bestell-Nr. 1666 € 15,50

Stellen Sie die Zeit auf den Kopf!
Da das spezifische Gewicht des Kunst-sandes niedriger ist als das der öligen Flüssigkeit, läuft er hier von unten nach oben.

Das Zometool Konstruktionssystem bietet die einfache Möglichkeit, fast alle geometrischen Grundkörper und ihre Beziehungen untereinander zu erforschen. Jetzt gibt es das beliebte Konstruktionssystem auch in elegantem Schwarzweiß.



ZOMETOOL DESIGN 5

227 Teile mit 8-seitiger Beschreibung, Zometool

Bestell-Nr. 3760 € 60,-

Design 5 beschäftigt sich vor allem mit dem Rhombentriakontaeder. Sie können einen Rhombentriakontaeder mit weißen Streben und Kugeln bauen, ferner die Schattenprojektionen dieses 3-D-Modells in 2-facher, 3-facher und 5-facher Symmetrie.

ZOMETOOL DESIGN 3

120 Teile mit 8-seitiger Beschreibung, Zometool

Bestell-Nr. 3759 € 30,-



Um die Schönheit der Symmetrien zu zeigen, beschäftigen wir uns hier mit dem Würfel. Seine hohe Symmetrie wird durch die Gleichartigkeit seiner Kanten, Ecken und Flächen bestimmt.

ACHTUNG! Nicht für Kinder unter 3 Jahren geeignet. Erstickungsgefahr wegen verschluckbarer Kleinteile.



KLASSIKER

EULER'S DISK

Drehscheibe aus Chromstahl: Ø 7 cm, Grundspiegelfläche: Ø 22 cm, Zubehör: holografische Magnetfolien für die Scheibe. Mit engl. Anleitung

Bestell-Nr. 1930 € 34,-

Bringt man die Scheibe in Schwung, beginnt eine fesselnde Vorführung aus Geräuschen, Licht und Bewegung. Statt langsamer zu werden, dreht sich Euler's Disk mehr als 100 Sekunden immer schneller und lässt Sie über die zu Grunde liegenden physikalischen Gesetze grübeln, bis die Bewegung plötzlich endet. Dabei ist auf den holografischen Magnetfolien ein faszinierendes Lichtspiel in allen Spektralfarben zu beobachten.



LCD DELUXE DIGITAL MIKROSKOP

Mikroskop mit Digitalkamera und TFT Touchscreen

Vergrößerungsbereich 40x bis 1600x, Einzelaufnahme und Filme, universelles Netzteil, 110-240 Volt mit Adaptern für fast alle Länder, 6-Volt-Batterie-pack für mobilen Einsatz (4 AA-Batterien, nicht enthalten), Tragetasche, Gewicht: 1,7 kg, Celestron

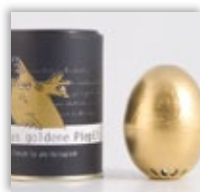
Bestell-Nr. 3770 € 299,-

Das Deluxe Digital-Mikroskop ist das weltweit erste digitale LCD-Mikroskop mit 3,5-Zoll-Touchscreen!

Diese Screen ist um 180° drehbar ist – so können Sie die Bilder leicht anderen Zuschauern zeigen. Die eingebaute Digitalkamera ermöglicht Einzelbilder oder kurze Filme, die Sie im internen Speicher oder auf einer optionalen SD-Karte speichern und auf den PC überspielen können.

Mehr Details und Zubehör:

www.science-shop.de/mikroskopie



PIEPEI GOLD

Das perfekte Frühstücksei für jeden Feinschmecker

Mit echtem Gold veredelt, Brainstream

Bestell-Nr. 2700 € 24,90

Einfacher und präziser können Frühstückseier nicht gekocht werden. Das PiepEi misst die Wassertemperatur und berechnet daraus über eine Differenzialgleichung die Innentemperatur im Ei. Erreicht die Temperatur im Eigelb 62°C, so erklingt eine Melodie. Man kann den Kochvorgang auch mit kaltem Wasser starten.



NEU

KLUGSCHEISSER-SPIEL 2 - BLACK EDITION

Das ultimative Spiel für alle, die auf (fast)alles eine Antwort haben ...
106 Fragekarten, ab 16 Jahren, Kylvskapsoesi

Bestell-Nr. 3815 € 21,95

Endlich neue Fragen! Das perfekte Spiel für jeden Fan von sinnlosem Wissen und schrägen Fakten! Ein unterhaltsamer Mix aus Humor und Wissenschaft mit mehr als 300 kuriosen, lustigen, verrückten und bizarren Fragen zu Dingen, über die Sie sich wahrscheinlich noch niemals Gedanken gemacht haben.

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



3-D-MIRASCOPE GROSS

Erschaffen Sie Ihre eigene Illusion

Ø: 23 cm, Mirascope, 4 kleine Gegenstände,

englischsprachige Anleitung, HCM Kinzel

Bestell-Nr. 3244 € 16,95

Sie werden Ihren Augen nicht trauen!

Das 23-cm große 3D Mirascope erzeugt ein Bild, das zu 100% echt aussieht, aber nicht greifbar ist. Versuchen Sie das gespiegelte Objekt zu berühren – Ihre Finger werden durch das Objekt hindurchgehen.



WASSERRAKETE SHOOTINGER

Raketenbausatz inklusive Startrampe

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

Bestell-Nr. 3467 € 39,90

Flughöhe bis zu 100 Meter nur mit Wasser und Druckluft!

Der Bausatz enthält zwei PET-Flaschen, die zu einer formschönen Rakete kombiniert werden können. Die stabile Raketenspitze aus Gummi aufgesetzt, die Leitflossen ans Heck montiert, die Aufkleber angebracht, die stabile Startplattform montiert, und schon kann es los gehen! Man benötigt ca. eine Stunde Vorbereitung und eine Luftpumpe (nicht im Bausatz enthalten).

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

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

Höhlenkino in der Eiszeit

Schon unsere Vorfahren aus der Steinzeit versuchten, Bewegung in Bildern einzufangen. Vor über 30 000 Jahren nutzten sie Lichteffekte und Eigenheiten unseres Sehsinns, um wilde Tiere darzustellen: wie sie jagen, flüchten oder angreifen. Bei entsprechender Beleuchtung scheinen die Abbildungen tatsächlich lebendig zu werden.

Von Marc Azéma

Stilmittel – bis heute modern

Bewegung mit Bildern nachzuempfinden oder vorzutäuschen, ist keine Erfindung unserer Zeit. Das versuchten schon die prähistorischen Künstler, die Höhlenmalereien schufen – allerdings mit unterschiedlichem Erfolg. Nicht alle frühen Darstellungen in Höhlen wirken so lebendig wie die jagenden Löwen, die eine Wand der südfranzösischen Grotte Chauvet schmücken (Bild auf dieser Doppelseite). Sowohl die Zeichentechniken als auch die verwendeten Stilmittel und optischen Tricks variieren. Aber selbst reglos wirkende Tiere gewinnen oft unerwartete Dramatik – als Teil einer bildlichen Geschichte.

AUF EINEN BLICK

MIT BILDERN GESCHICHTEN ERZÄHLEN

1 Viele der Tierbilder in altsteinzeitlichen Höhlen wirken recht naturalistisch. Die Künstler versuchten, **Haltungen, Posen** sowie **erkennbare Intentionen** und **Gefühlszustände** möglichst genau wiederzugeben.

2 Etliche Wandbilder zeigen lebhaftere, bewegte Szenen. Den Effekt unterstützen verschiedene **Darstellungstricks**, welche die **Lichtbedingungen** und Eigenheiten unseres **Sehsinns** einbeziehen.

3 Solche Höhlenmalerei sollte Geschichten erzählen. Sie berichtet von **wichtigen Ereignissen** im Leben der eindrucksvollen Tiere, denen die Steinzeitmenschen begegneten – und die teils wohl auch eigene Lebensepisoden widerspiegeln.



»PANNEAU DER LÖWEN«

Voller Leben wirken die Löwen einer Jagdszene, die ein Künstler vor 32 000 Jahren in der Chauvet-Höhle in Südfrankreich zeichnete. Der Ausschnitt des insgesamt über zehn Meter breiten Wandgemäldes vermittelt nicht nur die rasche, konzentrierte Bewegung der einzelnen Großkatzen, sondern auch die der gesamten heranstürmenden Meute. Selbst die flüchtende Wisentherde (links im Bild) regt die Fantasie des Betrachters an. Die Details zeugen von hervorragender Beobachtungsgenauigkeit. Auch heute noch benutzen Künstler die damaligen Darstellungsmittel.

MIT FRDL. GEN. DES MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), DIRECTION RÉGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES (DRAC) RHÔNE-ALPES, DÉPARTEMENT RÉGIONAL D'ARCHÉOLOGIE, FOTO N.18: JEAN CLOTTES



Das »Panneau der Löwen« aus der Grotte Chauvet (Ardèche, Südfrankreich, Alter: 32 000 Jahre)



Die »Schachtszene« aus der Höhle Lascaux (Dordogne, Alter: 19 000 Jahre)

WISENT GEGEN MANN
 In der »Schachtszene« (Scène du puits) aus der Höhle von Lascaux ist ein Wisent mit aufgeschlitztem Bauch im Begriff, einen Mann auf die Hörner zu nehmen. Der Vogel auf einem Stab könnte eine Speerschleuder darstellen. Die rätselhaften Zeichen daneben mögen auf Waffen oder deren Gebrauch hindeuten.

Nach der Natur gezeichnet

Die Szene ist außergewöhnlich, da die prähistorischen Jäger fast nie Menschen abbildeten. Der Wisent ist hier sorgsam gezeichnet, der Mann hingegen nur grob angedeutet. Indem jene Künstler die großen Tiere ihres Lebensraums so präzise wiedergaben, wollten sie damit wohl nicht nur ihre Welt symbolisch in einer eigenen Bildsprache ausdrücken. Vielmehr war ihnen offenbar wichtig, deren Verhalten, Bewegungsweisen und damit einhergehende Emotionen genau zu erfassen – hier etwa die Wut des Wisents. Entsprechend versuchen meine Kollegen und ich solche Bilder zu deuten.

Seit 15 Jahren untersuchen wir in diesem Sinn Bewegungsmotive von Tieren der vorgeschichtlichen Höhlenmalerei. Zum Vergleich beobachten wir Aussehen, Verhalten und Ausdrucksweisen ähnlicher heutiger Tiere, suchen Entsprechungen auf den Höhlenbildern und arbeiten dazu auch mit Tierexperten zusammen. Auf Bildnissen verschiedenster Höhlen fanden wir mit dieser Vorgehensweise viel mehr Bewegungsformen als erwartet. Außer Darstellungen, auf denen Tiere

klar sichtbar schnell rennen, galoppieren oder springen, gibt es andere, nicht selten in derselben Höhle, die subtileres, aber gleichfalls deutlich erkennbares Verhalten zeigen. Dem heutigen Betrachter mag eine angedeutete Änderungen von Pose, Kopfhaltung, Schnauzen-, Ohr- oder Schwanzstellung kaum auffallen. Die Menschen damals verstanden dies aber sicherlich sofort – und erkannten darin eine charakteristische Bewegung. Denn genau so waren und benahmen sich die Tiere, die sie in ihrer Welt antrafen und jagten.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier zum Thema
 »Steinzeitkunst« finden Sie unter

www.spektrum.de/steinzeitkunst



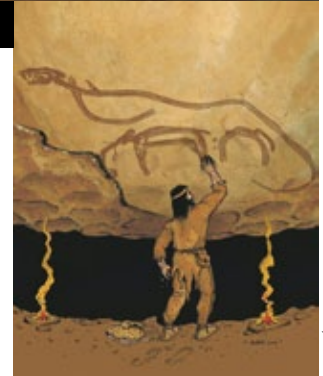
Löwen und Mammuts aus der Höhle La Baume Latrone (Gard, Südfrankreich, Alter: 32000 Jahre)

Lichteffekte

Höhlen waren für die Menschen der Urzeit keine Museen, deren Wandbilder man vorwiegend direkt von vorn anschaute, um sie auf sich wirken zu lassen. Vielmehr handelte es sich um Räume, in denen man selbst zu verschiedenen Zwecken umherging, wodurch man die Bilder aus unterschiedlichen Blickwinkeln sah, oft auch von der Seite – und noch dazu in schwachem, flackerndem Licht. All das zusammen brachte Bewegung und Dynamik in die Szenen an den Wänden und sogar räumliche Tiefe.

Meine Kollegen und ich haben tausende paläolithische Höhlengemälde nach diesen Kriterien untersucht. Demnach sind über 40 Prozent der abgebildeten Tiere in Bewegung dargestellt. Vermutlich erschien aber auch ein Großteil der übrigen den Betrachtern beseelt.

**WIE BILDER
LEBEN GEWANNEN**
Mit Feuern, Fackeln oder Fettlampen konnten die Menschen Höhlen nur schwach ausleuchten. Schon das Flackern der Flammen, deren Licht sich an den unregelmäßigen Wänden brach, erzeugte Bewegungsillusionen. Die nachempfundene Malszene einer Zeichnung (kleines Bild) mit Löwen und Mammuts der Höhle La Baume Latrone gibt davon einen Eindruck.



Die Dimension Zeit

Unser Sehsystem ist träge und bewahrt Eindrücke einen kurzen Moment. Dies beschrieb als Erster Claudius Ptolemäus im 2. Jahrhundert. Wegen dieses Sehmechanismus sehen wir die Welt im fließenden Zusammenhang, nicht in Einzelbildern. Offenbar kannten die Menschen das Phänomen aber schon viel länger. Höhlenkünstler nutzten es auf zwei Weisen – und brachten damit die zusätzliche Dimension Zeit in ihre Bilder.

Manchmal zeichneten sie dasselbe Tier mehrfach – wie in Filmbildern – dicht hinter- oder übereinander in jeweils ei-

ner anderen Phase der Bewegung. Oder sie gaben ihm einfach mehr Beine, Köpfe oder Schwänze, die unterschiedliche Positionen markierten und somit Schwanzschlagen, Kopfhochwerfen, Gehen und anderes illustrierten. Besonders Fortbewegung stellten sie so dar. In den verschiedenen Höhlen existieren hierzu mehrere Dutzend Beispiele. Sie bezeugen, dass dieses Verfahren weit verbreitet war und sich über alle altsteinzeitlichen Phasen der Höhlenkunst in Europa erstreckte. Und sogar auf mobilen Kleinkunstwerken finden sich solche »bewegten« Bilder.

MEHRERE BEWEGUNGSPHASEN IM SELBEN BILD

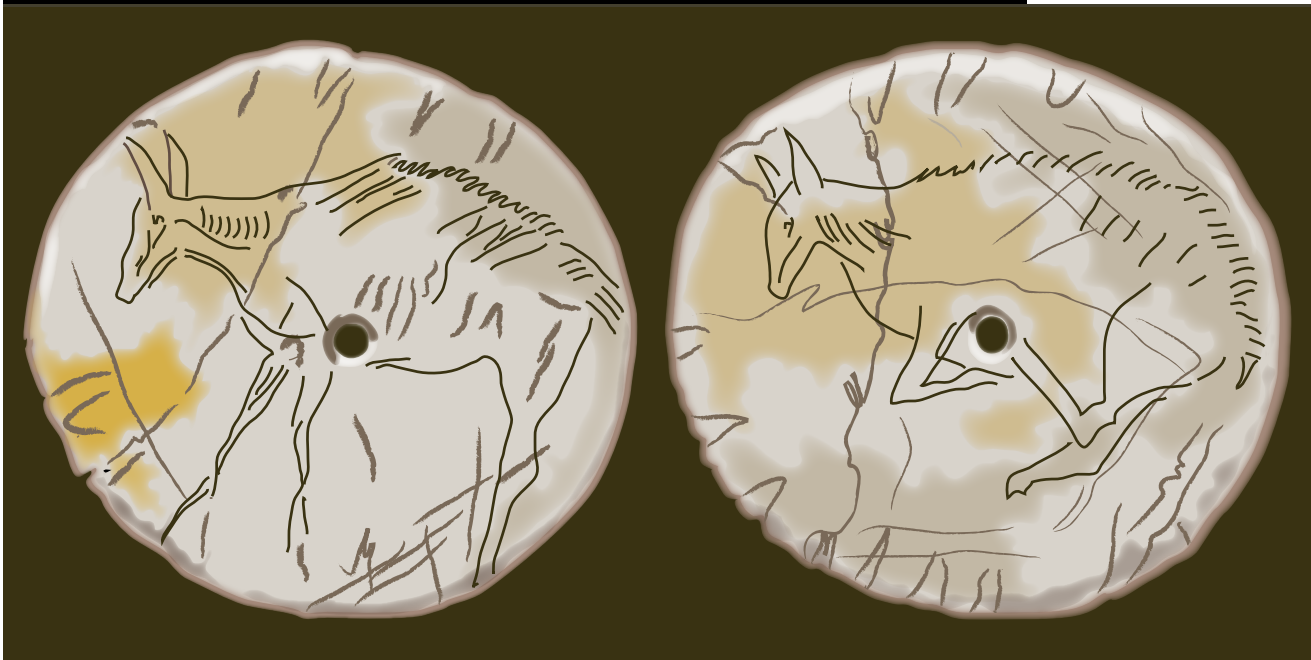
Ein Comiczeichner könnte einen Wisent im Galopp nicht überzeugender malen. Als wären zwei Schnappschüsse überlagert, sind sämtliche Beine »doppelt« zu sehen: jeweils in ihrer äußersten vorderen und hinteren Auslenkung. Das hinterste Bein ist nur noch schwer zu erkennen.

MIT FROLD. GEN. DES MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION (MCC), DIRECTION RÉGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES (DRAC) RHÔNE-ALPES, DÉPARTEMENT RÉGIONAL D'ARCHÉOLOGIE; PHOTO N. 14; JEAN CLOTTES



»Achtbeiniger Wisent«, Grotte Chauvet

»La rondelle aux chamois« (Scheibe mit Gämse, Abri de Laugerie-Basse, Dordogne, Alter: 15 000 Jahre)



WUNDERSCHEIBE

Das hier nachgezeichnete gelochte, gut drei Zentimeter breite, runde Knochenplättchen zeigt auf einer Seite eine stehende, auf der anderen eine liegende Gämse. Bringt man die Scheibe mit einer durchgezogenen und quer befestigten Schnur zum Rotieren, scheint das Tier abwechselnd aufzustehen und sich hinzulegen.

Das erste Thaumatrope

Angeblich wurden Wunderscheiben (so die Bedeutung der griechischen Bezeichnung) im frühen 19. Jahrhundert erfunden. Zum Beispiel war dann auf einer Seite ein Vogel, auf der anderen ein Käfig dargestellt, und wenn man die Scheibe an einem Faden rotieren ließ, saß der Vogel im Käfig.



Dass Menschen den Trick bereits vor mindestens 15 000 Jahren entdeckten, beweisen kleine Stein- und Knochen-scheiben mit beidseits eingeritzten Tierbildern. Den ersten Hinweis darauf fanden wir 1991 in Form eines Schieferplättchens aus der Höhle Isturitz (Pyrénées-Atlantiques), das ein Rentier zeigt. Auf einer Seite steht es, scheint aber verwundet zu sein und sieht aus, als würde es gleich zusammenbrechen, auf der anderen Seite liegt es und hat die Beine unter sich gezogen.

2007 bewies mein Kollege Florent Rivière an Rekonstruktionen, dass angebliche Knöpfe oder Anhänger aus derselben Zeit wohl dazu gedacht waren, zu zeigen, wie ein Tier seine Position wechselte. Nun wurde uns klar, dass etwa die hier nachgezeichnete Scheibe mit einer Gämse nur in der richtigen Weise rotieren muss, um das Hinlegen und Aufstehen des Tiers zu suggerieren. Die Konturen sind auf beiden Seiten genau so ausgerichtet, dass sich die Körper scheinbar überlagern.

Kleine Geschichten

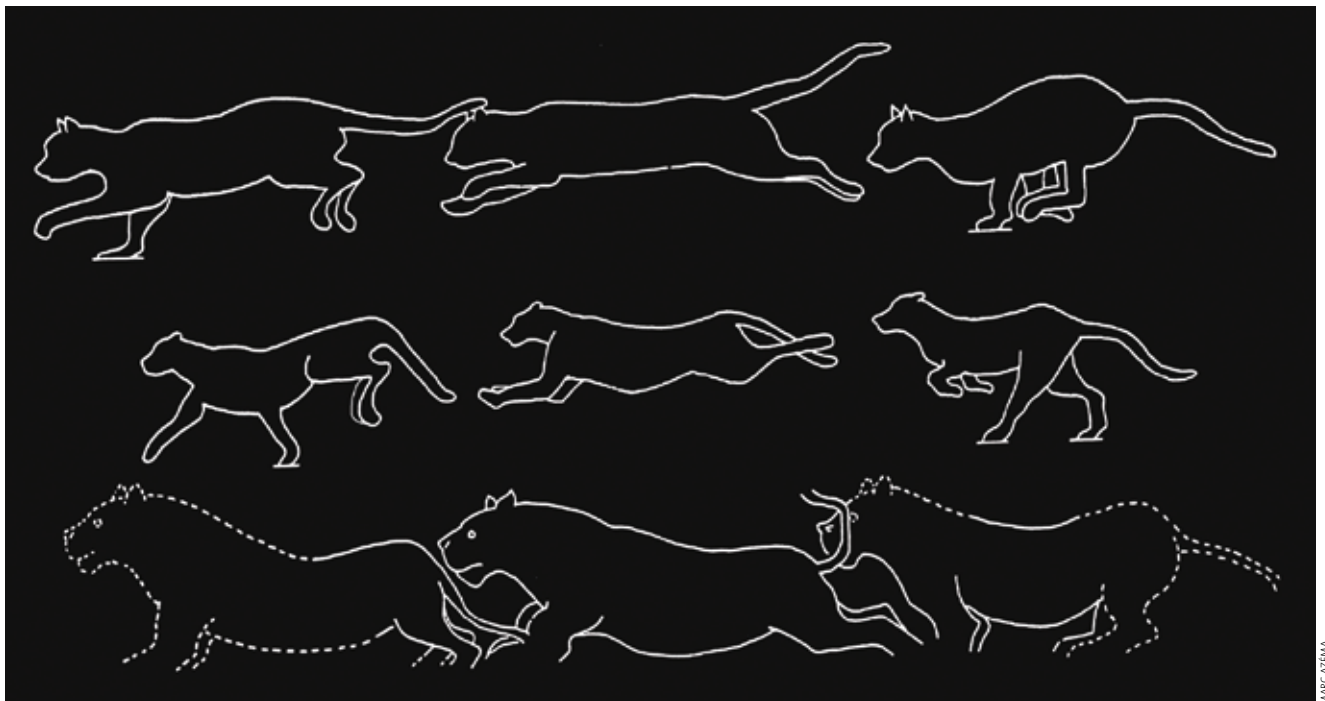
Indem die frühen Künstler ganze Bewegungsabfolgen wiedergaben, konnten sie länger dauernde Vorgänge »erzählen«. Vielleicht verstärkte man die Illusion noch mit hin und her bewegtem Licht. Dann sprinteten – in der Darstellung unten auf eine Tierrippe geritzt – nicht mehr drei Löwinnen hintereinander durch das Bild, sondern nur noch eine, die in aufeinanderfolgenden Bewegungsphasen gezeigt wurde.

SPRINTENDE LÖWIN

Die Löwin wurde auf eine Huftierrippe graviert. Anscheinend sind davor und danach andere Phasen ihres Sprints dargestellt. Die Zeichnung des Autors (unten) zeigt in der unteren Reihe, wie die Bildfolge ursprünglich ausgesehen haben könnte. Zum Vergleich stellte er darüber ähnliche Bewegungsphasen einer Katze (ganz oben) und eines Leoparden dar.



Fragment eines Löwenfrieses aus der Höhle La Vache (Ariège, Alter: 13 000 Jahre)




Künste miteinander verbinden – wie im Film

Mit erzählenden Bildern zelebrierten die paläolithischen Menschen markante Episoden im Lebenszyklus ihnen wichtiger Tiere. Sie erzählten auf diese Weise zum Beispiel von deren jahreszeitlichen Wanderungen, der Brunft und dem beobachteten Jagdverhalten.

Auf dem eingangs im Ausschnitt gezeigten Löwenfries etwa gibt es weiter links eine Szene mit lauernden, zum Sprung bereiten Löwen, und noch eine, bei der ein Löwe gerade seine Kiefer in den Kopf eines Wisents schlägt. Im selben Raum der Grotte Chauvet findet sich eine Darstellung, die offensichtlich Tiere direkt vor der Kopulation zeigt. Paarung selbst hat man wohl nie direkt gemalt. Vielleicht reflektierten – oder

symbolisierten – jene Menschen mit den Bildern auch die fundamentalen Aspekte und Ereignisse ihrer eigenen Existenz, insbesondere Leben und Tod. Unseres Erachtens steckt in ihnen viel Naturalismus. Was sie darüber hinaus an Mythologie und Symbolik enthalten, inwieweit sie Animismus, Schamanismus oder Religion ausdrücken, bleibt uns bisher verborgen.

Das Kino gilt oft als dominierende Kunst des 20. Jahrhunderts. Doch Grundkonzepte davon existierten schon in der ausgehenden Altsteinzeit – die Idee, Bilder, Lichtspiele, Bewegung, Geschichten, Singen und Sprechen zu verbinden. Damit liegen die Anfänge des Kinos nicht im 19. Jahrhundert, sondern über 30 000 Jahre früher. 

TRABENDER STEINBOCK

Der Autor hat die im Original übereinanderliegenden Bewegungsphasen in drei Einzelzeichnungen deutlich gemacht.



DOMINIQUE BUISSON UND MARC AZÉMA, MIT FRIEDRICH DÖRNER, DÄNISCHER HENRI HELLY

Steinbock aus dem Abri du Colombier
(Ardèche, Alter: 13 000 Jahre)



MARC AZÉMA

DER AUTOR



Marc Azéma hat Ur- und Frühgeschichte, Geschichte und Archäologie sowie Kinematografie studiert und arbeitet als Urgeschichtler und Filmemacher. Er ist Forscher des CNRS an der Universität de Toulouse 2 le Mirail (UMR 5608, TRACES) und Mitglied des Forscherteams der Grotte Chauvet.

QUELLEN

- Aujoulat, N.:** Lascaux. Le geste, l'espace et le temps. Editions du Seuil, Montrouge/Paris 2004
- Azéma, M., Rivère, F.:** Animation in Palaeolithic Art: A Pre-Echo of Cinema. In: *Antiquity* 86, S. 316–324, 2012
- Azéma, M.:** La préhistoire du cinéma. Editions Errance, Paris 2011
- Azéma, M.:** L'art des cavernes en action. 2 Bd., Editions Errance, Paris 2009 und 2010
- Clottes, J. et al.:** La grotte Chauvet: l'art des origines. Editions du Seuil, Montrouge/Paris 2001 (deutsche Fassung bei Thorbecke, Stuttgart 2001, vergriffen)

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen und Links zu Video-Animationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184767



AUF EINEN BLICK

ATMOSPHÄRISCHE FLÜSSE

1 Geologischen Indizien zufolge sind in Kalifornien ungefähr **alle 200 Jahre** extrem starke **Regenfluten** aufgetreten. Die letzte große Überschwemmung von 1861/62 führte den Bundesstaat in den Bankrott.

2 Solche Riesenfluten werden offenbar durch atmosphärische Flüsse verursacht: schmale **Bänder aus Wasserdampf**, die sich eineinhalb Kilometer hoch über dem Ozean Tausende von Kilometern weit erstrecken.

3 Wie **Computermodelle** zeigen, würde eine Megaflut in Kalifornien heutzutage zur Evakuierung von mehr als einer Million Menschen führen und Schäden in Höhe von 400 Milliarden Dollar anrichten. Auch die **Westküsten anderer Kontinente** bleiben von atmosphärischen Flüssen nicht verschont.

DON FOLEY

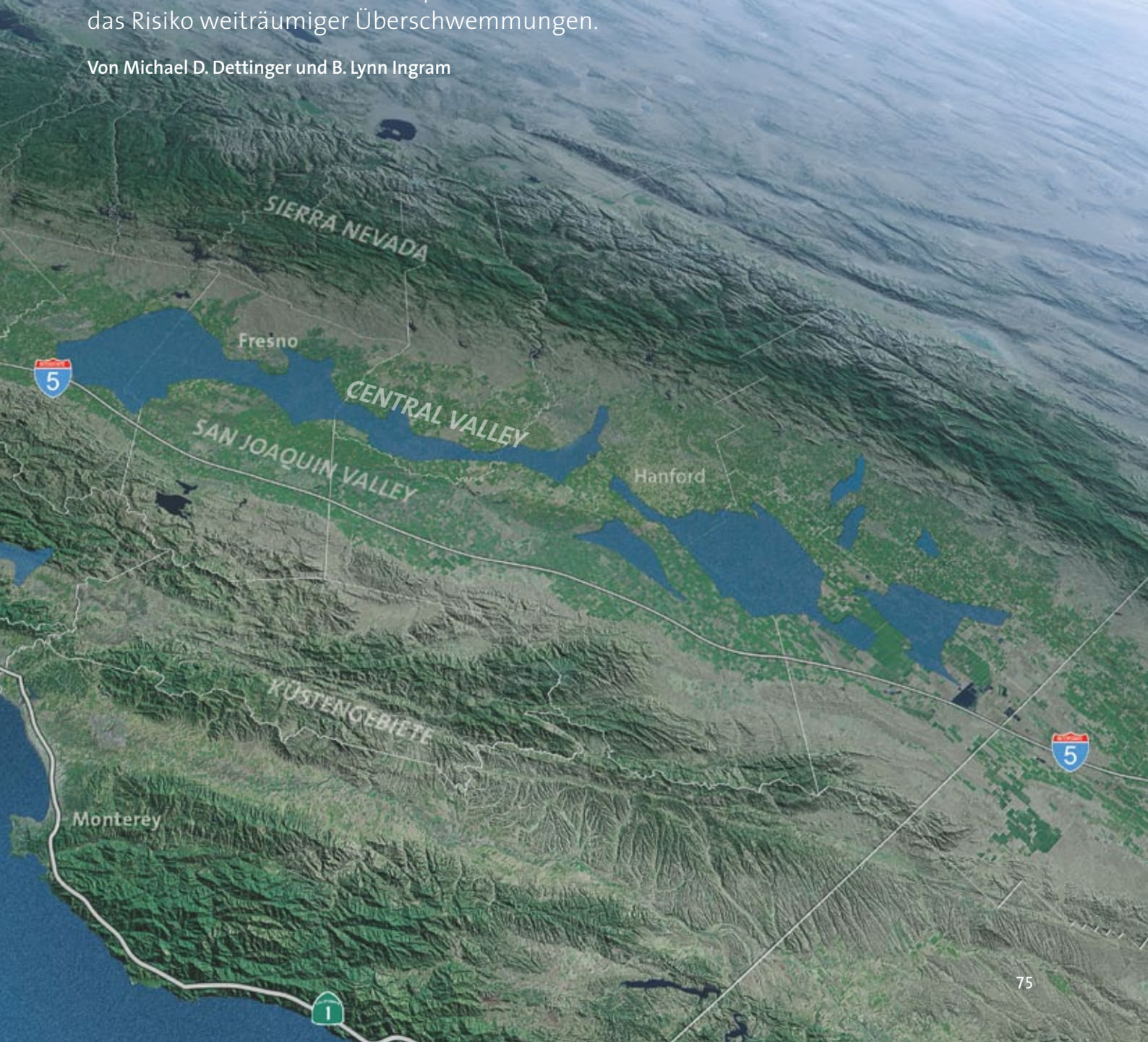
Zum Jahreswechsel 1861/62 verwandelte ein 43 Tage lang währendes Unwetter das kalifornische Central Valley in ein lang gestrecktes Binnenmeer. Das Ausmaß der überschwemmten Fläche wurde hier in eine aktuelle Karte eingetragen.

KLIMAFORSCHUNG

Die nächste Sintflut

Gewaltige Massen feuchter Luft ziehen über die Ozeane und lösen an Land immer wieder große Flutkatastrophen aus. Der Klimawandel verstärkt solche »atmosphärischen Flüsse« und erhöht damit das Risiko weiträumiger Überschwemmungen.

Von Michael D. Dettinger und B. Lynn Ingram



Am Weihnachtsabend 1861 begann es in Kalifornien zu regnen – und hörte 43 Tage lang nicht mehr auf. Immer neue Unwetterfronten schoben sich vom Pazifik ins Landesinnere. Die in der Sierra Nevada an der Ostgrenze des Bundesstaats entspringenden Flüsse schwollen rasch zu reißenden Strömen an; sie verschlangen ganze Gemeinden und Bergbausiedlungen. Die Fluten ergossen sich in das riesige Central Valley und verwandelten es in ein 500 Kilometer langes und 30 Kilometer breites Binnenmeer. Tausende Menschen starben, und rund 200 000 Rinder ertranken – ein Viertel des gesamten Viehbestands in Kalifornien. Die Hauptstadt Sacramento wurde meterhoch von braunem Wasser überflutet, das den Schutt zahlloser Schlammlawinen von den steilen Hängen des Umlands ins Stadtgebiet schwemmte. Aus diesem Grund musste sogar die kalifornische Regierung nach San Francisco ausweichen und konnte erst ein halbes Jahr später nach Sacramento zurückkehren. Da war der Staat Kalifornien bereits bankrott.

Heute wären die Folgen noch viel katastrophaler. Im Central Valley leben mehr als sechs Millionen Menschen – allein 1,4 Millionen davon in Sacramento. Das Land liefert eine jährliche Gesamternte im Wert von 20 Milliarden Dollar, darunter 70 Prozent aller weltweit produzierten Mandeln. Außerdem hat sich der Boden seit damals durch exzessives Abpumpen des Grundwassers bis zu zehn Meter tief gesenkt und ist damit noch anfälliger für Überschwemmungen geworden. Als Klimaforscher kürzlich ein ähnlich gnadenloses Unwetter von bloß 23 Tagen Dauer im Computermodell simulierten, ergab die Berechnung Sachschäden und landwirtschaftliche Verluste von 400 Milliarden Dollar. Und: Falls Vorsorge und Evakuierung nicht optimal funktionieren, müssen wieder tausende Menschen sterben.

Die Unwetter von 1861/1862 verheerten die Küste von Nordmexiko und Südkalifornien bis hinauf nach British Columbia. Damit waren sie die schlimmsten Überflutungen der überlieferten Geschichte. Stellten sie vielleicht nur eine einmalige Laune der Natur dar? Wohl nicht: Neuen Sedimentuntersuchungen zufolge wurde Kalifornien im Lauf der letzten zwei Jahrtausende ungefähr alle 200 Jahre unter Wasser gesetzt. Klimaforscher nehmen an, dass so genannte atmosphärische Flüsse derartige Ereignisse verursachen, die sich jederzeit wiederholen können.

Gigantische Ströme aus feuchter Luft

Atmosphärische Flüsse sind etwa 400 Kilometer breite und tausende Kilometer lange Bänder aus Wasserdampf, die in rund eineinhalb Kilometer Höhe entstehen. Manchmal erstrecken sie sich über einen ganzen Ozean. Diese luftigen Fließbänder transportieren die 10- bis 15-fache Wassermenge des Mississippi von den Tropen bis weit in mittlere Breiten. Erreicht ein Band die Westküste der USA und trifft im Binnenland auf eine Bergkette wie die Sierra Nevada, steigt die feuchte Luft auf, kühlt sich ab und kondensiert zu enormen Niederschlagsmengen.

Die Bewohner der nordamerikanischen Westküste kennen seit Langem ein wiederkehrendes Unwetter namens Ananaseexpress. Es entspringt in den Tropen bei Hawaii und bringt drei bis fünf Tage lang heftige Regen- und Schneefälle. Wie wir heute wissen, ist der Ananaseexpress nichts anderes als ein atmosphärischer Fluss. Nach neuen Untersuchungen treffen Kalifornien mindestens neun solche Flüsse pro Jahr. In der Regel sind sie nicht stark genug, um eine echte Sintflut auszulösen, aber selbst die »normalen« Unwetter stellen Notfallhelfer, Hochwasserschutz und Wasserbehörden vor gewaltige Probleme.

Atmosphärische Flüsse überschwemmen auch die Westküsten anderer Kontinente, und manchmal bilden sie sich an überraschenden Orten. Im Mai 2010 verursachte eine Überschwemmungskatastrophe in und um Nashville (Tennessee) 30 Todesfälle und mehr als zwei Milliarden Dollar Schäden. Auslöser war ein ungewöhnlicher atmosphärischer Fluss, der zwei Tage lang heftigen Regen vom Golf von Mexiko nach Tennessee brachte. Auch hinter den Überschwemmungen von 2009 in Südkalifornien und Spanien verbargen sich solche Luftflüsse. Nach den jüngsten Studien, die das Phänomen an der Pazifikküste erforscht haben, wird die Erwärmung des Klimas diese Wasserdampfströme in Zukunft sogar noch verstärken.

Sturm in luftigen Höhen

Trotz ihrer unglaublichen Zerstörungskraft wurden die atmosphärischen Flüsse erst kürzlich durch eine Verkettung glücklicher Zufälle entdeckt. Im Januar 1998 begann das Environmental Technology Laboratory der amerikanischen Wetterbehörde NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ein Projekt namens CALJET, das die Vorhersage großer Stürme an der kalifornischen Küste verbessern sollte. Der Meteorologe Marty Ralph und seine Mitarbeiter flogen mit einem Spezialflugzeug ins Zentrum eines aufziehenden Wintersturms über dem Nordpazifik, um die Bedingungen in einem solchen »Jet« an Ort und Stelle zu messen. Wie die Forscher herausfanden, transportierte dieser einzelne, mehrere Tage andauernde Sturm rund 20 Prozent der gesamten Luftfeuchtigkeit, die zur selben Zeit in den mittleren Breiten in Richtung der Pole wanderte. Der Jet blies ungefähr eineinhalb Kilometer über der Meeresoberfläche und war deshalb vom Boden aus kaum zu entdecken.

Im selben Jahr fiel den damals am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge tätigen Forschern Yong Zhu und Reginald Newell ein seltsames Phänomen in den Simulationen globaler Wind- und Wasserdampfmuster auf, die am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage in Reading (England) durchgeführt worden waren: Rund 95 Prozent des gesamten Wasserdampftransports außerhalb der Tropen fand in nur fünf bis sechs schmalen Bändern statt, die eher zufällig über den Globus verteilt waren und in den mittleren Breiten von Westen nach Osten wiesen. Um diese Bänder zu beschreiben, prägten die beiden Forscher den Begriff atmosphärische Flüsse.

Ungefähr zur selben Zeit lieferten Satelliten mit einem neuen Instrument namens Special Sensor Microwave Imager erstmals umfassende Daten zur globalen Wasserdampfverteilung. Demnach konzentrierte sich der Wasserdampf in langen, schmalen und beweglichen Streifen, die meist von den warmen, feuchten Tropen in trockenere und kühlere Regionen führten. Diese Tentakel entstanden und zerfielen binnen Tagen oder weniger Wochen.

Rasch erkannten die Wetterforscher, dass die drei Befunde einander ergänzten. Seither halten spezielle Observatorien an der US-Westküste mit aufwärtsgerichteten Radar- und Windmessgeräten Ausschau nach atmosphärischen Flüssen, und das Hydrometeorological Testbed Program der NOAA untersucht deren Auswirkungen im Landesinnern.

Mit solchen Daten können Meteorologen einen atmosphärischen Fluss in ihren Wettermodellen besser aufspüren und seine Ankunft an der Küste vorhersagen. In den letzten Jahren erkannten sie einige Regenstürme bereits mehr als eine Woche vor Erreichen der Küste. Auch in den globalen Klimamodellen wird das Phänomen der atmosphärischen Flüsse neuerdings berücksichtigt.

Wie oft drohen die Riesenunwetter?

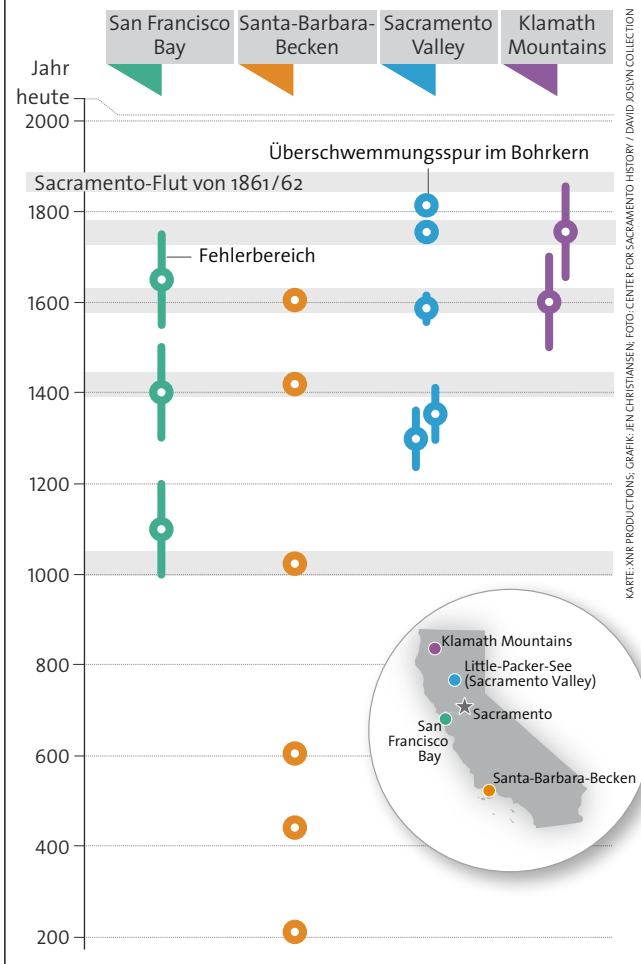
Die kalifornische Flutkatastrophe von 1861/1862 ist heute praktisch vergessen. Im vergangenen Jahrhundert haben sich Siedlungen, Fabriken und Farmen über die vor 150 Jahren überschwemmten Ebenen ausgebreitet. Während die Bewohner die offensichtlichen Risiken für Leben und Eigentum ignorieren, machen sich die Klimaforscher zunehmend Sorgen über ein drohendes Riesenunwetter.

Um die Häufigkeit solcher Ereignisse zu schätzen, suchten Forscher die bis zu 2000 Jahre alten Spuren in den Sedimenten von Flussbetten, Auen, Sümpfen und Meeresbecken. Wenn die Fluten sich über Abhänge ergießen, spülen sie Ton, Lehm und Sand aus den Hügeln und tragen das Material in reißenden Strömen mit sich fort. Sobald die Flüsse eine Schwemmebene, einen Sumpf, eine Mündung oder das Meer erreichen, verlangsamen sie sich und lagern ihre Sedimentfracht ab: erst groben Kies, dann Sand und schließlich Lehm. Später werden die Ablagerungen unter neuen Schichten begraben, die das normale Wetter hinterlässt. Die Forscher bohren senkrecht durch die Sedimente und können durch Analyse der Bohrkerne die Überschwemmungen datieren.

Beispielsweise wurden typische Ablagerungen unter dem Gezeitenmarschland rund um die San Francisco Bay in Nordkalifornien gefunden. Normalerweise hinterlassen die Flussmündungen dort nur dünne Spuren feinsten Ton- und Lehmsedimente. Schwere Überschwemmungen lagern dagegen größere Partikel in dickeren und gröberen Schichten ab. Die Sedimente lassen sich mit der Radiokohlenstoffmethode auf 100 Jahre genau datieren. Einer der Autoren, B. Lynn Ingram, hat zusammen mit der Geografin Frances Malamud-Roam durch Bohrungen im Marschland die Ablagerungen mehrerer großer Fluten nachgewiesen und sie auf 1100, 1400 und 1650 n. Chr. datiert. Der Katastrophe von 1861/1862 ließ sich

Alle 200 Jahre eine Katastrophe

Kalifornien wurde im Abstand von rund zwei Jahrhunderten von riesigen Überschwemmungen heimgesucht. Das geht aus den Ablagerungen hervor, die an vier weit voneinander entfernten Orten analysiert wurden. Dabei kamen jeweils unterschiedliche Datierungsmethoden mit verschiedenen großen Fehlerbereichen zur Anwendung, doch insgesamt stimmen die Daten gut überein. Aus der bisherigen Flutabfolge lässt sich schließen, dass dem Land bald wieder eine Katastrophe droht. Die letzte Riesenflut begann 1861 und setzte Sacramento ein halbes Jahr lang unter Wasser (Foto).



KARTE: XIN PRODUCTIONS; GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN; FOTO: CENTER FOR SACRAMENTO HISTORY / DAVID JOSIN COLLECTION

Atmosphärische Flüsse in Europa

Die schmalen Bänder, die hohe Luftfeuchte aus den Tropen transportieren, machen sich in Europa eher selten bemerkbar. Erreicht ein atmosphärischer Fluss doch einmal unseren Kontinent, dann trifft er häufig auf Westküsten – von Portugal bis Norwegen.

Im November 2009 setzten massive Regenfälle Teile von England unter Wasser. Innerhalb von drei Tagen fielen in der nordwestlichen Grafschaft Cumbria mehr als 150 Liter pro Quadratmeter. Ursache war ein Atmosphärenfluss aus Südwesten, der feuchte Luft vom tropischen Atlantik heranzuführte. Wie Forscher um den Meteorologen David Lavers von der University of Reading später herausfanden, wurden die zehn stärksten Winterfluten in Großbritannien seit 1970 durch atmosphärische Flüsse verursacht.

Auch für andere europäische Länder haben Forscher derartige Unwetter dokumentiert. Im September 2005 goss es im Südwesten Norwegens so heftig, dass es zu Überschwemmungen und Hangrutschen kam. Die Ursache waren zwei Hurrikane und ein Atmosphärenfluss. Und portugiesische Wissenschaftler wiesen nach, dass es im Winter 2009/2010 auf der gebirgigen Insel Madeira mehrfach besonders stark und anhaltend regnete, weil atmosphärische Flüsse Feuchtigkeit aus Süden lieferten – für die subtropische Insel eine wichtige Regenquelle.

Selbst Mitteleuropa ist keineswegs gefeit gegen solche Ereignisse. Im Oktober 2011 traten in der Schweiz viele Flüsse über die Ufer, weil heftiger Regen auf die Schneedecke fiel. Mancherorts wurden 100 Liter Niederschlag pro Quadratmeter binnen 24 Stunden gemessen; Meteorologen stellten ungewöhnlich hohe Luftfeuchte fest. Auch dies verursachte laut Schweizer Wetterdienst ein Atmosphärenfluss: Feuchtwarme Luft aus einem Gebiet südlich der Azoren war in einem riesigen Bogen – im Uhrzeigersinn um das Azorenhoch herum und über Großbritannien hinweg – bis zu den Alpen gelangt. Das Gebirge zwang die Luft aufzusteigen, wodurch die Feuchtigkeit kondensierte.

Warum treten atmosphärische Flüsse in Europa sehr viel seltener und schwächer auf als in Kalifornien? Feuchtwarme Luft gelangt aus den Tropen selten auf direktem Weg nach Europa; häufig versperrt das Azorenhoch den Weg. Bei Westwind stammt die Luft oft vom nördlichen Nordatlantik – und der ist so kalt, dass die Luft wenig Feuchtigkeit aufzunehmen vermag. Kommt es in Europa zu schweren Überschwemmungen, dann stammt die Feuchtigkeit meist aus der näheren Umgebung, etwa vom Mittelmeer. Doch wie die genannten Beispiele zeigen, sind atmosphärische Flüsse tropischen Ursprungs auch hier zu Lande durchaus kein Ding der Unmöglichkeit.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

allerdings keine deutliche Schicht zuordnen, denn in dem Jahrzehnt davor und danach wurden von Goldsuchern in der Sierra Nevada mit Pumpwasser riesige Lehm- und Sandmassen bewegt. Das hat alle Spuren der natürlichen Überschwemmung überdeckt.

Wie Bohrungen in der San Francisco Bay selbst ergaben, stand die Bucht um 1400, wie auch 1861/1862, voll mit Süßwasser – Beweis für eine riesige Überflutung. Weitere Indizien fanden Geologen in Südkalifornien vor der Küste von Santa Barbara. Im Frühling lagern sich dort auf dem Meeresboden helle Schichten von Kiesalgen ab, im Winter dunkle Lehmschichten. In solchen Tiefen ist die Sauerstoffkonzentration zu gering für Organismen, die den Meeresboden besiedeln und umgraben könnten; darum blieben die jährlichen Ablagerungen über Jahrtausende hinweg ungestört. Die Bohrkerne offenbaren sechs dicke graue Lehmschichten: Megafluten in den Jahren 212, 440, 603, 1029, 1418 und 1605. Die drei späteren Daten passen gut zu den Jahreszahlen 1100, 1400 und 1650, die aus den Marschablagerungen rund um die San Francisco Bay gewonnen wurden. Demnach haben sich tatsächlich alle paar hundert Jahre großflächige Überflutungen ereignet.

Im Oktober 2012 veröffentlichte Ingrid Hendy von der University of Michigan in Ann Arbor eine Studie, die auf einer anderen Datierungsmethode beruhte; sie kam für die sechs Jahreszahlen der Santa-Barbara-Bohrungen auf um 100 bis 300 Jahre versetzte Werte. Das Grundmuster – Megafluten im Abstand von 200 Jahren – bleibt davon unberührt.

Die massivste Schwemmschicht im Santa-Barbara-Becken wurde laut der Santa-Barbara-Daten anno 1605 abgelagert; sogar mehrere Kilometer vor der Küste ist sie noch fünf Zentimeter dick. Die Überflutungen von 440 und 1418 hinterließen jeweils eine rund drei Zentimeter dicke Schicht. Zum Vergleich: Die großen Unwetter von 1958 und 1964 manifestieren sich am oberen Ende des Bohrkerns durch 0,6 und 0,2 Zentimeter Sediment. Somit müssen die drei früheren Katastrophen viel schlimmer gewesen sein als alles, was wir je erlebt haben.

Indizien für riesige Überflutungen fanden sich auch rund 250 Kilometer nordöstlich der San Francisco Bay in einem kleinen See namens Little Packer; er liegt in der Schwemmebene des Sacramento River, des größten Flusses in Nordkalifornien. Bei heftigen Regenstürmen spülen die Fluten Sedimente in den See, die am Boden dicke grobe Schichten bilden. Der Geograf Roger Byrne von der University of California in Berkeley und sein damaliger Student Donald G. Sullivan stellten mittels Radiokohlenstoffdatierung fest, dass Überflutungen vom Ausmaß der Katastrophe von 1861/1862 in groben Abständen von 100 bis 200 Jahren auftraten.

Große Fluten haben auch in engen Canyons der Klamath Mountains in der Nordwestecke Kaliforniens ihre Spuren hinterlassen. Zwei besonders starke Ablagerungen bildeten sich um 1600 und 1750.

Alles in allem besagen die Resultate, dass die Flut von 1605 um mindestens 50 Prozent größer war als alle anderen

Luftige Ströme

Ein atmosphärischer Fluss ist ein relativ schmales und tausende Kilometer langes Förderband für feuchte Luft, das 15-mal so viel Wasser wie der Mississippi mit sich führt. Bei Erreichen der Küste entstehen tage- oder wochenlang andauernde Unwetter mit enormen Niederschlagsmengen.

ABLENKUNG

Wenn der Fluss senkrecht auf eine Bergkette trifft, kondensiert der Wasserdampf fast vollständig aus. Trifft er schräg auf (siehe Grafik), so entsteht ein »Barrierenjet«, der die Bergkette entlangströmt und den Niederschlag über die Bergflanke verteilt.

Barrierenjet

AUFTRIEB

Wenn die warme, feuchte Luftmasse über einer Bergkette aufsteigt, kühlt sie sich ab. Der Wasserdampf kondensiert. Letztlich zerfällt der atmosphärische Fluss in örtlichen Regen oder Schneestürme.

HERKUNFT

Atmosphärische Flüsse nähern sich Kalifornien in der Regel aus Südwesten und führen warme, feuchte Luft aus den Tropen mit.

DAUER

Ein großes Unwetter kann bis zu 40 Tage anhalten und an der Küste hin- und herwandern. Kleinere atmosphärische Flüsse treten jedes Jahr auf und dauern gewöhnlich zwei bis drei Tage. Der so genannte Ananasexpress kommt direkt aus der Gegend um Hawaii.

atmosphärischer Fluss

NIEDERSCHLAG

Unter einem Atmosphärenfluss fallen jeden Tag hunderte Liter Regen pro Quadratmeter. Schon mittelstarke Unwetter können mehr als 400 Liter pro Quadratmeter bringen.

400 Kilometer

zirka 1,5 Kilometer

DAMPFTRANSPORT

Die Feuchte konzentriert sich etwa 800 bis 1600 Meter über dem Meer. Der starke Wind in dieser Schicht bringt sehr feuchte Tropenluft mit sich. Außerdem nimmt der Fluss unterwegs Luftfeuchte auf.

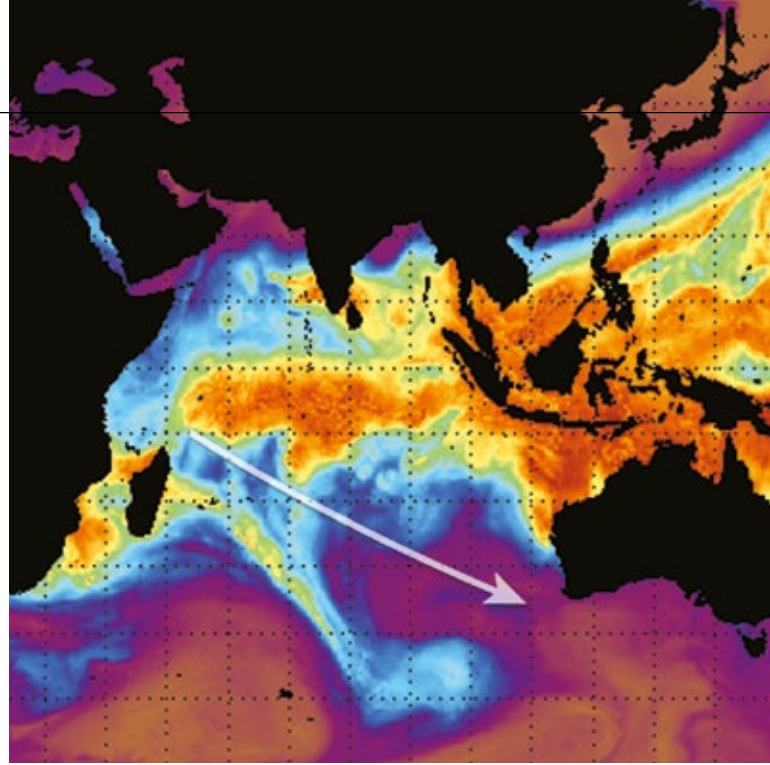
NOT TO SCALE

DON FOLEY

Jede Westküste ist bedroht

Atmosphärische Flüsse bilden sich über tropischen Gewässern und strömen dann, in Richtung der Pole abgelenkt, auf die Westküsten vieler Kontinente zu; ein solcher Fluss traf England im November 2009. Besonders häufig treten sie an der Pazifikküste der USA auf, doch gelegentlich entstehen sie an ungewöhnlichen Orten wie dem Golf von Mexiko, worauf im Mai 2010 die Stadt Nashville überflutet wurde. Durch die Erderwärmung könnten atmosphärische Flüsse in Zukunft häufiger und heftiger auftreten.

Luftfeuchtigkeit
vom 17. bis 19. Dezember 2010



Riesenfluten. Bei aller Unsicherheit der Radiokohlenstoffmethode drängt sich das Fazit auf: Überschwemmungen, die so enorm sind wie die von 1861/1862 oder noch größer, kommen ungefähr alle zwei Jahrhunderte vor. Dass die letzte Katastrophe in Kalifornien 150 Jahre zurückliegt, darf die Menschen nicht in falscher Sicherheit wiegen – ganz im Gegenteil.

Wie beeinflusst die globale Erwärmung die atmosphärischen Flüsse?

An sich sind atmosphärische Flüsse für Kalifornien auch nützlich: Die kleineren, die Jahr für Jahr wiederkehren, stellen wichtige Wasserquellen dar. Nach Schätzungen haben atmosphärische Flüsse zwischen 1950 und 2010 jährlich 30 bis 50 Prozent der Niederschlagsmenge Kaliforniens herangeschafft – und das innerhalb von zehn Tagen. Ähnliches gilt für die gesamte Westküste. Doch in derselben Zeitspanne verursachten die Unwetter in Kalifornien auch mehr als 80 Prozent aller Flussüberschwemmungen und 81 Prozent der 128 dokumentierten Deichbrüche im Central Valley.

Diese dramatischen Vor- und Nachteile werfen die Frage auf, was sich bei wachsender globaler Erwärmung daran ändern wird. Wie erwähnt prägten Zhu und Newell den Begriff atmosphärische Flüsse ursprünglich, weil ihnen bestimmte Muster in Wettermodellen auffielen. Mit ganz ähnlichen Computermodellen lassen sich auch die Folgen steigender Treibhausgaskonzentrationen simulieren. Die Klimatologen programmieren die atmosphärischen Flüsse nicht von vornherein in ihre Wetter- und Klimamodelle hinein, sondern die Flüsse entstehen bei aufwändigen Simulationen der atmosphärischen Wasserkreisläufe ganz von selbst. Darum tauchen sie auch in den neuen Modellen des Weltklimarats IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) auf.

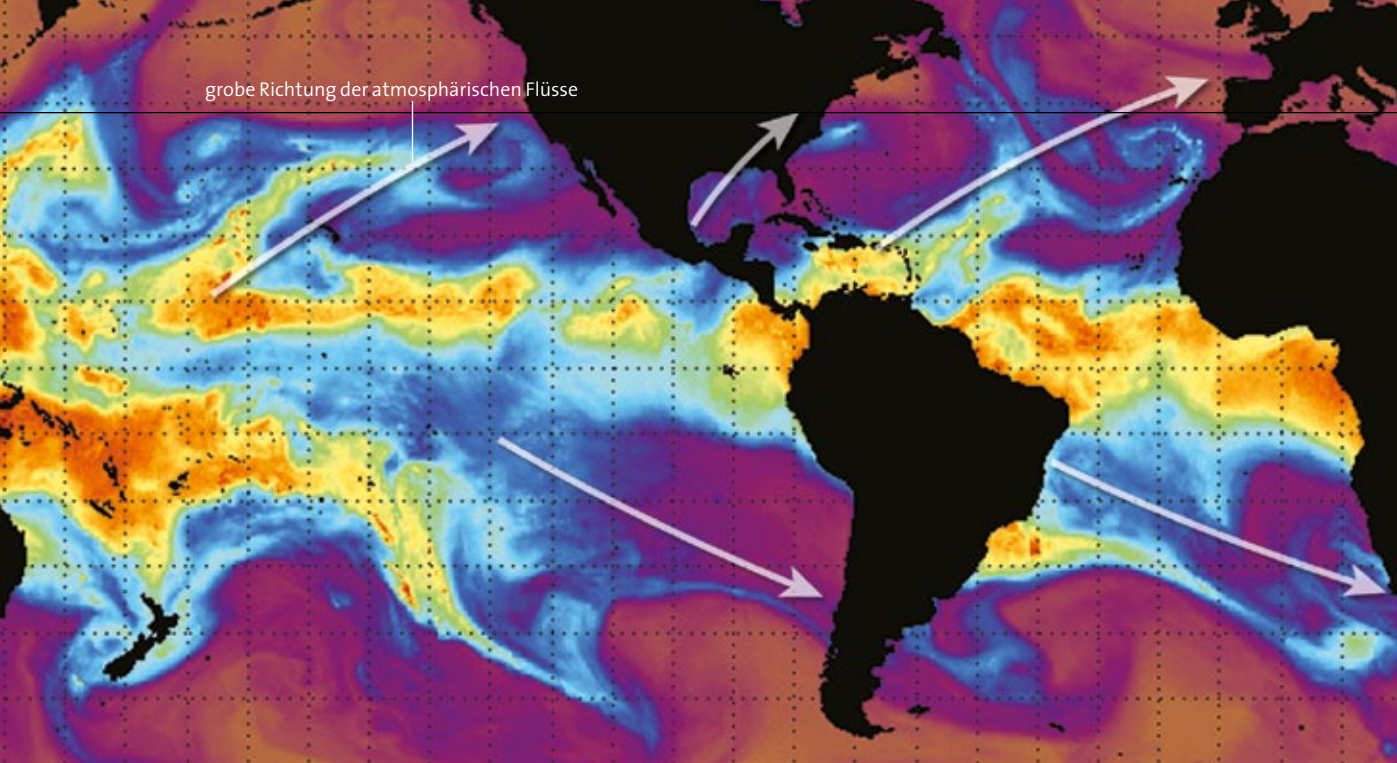
Einer der Autoren, Michael D. Dettinger, hat kürzlich sieben unterschiedliche Klimamodelle aus aller Welt verglichen und daraus den Schluss gezogen, dass Kalifornien im 21. Jahrhundert mehrfach von atmosphärischen Flüssen heimgesucht werden wird. In den Prognosen klettert die Temperatur auf Grund des Treibhauseffekts im Durchschnitt um drei Grad Celsius. Da wärmere Luft mehr Wasserdampf speichert, werden die atmosphärischen Flüsse mehr Feuchtigkeit transportieren.

Andererseits dürften sich die über dem Pazifik wehenden Winde künftig etwas abschwächen, weil die Polarregionen stärker erwärmt werden als die Tropen, wodurch der Temperaturunterschied sinkt. Die von atmosphärischen Flüssen erzeugte Regenmenge hängt davon ab, wie viel Wasserdampf sie speichern und wie schnell sie sich bewegen. Also lautet die Frage: Entscheidet die feuchtere Luft oder der schwächere Wind? In sechs der sieben Klimamodelle nehmen die von atmosphärischen Flüssen nach Kalifornien beförderten Regen- und Schneemengen bis zum Jahr 2100 um rund zehn Prozent zu. Die feuchtere Luft triumphiert über den schwächeren Wind.

Alle sieben Modelle sagen voraus, dass die Anzahl der jährlich an der kalifornischen Küste ankommenden atmosphärischen Flüsse zunehmen wird: von neun, dem historischen Mittelwert, auf elf. Und es werden atmosphärische Flüsse von noch nie dagewesener Stärke auftreten.

Simulierte Katastrophe

Angesichts solcher Prognosen und der betroffenen Bevölkerungsmenge ist es unabdingbar, Vorsorge zu treffen. Um dem kalifornischen Katastrophenschutz ein konkretes Beispiel zu liefern, haben Wissenschaftler am U.S. Geological Survey (USGS) das zu Beginn des Artikels erwähnte Szenario



KARTENBASIS: UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON / SSEC; BEARBEITUNG: XNR PRODUCTIONS

entwickelt: ein Unwetter vom Ausmaß der Katastrophe von 1861/1862, das aber statt 43 nur 23 Tage dauert und somit gewiss nicht unrealistisch ist. Das Szenario erhielt den Namen ARKStorm (für Atmospheric River kilo Storm); es kombiniert die Daten von zwei großen Regenstürmen, die Kalifornien im Januar 1969 und im Februar 1986 heimgesucht haben.

Den Modellrechnungen zufolge würden die meisten Niederungen Nord- und Südkaliforniens überschwemmt, und 1,5 Millionen Menschen müssten evakuiert werden. Hochwasser, Hunderte von Erdlawinen und örtliche Stürme in Orkanstärke würden 400 Milliarden Dollar an Sachschäden und Ernteverlusten verursachen. Durch die langfristige Unterbrechung von Wirtschaft und Beschäftigung könnten die Gesamtkosten sogar auf über 700 Milliarden Dollar anwachsen. Die ARKStorm-Simulation berücksichtigt keine Todesopfer, doch vermutlich würde eine Katastrophe dieses Ausmaßes tausende Menschenleben fordern.

Die Schäden fielen ungefähr dreimal so hoch aus wie in einem anderen USGS-Katastrophenszenario namens ShakeOut, das ein Erdbeben der Stärke 7,8 in Südkalifornien simuliert. Offenbar ist die Gefahr einer durch atmosphärische Flüsse ausgelösten Riesenflut für Kalifornien noch viel größer als das ausgiebig diskutierte Risiko eines schweren Erdbebens. Obwohl ein ARKStorm-Ereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit eintreten wird, ist der Hochwasserschutz des Bundesstaats nicht darauf vorbereitet. Wenigstens kündigen sich Megafluten heute auf Grund des wissenschaftlich-technischen Fortschritts mehrere Tage im Voraus an. Doch nur angemessene Vorsorge und bessere Vorhersagen können das Ausmaß der Schäden und die Anzahl der Todesopfer gering halten.

Die gleiche Warnung gilt auch für die Westküsten anderer Kontinente. Nirgendwo sonst haben Wissenschaftler die at-

mosphärische Flüsse so gründlich untersucht wie an der Küste Kaliforniens, doch es gibt wenig Grund anzunehmen, dass Riesenfluten anderswo seltener oder schwächer auftreten. Die nächste Sintflut könnte auch Chile, Spanien, Namibia oder Westaustralien treffen. ~

DIE AUTOREN



Michael D. Dettinger (links) ist Hydrologe beim U.S. Geological Survey sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter der Climate, Atmospheric Sciences and Physical Oceanography Division an der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien). **B. Lynn Ingram** ist Professorin für Geo- und Planetenwissenschaften an der University of California in Berkeley.

QUELLEN

- Dettinger, M. D. et al.:** Design and Quantification of an Extreme Winter Storm Scenario for Emergency Preparedness and Planning Exercises in California. In: *Natural Hazards* 60, S. 1085–1111, 2012
- Dettinger, M. D., Ralph, F. M.:** Storms, Floods, and the Science of Atmospheric Rivers. In: *Eos* 92, S. 265–267, 2011
- Ingram B. L., Malamud-Roam, F. P.:** The West without Water. What Past Floods, Droughts, and Other Climatic Clues Tell Us about Tomorrow. University of California Press, Berkeley 2013
- Malamud-Roam, F. P. et al.:** Holocene Paleoclimate Records from a Large California Bay Estuarine System and its Watershed Region: Linking Watershed Climate and Bay Conditions. In: *Quaternary Science Reviews* 25, S. 1570–1598, 2006

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184771

PROMETHEUS IM LABOR

Moleküle aus dem mentalen Modellbaukasten

Theoretische Chemiker denken sich immer wieder neue Molekülstrukturen aus. Wozu ist das gut?

VON ROALD HOFFMANN

Meine Lieblingsbeschäftigung ist, Moleküle auszuhecken, die es (noch) nicht gibt. Mit der bloßen Vorstellungskraft aus dem Bausatz der Atome neue Kombinationen und Konfigurationen zu ersinnen, finde ich faszinierend. Man kann das spielerisch oder sogar halb träumerisch tun – wie einst Friedrich August Kekulé (1829–1896),

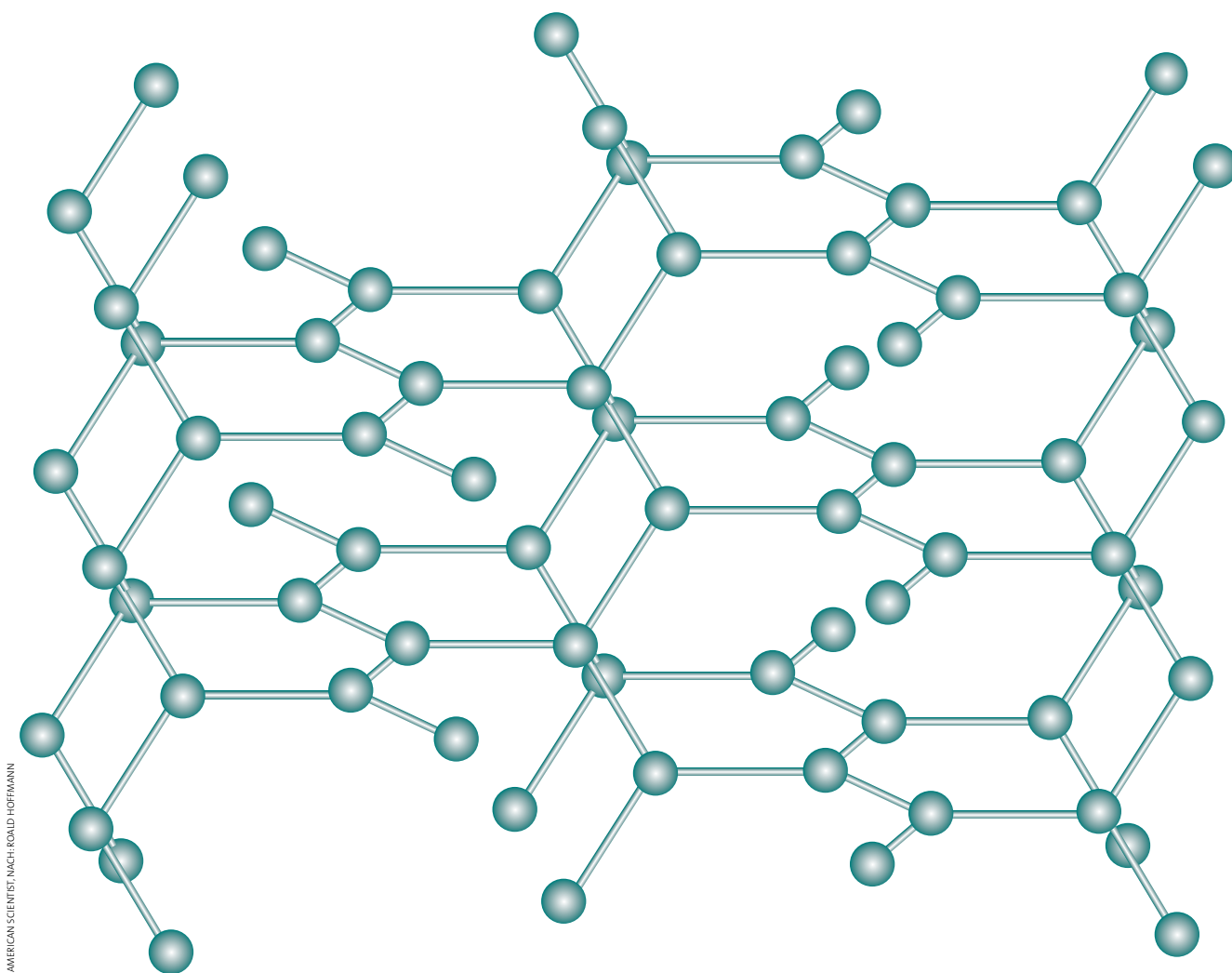
dem nach eigener Aussage die zyklische Struktur von Benzol einfiel, als er gedankenverloren über das Symbol des Ouroboros sinnierte: der Schlange, die sich in den Schwanz beißt.

Aber gibt es nicht schon genügend Moleküle – natürliche wie synthetische – in der großen weiten Welt? Warum soll man sich überhaupt noch neue

ausdenken? Wichtige Gründe sprechen meines Erachtens dafür.

Aus Handwerk wird Kunst

Die Synthese ist das Herzstück der Chemie – quasi ihre Krönung, bei der aus dem Handwerk hohe Kunst wird. Was wir über die Eigenschaften der Substanzen oder (auf der mikroskopischen Ebene



AMERICAN SCIENTIST, NACH: ROALD HOFFMANN

ne) Moleküle und ihre Umwandlungen in Erfahrung gebracht haben, dient hier dazu, gezielt Neues zu erschaffen.

Schöpferisch tätig sein kann ich als Theoretiker am besten, indem ich mir ungewöhnliche Moleküle ausdenke, die noch niemand kennt. Wenn ich Glück habe, wird irgendwann ein Experimentator versuchen, meine Kopfgeburten auch herzustellen.

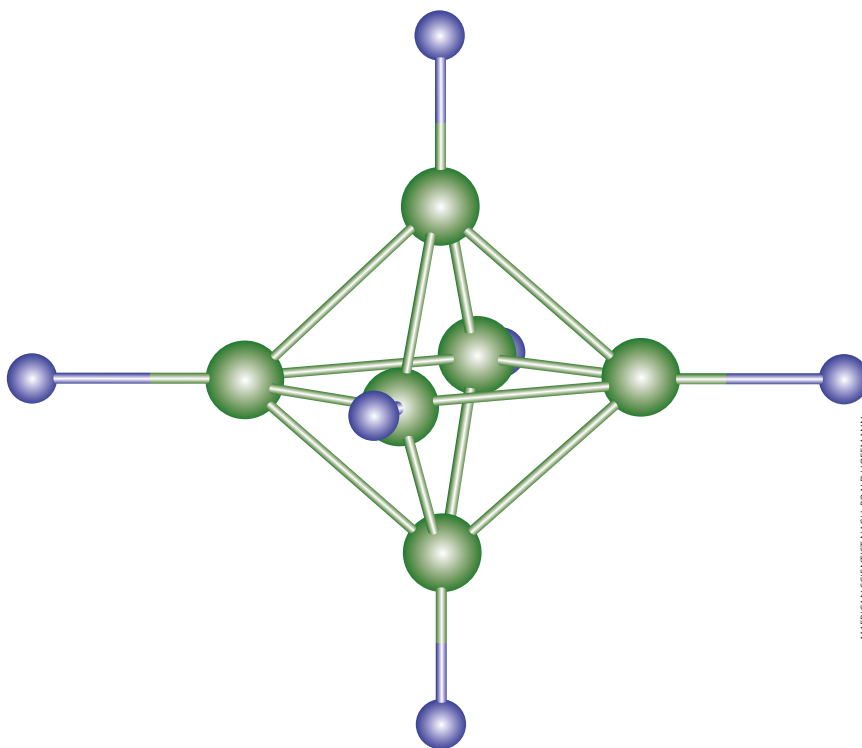
Meist stehen die Chancen dazu allerdings eher schlecht. Erfahrungsgemäß nimmt ein hypothetisches Molekül am ehesten reale Gestalt an, wenn es von jemandem erdacht wird, der es auch synthetisieren kann, und nicht von einem Theoretiker wie mir.

Wann ist ein Molekül interessant?

Die Chemie ist ein nahezu unendlicher Makrokosmos von Strukturen. Daher warten unzählige faszinierende Moleküle bis heute auf ihre Synthese – und noch mehr eher langweilige. So wurden von den 355 theoretisch möglichen Dodekanen ($C_{12}H_{26}$) nur wenige tatsächlich hergestellt – und das mit gutem Grund: Von den anderen sind kaum neue Prinzipien oder Eigenschaften zu erwarten, da sie den bereits existierenden zu ähnlich sind. Aber was verstehe ich unter einem interessanten Molekül? Hier ein paar Beispiele.

Zusammen mit Timothy R. Hughes von der Texas A&M University in College Station, Miklos Kertesz von der Georgetown University und Peter Bird von der Concordia University in Montreal habe ich eine Kohlenstoff-Modifikation erdacht, die aller Voraussicht nach metallische Eigenschaften hätte (Bild links). So etwas ist zweifellos spannend. Allerdings sagt mir meine chemi-

Ausschnitt aus einem dreidimensionalen Gitter, das die Molekülstruktur einer hypothetischen Modifikation von Kohlenstoff zeigt. Diese sollte nach theoretischen Berechnungen metallische Eigenschaften haben. Allerdings ist fraglich, ob ihre Synthese je gelingen wird.



AMERICAN SCIENTIST, NACH: ROALD HOFFMANN

Ein oktaedrischer Käfig aus Boratomen (grün) mit Wasserstoffatomen (blau) ist ein theoretisches dreidimensionales Analogon zu dem Redoxpaar Chinon/Hydrochinon. Anders als dieses könnte er vier statt zwei Elektronen aufnehmen oder abgeben.

sche Intuition auch, dass die Synthese dieser komplizierten Struktur sehr schwer sein dürfte. Ob sich je ein Experimentator daran wagen wird?

Als weiteres Beispiel aus meiner Forschungsgruppe sei die Arbeit von Musiri M. Balakrishnarajan genannt, der sich eine Art dreidimensionales Gegenstück zum System Chinon/Hydrochinon ausgedacht hat, das als bestes Redoxpaar in der organischen Chemie gilt: Die beiden Verbindungen wandeln sich bereitwillig ineinander um, während sie jeweils zwei Elektronen aufnehmen oder abgeben. Die von meinem Mitarbeiter erdachten polyedrischen Bor-käfige wie das oben dargestellte Oktaeder vereinen gleichsam zwei solche Redox-paare in sich. Sie können dadurch zweimal nacheinander jeweils zwei Elektronen aufnehmen oder abgeben, also insgesamt vier. Dabei ändern sie zugleich ihre Geometrie: Das Mole-

kül atmet gewissermaßen während des Redoxvorgangs.

Das dritte Beispiel stammt nicht aus meiner Arbeitsgruppe. Es betrifft zwei spektakuläre Homologe zum Ethin (C_2H_2), die statt Kohlenstoff Silizium enthalten. Sie wurden zunächst vorhergesagt und später auch experimentell erzeugt und nachgewiesen.

Spektakulär waren die Vorhersagen wegen der völlig unerwarteten Struktur des aus nur vier Atomen bestehenden Moleküls. Wie Hans Lischka und Hans-Joachim Kohler von der Universität Wien berechneten, sollte es nicht die vom Ethin vertraute lineare Anordnung H-Si-Si-H haben, sondern eine gefaltete geometrische Struktur, in der die beiden Wasserstoffatome als Brücken zwischen den zwei Siliziumatomen fungieren (Bild auf S. 84). Und diese kaum glaubliche Prognose hat sich als zutreffend erwiesen!

Später sagten Brenda T. Colegrove und H. F. Schaefer III von der University of Georgia in Athens ein zweites »Isomer« mit noch einer anderen, nicht minder ausgefallenen Struktur als metastabil voraus (rechts im Bild unten). Auch dieses Molekül ist keine bloße Schimäre: Michel Cordonnier, Marcel Bogey, Claire Demuyck und Jean-Luc Destombes konnten es 1992 an der Universität Lille nachweisen.

Design-Sprünge

Viele Verbindungen und Moleküle sind von großem technischen Nutzen, wovon die riesigen Chemiewerke sowie die vielen Chemie- und Chemieingenieur-Institute weltweit zeugen. Die Eigenschaften der Substanzen sollen dabei ihrer Funktion dienen. Seien es nun Werkstoffe für die Elektronik, gestalterinnernde Legierungen, Arzneimittel oder extrem feste Kleber – technische Moleküle erfüllen bestimmte Aufgaben. Aber leider nie so gut und preiswert, wie wir es uns wünschen. Daher der Anreiz, immer neue Moleküle mit noch spezifischeren Eigenschaften zu entwickeln.

Deren Planung läuft oft auf eine Feinabstimmung hinaus. Man kennt zum Beispiel eine pharmazeutische Leitverbindung mit Antitumor-Aktivität. Allerdings wirkt sie nicht optimal, und obendrein ist sie selbst oder eines ihrer Abbauprodukte giftig. Um sie zu verbessern, könnte man etwa hier eine Methylgruppe durch Fluor ersetzen und dort zwei Wasserstoffatome hinzufügen. Dieses stückweise Abwandeln eines vorliegenden Molekülgerüsts ist unser Metier als Chemiker, sei es nun beim Design von Farbstoffen oder von Arzneimitteln.

Doch die Feinabstimmung ist keine zufällige Veränderung. Man muss genau überlegen, wie sich die gewünschte Eigenschaft erreichen lässt, bevor man sich an die Synthese macht. Das kann durch Rückgriff auf eigene Erfahrung oder Lehrbuchwissen, aber auch per Computersimulation geschehen. Theoretiker sind da ausgezeichnete Ratgeber.

Obwohl das Abwandeln von Molekülen in kleinen Schritten – in Grenzen – erfolgreich ist, so lehrt uns doch die Chemie, dass wirklich neue Eigenschaften und Funktionen nur durch große Sprünge bei Struktur und elektronischen Eigenschaften zu Stande kommen. Ich denke etwa an Flüssigkristalle und Nylon sowie Fullerene und Metall-Metall-Bindungen. Hier spielt die Theorie eine noch wichtigere Rolle. Kleine Extrapolationen sind leicht – man kann dazu auf bekannte Trends zurückgreifen oder einzelne Faktoren in den Berechnungen anpassen. Die Eigenschaften eines ganz neuen, ungewöhnlichen Moleküls vorherzusagen fordert dagegen das Können des Designers heraus. Er muss es verstehen, aus dem Vorhandenen zu schöpfen, aber nicht nur in reduktionistischer Weise Schlüsse daraus zu ziehen, sondern auf unbekanntes Terrain vorzustößen.

Möglichst kühne Vorhersage

Theorien verhelfen zu einem tieferen Verständnis wissenschaftlicher Zusammenhänge. Wenn sie Anerkennung in Fachkreisen finden, hat das viele Gründe. Einer der wichtigsten ist sicher ihre Fähigkeit, Voraussagen – am besten möglichst kühne – zu machen, die sich dann als richtig erweisen.

Wie ließe sich das Verständnis einer katalytischen Funktion besser unter Be-

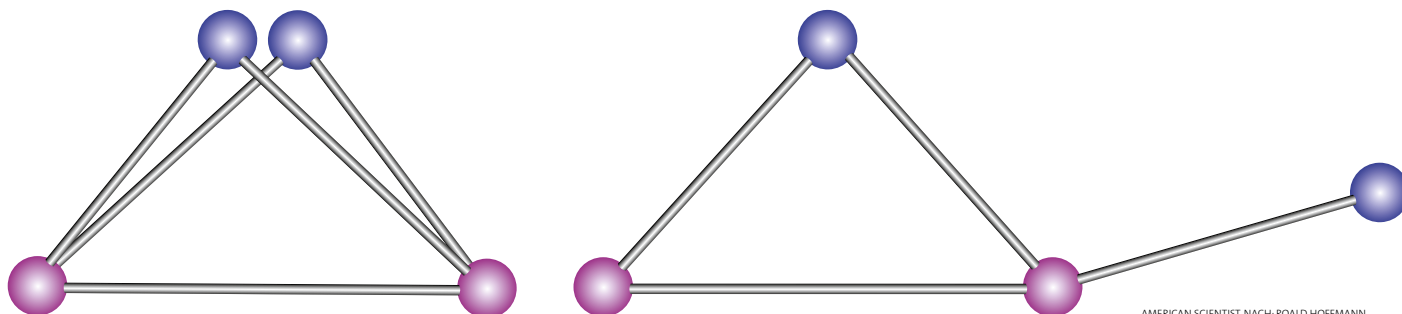
weis stellen als mit dem Entwurf eines Katalysators, der eine biochemische Reaktion schneller oder selektiver ablaufen lässt als das natürliche Enzym? Oder ein anderes Beispiel: Die Richtigkeit einer umfassenden Theorie der Supraleitung wäre am überzeugendsten dadurch zu demonstrieren, dass sie nicht nur wie die herkömmliche so genannte BCS-Theorie die beobachteten Isotopeneffekte und Symmetrieeigenschaften richtig beschreibt, sondern auch korrekt vorhersagt, welche chemische Verbindung ein Hochtemperatur-Supraleiter sein sollte, der die Elektrotechnik revolutionieren könnte. So weit sind wir leider noch nicht.

Kurzum: Die theoretische Vorhersage von neuen Molekülen mit ungewöhnlichen Strukturen oder Eigenschaften ist auch deshalb sinnvoll, weil sie den besten Test dafür darstellt, wie gut das wissenschaftliche Verständnis auf einem Fachgebiet ist.

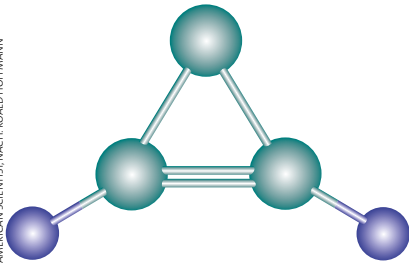
Moleküle unter Extrembedingungen

Das Universum wimmelt von Orten, an denen extreme Bedingungen herr-

Die zwei hier gezeigten verblüffenden Strukturen ergaben sich aus theoretischen Berechnungen für ein einfaches Molekül aus zwei Silizium (violett) und Wasserstoffatomen (blau). Sie wurden später experimentell bestätigt. Keine entspricht der erwarteten linearen Konfiguration, wie sie beim homologen Ethin ($\text{HC}\equiv\text{CH}$) vorliegt. Im Molekül links bilden die zwei Wasserstoffatome Brücken zwischen den beiden Siliziumatomen. In der Struktur rechts ist dagegen ein Wasserstoff- an nur ein Siliziumatom gebunden.



AMERICAN SCIENTIST, NACH: ROALD HOFFMANN



schen. Man denke nur an den gewaltigen Druck und die mörderische Hitze im Inneren eines Sterns oder an das eisige Beinahvakuum, das ein Körnchen in einer interstellaren Wolke umgibt. Im Lauf einer chemischen Reaktion treten viele molekulare Zwischenstufen auf, die unter Umständen nur eine äußerst flüchtige Existenz haben. Ihre Eigenschaften, ja ihr Vorhandensein, sind meist schlichtweg nicht messbar – weder draußen im All noch drinnen im Labor.

Hier kann die theoretische Chemie weiterhelfen. Mit Hilfe der Quantenmechanik ist es beispielsweise gelungen, die Spektren von Molekülen im interstellaren Raum korrekt zu berechnen. Dadurch wurde unter anderem ein ziemlich bizarres kleines Molekül entdeckt, das in den Weiten des Kosmos relativ häufig vorkommt, dessen man im Labor aber kaum habhaft wird. Es trägt den zungenbrecherischen Namen Cyclopropenyliden (Bild oben) und ist unter irdischen Bedingungen extrem unbeständig.

Ebenso schwer fassbar sind die metastabilen Zwischenstufen chemischer Reaktionen. Auch sie lassen sich nur in Ausnahmefällen mit aufwändigen Verfahren direkt beobachten, sind aber sehr wichtig für das Verständnis des Reaktionsverlaufs. Sie theoretisch zu berechnen, ist da meist die einzige Alternative.

Eine fruchtbare Hassliebe

Theoretiker bilden in der Chemie eine Minderheit, denn die Chemie ist eine experimentelle Wissenschaft. Unsere Freunde in den weißen Kitteln im Labor und das molekulare Füllhorn der Biosphäre sind ungeheuer produktiv. Zusammen haben sie der Menschheit Millionen von Molekülen geschenkt, mit unglaublich vielfältigen Eigen-

Dieser ungewöhnliche Kohlenwasserstoff namens Cyclopropenyliden kommt im interstellaren Raum vor, ist auf der Erde aber hochreaktiv und im Labor deshalb nur sehr kurze Zeit beständig (grün: Kohlenstoff; blau: Wasserstoff).

schaften. Manche sind nur geringfügige Variationen eines Themas, während andere in Struktur und Eigenschaften bisher Ungeahntes bieten. Und da stehen wir nun als Theoretiker, eher reagierend als agierend, und müssen beständig Erklärungen liefern.

Ich habe nichts gegen das Erklären. Es ist sicherlich ein guter Test für die Theorie. Aber es macht Spaß, ab und zu die Rolle zu tauschen und etwas vorherzusagen.

Wie die Dinge liegen, verbindet Experimentatoren und Theoretiker eine Art Hassliebe – und zwar nicht nur in der Chemie. Die Stereotype sind klar: Für den Experimentator bauen die Theoretiker Luftschlösser, kümmern sich nicht um die wirklich wichtigen Probleme und vereinfachen die Welt derart, dass sie nicht mehr wiederzuerkennen ist. Für Theoretiker dagegen verkomplizieren die Experimentatoren alles unnötig, variieren zu viele Parameter gleichzeitig und messen nie die Werte, auf die es eigentlich ankommt.

Trotzdem sind beide auf Gedeih und Verderb miteinander verbunden, denn sie brauchen sich. Der Theoretiker kann nicht im luftleeren Raum spekulieren. Umgekehrt bleiben die Fakten für sich allein stumm. Die Wissenschaft als unsere Art und Weise »Wissen zu schaffen« ist angewiesen auf die Höhenflüge und die Vorstellungskraft der Theoretiker, gekoppelt mit der nüchternen Prüfung der physikalischen und chemischen Realität im Labor.

Aus diesem Grund bereitet es Vergnügen, Vorhersagen von mäßig unrealistischen Molekülen – oder solchen, die nur vorübergehend existieren – zu machen. Die Betonung liegt auf »mäßig unrealistisch«. Das Molekül muss einerseits ausgefallen genug sein, dass seine Synthese reizvoll erscheint. Ander-

erseits darf es aber nicht zu exotisch wirken; denn sonst findet sich kein Doktorand, der sich an die Aufgabe wagt – schließlich hat er dafür nur zwei bis drei Jahre Zeit.

Ausflug auf unerforschtes Terrain

Wissen an sich ist schon ein Vergnügen. Das Schaffen von Neuem desgleichen. Und auch das Teilen von Wissen mit anderen verschafft eine innere Befriedigung. Ebenso – ja, auch das spielt eine Rolle – die Anerkennung der eigenen Arbeit durch andere.

Der Prophet verlässt die Sicherheit von bekannten Molekülen und Eigenschaften und begibt sich auf unerforschtes Terrain, was riskant und reizvoll zugleich ist. Er flirtet dabei in gewisser Weise mit dem Experimentator, dem er ein lohnendes Ziel vor Augen stellt, das aber nicht unerreichbar erscheinen darf. Die Vorhersage neuer Moleküle ist somit ein Abenteuer, das dem stetigen Streben der Wissenschaft nach Erkenntnis sowie dem Bedarf der Industrie an immer besseren Werkstoffen dient und durch den Nervenkitzel, der mit ihm verbunden ist, zugleich riesig Spaß macht. ~

DER AUTOR



Roald Hoffmann ist emeritierter Frank H. T. Rhodes Professor of Humane Letters an der Cornell University in Ithaca (New York) und Träger des Chemie-Nobelpreises 1981. Von seinen literarischen Neigungen zeugt unter anderem das von ihm und Carl Djerassi verfasste Theaterstück »Oxygen«.

QUELLEN

- Hoffmann, R.:** Why Buy That Theory? In: American Scientist 91, S. 9–11, 2003
Hoffmann, R., Hopf, H.: Moleküle in Not – und was wir von ihnen lernen. In: Angewandte Chemie 120, S. 4548–4556, 2008
Schaefer III, H. F.: Odorless Chemistry: A Gentle Reductionist Companion to Experiment. In: Journal of the Chinese Chemical Society 43, S. 109–115, 1996

Bücher und mehr



Unser besonderer Tipp:



Ian Ridpath

STARTER-SET ASTRONOMIE

Inhalt: Sternkarte - drehbar und nachleuchtend. Buch - alles über Sterne und Planeten. Poster - unser faszinierendes Sonnensystem

2013, 80 S. m. zahlr. Farbbabb., in Box, Kosmos

Bestell-Nr. 3798 € 19,99 (D), € 20,60 (A)

Das Einsteigerpaket mit dem unschlagbaren Preis-Leistungs-Verhältnis!

Das kosmische Komplettpaket bietet alles, was Astro-Einsteiger brauchen: Mit der nachleuchtenden Sternkarte werden die Sternbilder erkundet, das großzügig gestaltete und hervorragend illustrierte Buch gibt einen Überblick über das Universum, und das Poster „Unser Sonnensystem“ schmückt die Wand des neuen Astro-Aspiranten. So wird der Blick in den Himmel zum Erlebnis!

Das kosmische Komplettpaket bietet alles, was Astro-Einsteiger brauchen: Mit der nachleuchtenden Sternkarte werden die Sternbilder erkundet, das großzügig gestaltete und hervorragend illustrierte Buch gibt einen Überblick über das Universum, und das Poster „Unser Sonnensystem“ schmückt die Wand des neuen Astro-Aspiranten. So wird der Blick in den Himmel zum Erlebnis!



NEU

Chad Orzel

EINSTEINS HUND Relativitätstheorie (nicht nur) für Vierbeiner

2013, XX, 468 S. m. 43 Abb., geb., Springer

Bestell-Nr. 3820

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

In dieser unwiderstehlichen Einführung in die Physik von

Albert Einstein begeben sich der Physikprofessor Chad Orzel und seine reizende Promenadenmischung Emmy auf die Spuren der allgemeinen Relativitätstheorie. Wenn Orzel sich im Lehnstuhl – und gelegentlich im Auto – mit Emmy über die Relativbewegungen von Hunden und Katzen oder die Vorgehensweise beim Jagen von Eichhörnchen unterhält, übersetzt er die schwierigen Ideen Einsteins in Beispiele, die einfach genug sind, dass sie auch ein Hund verstehen kann.

Ebenfalls lieferbar: Orzel, Schrödingers Hund, Quantenphysik (nicht nur) für Vierbeiner

Bestell-Nr. 3394 € 19,95 (D), € 20,60 (A)



Georg Schwedt

EXPERIMENTE RUND UM DIE KUNSTSTOFFE DES ALLTAGS

2013, 180 S., kart, Wiley-VCH

Bestell-Nr. 3805

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Wie kann man das Material eines

Joghurtbechers von dem eines Zahnpfutzbechers unterscheiden? Was kann man mit dem Superabsorber einer Babywindel so alles Sinnvolles anstellen? Nach der Lektüre dieses Buches wissen Sie mehr! Und den Spaß beim lehrreichen Experimentieren gibt es kostenlos dazu! Ein neues und in seiner Thematik einzigartiges Experimente-Buch für Lehrer und Schüler der Mittel- und Oberstufe, Dozenten, Studenten und überhaupt für Alle an Chemie Interessierte.



NEU

Paul Parsons, Gail Dixon

STEPHEN HAWKING IM 3-MINUTEN-TAKT

Sein Leben, sein Werk, sein Einfluss

2013, 160 S. m. 160 Farbbabb., geb., Springer

Bestell-Nr. 3819

€ 14,99 (D), € 15,50 (A)

Der Band bietet eine kompakte Einführung in Leben und Werk von Stephen Hawking, der als brilliantester Physiker seit Einstein gilt. Der Lesestoff ist in 3-Minuten-Portionen aufgeteilt und liefert so einen schnellen Einblick in das Denken des Wissenschaftlers. Tauchen Sie also einfach ein in die faszinierende Geschichte dieses großen Denkers und beginnen Sie, das Universum ein wenig besser zu verstehen.

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



Salomon Kroonenberg

WARUM DIE HÖLLE NACH SCHWEFEL STINKT

Eine geologische Höllenfahrt

2013, 272 S., 107 farb. Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 3806

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Faszinierende Einblicke in die

Unterwelt – ein unterhaltsames und schön illustriertes Buch! Wäre die Erde durchsichtig, würden die Menschen den ganzen Tag flach auf dem Bauch liegen, um in die Tiefe zu schauen – so schön sind die Vorgänge unter unseren Füßen. Salomon Kroonenberg betreibt Feldforschung unter der Erde, mit jedem Kapitel steigt er tiefer hinab, wobei er sich an Dantes Höllenkreisen orientiert. Entstanden ist eine unterhaltsame Geologie der Unterwelt – gewürzt mit Kroonenbergs persönlichen Erlebnissen und einem kräftigen Schuss Mythologie.



%

Georg Joos, Egon W. Richter

HÖHERE MATHEMATIK

Ein kompaktes Lehrbuch für Studium und Beruf

13. Aufl. 2013, 496 S., Lizenz:

Harri Deutsch, geb., Nikol Verlag

Bestell-Nr. 3768, früher € 19,80

jetzt € 9,99 (D), € 10,30 (A)

Das weit gesteckte Feld dieses kompakten Lehrbuches umfasst u.a. auch Differentialgleichungen und Numerische Mathematik. Lesern aus naturwissenschaftlichen und technischen Fachrichtungen liefert es eine pointierte und einprägsame Darstellung der Teilgebiete der höheren Mathematik.



Lawrence M. Krauss

EIN UNIVERSUM AUS NICHTS

... und warum da trotzdem etwas ist

2013, 256 S. mit 40 Abb., geb., Knaus

Bestell-Nr. 3804

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Die Frage nach der Entstehung unseres Universums ist eine der bemerkenswertesten Erkundungsreisen, die die Menschheit je unternommen hat. Einstein und Hubble, Relativitätstheorie, Inflation und Quantenmechanik – kein Forscher und Bereich der Kosmologie, über den Lawrence Krauss nicht verständlich und vor allem spannend zu erzählen weiß. Dabei fragt er immer auch nach den Quellen unseres Wissens: Wie hat sich unsere Vorstellung vom Ursprung aller Dinge entwickelt? Weshalb wissen wir, was wir heute wissen? Und warum können wir davon ausgehen, dass das auch stimmt?



Ludolf Schultz, Jochen Schlüter

METEORITE

2012, 100 S. m. 50

Farbbabb., geb., Primus

Bestell-Nr. 3685

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Eine verständliche und reich bebilderte Einführung

über die steinernen Boten aus dem All. Meteorite sind die ältesten Gesteine auf der Erde. Sie tragen noch »Erinnerungen« an die Zeit, als sich das Sonnensystem bildete. Aus ihnen lassen sich physikalische und chemische Parameter des Sonnenebels und der frühen Erde herauslesen. Grund genug, sich mit den geheimnisvollen Materiebrocken aus dem Weltall zu beschäftigen. Die Autoren, zwei ausgewiesene Meteoriten-Experten, legen mit diesem Band eine allgemein verständliche und reich bebilderte Einführung in das Thema Meteorite vor.

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

Bequem bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 752-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



%

Markus T. Mall, Dierk Suhr
KLEINE GESCHICHTE DER KETZEREI

2008, 156 S., geb., Thorbecke

Bestell-Nr. 3789,
früher € 19,80,

jetzt € 8,95 (D), € 9,20 (A)

Mit strengen und brutalen Methoden ging die mittelalterliche Kirche gegen Ketzer vor, denn schlimmer noch als ein Heide war nach Sicht der Kirche ein Ketzer, war dieser doch zugunsten einer Irrlehre vom rechten Glauben abgefallen. Nicht selten landeten diese Menschen auf dem Scheiterhaufen. Eines der spannendsten Kapitel mittelalterlicher Geschichte.



Morgan Freeman

MYSTERIEN DES WELTALLS, STAFFEL 2

2013, 405 Min., Discovery Channel, WVG Medien

Bestell-Nr. 3779

€ 19,99 (D), € 19,99 (A)

Zusammen mit hochkarätigen Wissenschaftlern aus den

Bereichen der Astrophysik, Medizin und Philosophie erläutert Morgan Freeman neue Theorien und Forschungsergebnisse über unser Dasein auf der Erde sowie die großen Geheimnisse des Universums. Spannend, lehrreich, informativ und beeindruckend zugleich – eine bildgewaltige Entdeckungsreise!

Technische Angaben: Sprachen: Deutsch und Englisch; Untertitel: ohne; Ton: Dolby Digital 5.1; Bild: 16:9 (1,78:1); Medium: DVD 9; Anzahl der Medien: 2; Region: 2 PAL, FSK-Freigabe: INFO-Programm

Die erste Staffel dieser Doku-Reihe erhalten Sie hier:

www.science-shop.de/artikel/1126397



Joachim Wambsganz

UNIVERSUM FÜR ALLE

70 spannende Fragen und kurzweilige Antworten

2012, 439 S. m. zahlr. Farbbabb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3646

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Heidelberger Astronomen erklären Ihnen hier die Rätsel des Universums. Die Artikel basieren auf der Vortragsreihe *Uni(versum) für alle! – Halbe Heidelberger Sternstunden*: Von April bis Juli 2011 gab es jeden Tag eine ›Astronomische Mittagspause‹ in der Heidelberger Peterskirche mit einem 15-minütigen Kurzvortrag. In diesem Buch sind alle 70 Vorträge zu allen erdenklichen Themen der Astronomie für Sie zusammengestellt.

Alle Vorträge wurden gefilmt und stehen auf YouTube zur Verfügung. Mit dem jeweiligen QR-Code werden Sie zum passenden Video geleitet oder Sie gehen direkt zum YouTube-Kanal von *Spektrum der Wissenschaft*:

www.spektrum.de/universumfueralle



NEU

Wolfgang Steinicke

GALAXIEN

Eine Einführung für Hobby-Astronomen

2012, 208 S. m. zahlr. meist farb. Abb. u. Tab., kart., Oculum

Bestell-Nr. 3800

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Galaxien, die Schwestern unserer Milchstraße im All, faszinieren durch ihre vielfältigen Formen und Erscheinungsweisen. Ihre ungeheuren Größen und wahrhaft astronomische Entfernungen relativieren die Dimensionen unserer kosmischen Umgebung. Dieses Buch erklärt die Entstehung, Entwicklung und Struktur der Welteininseln aus Sternen, Gas und Staub. Ausführlich wird erklärt, wie man Galaxien mit Amateurteleskopen beobachten und fotografieren kann.



NEU

Adrian Thomas

GÄRTNERN FÜR TIERE

Das Praxisbuch für das ganze Jahr

2013, 240 S. m. zahlr. farb. Abb., geb., Haupt

Bestell-Nr. 3821

€ 29,90 (D), € 30,80 (A)

Gärtnern für Tiere räumt mit Irrtümern auf und zeigt, wie sich ein Garten in ein kleines oder großes, elegantes oder wildes Tierparadies verwandeln lässt, damit sich viele verschiedene Tierarten wohl fühlen und darin ein Zuhause finden. Mit Porträts von rund 300 Gartenpflanzen (Blumen, Sträucher und Bäume), die nicht nur ideal für manche Wildtierarten sind, sondern überdies den Garten verschönern. Einige Hundert Tierarten (Vögel, Schmetterlinge, Säugetiere, Amphibien und Reptilien, Bienen, Libellen) werden mit ihren jeweiligen Lebensbedürfnissen vorgestellt.



NEU

OPTISCHE TÄUSCHUNGEN

Mit Pop-ups und tollen Extras

2013, 32 S. m. zahlr. farb. Abb. u. Pop-ups, ab 8 Jahren, geb., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3812

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Schiefe oder gerade Linien? Punkte, die tanzen, oder scheinbar absurde Perspektiven? Kann man dem Augenschein trauen? Über 50 verblüffende optische Täuschungen in diesem Buch beweisen, dass der erste Eindruck nicht immer der richtige ist. Pop-ups, Drehscheiben, Klappen und eine Wunderscheibe zeigen faszinierende Effekte und bringen Kinder (und auch Erwachsene!) zum Staunen!

Die großen Fragen behandeln grundlegende Probleme und Konzepte in Wissenschaft und Philosophie, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben. Anspruch der ambitionierten Reihe ist es, die Antworten auf diese Fragen zu präsentieren und damit die wichtigsten Gedanken der Menschheit in einzigartigen Übersichten zu bündeln. Eine Übersicht über alle bisher erschienenen Bände der Reihe finden Sie hier: www.science-shop.de/fragen



Mark Vernon

DIE GROSSEN FRAGEN: GOTT

2013, 207 S., 15 SW-Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3823

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Gott* widmet sich Mark Vernon zwanzig bedeutenden Fragen zu Glaube, Religion und Spiritualität.



Francisco J. Ayala

DIE GROSSEN FRAGEN: EVOLUTION

2013, 207 S. m. Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3824

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Evolution* widmet sich Francisco Ayala zwanzig bedeutenden Fragen zu Ursprung und Entwicklung des Lebens auf der Erde, zur Vielfalt der Organismen und zur Stellung des Menschen.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



MATHE FÜR ELTERN

Was Sie wissen müssen, um Ihr Kind zu unterstützen. Sicher durch die Jahrgangsstufen 5 bis 9

2013, 256 S. über 600 farb. Abb., kart., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3822

€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Oft fühlen sich Eltern überfordert, wenn sie ihre Kinder in Mathematik unterstützen möchten. Dieses innovativ konzipierte Buch hilft, sich das nötige Wissen schnell wieder anzueignen. Es erklärt den Lehrstoff auf einzigartig anschauliche Weise: Probleme werden nicht nur beschrieben, sondern in verständliche Schritte zerlegt und durch viele Illustrationen erklärt. Vom einfachen Bruchrechnen über die binomischen Formeln bis zu komplizierten Volumenberechnungen - mit Hilfe dieses Ratgebers ist die Wissenschaft der Mathematik leicht nachvollziehbar.

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

Elektrischer Anschluss ans Nervensystem

Ein neues Verfahren, Nervenimpulse in elektrische Signale umzusetzen, verspricht eine Revolution: Ein Mensch könnte damit eine Handprothese so präzise bewegen und so lebhaft spüren, als wäre es eine gesunde, natürliche Hand.

Von D. Kacy Cullen und Douglas H. Smith

Es ist eine der berühmtesten Sciencefiction-Filmszenen: Luke Skywalker begutachtet seinen neuen künstlichen Unterarm samt Hand. Durch eine geöffnete Klappe am Handgelenk sieht der Held aus »Star Wars«, wie sich Kolben vor- und zurückbewegen und dadurch seine Finger krümmen oder strecken. Später spürt er deutlich, wie der Roboterchirurg ihm in den Finger sticht. Er kann die Prothese also nicht nur durch seine Gedanken bewegen, sie fühlt sich für ihn auch wie seine eigene Hand an.

Was das Publikum allerdings nicht sieht, sind die Details der Verbindung zwischen Mensch und Maschine. Aber gerade die wären das Spannendste an der ganzen Szene gewesen – zumindest für uns Neurowissenschaftler. Damit solch eine Verknüpfung funktioniert, müssen Nervenimpulse aus dem Gehirn in elektrische Signale im künstlichen Arm umgewandelt werden und umgekehrt. Und das ist außerhalb der Fantasiewelt der Filme noch niemandem gelungen.

Das ist auch wenig überraschend. Zum einen übertragen sowohl Nerven als auch Stromleitungen ihre Signale zwar mit Hilfe elektrischer Ladungen, aber auf völlig verschiedene Art. Im Draht fließen Elektronen, während sich entlang der Nervenfasern eine elektrische Depolarisierung der Zellmembran fortpflanzt und Informationen von einer Nervenfasern

zur anderen durch Ausschüttung chemischer Signalmoleküle gelangen. Zum anderen müsste für eine solche Verknüpfung der Nerv zu irgendeinem elektrisch leitfähigem Material in engem Kontakt stehen. Dieses aber würde das Immunsystem als Fremdkörper erkennen und entsprechend heftig bekämpfen, wodurch sich Narbengewebe um die Kontaktstelle bilden und ihre Funktionsfähigkeit zerstören würde.

In den letzten Jahren sind die Forscher mit Hilfe der Nanotechnologie und der Technik der Gewebezüchtung (»Tissue Engineering«) der Lösung beider Probleme nähergekommen. Sie versuchen nicht, die Nerven zu direkter Kommunikation mit einem üblichen elektrischen Anschluss zu zwingen; stattdessen bauen wir – und andere Wissenschaftler – neue Arten von Brücken zwischen Nerven und künstlichen Gliedern. Dabei nutzen wir die natürliche Fähigkeit des Nervensystems, sich neuen Umgebungen anzupassen. Noch liegt Luke Skywalkers Kunstarm samt Bewegungs- und Empfindungsfähigkeit außerhalb unserer Reichweite; aber unsere jüngsten Forschungsergebnisse haben uns auf dem Weg zu diesem Ziel ein gutes Stück weitergebracht.

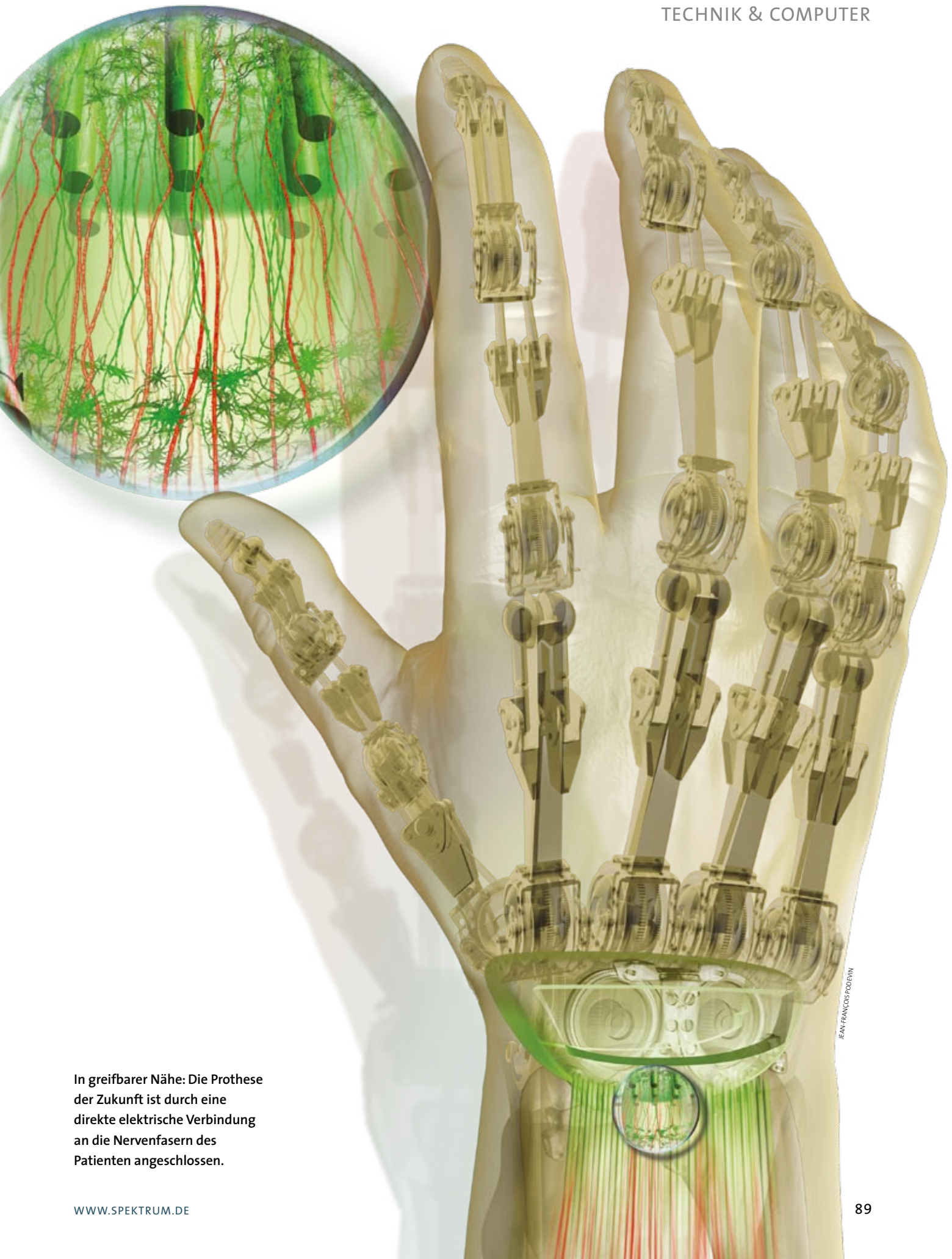
Die Entwicklung künstlicher Gliedmaßen hat in den letzten Jahren einen großen Aufschwung genommen, auch wenn man über dessen Ursache nicht wirklich glücklich sein kann: Bewaffnete Konflikte, namentlich die Kriege in Afghanistan und im Irak, haben einen großen Bedarf geschaffen. Nachdem 2006 die Wissenschaftsagentur des amerikanischen Verteidigungsministeriums (DARPA) das ambitionierte Programm »Revolutionizing Prosthetics« ins Leben rief, haben die Forscher beeindruckende Fortschritte erzielt.

Bis vor wenigen Jahren konzentrierten sich die Prothesenkonstrukteure auf die untere Körperhälfte. Ein künstliches Bein, mit dem man im Wesentlichen nur gehen und stehen muss, ist einfacher zu konstruieren als eine Hand, die ein Einmachglas aufdrehen oder auf einer Computertastatur tippen soll. Die hochentwickelte Feinmotorik der menschlichen Hand auch nur teilweise nachzubilden, ist die größte Herausforderung an die Kunst des Prothesenbaus.

AUF EINEN BLICK

ADAPTERSTECKER FÜR NERVEN

- 1 Bioingenieure versuchen, **Arm- und Handprothesen** unmittelbar an das Nervensystem anzuschließen.
- 2 Der Träger einer solchen Prothese würde die künstliche Hand **bewegen** und sie **spüren**, als wäre es die eigene.
- 3 Die Autoren entwickeln einen »Adapterstecker«, der Nervenimpulse in **elektrische Signale** umsetzt und umgekehrt.
- 4 Dieser besteht aus im Labor gezüchteten **Nervenfasern** und elektrisch leitfähigen **Polymeren**.



JEAN-FRANÇOIS POEWIN

In greifbarer Nähe: Die Prothese der Zukunft ist durch eine direkte elektrische Verbindung an die Nervenfasern des Patienten angeschlossen.

Das Gehirn sendet Nervensignale an eine Vielzahl von Muskeln im Unterarm und in der Hand selbst; zugleich empfängt es über andere Nervenfasern Rückmeldungen über Druck, Position, Spannung, Impuls und Kraft und nutzt sie, um die Aktivität der Muskeln präzise zu dosieren. Dazu verfügt das Gehirn über spezielle Areale, in denen diese Region des Körpers repräsentiert ist. Auf diese »mentalen Karten« müsste eine elektronisch betriebene Prothese zugreifen.

Bei einer gesunden Hand arbeiten motorische und sensorische Signale zusammen und verschaffen uns unter anderem die Eigenwahrnehmung (»Propriozeption«): Wir wissen, wo sich unsere Körperteile im Raum befinden und wie sie zueinander stehen, ohne nachsehen zu müssen. Ohne Propriozeption könnten wir nicht einmal mit einem Bleistift umgehen. Erst durch das präzise Zusammenspiel aus- und eingehender Nervenimpulse können wir unsere Hand ganz genau auf den Stift zubewegen, ihn vorsichtig anheben, in einer harmonischen Bewegung greifen und mit genau dosiertem Druck aufs Papier setzen.

Wie kann man Nervenimpulse aufzeichnen, ohne dem Menschen einen Draht in den Kopf zu stecken?

Bisher konstruierte Roboterhände empfangen die Signale zu ihrer Bewegungssteuerung auf verschiedene, meist indirekte Weise. Beispielsweise betätigt der Träger der Prothese durch wiederholtes Anspannen und Entspannen von Muskeln in der Brust oder im Armstumpf spezielle Schalter, die dann verschiedene Bewegungen der Prothese auslösen. Besser wäre es allerdings, die Prothese wäre mit den ursprünglichen motorischen Nerven verbunden und würde durch sie gesteuert. Diese Nerven sterben nach der Amputation nicht etwa ab, sondern ziehen sich nur ein Stück vom Stumpfende zurück.

Selbst mit den inzwischen sehr fortgeschrittenen Prothesen erweisen sich jedoch die einfachsten Aufgaben als überaus schwierig, da die sensorische Rückkopplung fehlt. Ein Amputierter kann nicht auf das natürliche Gefühl der Propriozeption zurückgreifen, sondern muss jede kleinste Bewegung seiner Prothese im Auge behalten und ganz bewusst kontrollieren. Das gelingt ihm nur sehr langsam und unbeholfen. Da fordert bereits das Zuknöpfen des Hemdes seine Konzentration bis zur Erschöpfung.

Es kommt demnach entscheidend darauf an, dass die Anschlussstelle (das »Interface«) zwischen Nervensystem und Prothese in beiden Richtungen funktioniert, also einen Austausch von motorischen wie sensorischen Informationen erlaubt. Eine solche Handprothese wäre nicht nur intuitiv, durch die reine Kraft der Gedanken, ansteuerbar, sondern würde sich auch »echt anfühlen«. Etliche Forschungseinrichtungen, darunter unsere, verfolgen nun dieses ehrgeizige Ziel mit unterschiedlichen Ansätzen, die ihre je eigenen Vor- und Nachteile haben. Vermutlich wird am Ende ein erfolgreiches Produkt von jedem etwas aufgreifen – und zusätzlich technologische Innovationen erfordern.

Die erste Grundsatzentscheidung betrifft die Position der Anschlussstelle innerhalb des Nervensystems. Es stehen im

Wesentlichen zwei Möglichkeiten zur Auswahl: das zentrale Nervensystem aus Gehirn und Rückenmark oder das periphere Nervensystem, genauer gesagt, jener Nerv, der vom Rückenmark ausgeht und zu gesunden Zeiten die zu ersetzende Hand versorgte.

Bislang wählen die meisten Wissenschaftler das Gehirn als Signalquelle. In einem der Projekte wird dessen Aktivität durch Elektroden aufgezeichnet, die an der Kopfhaut oder direkt unter der Schädeldecke auf der Hirnoberfläche selbst angebracht sind. Ein Computer analysiert die Signale und setzt sie in die gewünschten Bewegungsbefehle um. Diese Methoden haben den Vorteil, dass sie nicht in das Gehirn selbst eingreifen. Jedoch wird das aufgenommene Signal häufig durch elektrische Geräte in der Umgebung gestört und gibt obendrein die Gehirnaktivität nur sehr grob wieder. Entsprechend schwierig ist es für das Analyseprogramm zu ermitteln, welche Bewegung beabsichtigt ist.

Bei der invasivsten Technik dagegen werden Reihen von Mikroelektroden direkt in die Hirnrinde implantiert. Es handelt sich typischerweise um Sonden aus Silizium hoher Dichte, jede dünner als ein menschliches Haar. Ein solch direkter Anschluss bietet den gewaltigen Vorteil, dass er sehr genaue und reichhaltige Daten liefert, bis hin zur Aktivität einzelner Nervenzellen. Entsprechend präzise könnte die Prothese angesteuert werden.

Anschlüsse ans Gehirn – mehr oder weniger invasiv – werden bereits an Dutzenden von Menschen getestet. Eine Frau, die durch einen Schlaganfall gelähmt war, lernte, nur mit Hilfe ihrer Gedanken ihren Roboterarm so präzise zu führen, dass sie Kaffee aus einem Becher trinken konnte. Im vergangenen Jahr startete DARPA ein Projekt, bei dem erstmalig einigen Personen, die ihre Arme verloren haben, Elektroden ins Gehirn implantiert werden sollen, um mit ihnen hochmoderne Prothesen zu steuern. In beiden Fällen sind die Elektroden, welche die neuronalen Signale aufzeichnen, mit Drähten verbunden, die aus der Schädeldecke herauskommen. Ein leistungsstarker Computer analysiert die eingehenden Signale und verwandelt sie in Befehle an den Roboterarm. Letztendlich hoffen Wissenschaftler, die Informationen drahtlos übertragen zu können, damit ein Patient nicht mit dem Computer verkabelt sein muss, um seine Armprothese bewegen zu können. Noch besser wäre ein kleiner Computer, den man am Körper oder sogar unter der Haut tragen kann – aber leider reicht dafür die Leistung der derzeit verfügbaren Geräte noch nicht aus.

Ein weiterer Nachteil ist, dass das Hirngewebe die eindringenden Elektroden als Fremdkörper bekämpft und mit einer Entzündung reagiert, die schließlich zur Bildung von Narbengewebe führt. Dadurch wird die Elektrode gewissermaßen betäubt: Die empfangenen Signale werden schwächer, und die Zahl der überhaupt abhörbaren Nervenzellen nimmt mit der Zeit exponentiell ab. Bei einigen Patienten haben die Elektroden Berichten zufolge noch mehrere Jahre nach der Implantation Signale von einem oder mehreren Neuronen übermittelt, aber diese Fälle sind die Ausnahme. Forscher su-

chen nun nach Wegen, um die körpereigene starke Immunreaktion gegen Fremdoobjekte im Gehirn zu minimieren.

Angesichts dieser erheblichen Schwierigkeiten zogen wir es vor, das periphere Nervensystem anzuzapfen. Im Gegensatz zum zentralen Nervensystem, das sich aus bis zu 100 Milliarden Nervenzellen zusammensetzt, hat man es hier hauptsächlich mit einzelnen Fasern zu tun, den Axonen, die zu Nerven gebündelt sind. Axone sind bis zu einem Meter lange Fortsätze von Nervenzellen, die elektrische Signale übertragen.

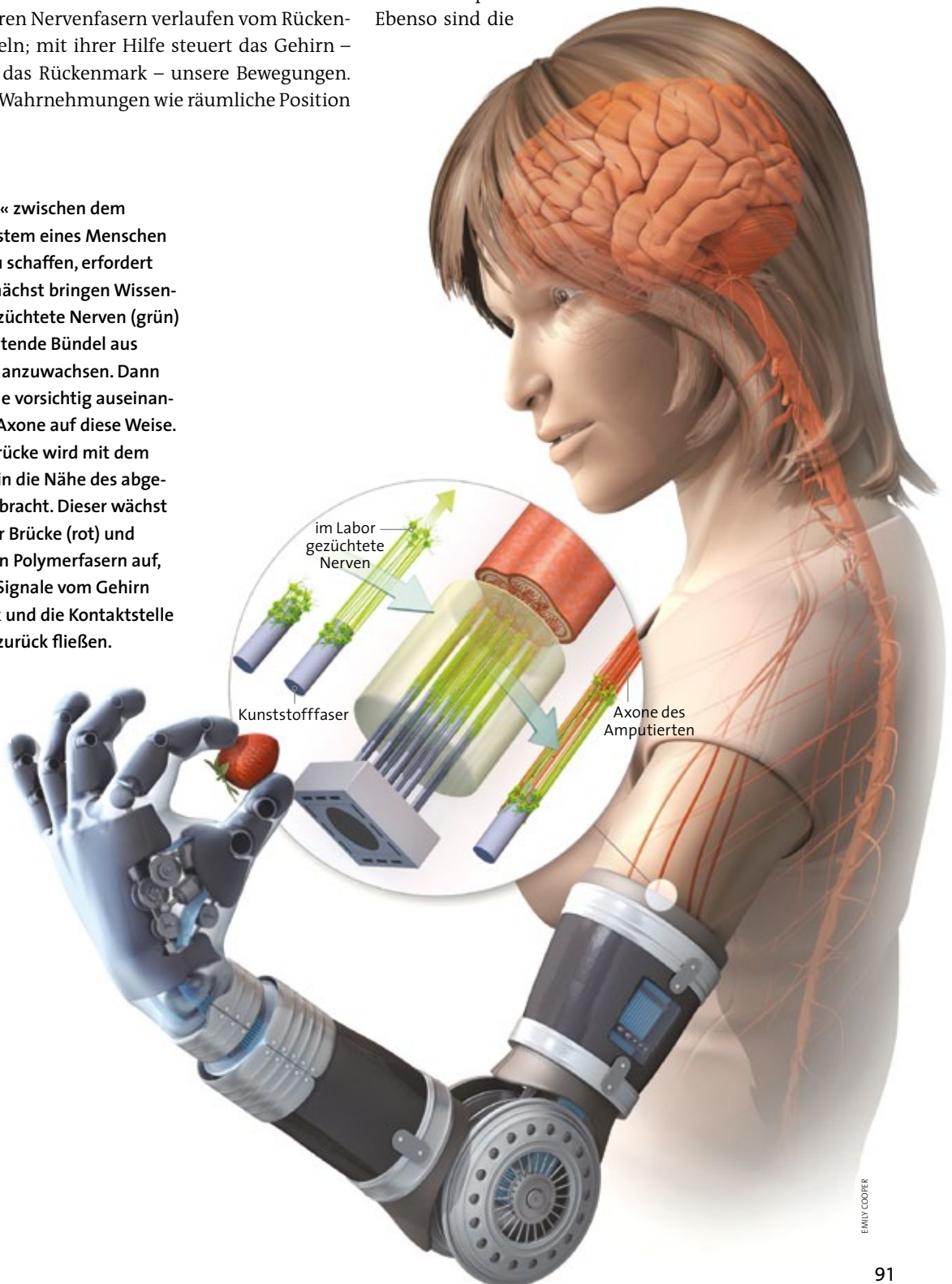
Manche peripheren Nervenfasern verlaufen vom Rückenmark zu den Muskeln; mit ihrer Hilfe steuert das Gehirn – auf dem Weg über das Rückenmark – unsere Bewegungen. Andere übertragen Wahrnehmungen wie räumliche Position

eines Körperteils, Temperatur oder Berührung von dort zum Rückenmark, das sie an das Gehirn weiterleitet.

Da abgeschnittene sensorische Nerven nach einer Amputation oft weiterhin Signale abgeben, haben viele Amputierte die Empfindung, ihre fehlende Extremität sei noch da – der Phantomschmerz. Wenn man diese fehlfeuernden sensorischen Axone an eine Prothese anschließen könnte, die starke Signale abgibt, würde das Gehirn diese bereitwillig als von einem Unterarm, einer Hand oder einem Finger stammend interpretieren.

Ebenso sind die

Eine »lebende Brücke« zwischen dem peripheren Nervensystem eines Menschen und einer Prothese zu schaffen, erfordert mehrere Schritte. Zunächst bringen Wissenschaftler im Labor gezüchtete Nerven (grün) dazu, an elektrisch leitende Bündel aus Polymerfasern (grau) anzuwachsen. Dann ziehen sie die Neurone vorsichtig auseinander und dehnen ihre Axone auf diese Weise. Die so konstruierte Brücke wird mit dem nervenseitigen Ende in die Nähe des abgeschnittenen Nervs gebracht. Dieser wächst daraufhin entlang der Brücke (rot) und nimmt Kontakt zu den Polymerfasern auf, mit dem Effekt, dass Signale vom Gehirn über das Rückenmark und die Kontaktstelle bis zur Prothese und zurück fließen.





motorischen Axone des peripheren Nervensystems noch fähig, Bewegungen zu steuern. Da das Gehirn diese verschiedenen motorischen Signale zu geordneten Bewegungen zusammensetzen kann, würde es eine korrekt angeschlossene Prothese auf natürliche Weise bewegen.

Ein abgeschnittenes peripheres Axon kann sogar wieder wachsen, allerdings nur dann, wenn es eine Zielstruktur gibt, zu der es Kontakt herzustellen vermag. Ein metallischer Draht könnte jedoch diese Rolle nicht übernehmen, ganz abgesehen davon, dass ihn das Immunsystem ebenso attackieren würde wie eine ins Gehirn implantierte Elektrode.

Todd Kuiken von der Northwestern University in Chicago und seine Arbeitsgruppe haben eine raffinierte Umgehung dieses Problems erfolgreich an Freiwilligen getestet: Sie nutzen Brustmuskeln als »lebende Brücken« zwischen dem Armstumpf und dem elektrischen Anschluss einer Prothese. Zunächst kappen die Wissenschaftler die motorischen Nerven zu einigen oberflächliche Brustmuskeln, damit diese keine konkurrierenden Signale vom Gehirn mehr empfangen können. Dann leiten sie die motorischen Axone, die ursprünglich vom Rückenmark zu dem nun abgetrennten Teil des Arms verliefen, sorgfältig um, so dass sie nun stattdessen die zuvor präparierten Brustmuskeln innervieren – ein Wachstumsprozess, der binnen weniger Wochen abgeschlossen ist. Befehle vom Gehirn, die eigentlich an die Muskeln des nicht mehr vorhandenen Arms gerichtet sind, wandern nun zur Brust und veranlassen dort Muskeln zur Kontraktion.

Dort setzen die Forscher Elektroden auf die Haut auf. Die registrieren die elektrische Aktivität einzelner Muskeln und damit indirekt die Signale, die vom Gehirn kommen. Nach einigen Wochen Training kann der Patient seine Prothese »mit Gedankenkraft« bewegen. Indem er zum Beispiel daran denkt, einen Becher zu greifen, löst er ein spezielles Muster von Muskelzuckungen in seiner Brust aus. Die ihrerseits weisen – auf dem Weg über die dort aufgesetzten Elektroden – die Elektronik in der Prothese an, die Finger der künstlichen

Hand zu krümmen. Kuiken und seine Gruppe haben diese »zielorientierte Muskel-Reinnervierung« (targeted muscle reinnervation, TMR) inzwischen bei Dutzenden von Amputierten angewandt. Ob man damit allerdings die Feinmotorik einer echten Hand erreichen kann, bleibt abzuwarten.

Wir glauben, dass dieses ambitionierte Ziel letztendlich eine andere Form von Verknüpfung zwischen lebendem Gewebe und Prothese erfordert. Glücklicherweise ist ein abgeschnittener Nerv nicht auf einen Muskel als Zielstruktur für sein Wachstum beschränkt. Er wächst auch in Richtung anderer Nerven und akzeptiert diese selbst dann, wenn sie transplantiert sind. Diese Möglichkeit beschlossenen wir vor ungefähr sechs Jahren auszutesten: An Stelle von Muskeln sollten transplantierte Nervenfasern als Vermittler zwischen den durchtrennten Axonen in einem Stumpf und der elektrischen Steuerung einer Prothese dienen.

Um eine solche neuronale Brücke zu schaffen, muss man zunächst Nervenfasern in Zellkultur dazu bringen, in die Länge zu wachsen. Einer von uns (Smith) hat dafür eine Technik namens »stretch-grow« entwickelt, welche die natürliche Fähigkeit von Nerven nutzt, mit dem umgebenden Gewebe mitzuwachsen. Der Extremfall sind die Rückenmarksaxone des Blauwals, die bis zu drei Zentimeter pro Tag zulegen und insgesamt bis zu 30 Meter lang werden können.

Im Wesentlichen bringen wir eine Kultur von Nervenzellen auf zwei Träger auf, die wir dann ganz allmählich auseinanderziehen. Axone, die ursprünglich auf beiden Trägern lagen, geraten dadurch unter Spannung; dieser Reiz veranlasst sie dazu, in beide Richtungen zu wachsen. In den von uns entwickelten speziellen Geräten, den »axon elongators« (»Axonstrecker«), bringen es die Axonbündel auf die bislang im Experiment unerreichte Wachstumsgeschwindigkeit von einem Zentimeter pro Tag und eine Länge von bis zu zehn Zentimetern; dieser Wert ist wahrscheinlich noch steigerbar.

Leitfähiges Polymer statt Kupferdraht

Diese durch Dehnung gewachsenen Axone fanden eine ihrer ersten Anwendungen als »lebende Brücke« oder genauer als »Leitfaden« im Wortsinn: um nämlich peripheren Nerven, die durch eine Verletzung oder eine Operation durchtrennt worden waren, den richtigen Weg beim Wachstum zu weisen. Als wir bei Ratten solche Axonbündel mit einem Ende nahe der Stelle implantierten, wo der Nerv durchgeschnitten worden war, wuchs dieser den Leitfaden entlang – in Einzelfällen so weit, dass der Nerv völlig wiederhergestellt wurde und die Ratten den zuvor gelähmten Körperteil wieder bewegen konnten.

Außerdem stellten wir fest, dass unsere neuronalen Brücken mindestens vier Monate nach der Transplantation noch vorhanden waren. Sie waren weder resorbiert worden, noch hatten sie eine Immunreaktion ausgelöst. Als Nächstes werden wir die Technik nun an Schweinen erproben. Und falls diese Experimente ebenfalls erfolgreich verlaufen, werden wir Studien an Menschen mit noch frischen Nervenverletzungen durchführen.

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Was steckt hinter der künstlichen Biologie?
Wie lassen sich Gene synthetisch herstellen?
Können wir damit neues Leben erschaffen?

Do **30.05.2013/19.00 / HANNOVER**
EVOLUTION RELOADED

Von den Möglichkeiten der künstlichen Biologie

MIT **Prof. Dr. Sven Panke** ETH Zürich, **Prof. Dr. Nediljko Budisa** Technische Universität Berlin,
Prof. Dr. Horst Bredekamp Humboldt-Universität zu Berlin, **Dr. Jakob Schweizer** Technische Universität Dresden
MODERIERT VON **Dr. Joachim Schüring** Spektrum der Wissenschaft

VERANSTALTUNGSORT Schloss Herrenhausen, Hannover
ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de
MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Nachdem es uns also gelungen war, ein abgeschnittenes Axon ein gutes Stück in eine von uns gewählte Richtung wachsen zu lassen, versuchten wir, eine wesentlich kompliziertere Brücke zu bauen: Der Nerv sollte an eine elektrische Verbindung heranwachsen, die dann an eine Prothese anzuschließen wäre. Dazu mussten wir ein elektrisch leitfähiges Material in Form eines sehr dünnen Fadens finden, das vom Immunsystem des Körpers nicht als fremd wahrgenommen und abgestoßen wird. Nach einigem Ausprobieren entschieden wir uns für eine Klasse von Polymeren; ihr bekanntester Vertreter ist Polyanilin, eine stickstoffhaltige organische Substanz. Ihre elektrische Leitfähigkeit war schon lange bekannt, allerdings zwischenzeitlich in Vergessenheit geraten; erst seit den frühen 1980er Jahren ist der Stoff Gegenstand intensiven wissenschaftlichen Interesses. Forschungsergebnisse anderer Gruppen lassen vermuten, dass der Körper ihn toleriert. Zumindest haben diese spezialisierten Polymere in Versuchen an Nagern keine starke Immunreaktion ausgelöst.

Im nächsten Schritt geht es darum, ein Bündel im Labor gezüchteter Neurone dazu zu veranlassen, um das Ende eines solchen Kunststofffadens herumzuwachsen. Deren Axone würden wir mittels »stretch-grow« verlängern und dann so implantieren, dass der abgetrennte Nerv die Axone als Leitfaden nutzen und schließlich ersetzen würde, einschließlich der Anlagerung an den Polymerfaden. Wenn dies gelingt, ist der Rest eine einfache Anwendung von Elektronik: Die Faser nimmt die Impulse des Nervs auf und leitet sie an einen Verstärker mit angeschlossenem Sender weiter, der mitsamt der Stromquelle unter der Haut implantiert ist. Über einen Empfänger, den der Patient sich umbindet, gelangen die Bewegungsbefehle schließlich zur Prothese, ohne dass dem Patienten ein Draht im Körper stecken müsste.

Die Verbindung sollte auch in umgekehrter Richtung funktionieren: Ein sensorischer Nerv, der mit Hilfe einer in Kultur gewachsenen Brücke den Weg zu einem Polymerfaden gefunden hat, wird durch elektrische Signale von Sensoren in der Prothese erregt und meldet dem Gehirn, dass zum Beispiel der künstliche Zeigefinger auf Widerstand gestoßen ist.

In Experimenten mit Ratten fanden wir, dass unsere Nervenbrücke die nachwachsenden Axone des ursprünglichen Nervs bis auf wenige hundertstel Millimeter an den Polymerfaden heranführt. Das ist ausreichend nah für eine Signalübertragung in beide Richtungen. Bislang haben unsere Hybride aus biologischem und künstlichem Material die Transplantation mehr als einen Monat überdauert und den Kontakt mit dem ursprünglichen Nerv aufrechterhalten. Wir nehmen daher an, dass das Immunsystem sie bereitwillig toleriert, da es sie ansonsten innerhalb weniger Tage zerstört hätte. Weitere Untersuchungen mit längeren Zeitabschnitten werden derzeit durchgeführt.

Unser Biohybrid-Ansatz ist zwar viel versprechend, steckt aber noch in den Kinderschuhen. Noch wissen wir nicht, wie lange solche Brücken funktionsfähig sind und ob unser Immunsystem diese Polymere langfristig toleriert. Darüber hinaus müssen wir Störungen durch andere elektrische Geräte

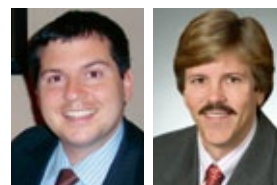
minimieren und die »Empfangsqualität« erhöhen, das heißt, die Nervensignale, die von der Brücke zur Prothese gelangen, von Störungen befreien, so dass sie präziser interpretiert werden. Und schließlich haben wir noch keine Garantie dafür, dass das Gehirn eingehende Signale, die aus der Prothese stammen, sinnvoll interpretieren kann.

Allerdings geben Erfahrungen mit Handtransplantaten Anlass zum Optimismus. Bei einer solchen Transplantation verbindet der Chirurg zwar jeden Nerv aus dem Stumpf des Empfängers mit dem zugehörigen Nerv der Spenderhand; aber einzelne Nervenfasern korrekt zu verknüpfen ist unmöglich. Solche Präzision scheint allerdings auch nicht erforderlich zu sein. Offensichtlich zeichnet das Gehirn seine eigene innere Landkarte um, während es lernt, mit der neuen Hand umzugehen. Auf ähnliche Weise wird es auch eine Roboterhand bewegen können – wenn auch wahrscheinlich erst nach ausgiebigem Training.

Für weitere Fortschritte in der Steuerung von Prothesen werden die Forscher wohl die Ergebnisse aus den verschiedenen Ansätzen zusammenführen müssen. Nach dem gegenwärtigen Stand bieten direkte Verknüpfungen zwischen dem Gehirn und modernen Prothesen – durch direktes Anzapfen der Signale im Großhirn, durch umfunktionierte Brustmuskeln oder über Biohybrid-Brücken – die besten Erfolgsaussichten, einen künstlichen Arm so elegant zu bewegen und als so natürlich zu empfinden wie den ursprünglichen eigenen.

Wie Luke Skywalker seinen neuen Arm bewegte, hat er nie verraten. Aber die Wissenschaftler sind auf gutem Wege, das herauszufinden. ~

DIE AUTOREN



D. Kacy Cullen (links) hat in Biomedizintechnik (Biomedical Engineering) promoviert und ist Assistenzprofessor für Neurochirurgie an der University of Pennsylvania in Philadelphia.

Douglas H. Smith ist Direktor am Center for Brain Injury and Repair (CBIR) und Professor für Neurochirurgie an der University of Pennsylvania. Er ist einer der Gründer der Firma Axonia Medical, welche die beschriebene Technik auf dem Markt anbieten will.

QUELLEN

Cullen, D.K.: Neural Tissue Engineering and Biohybridized Microsystems for Neurobiological Investigation in Vitro, Part 1. In: Critical Reviews in Biomedical Engineering 39, S. 201–240, 2011

Cullen, D.K.: Neural Tissue Engineering for Neuroregeneration and Biohybridized Interface Microsystems in Vivo, Part 2. In: Critical Reviews in Biomedical Engineering 39, S. 241–259, 2011

Smith, D.H.: Stretch Growth of Integrated Axon Tracts: Extremes and Exploitations. In: Progress in Neurobiology 89, S. 231–239, 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1184773

Technology Review präsentiert:

Das Sonderheft zur Energiewende – jetzt bestellen!



Inklusive Dokumentarfilm auf DVD!

Die **Energiewende** ist ein Jahrhundertprojekt – und wirft Fragen auf, von deren Antworten die wirtschaftliche und gesellschaftliche **Zukunft Deutschlands** abhängt. **Technology Review** hat die Fakten zu den **56 wichtigsten Fragen** recherchiert. Für alle, die wissen wollen, was mit der Energiewende auf uns zukommt, was hinter den verschiedenen Technologien steckt und wie wir die Herausforderungen bewältigen können.

Extra auf DVD: der 100-minütige Dokumentarfilm „**Leben mit der Energiewende**“ in einer aktualisierten, exklusiven Fassung

Bestellen Sie Ihr Exemplar jetzt portofrei bis Mitte April* für nur 9,90 Euro bequem nach Hause: shop.heise.de/tr-energie



* danach portofreie Lieferung für Zeitschriften-Abonnenten des Heise Zeitschriften Verlags und ab einem Gesamtwarenkorb von 15 Euro

Schlauer einkaufen: [Einfach finden](#). [Direkt bestellen](#). [Schnell bekommen](#).

 **heise shop**

shop.heise.de/tr-energie



Enrico Coen
Die Formel des Lebens
 Von der Zelle zur Zivilisation
 Aus dem Englischen von Elsbeth Ranke.
 Hanser, München 2012. 383 S., € 24,90

EVOLUTIONSTHEORIE

Unwandelbarer Wandel

Enrico Coen hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, die unterschiedlichsten biologischen Veränderungsprozesse auf einen Nenner zu bringen.

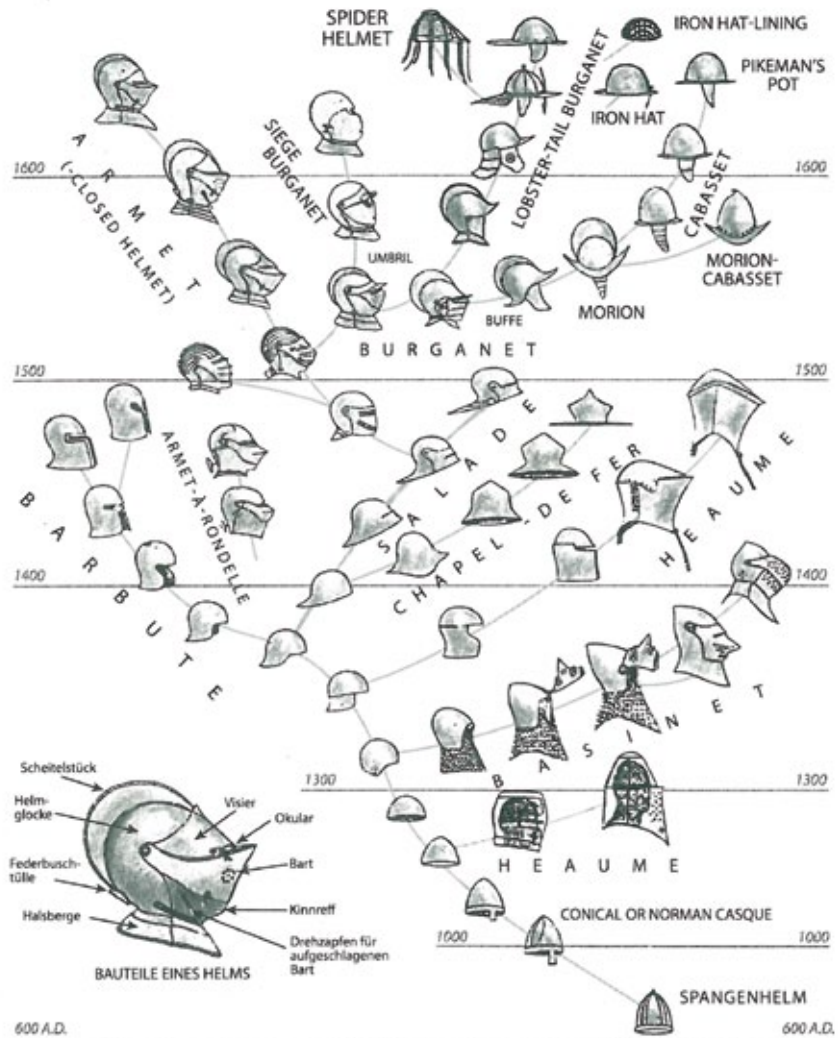
Aus den ersten primitiven Einzelern entsteht die Vielfalt des Lebens auf der Erde, aus einer einzelnen Eizelle ein ganzer Mensch, aus einer Ansammlung kaum verbundener Nervenzellen ein komplex verschaltetes, leistungsfähiges Gehirn und aus Hor den von Höhlenmenschen unsere viel schichtige moderne Gesellschaft: Jeder dieser Prozesse ist überaus komplex und alles andere als einfach zu erklären. Aber der Molekularbiologe Enrico Coen aus Norwich (Großbritannien) versucht nicht nur das; er behauptet sogar, sie alle auf sieben Grundprinzipien zurückführen zu können: Variabilität, kombinatorischen Reichtum, Persistenz, Verstärkung, Wettbewerb, Kooperation und Rekurrenz.

Variabilität bedeutet, dass ein Merkmal in verschiedenen Versionen vorkommt. Gäbe es diese Unterschiede nicht, könnte die natürliche Selektion nicht das Fitteste unter vielen Individuen wählen, eine Eizelle sich nicht in verschiedene Zelltypen weiterentwickeln und eine menschliche Gesellschaft keine unterschiedlichen kulturellen Ausprägungen bilden. Das Prinzip des kombinatorischen Reichtums besagt, dass eine begrenzte Anzahl unterschiedlicher Merkmale bereits

unvorstellbar viele Kombinationen ermöglicht – und damit ebenso viele Richtungen, in die ein Wandlungsprozess voranschreiten kann.

Damit dieser Prozess nicht ausufert, muss ihm ein gewisses Beharrungsvermögen (»Persistenz«) Einhalt gebieten. DNA wird bei allen Mutationen im Wesentlichen getreu kopiert, alle Nachkommen einer Eizelle finden zu einer funktionierenden Einheit zusammen, zum Wandel durch Lernen gehört das Behalten des Gelernten, Kulturen leben von Traditionen.

Die bereits genannten Prinzipien für sich genommen würden das System irgendwann in ein stabiles Gleichgewicht und damit zum Stillstand führen. Es muss einen Mechanismus geben, der immer wieder Instabilität erzeugt. Coen nennt ihn »Verstärkung«, gekoppelt mit »Wettbewerb«. Damit meint er im Kontext der Evolution die Selbstverstärkung einer erblichen Eigenschaft, die sich gegen andere durchsetzt, weil sie einen Selektionsvorteil bietet. Bei der



Unbiologische Evolution: die Entwicklung der mittelalterlichen Helme (Diagramm von Bashford Dean, 1915).

Entwicklung des Embryos können Proteine ihre eigene Produktion ankurbeln, wenn der Körper mehr von ihnen braucht. Beim Lernen spornt die Bildung neuer Nervenbahnen sich selbst immer weiter an – je mehr wir lernen, umso mehr Verbindungen werden neu geknüpft. Auch kulturell setzen sich erfolgreiche Handlungsweisen gegenüber weniger effizienten durch.

Doch nicht immer führt Wettbewerb zu Konkurrenz. Im Gegenteil: Oft schließen sich einzelne Individuen zu Gruppen zusammen, um gemeinsam stärker zu sein. Dies betrifft nicht nur menschliche Bevölkerungen – das Prinzip der Kooperation findet man auch zwischen einzelnen Zellen und in Ansätzen sogar auf Molekülebene. Kooperation ist in vielerlei Hinsicht sogar überlebensnotwendig. Denn würden sich in einer Zelle einzelne Proteine gegenseitig blockieren, könnte diese nicht überleben, und die Proteine hätten ihren Wirkungsraum verloren. Auch Nervenzellen kooperieren auf komplexe Weise miteinander, indem sie Signale gemeinsam zum Gehirn weiterleiten – ähnlich wie Menschen, die gemeinsam eine Gesellschaft prägen.

Das letzte Prinzip, das Coen aufführt, ist das der Rekurrenz. Dieses besagt, dass es immer etwas gibt, das verbessert werden könnte, denn es geht nie darum, einen gewissen Punkt zu erreichen, sondern stets darum, im Wettbewerb zu gewinnen. In der Evolution setzt sich meist eine Art durch, die besser an ihre Umgebung angepasst ist als eine andere. Dadurch sind nach und nach alle Überlebenden gleich gut angepasst und konkurrieren dann miteinander in anderen Bereichen. Auch in der embryonalen Entwicklung ist Rekurrenz vorherrschend: Hat sich ein Organ ausgebildet, beeinflusst es alle anderen. Der Wandel endet dadurch aber nicht, sondern geht basierend auf diesen neuen Gegebenheiten weiter. Und auch Kulturen, die sich durchsetzen, bleiben nicht unwandelbar, denn sie müssen sich stets mit neuen kulturellen Konkurrenten befassen.

Enrico Coens Vorhaben ist zugegebenermaßen ehrgeizig. Von der Entste-

hung des Lebens bis zur Entwicklung von Hochkulturen will er alles erklären, und zwar mit besonderem Schwerpunkt auf den biologischen Grundlagen. Neueste wissenschaftliche Erkenntnisse zum Zusammenwirken von Zellkomplexen und Molekülen fließen ebenso in die Darstellung ein wie altbekanntes Wissen. Coen verzichtet so weit wie möglich auf Fachsprache; stattdessen arbeitet er mit Analogien zu Dingen, die jeder kennt: Vom Schachspiel über das Erschaffen von Kunstwerken bis hin zu den Streifen des Zebras kennt sein Fundus an Beispielen keine Grenzen.

Bei so zahlreichen Aspekten kann Coen nicht alle bis ins letzte Detail wiedergeben. Das ist auch gar nicht sein Ziel. Er versucht vielmehr, Zusammenhänge zwischen Forschungsgebieten aufzuzeigen, die bislang völlig unabhängig arbeiten, wie etwa die Evolutionsforschung und die Kulturwissenschaften, und diese Aspekte dem interessierten Laien verständlich zu machen. Dies gelingt ihm auf eindruckliche Weise.

Werden sich diese Zusammenhänge irgendwann als nutzbar erweisen? Wird man also zum Beispiel aus Erkenntnissen der Zellbiologie solche in der Kulturwissenschaft gewinnen können, weil in beiden Wissenschaften dieselben Prinzipien in unterschiedlicher Realisierung am Werk sind? Die Antwort auf diese Frage bleibt der Autor schuldig – und ich fürchte, sie lautet »nein«.

Der deutsche Titel »Die Formel des Lebens« erhebt entgegen dem sachgerechteren Originaltitel »Cells to Civilizations: The Principles of Change That Shape Life« einen Anspruch, der am Ende nicht eingelöst wird – und auch übertrieben wäre. Man muss ja einen solch universellen Zusammenhang nicht unbedingt in eine konkrete Formel packen.

Mareike Fischer

Die Rezensentin ist promovierte Mathematikerin und arbeitet an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald als Juniorprofessorin für Diskrete Biomathematik.



Lothar Frenz

Lonesome George

oder Das Verschwinden der Arten

Rowohlt, Berlin 2012. 352 S., € 19,95

ZOOLOGIE

Eine Ode an die Natur

Von den Kreaturen, die je auf der Erde lebten, hat der Mensch die allermeisten nie zu Gesicht bekommen; eine ganze Reihe hat er verdrängt. Lothar Frenz erzählt einfühlsam und detailliert ihre Geschichten.

Der Titelheld hat das Erscheinen des Buchs nicht mehr erlebt. Ende Juni 2012 verstarb die männliche Pintariesenschildkröte »Lonesome George« im Alter von ungefähr 100 Jahren in der Charles-Darwin-Station auf den Galapagosinseln. Mehrere Jahrzehnte lang galt der einsame alte Mann als der letz-

te seiner Art. Erst jüngst gab es eine Überraschung: Forscher identifizierten 17 lebende Individuen als seine Artgenossen.

Dass eine ausgestorbene geglaubte Spezies wiederentdeckt wird, ist ein äußerst seltener Glücksfall; dass eine fast ausgestorbene vor dem endgültigen



Hans Konrad Biesalski

Der verborgene Hunger. Satt sein ist nicht genug

Springer Spektrum, Heidelberg 2013. 308 S., € 24,95

Der Ernährungswissenschaftler Hans Konrad Biesalski holt eine unsichtbare Katastrophe ans Licht: die chronische Fehlernährung der Ärmsten dieser Welt. Drei Milliarden Menschen müssen mit einseitiger Nahrung wie Reis, Weizen und Mais auskommen, obwohl wichtige Stoffe wie die Vitamine A und D, Zink und Eisen in vielen Lebensmitteln der betroffenen Ländern verfügbar sind; aber diese werden exportiert und zu Biosprit verarbeitet. Und tierische Produkte sind teure Mangelware. Entwicklungsstörungen, Fehlgeburten und der tödliche Ausgang harmloser Infektionskrankheiten sind die Auswirkungen des von westlichen Ökonomien dominierten Lebensmittel-Weltmarkts. Fehlernährte Mütter bekommen entwicklungsgestörte Kinder, die zu schwachen Erwachsenen heranwachsen – so dreht sich ein »Hunger-Karussell« über Generationen hinweg. Das ist nicht neu, gewinnt aber durch die derzeit explosionsartig steigenden Lebensmittelpreise brisante Aktualität. Am Ende bleibt zumindest ein Funken Hoffnung, dass sich etwas ändern kann: Biesalski beschließt seine Analyse mit einem Ausblick auf mögliche Strategien gegen den »hidden hunger«.

TIM HAARMANN



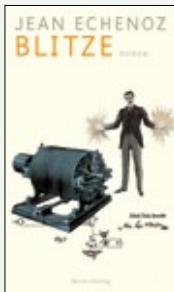
Kalle Lasn

No More Bull Shit. Das Occupy-Manifest für die 99 Prozent. Lehrbuch der realen Ökonomie

Aus dem Englischen von Elisabeth Liebl und Joannis Stefanidis. Riemann, München 2012. 400 S., € 29,99

Was die Occupy-Bewegung eint, ist die Opposition gegen die Exzesse des Bankensystems und deren ideologische Grundlage, die neoliberale Wirtschaftswissenschaft. Ansonsten ist sie bunt, fantasievoll und in Sachen konkreter Forderungen oder Gegenentwürfe eher unterbelichtet (Spektrum der Wissenschaft 11/2012, S. 104). Der Occupy-Vordenker Kalle Lasn bietet mit seinem Buch ein getreues Bild dieses Zustands: jede Menge bunte Bilder, darunter viele, bei denen der Bezug zum Thema an den Haaren herbeigezogen ist; starke Worte gegen die etablierte Wissenschaft; viele Fragen, mit denen der studentische Leser seinen Professor aus dem Konzept bringen soll; eine bunte Mischung aus Zitaten von weisen Leuten. In dem Getöse gehen die längeren, sehr lesenswerten Texte kluger Autoren wie George Akerlof, Joseph Stiglitz und Herman Daly fast unter.

CHRISTOPH PÖPPE



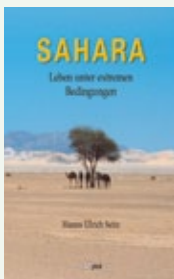
Jean Echenoz

Blitze

Aus dem Französischen von Hinrich Schmidt-Henkel. Berlin Verlag, Berlin 2012. 144 S., € 18,99

Nikola Tesla (1856–1943) war ein unermüdlicher Erfinder. So geht der Wechselstrom auf sein Konto, er ersann Turbinen, Generatoren, Funk- und Radartechnik und vieles mehr. Tesla war der Vielbegabte, den die reichsten Männer der USA mit Kapital unterstützten, später der Sonderling, der mit Marsbewohnern zu konferieren hoffte, der Welt »freie Energie« zur Verfügung stellen wollte und sich immer mehr aus seinem ohnehin armseligen sozialen Leben zurückzog. Jean Echenoz erzählt diese Geschichte im Galopp. Der Mensch Tesla bleibt Skizze, sein Leben (faszinierende) Anekdote. Indem Echenoz lediglich das Offensichtliche mitteilt – immerhin zu einem spannenden Kurzroman verdichtet, sehr unterhaltsam und stilistisch auf hohem Niveau –, wird er Tesla nicht gerecht. Und auch nicht dem Leser, dem er weismachen will, dass das schon alles gewesen sein soll.

THILO KÖRKELE



Hanns Ulrich Seitz

Sahara. Leben unter extremen Bedingungen

Pfeil, München 2012. 192 S., € 28,-

Den zweiten Teil des reich bebilderten Bands werden besonders Botaniker und Pflanzenliebhaber schätzen. Dort gibt der Autor einen tief greifenden, systematischen Überblick über die Saharapflanzen. Der erste Teil wendet sich stärker auch an Laien. Denn in ihm beschreibt Seitz die Geologie und Geschichte der Sahara, Klima, Ökologie und Landschaften sowie die Tierwelt und die besonderen Anpassungen der verschiedenen Organismen an diesen extremen Lebensraum. Auch die menschlichen Bewohner und ihre Kulturen kommen zur Sprache. Hanns Ulrich Seitz, Professor für Pflanzenphysiologie in Tübingen, kannte die Sahara von vielen ausgiebigen Forschungsreisen. Kurz vor Fertigstellung dieses schönen Buchs ist er gestorben.

ADELHEID STAHNKE

Verschwinden bewahrt wird, leider auch. Denn wie der Biologe und Wissenschaftsjournalist Lothar Frenz an zahlreichen Beispielen – nach Kontinenten geordnet – aufzeigt, ist für jede derartige Rettungsaktion großes Engagement erforderlich. Gesetzliche Bestimmungen kamen, wenn überhaupt, meist zu spät.

Einer der wenigen Erfolge ist die Rettung des Kalifornischen Kondors. Artenschützer zogen in den 1980er Jahren künstlich ausgebrütete Jungtiere in Gefangenschaft groß, mit Liebe, Fachwissen und Fantasie: Handpuppen mussten die Elterntiere vertreten. Die Aktion war auch unter Naturschützern umstritten; aber innerhalb von rund 15 Jahren wurden die Zöglinge ausgewildert, und 2011 lebten wieder 400 statt zuvor 27 Individuen des nordamerikanischen Fluggiganten auf dem Kontinent.

Noch seltener versuchen ambitionierte Forscher, ausgestorbene Arten wieder ins Leben zurückzuholen – kuriose Versuche, die dem Leser trotz Frenzens sachlicher Darstellung hier und da ein Schmunzeln entlocken. Das Paradebeispiel ist die vermeintliche Rückzüchtung des Auerochsen *Bos primigenius*. In den 1920er Jahren hatten die Brüder Lutz und Heinz Heck, Zoodirektoren in Berlin beziehungsweise München, den Ehrgeiz, das heroische Tier wieder durch die verbliebenen europäischen Wälder streifen zu lassen. Nur ist aus ihren Kreuzungen von korsischen Berg- und ungarischen Steppenrindern mit spanischen Kampfstieren und schottischem Hochlandblut nicht die 1627 ausgestorbene Ursprungsart entstanden, sondern lediglich eine neue Rinderrasse.

Sogar per Klonen wollte man eine ausgestorbene Art wiederbeleben, nachdem 1996 Schaf Dolly das Licht der Welt erblickt hatte. Der letzten weiblichen Pyrenäen-Steingeiß hatten Biologen 1999 vorsichtshalber genetisches Material entnommen. Doch das Experiment scheiterte – das 2009 geborene Kitz lebte nur sieben Minuten.

Frenz zieht einen roten Faden durch die Lebens- und Aussterbegeschichten, der den Menschen klar als Verursacher ausweist: In allen Fällen hat man zu spät



Ein Kondorküken wird im Zoo von San Diego (Kalifornien) mit einer Handpuppe gefüttert, da echte Eltern nicht zur Verfügung stehen.

oder nie Maßnahmen ergriffen, die die eigenen, verheerenden Einflüsse wettgemacht hätten. Ob Trophäenjagd, Medizin, Zerstörung von Lebensraum oder Klimawandel – Lothar Frenz' Liste deckt die diskutierten Gründe für das menschenverursachte Artensterben komplett ab. Seine akribisch recherchierten Fakten hinterlassen beim Leser ein Gefühl des Bedauerns.

Nicht erst in jüngster Zeit hat die Gattung *Homo* massiv die Artenvielfalt aller Kontinente beeinflusst, sondern schon als sie sich über die Erdkugel ausbreitete. Allerdings kommt es offensichtlich darauf an, wie viel Zeit die Fauna hatte, um sich auf die neue Bedrohung durch die immer geschickteren Jäger auf zwei Beinen einzustellen. In Afrika, der »Wiege der Menschheit«, waren es immerhin zweieinhalb Millionen Jahre. Deshalb haben hier – zumindest bis Anfang des 19. Jahrhunderts – noch die »Big Five« Elefant, Spitzmaulnashorn, Löwe, Leopard und Büffel die Stellung gehalten. In Asien und Europa, wo die Fauna immerhin schon mit *Homo ergaster* und *Homo heidelbergensis* vertraut war, überlebten noch einige Großtiere bis in die Moderne. Dagegen wurden die Tiere Australiens, Amerikas und vor allem Neuseelands geradezu überrascht, als vor 50 000, 13 000 beziehungsweise 1000 Jahren *Homo sapiens* erstmals seinen Fuß aufs Land setzte.

Welchen Sinn hat es überhaupt, Tierarten mit großem Aufwand vor dem

Aussterben zu bewahren oder in ehemals von ihnen bevölkerten Gebieten wieder anzusiedeln? Im Epilog gibt Frenz eine ernüchternde Teilantwort: Es geht nicht darum, der Natur zu ihrem Recht zu verhelfen. Der Natur ist es gleichgültig, ob eine Art mehr oder weniger auf diesem Planeten lebt. Früher oder später nimmt eine neue Art den Platz einer ausgestorbenen ein, besonders drastisch zu sehen an drei großen Aussterbeereignissen – das erste vor fast 440 Millionen Jahren –, denen jeweils eine ganz neue Artenvielfalt folgte. Dementsprechend liegt es, bei aller Trauer über den Verlust jeder einzelnen Art, dem Autor fern, die Menschheit eines Verbrechens an unserem Heimatplaneten zu bezichtigen.

Lothar Frenz hat sein Buch hervorragend recherchiert. Er überrascht mit Kuriositäten, glänzt mit Fachwissen und hebt beim heiklen Thema Artenschutz nicht den moralischen Zeigefinger. Humorvoll und einfühlsam erzählt er die Geschichten von Lebewesen, die einst unsere Erde besiedelten, und vergisst dabei die Pflanzen nicht. Er ergänzt geläufige Beispiele um weniger bekannte Details und spannende Exkurse durch die Erdgeschichte. Das macht es sowohl für Laien als auch für Fachleute lesenswert.

Katharina Schulz

Die Rezensentin hat Biologie studiert und ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



Tomáš Sedláček

Die Ökonomie von Gut und Böse

Aus der amerikanischen Ausgabe
übersetzt von Ingrid Proß-Gill.

Hanser, München 2012. 448 S., € 24,90

WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Selektive Nachhilfe in Geschichte

Ökonomie kommt ohne Moral und Philosophie nicht aus.
Stimmt – aber wo ist die Neuigkeit?

Wissenschaft war die letzten hundert Jahre extrem erfolgreich – so sehr, dass eine enorme Spezialisierung notwendig wurde. Universalgelehrte gibt es nicht mehr, aktive Forscher sind zwangsläufig Fachidioten – was völlig wertfrei gemeint ist, denn nur so kann weiterer Wissenszuwachs gelingen.

Aber es gibt interessante Nebeneffekte: Innerhalb eines Fachgebiets, das unvermeidlich den großen Überblick verloren hat, können Selbstverständlichkeiten zu totalen Überraschungen werden. So etwas erleben nun die Ökonomen mit dem Buch »Die Ökonomie von Gut und Böse«. Die Kritiken waren so berauschend, dass sie zahlreich auf den Einband der frischen deutschen Ausgabe gedruckt wurden, der prominente Schriftsteller und ehemalige Staatspräsident Václav Havel hat zur tschechischen Originalausgabe des Werks ein Vorwort geschrieben. Welche verblüffende Erkenntnis, welchen neuen und zu diskutierenden Zugang hat der Ökonom Tomáš Sedláček gefunden?

Er wirft einen Blick in die jüngere Menschheitsgeschichte und sagt, Ökonomie ist mehr als Mathematik, Ökonomie braucht Moral und Philosophie. Und die Ökonomen scheinen erstaunt zu sein. Laien haben vermutlich nie etwas anderes gedacht.

Der 1977 geborene Sedláček beginnt seinen Geschichtstrip beim Gilgameschepos, hüpfert zum Alten Testament, ins antike Griechenland, landet zwischen-

durch bei Thomas von Aquin und hangelt sich dann über Descartes und einige andere bis hin zu Adam Smith. Wobei das nur ein grober Faden ist, der Autor zerrt Zitate aus allen Epochen dorthin, wo sie ihm nützlich erscheinen. Da springt er schon mal im Zickzack von den alten Hebräern direkt zu den jüdischen Geldverleihern im Mittelalter, von dort in die Gegenwart und zurück zu den Hebräern, ohne den historischen Fluss oder den genauen Zusammenhang zu erläutern. Entlang seines gewundenen historischen Fadens versucht er die unterschiedlichen Philosophien der Ökonomie darzustellen und ihren bis in die Gegenwart reichenden Einfluss zu formulieren. Bis er sie gegen Ende des Buchs alle an einer Achse ausrichtet, und zwar danach, »wie sehr Gutheit sich ihrer Ansicht nach auszahlt«.

Sedláček verwendet sowohl geschichtliche Fakten als auch historische Mythen. Das mag interessant sein, aber Mythen lassen immer viel Raum für Interpretation. Eine saubere Trennung zwischen ihnen und historischen Tatsachen nimmt er nicht vor. In schlechteren Momenten erinnert das an Erich von Däniken, der in der Vergangenheit eben auch immer das findet, was er gerade sucht. Und Sedláček behandelt die Geschichten nicht wie Mythen, sondern so, als ob die Gesellschaften tatsächlich genau so funktioniert hätten. Bei jüdischen oder christlichen Regeln und Werten nimmt er nie darauf Bezug, wie

sehr sich die jeweilige Gesellschaft tatsächlich daran gehalten hat.

Wer wie Sedláček ohne System durch die Historie springt, kann jede These belegen oder widerlegen, es finden sich Beispiele und Parallelen für wirklich alles. Zugegeben: Auch der willkürliche Blick in die Geschichte bringt interessante Anekdoten. Wie die von dem niederländischen Arzt und Dichter Bernard Mandeville (1670–1733), der das wirtschaftliche Wohl einer Gemeinschaft auf deren Laster zurückführt; in Versform, mit scharfem Blick und scharfer Sprache. Und es ist ja auch ganz nützlich zu erfahren, was im Gilgameschepos steht, ohne es selbst lesen zu müssen. So ist das Buch eine Gelegenheit, ein wenig Geschichte zu lernen und den Vorrat an brauchbaren Zitaten aufzufüllen.

Tomáš Sedláček beschränkt sich auf jenen Teil der Menschheitsgeschichte, aus dem es schriftliche Hinterlassenschaften gibt. Für die Biologie des Menschen interessiert er sich kaum. Das ist natürlich legitim, aber: Über »Animal Spirits« zu schreiben und dabei nicht an die Biologie zu denken, ist zu kurz gedacht. Doch nachdem der Autor in einem Absatz schon das Überleben des Passendsten als Tautologie enttarnt zu haben glaubt, erwartet er aus der Biologie wohl keine Antworten. Selbst wenn er über die Natur schreibt und die Natürlichkeit oder Unnatürlichkeit des Menschen, redet er wieder über Adam und Eva.

Persönliche Anmerkung: Besonders problematisch fand ich, dass der Autor zwar die gesamte Wissenschaft und all ihre Grundlagen in Zweifel zieht (was durchaus wünschenswert ist), aber gleichzeitig Gott als unzweifelhaften Faktor stehen lässt. Dass er zahlreiche Wissenschaftszweige zerlegt, aber religiöse Mythen nicht auf ihren Kern oder ihren Bezug zum echten gesellschaftlichen Leben der jeweiligen Zeit hin diskutiert, verleiht dem Buch eine seltsame Schiefelage.

Jörg Wipplinger

Der Rezensent hat Zoologie studiert; er ist Journalist und Videoblogger (<http://diewahrheit.at>) in Wien.



Michael Esfeld (Hg.)
Philosophie der Physik
Suhrkamp, Berlin 2012. 481 S., € 18,-

WISSENSCHAFTSTHEORIE

Ein Ritt über den Bodensee

Die Physik galoppiert von Erfolg zu Erfolg, während in ihren theoretischen Grundlagen überall Löcher klaffen – ein Befund, der nach Aufarbeitung durch die Philosophie schreit.

Kaum eine Leistung des menschlichen Geistes ist stupender als der Fortschritt der theoretischen Physik. Die triumphale Anwendung ihrer Erkenntnisse beweist, dass hier mehr am Werk ist als mathematisches Gedanken-

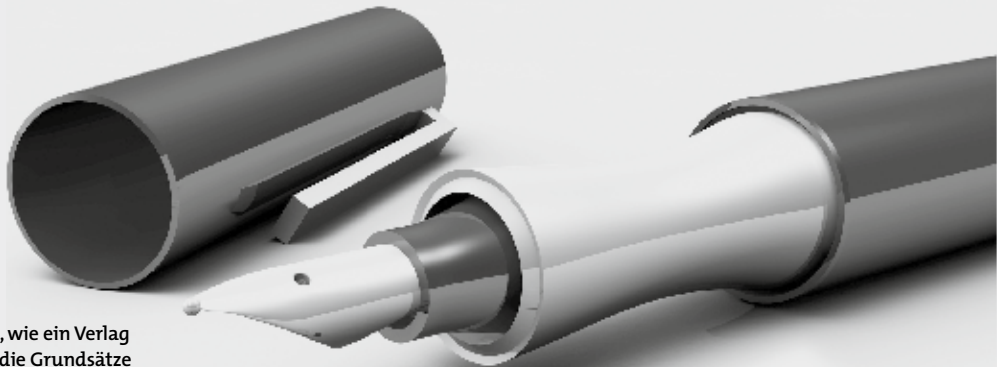
spiel. Von den physikalischen Gleichungen führt eine überschaubare Reihe von Übersetzungsschritten zu Dampfmaschinen, Fabriken, Raffinerien, nachts hell erleuchteten Großstädten, Autos, Raketen und Rechenmaschinen.

Doch trotz ihres gigantischen Erfolgs ist aus der theoretischen Physik kein harmonisches, widerspruchsfreies Gebilde geworden. Immer wieder schien die große Vereinigung aller Teilbereiche zum Greifen nah, die einheitliche Feldtheorie, die Weltformel – aber jedes Mal kam eine neue Entdeckung dazwischen und erforderte Anbauten und Umbauten des Theoriegebäudes, das darum weniger einem kompakten Haus als einer losen Siedlung gleicht.

Wer sich darin orientieren will, braucht die Philosophie. Sie übersetzt die mathematischen Gleichungen in ein Mittelding von Umgangssprache und Fachlatein. Vor allem die Begründer der Quantenphysik argumentierten notgedrungen philosophisch, um das radikal Neue der Theorie zu deuten.

Unterdessen ist die Quantenmechanik längst fest etabliert und trägt reiche Früchte, vom Laser im optischen Laufwerk bis zum Kernspintomografen in der Klinik und demnächst vielleicht im

DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT



Möchten Sie mehr darüber wissen, wie ein Verlag und eine Redaktion arbeiten, und die Grundsätze sowie Handlungsregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Weitere Informationen und Anmelde­möglichkeit

www.spektrum.de/schreibwerkstatt

Workshop-Termine:

17. Mai 2013, 10.00 – ca. 15.00 Uhr

13. Juli 2013, 10.00 – ca. 15.00 Uhr

Ort: Heidelberg

Teilnahmegebühr: € 99,-



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

ersten echten Quantencomputer. Ein passender Zeitpunkt also, ein philosophisches Resümee zu ziehen.

Den Sammelband »Philosophie der Physik« hat Michael Esfeld herausgegeben, unseren Lesern als Autor eines Artikels zum Thema bekannt (Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 54). Er steuert zu dem Buch einen Aufsatz über die nach wie vor strittige Deutung der Quantenmechanik bei.

Wo liegt das Problem? In der klassischen Physik herrscht der »lokale Realismus«: Was sich hier und jetzt abspielt, wirkt nicht augenblicklich auf beliebig weit entfernte Raumzeitregionen ein. Ich kann ein lokales Phänomen separat untersuchen, ohne gleich die ganze übrige Welt in Betracht ziehen zu müssen. In der Quantenphysik wird dieses Prinzip durchbrochen: So genannte verschränkte Teilchen bleiben, so man sie nicht stört, über beliebige Entfernungen voneinander abhängig.

Als Philosoph vertritt Esfeld daher einen »Strukturenrealismus«: Die Natur verhält sich nicht atomistisch, sondern holistisch. Es genügt nicht mehr, nur lokal isolierte Objekte – Atome, Elementarteilchen – zu betrachten, sondern der Physiker und ihm folgend auch der Philosoph muss als Grundphänomen die gesamte Struktur berücksichtigen, die von den Objekten und ihren Relationen gebildet wird, mathematisch zu beschreiben durch die Wellenfunktion des betrachteten Quantenzustands.

Natürlich wird mit der Einführung eines philosophischen Fachbegriffs das Problem nicht gelöst, sondern zuge-spitzt. Im Alltag leben wir durchaus im lokalen Realismus; wenn in China ein Sack Reis umfällt, kümmert mich das unmittelbar gar nicht. Irgendwie muss der quantenmechanische Strukturrealismus also in den lokalen Alltagsrealismus übergehen – aber wie?

Die Frage ist nach wie vor offen. Esfeld diskutiert und bewertet drei verschiedene Lösungsansätze: Everetts Vielweltheorie, Bohms verborgene Parameter sowie die GRW-Theorie nach Ghirardi, Rimini und Weber. Der Vielweltheorie – die globale Quantenstruktur spaltet sich ständig in unzäh-

lige lokal-realistische Teilwelten auf – erteilt Esfeld eine deutliche Absage, während der Kosmologe Claus Kiefer an anderer Stelle im Buch gerade sie favorisiert. Bohms Theorie – klassische Teilchen folgen einem quantenmechanischen Führungsfeld – findet in einem Aufsatz von Detlef Dürr und Dustin Lazarovici glühende Verteidiger. Esfeld selbst scheint ebenfalls eine gewisse Schwäche für Bohm zu haben, obwohl bei diesem Ansatz die Teilchen primär und die Struktur – das Führungsfeld – sekundär sind, was für mein Gefühl dem Strukturrealismus eher widerspricht.

Andere Artikel behandeln »ältere« philosophische Probleme der statistischen Mechanik und der Relativitätstheorie. Beim Lesen entsteht der Eindruck, dass jede neue Theorie der Physik zunächst auf Widerstände und Verständnisschwierigkeiten gestoßen ist. Schon der antike Atomismus widersprach der Anschauung. Newtons Gravitationsthe-

orie mit einer durch den leeren Raum augenblicklich wirkenden Kraft war für die Zeitgenossen ein Skandal. Ein elektromagnetisches Feld ohne einen Träger – den »Äther« – schien vor Einstein so undenkbar wie die Relativität von Zeit und Raum.

Die Philosophen hatten in jedem Fall Mühe, die alltägliche Anschauung mit den Herausforderungen durch die jeweils neue Physik zu versöhnen – und ihr Denken allmählich an sie zu gewöhnen. Mit der Quantenphysik wird es wohl ähnlich gehen. Der Begriff des Strukturrealismus mag dabei helfen; in den Geisteswissenschaften ist er als Strukturalismus schon ein alter Hut.

Ein Glossar sowie ein Namens- und Sachregister machen den soliden Sammelband zum praktischen Handbuch.

Michael Springer

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



Richard Béliveau, Denis Gingras

Der Tod

*Das letzte Geheimnis des Lebens –
Daten, Fakten, Unerklärliches*

Aus dem Französischen von Hanna van Laak.
Kösel, München 2012. 264 S., € 21,99

MEDIZIN

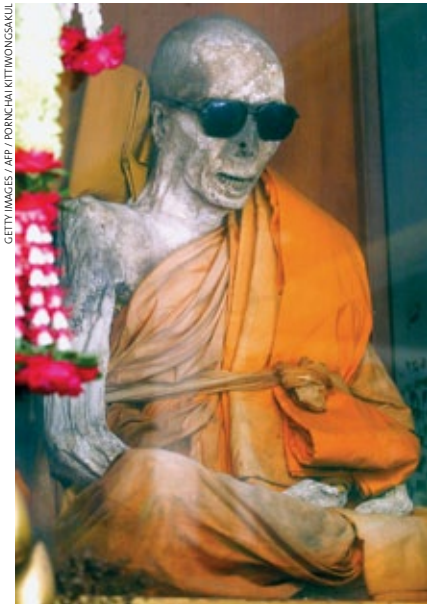
Nüchterner Blick auf das Ende des Lebens

Zwei kanadische Mediziner entzaubern das Mysterium des Todes mit vielen wissenschaftlichen Fakten und farbenfrohen Bildern.

Für die Krebsforscher Richard Béliveau und Denis Gingras aus Montreal (Kanada) sind »Daten, Fakten, Unerklärliches« nur Mittel zum Zweck. Wie der Originaltitel »La mort. Mieux la comprendre et moins la craindre pour mieux célébrer la vie« deutlich macht, verfolgen sie eine aufklärerische Ab-

sicht: Die Wissenschaft »kann die Mechanismen entmystifizieren, die beim Sterben wirksam sind, und das letzte Tabu unserer Gesellschaft in neuem Licht erscheinen lassen«.

Ihre Absicht, »die großen Linien des Lebens darzustellen und anhand konkreter Beispiele die vielen möglichen Ar-



Mumifizierte Leiche eines buddhistischen Mönchs.

ten des Sterbens zu veranschaulichen«, realisieren sie in elf Kapiteln. Auf Tröstliches (»Sterben gehört zum Leben«) folgen unter anderem Physiologisches (»Schleichender Tod«; »Tod durch Infektionen«), Mörderisches (»Gifte: Faszination und Gefahr«, »Gewaltsame Todesarten«), Unappetitliches (»Post-mortem-Prozesse«) und Komisches (»Zum Totlachen«). Das ganze Werk ist durchgehend und reichlich mit anschaulichen Illustrationen ausgestattet.

Bereits das Eingangskapitel »Schweren Herzens« zeigt die auch didaktisch wohlüberlegte Vorgehensweise der Autoren. Der Tod sei gar nicht so mysteriös, wie man oft glaube. Es handle sich um ein normales und sogar faszinierendes Phänomen, das wir unbedingt besser kennen lernen müssten.

Und dann legen die beiden los. Die Sterbemedizin weiß immer noch nicht, wo und wann der Tod tatsächlich eintritt: im Herzen oder im Gehirn? Es folgt eine spannende Reise, auf der wir über das Gehirn und seine Evolution sowie seine Funktion auf der Ebene einzelner Moleküle, namentlich der Neurotransmitter, so viel erfahren, dass sich die komplexen Verbindungslinien zwischen Körper und Geist deutlicher herauskristallisieren. Allerdings ist dies al-

les – trotz gigantischer Erkenntnisschübe in der Hirnforschung – bislang nur in Ansätzen erfasst. »Der Tod ist der Tod dieser zerebralen Seele«, lesen wir verwundert, um dann zu erfahren, dass wir den Tod nur begreifen können, wenn wir die Lebensbedingungen erforschen, die ihn auslösen.

Und wie verstehen wir diese geheimnisvollen Prozesse in uns? Indem wir uns den Vorgang der Apoptose gegenwärtigen, der im Buch auf anschauliche Weise dargestellt ist. »Jeden Tag opfern sich ungefähr zehn Milliarden unserer Zellen, die ineffektiv geworden sind, in absoluter Anonymität durch den Prozess der Apoptose. Zum Glück wird jede von ihnen sogleich durch eine neue, leistungsfähige Zelle ersetzt.«

Und Leben im Bewusstsein des Todes? Viele geheimnisvolle Rituale in den unterschiedlichsten Kulturen fordern den Tod mit mystischen Handlungen heraus, spielen zum Beispiel bei der Zubereitung des japanischen Kugelfischs Fugu mit der tödlichen Wirkung seines Gifts, welche die des Zyankali vielfach übertrifft. Auch Vampire, Werwölfe und Zombies tauchen im Kapitel auf. Doch die Autoren tischen nicht einfach irgendwelche Horrorgeschichten auf, sondern gehen auf der Grundlage ethnologischer Forschungen den Spuren nach, an deren Ausgangspunkt stets die Angst vor dem Tod lauert.

Geheimnisvolle Giftmorde, die richtige Handhabung von Schlangentoxinen, die Herstellung tödlicher Pflanzenextrakte bei Naturvölkern, chemische Gifte zur Massenvernichtung von Tieren und Menschen, aber auch die Nutzung eigentlich schädlicher Stoffe zur Therapie exotischer Krankheiten – dies präsentiert das Kapitel »Gifte: Faszination und Gefahr« mit farbigen Abbildungen und klar strukturierten Texten.

Auch in den Kapiteln über gewaltsame und spektakuläre Todesarten do-

miniert sachliche Darstellung auf der Grundlage von historischen Quellen. Ein besonders spannendes Kapitel dokumentiert Post-mortem-Prozesse. Hier geht es um die Sterbekaskade des Organismus, den Geruch des Todes, die Arbeit von Insekten bei der Beseitigung von Leichen und die Mumifizierung von Leichen, die im Lauf der Jahrhunderte durch immer neue Verfahren bereichert wurde.

Besonders verstörend ist der Bericht über die Selbstmumifizierung (»Sokuhinbutsu«): Durch eine aushungernde Diät und gezielte Selbstvergiftung führten manche Mönche im nördlichen Japan über mehrere Jahre hinweg ihren Tod so herbei, dass die in der Leiche verbliebenen Gifte die Verwesung des Körpers verhinderten (Bild links).

Im letzten Kapitel »Zum Totlachen« haben die Autoren lebenskluge Ratschläge über den Umgang mit dem Tod aus der Feder bedeutender Wissenschaftler und Schriftsteller versammelt, darunter die hintersinnige Sentenz »Er starb mit einer schönen Zukunft hinter sich« von James Joyce, dazu Sprichwörter, welche die Unabwendbarkeit des Todes, aber auch dessen scherzhaftes und skurrile Überwindung zum Ausdruck bringen.

Und die Angst vor dem Tod? Sie kann der Mensch nach Ansicht von Béliveau und Gingras nur überwinden, wenn er den Tod akzeptiert, indem er verstehen lernt, was das Leben entstehen lässt und aufrechterhält. Es ist eine lebenslange Aufgabe, bei deren Umsetzung die vorliegende populärwissenschaftliche Publikation eine in jeder Hinsicht vorbildliche Hilfestellung leistet.

Als »Schlussfolgerung« außerhalb der Kapiteleinteilung geben uns die Autoren den Rat auf den Weg: »Anstatt uns vor dem Tod zu fürchten, sollten wir lieber unser kurzes Dasein auf der Erde genießen und uns über das Leben und Glück freuen, dass wir an diesem Abenteuer teilhaben können.«

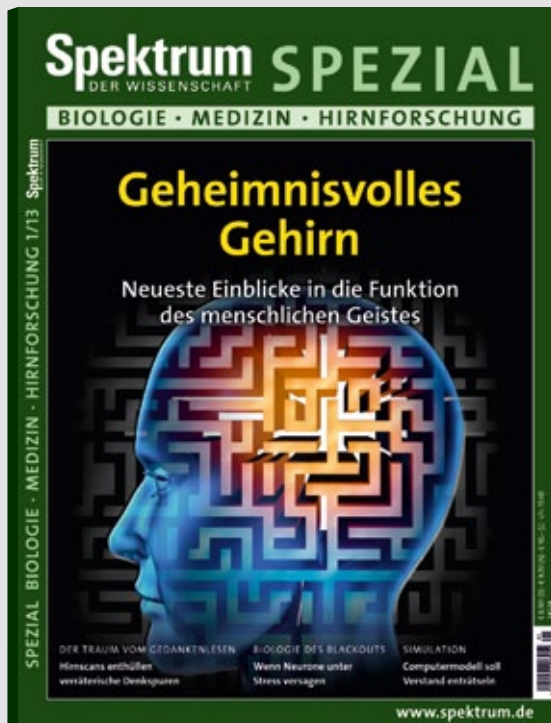
Wolfgang Schlott

Der Rezensent hat Kulturgeschichte und Medienwissenschaft studiert und ist Professor an der Universität Bremen.

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

DAS GANZE SPEKTRUM:
UNSERE SPEZIALREIHEN



JETZT IM
ABO
 BESTELLEN
 UND 15%
 SPAREN

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandspporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

www.spektrum.de/spezialabo



Tel.: 06221 9126-743
 Fax: 06221 9126-751
 E-Mail: service@spektrum.com
 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
 Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
 DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

1913

Magnetismus

»Ein eigenartiges Klettergerüst ist in der Abbildung dargestellt. Die Kette, an der der Mann hochklettert, ist magnetisch an dem an drei Ketten hängenden zylindrischen Körper aufgerichtet. Dieser zylindrische Körper ist ein Riesenelektromagnet. Die magnetische Aufhängung der Kette ist so erreicht, daß sie mit einem Ende im Erdboden verankert ist, während am anderen Ende eine Eisenkugel befestigt ist. Die Anziehungskraft des Magneten auf die Kugel ist nun so



Der Magnet die hält Kugel straff.

gewaltig, dass die Kugel straff gezogen wird, ohne daß die Kugel und der Magnet sich berühren. Ja sogar das Gewicht des an der Kette hängenden Mannes vermag noch nicht die Kugel vom Magnet zu entfernen. Ein Schulbeispiel für die gewaltigen Kräfte, die uns die Elektrizität zur Verfügung stellt.«

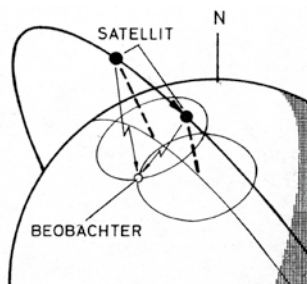
Die Umschau in Wissenschaft und Technik 16, S. 326, 1913

Eisenbeton als Bootsbaumaterial

»Kürzlich wurde in Deutsch-Neuguinea ein Ruderboot aus Eisenbeton vom Stapel gelassen und als seetüchtig erprobt. Das Boot ist 4,5 m lang, 1,40 m breit und besitzt eine größte Tiefe von 70 cm. An Material (Zement, Sand und Eisen) hat es rund 30 Mark gekostet, an Arbeitslöhnen 80 Mark. Ein hölzernes Boot hätte nach dem erwähnten Bericht aus Sydney oder Hongkong bezogen werden müssen und würde dann allein an Fracht 90 Mark gekostet haben. Dazu kommt, dass hölzerne Boote im Klima Neuguineas sehr leicht undicht werden und faulen, wenn sie nicht schon vorher vom Seewurm leckgefressen worden sind. Vielleicht ist mit diesem Versuch der Anfang zu einer neuen Industrie geschaffen, die auch für unsere Breiten Bedeutung hat. Im Großschiffbau scheint der Eisenbeton ja auch immer mehr Boden zu gewinnen.« Technische Monatshefte, 4, S. 126, 1913

Eier in Kunststoffschalen

»Bald werden in den Lebensmittelgeschäften Frischeier zu haben sein, deren Schalen fast unzerbrechlich sind und aus einem durchsichtigen Kunststoff bestehen. Diesen Ausweg hat eine Eierpackstation eingeschlagen, weil bei ihr immer mehr Bruch vorkam. Alle mit Knicken und Haarrissen eingehenden Eier werden von einer Maschine geöffnet, in Kunststoffschalen umgefüllt, verschlossen und mit ultravioletten Strahlen sterilisiert. Jeweils ein Dutzend kommt in eine ebenfalls aus Kunststoff bestehende Sammelpackung, die wie ein grosses Spiegelei aussieht und einen wirkungsvollen Blickfang für die Kunden abgibt.« Neuheiten und Erfindungen 328, S. 60, 1963



Prinzip der Ortsbestimmung durch Distanzmessung zum Satelliten

Navigationssysteme mit Erdsatelliten

»Die Verwendung von Erdsatelliten für Navigationszwecke liegt nahe, da man die natürlichen Himmelskörper schon seit Jahrtausenden dafür benutzt. Optische Winkelmessungen an Sonne, Mond und Sternen gestatten es, die geographischen Koordinaten des

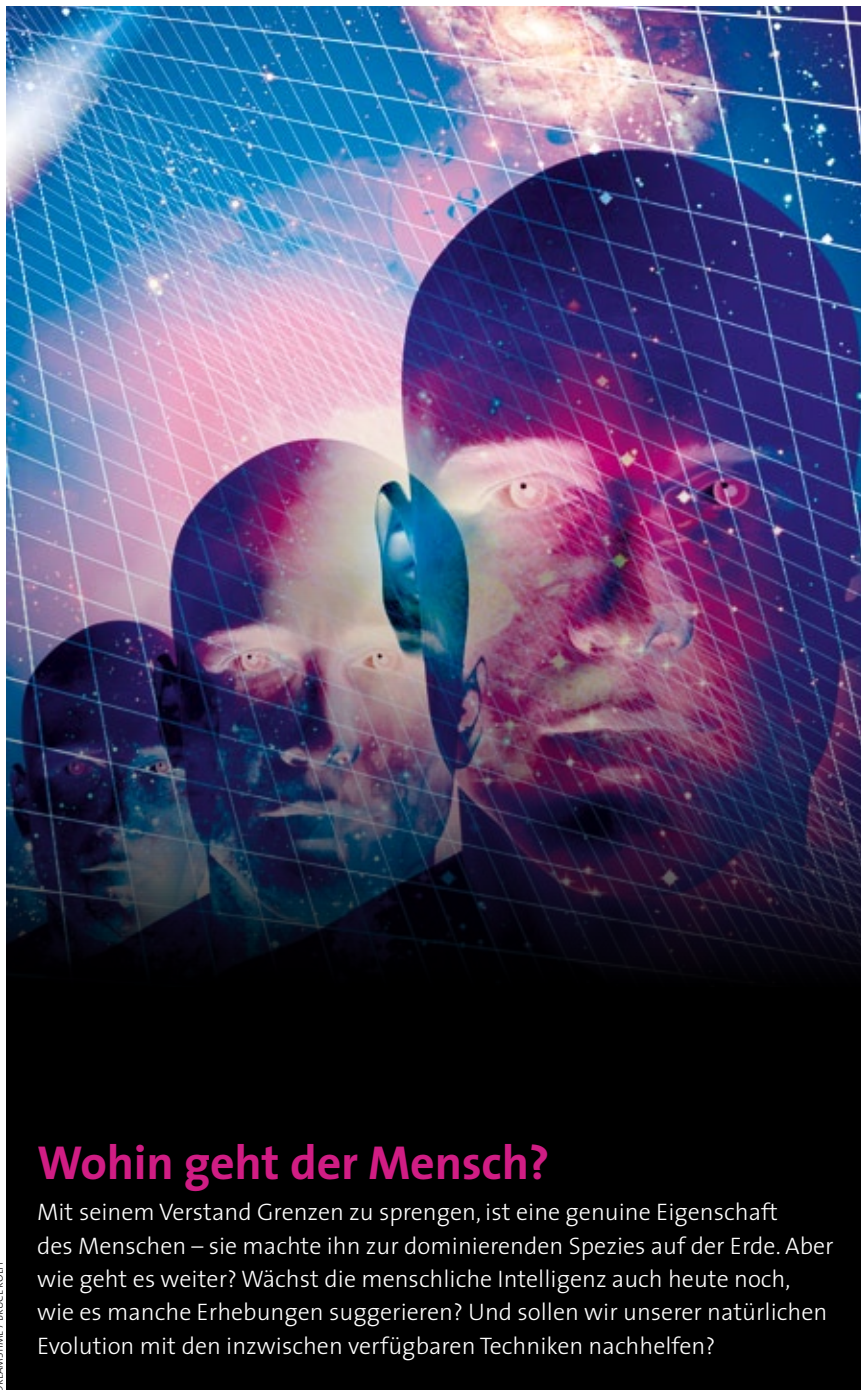
Standortes zu berechnen. Diese Kunst wird auch heute noch von Navigatoren täglich geübt. Sozusagen als Ergänzung der natürlichen Himmelskörper können nun künstliche Erdsatelliten eingesetzt werden. Eine Anzahl von drei bis vier Satelliten in 2000 bis 20000 km Höhe

1963

würde ausreichen, um fast ununterbrochene Standortmessungen an jedem Punkt der Erde vornehmen zu können.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 7, S. 204, 1963

Nach Jahrmillionen zum Leben erweckt

»Auf einem Kongress für Protobiologie, der kürzlich in der Newyorker Akademie der Wissenschaften abgehalten wurde, berichtete der deutsche Gelehrte Dr. Heinz Dombrowski über aufsehenerregende Forschungen mit Millionen Jahre alten Bakterien. Eingebettet in Salzkristalle, die in über 1000 Meter Tiefe bei Irkutsk in Sibirien aufgefunden wurden, fanden sich völlig ausgetrocknete, mumifizierte Bakterien, deren Alter auf Grund der Pollenanalyse etwa 650 Millionen Jahren beträgt. Dem Gelehrten gelang es, die Austrocknung allmählich rückgängig zu machen, und die Bakterien, erwachten dadurch zu neuem Leben, ja bildeten sogar neue umfangreiche Kulturen. Damit rückt die Erfüllung des alten Traumes von künstlich in der Retorte des Chemikers geschaffenen Lebewesen ein gutes Stück näher.« Neuheiten und Erfindungen 328, S. 56, 1963



DREAMSTIME / BRUCE ROYF

Wohin geht der Mensch?

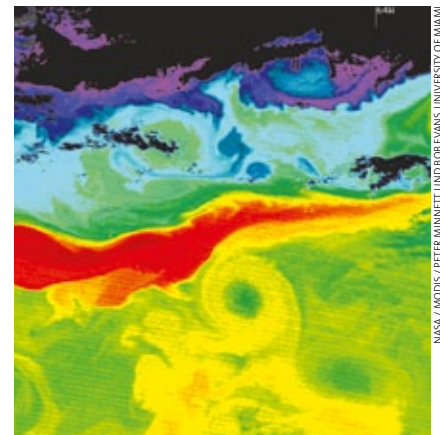
Mit seinem Verstand Grenzen zu sprengen, ist eine genuine Eigenschaft des Menschen – sie machte ihn zur dominierenden Spezies auf der Erde. Aber wie geht es weiter? Wächst die menschliche Intelligenz auch heute noch, wie es manche Erhebungen suggerieren? Und sollen wir unserer natürlichen Evolution mit den inzwischen verfügbaren Techniken nachhelfen?

Druiden, Ritter, Fürstinnen

Lange Zeit waren Forscher fast ausschließlich auf die Berichte antiker Autoren und Spekulationen angewiesen, wollten sie die keltische Gesellschaft ergreifen. Jüngste Ausgrabungen eröffneten Archäologen jedoch tiefe Einblicke in die herrschaftlichen und organisatorischen Strukturen der frühen Kelten.

Gefeit gegen Aids

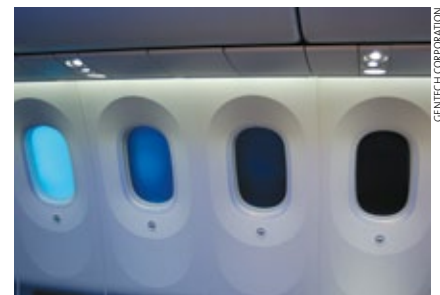
Manche Menschen sind mit dem HI-Virus infiziert, erkranken aber selbst nach Jahrzehnten nicht an Aids. Ihr Immunsystem kann den Erreger wegen einer besonders effizienten Erkennungsfähigkeit in Schach halten. Diesen Mechanismus möchten Wissenschaftler für eine vorbeugende Behandlung nutzen.



NASA / MODIS / PETER MANNETT UND DOB EWANS, UNIVERSITY OF MAMA

Heizung Europas in neuem Licht

Nicht nur der Golfstrom transportiert Wärme in hiesige Breiten: Vor allem spezielle Windströmungen bescheren uns ein milderes Klima, als es etwa an der amerikanischen Ostküste herrscht.



GENTECH CORPORATION

Farbwechsel auf Knopfdruck

Stufenlos abdunkelbare Flugzeugfenster beruhen auf Materialien, die beim Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Farbe ändern. Solche »elektrochromen« Werkstoffe haben bereits einige faszinierende Anwendungen – und versprechen noch viele weitere.

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

ALLES ÜBER IHRE GRAUEN ZELLEN. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO**



Ein Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-).
Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen,
sondern haben auch Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

www.spektrum.de/digitalabo



Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751
E-Mail: service@spektrum.com
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

Deutschlands erstes digitales, wöchentliches Wissenschaftsmagazin



Jetzt jeden Donnerstag

- mit mehr als 40 Seiten News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar
- mit exklusivem Artikel aus **nature** in deutscher Übersetzung



Infos und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum.de/testwoche