

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

DER PALÄO-
ANTHROPOLOGE
FRIEDEMANN
SCHRENK

Auf der Fährte
der Urmenschen

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC
AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

09/10

SEPTEMBER 2010

TEILCHENPHYSIK

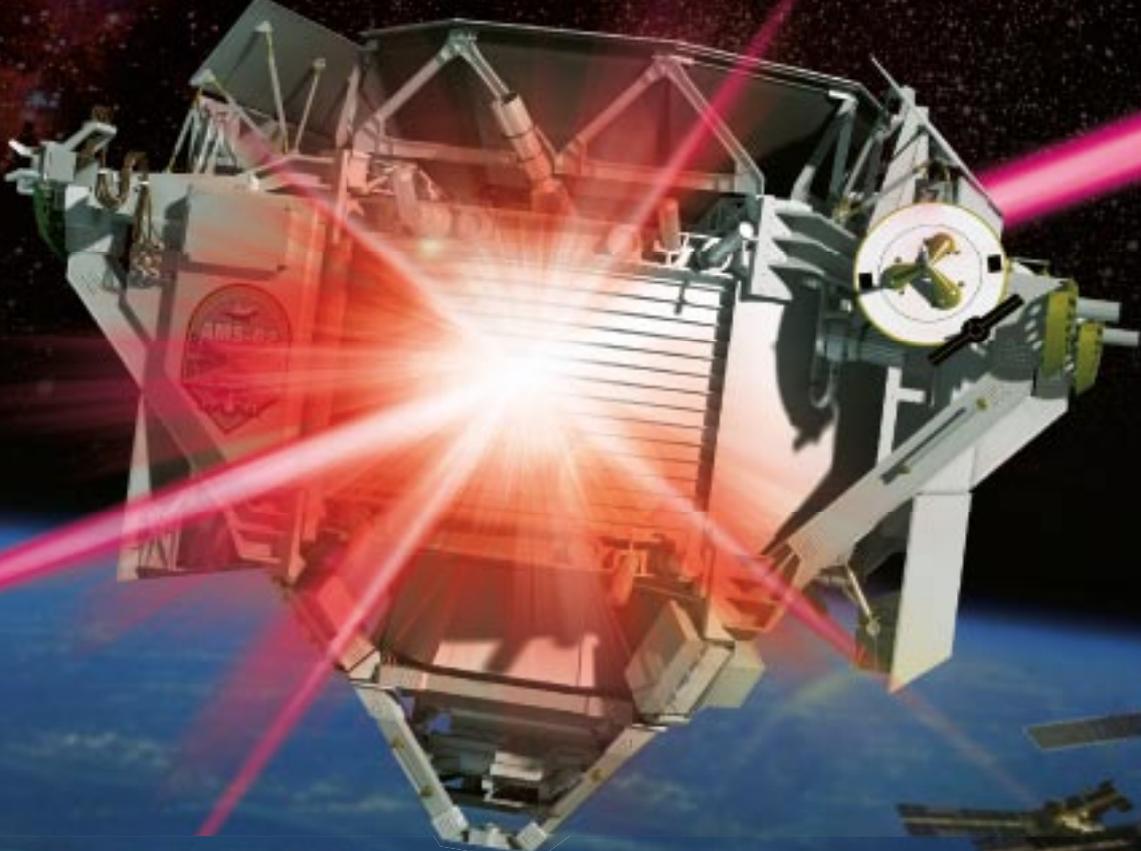
Der LHC stößt endlich
zu neuen Energien vor

AUTOS DER ZUKUNFT

Brennstoffzellen besser
als Elektrobatterien?

PSYCHOLOGIE

Wie manipulierbar
ist der Mensch?



Jagd auf die Dunkle Materie

Ein Detektor auf der Raumstation
soll ein kosmisches Geheimnis lüften

7,40 € (D/A) · 8,- € (L) · 14,- sFr.
D6179E



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Urmenschen auf den Zahn gefühlt

Bernhard Epping und ich betreten das etwas triste Nebengebäude des Naturmuseums Senckenberg in Frankfurt, um uns mit Friedemann Schrenk zu unterhalten. Im zweiten Stock landen wir vor einer verschlossenen und kodegesicherten Glastür. In dem Flur dahinter stapeln sich braune Pappkartons in deckenhohen Regalen, nur von etlichen Panzerschränken unterbrochen. Wenig später erscheint der Paläoanthropologe höchstpersönlich und öffnet die Tür zu seinem Reich. Sogar einige der Panzerschränke, in denen die hoch versicherten Fossilienrelikte diverser Urmenschen lagern, schließt er für uns auf. Dann fischt er aus einem Aluminiumkoffer etwas respektlos den berühmten Unterkiefer »U 501« heraus. Den hat der Forscher selbst 1991 in Malawi entdeckt und darin den ältesten Vertreter der Gattung *Homo* erkannt. Ich zögere einen Moment, das kostbare Stück einfach so in die Hand zu nehmen. Zerbröckelt das nicht? »Keine Angst«, amüsiert sich Schrenk. »Das ist aus Stein und hat schon 2,5 Millionen Jahre überlebt.« Im Gespräch plaudert der berühmte Wissenschaftler dann über die Lebenswelt dieser Urmenschen, die Entstehung des aufrechten Gangs und die Ausbreitung unserer Vorfahren über die Erde. Dies und vieles mehr lesen Sie ab S. 68.

Kürzlich stellten Psychologen aus New York fest: Menschen lassen sich täuschen, selbst wenn sie wissen, dass dies gerade geschieht.

Jeder kennt das ja etwa vom Zauberkünstler. Man erwartet, hinters Licht geführt zu werden, und versucht deshalb, besonders genau hinzuschauen – aber man fällt doch jedes Mal wieder herein! Wie aber steht es mit unterschwelligen Beeinflussungen? Die Werbung, ob für Produkte oder Parteien, ist dafür berüchtigt, ihre Zielgruppen ständig mit nur unbewusst wahrnehmbaren Signalen zu manipulieren. Selbst als kritischer Konsument hielt ich mich bisher nicht für gefeit gegen alle Arten werblicher Einflüsterungen.

Lässt sich also das Verhalten von Menschen, so die Frage an die Psychologen, gezielt steuern, ohne dass die betroffene Person es merkt, sogar gegen ihren eigenen Willen? Dies ist schwerer zu beantworten, als es scheint. Jetzt hat ein Team von Psychologen in London und Paris sich das Thema nochmals vorgenommen und mit ziemlich raffinierten Experimenten untersucht. Das Ergebnis hat mich dann doch einigermaßen beruhigt (S. 50).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

SVEN TRÄNKNER, SENCKENBERG GESELLSCHAFT FÜR NATURFORSCHUNG



Der Paläoanthropologe Friedemann Schrenk (Mitte) vom Naturmuseum Senckenberg in Frankfurt führt dem freien Wissenschaftsjournalisten Bernhard Epping (rechts) und Reinhard Breuer seine Schätze vor. Im Vordergrund: Gesichtsrekonstruktionen einiger Hominiden



40

MEDIZIN & BIOLOGIE

Stumme Mutationen mit großer Wirkung



MENSCH & GEIST

Die Erfindung der Uhr ermöglichte Fortschritt und »moderne Zeiten«

58



ASTRONOMIE
& PHYSIK
Der LHC läuft wieder

34

AKTUELL

8 Spektrogramm

Risikofaktor kleine Statur · Verblüffend alte Vielzeller · Alle Sterne sind gleich geboren · Frühe Besiedlung Nordeuropas · Falscher Tumorverdacht u. a.

11 Bild des Monats

Wundersames Wesen der Tiefsee

12 Molekulare Spinne auf dem Vormarsch

Vierbeiniger Nanoroboter folgt vorgegebener Route über DNA-Origami

14 Neues zum Ursprung der Karibik

Expedition in die karibische See beleuchtet die Entstehung der Region

16 Antenne für die Nanowelt

Winzige Version der Fernsehantenne sendet roten Lichtstrahl

18 Sensoren für jeden Geschmack

Nach Entdeckung des Salzrezeptors ist der Geschmackssinn völlig enträtselt

19 Springers Einwürfe

Wie tanzen die Quanten?

ASTRONOMIE & PHYSIK

► TITEL

22 Mit der Raumstation der Dunklen Materie auf der Spur

Ein aufwändiger Teilchendetektor wird demnächst zur ISS gebracht, um dort Antimaterie aufzuspüren und zu helfen, das Rätsel der Dunklen Materie zu entschlüsseln

SCHLICHTING!

32 Mondphasen im Apfelbaum

Das Licht des Erdtrabanten ist immer noch gut für einige Überraschungen

34 ► Experimentieren am Limit

Der weltgrößte Teilchenbeschleuniger LHC arbeitet endlich wieder, erste Ergebnisse wurden gerade auf einer Tagung vorgestellt

MEDIZIN & BIOLOGIE

40 Die Macht stummer Mutationen

Mutationen, die an der Zusammensetzung eines Proteins nichts ändern und deshalb bis vor Kurzem als unbedeutend galten, haben sich als Auslöser vieler Erkrankungen erwiesen

Titelmotiv: NASA (AMS-02, Erdkugel mit ISS und Sternenhintergrund); iStockphoto / Loops 7 (Strahlen); Spektrum der Wissenschaft (Composing)

Der Detektor AMS soll im Februar 2011 zur Raumstation gebracht werden und Hinweise zur Dunklen Materie finden – hier symbolisch als Teilchenreaktion mit Lichtblitz dargestellt

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter:

www.spektrum.de/audio



TITEL

Jagd auf die Dunkle Materie

22



68

MENSCH & GEIST
Der Paläoanthropologe Friedemann Schrenk über Urmenschen



74

ERDE & UMWELT
Ölkatastrophen in der Tiefsee

MENSCH & GEIST

50 ► **Menschen heimlich motivieren** 
Nicht bewusst wahrgenommene – unterschwellige – Reize können unser Handeln beeinflussen, allerdings mit Einschränkungen

SERIE ZEIT (III)

58 **Vom Werden der Zukunft** 
Jesu Geburt als Nullpunkt der Zeitrechnung und die Erfindung der mechanischen Uhr begründeten die zukunftsorientierte Moderne

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

64 **Türme aus Bauklötzchen**
Kann man lauter gleiche quaderförmige Bauteile ohne weitere Hilfsmittel so zusammensetzen, dass sie beliebig weit über die Tischkante hinausragen?

PORTRÄT

68 ► **Auf der Fährte der Urmenschen**
Der Frankfurter Paläoanthropologe Friedemann Schrenk über die Welt unserer Vorfahren

ERDE & UMWELT

ESSAY

74 **Schutz vor Ölkatastrophen** 
Tankerhavarien werden seltener, dafür steigt das Umweltrisiko durch undichte Pipelines und Bohrlöcher, zunehmend auch in der Tiefsee. Was ist zu tun?

78 **Mit Erbgutanalysen gegen Elfenbeinschmuggler**
Obwohl der Handel mit Elfenbein seit 20 Jahren verboten ist, werden heute in Afrika mehr Elefanten gewildert als je zuvor. Mit Analysen der Stoßzahn-DNA kommen Forscher den kriminellen Kartellen auf die Spur

TECHNIK & COMPUTER

► E-MOBILE

86 **Wasserstoff – Treibstoff der Zukunft?**
Es gibt gute Gründe, warum die Antwort Ja lauten könnte

91 **Abschied vom eigenen Tank**
Ingenieure setzen auf betankbare chemische Batterien zum Wechseln

FRAG DEN EXPERTEN

97 **Helfen manche Armaturen wirklich beim Wassersparen?**
Die Wissenschaftsjournalistin Katja Bammel ist der Frage nachgegangen

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Urmenschen auf den Zahn gefühlt
- 6 Leserbrief/Impressum
- 48 Im Rückblick
- 104 Onlineangebote
- 106 Vorschau

- 98 Rezensionen:
- B. Jack Copeland et al. *Colossus*
 - Paul Gannon *Colossus*
 - Richard Wrangham *Feuer fangen*
 - Dagmar Röhrlich *Tiefsee*
 - Werner David *Von Fallenstellern und Liebesschwindlern*

Theodor Boveris Chromosomentheorie der Vererbung

Der vergessene Entdecker der DNA
Juli 2010

In der Grafik mit den historischen Stationen von 1865 bis 1995 fehlt ein entscheidender Meilenstein: Theodor Boveri (1862 – 1915), seit 1893 Professor für Zoologie und vergleichende Anatomie in Würzburg, der mit seinen experimentellen Arbeiten und theoretischen Ableitungen aus dem Jahr 1902 neben W.S. Sutton als Vater der Chromosomentheorie der Vererbung gilt.

Während mehrerer Aufenthalte an der Zoologischen Station in Neapel arbeitete Boveri vorwiegend mit Seeigeln. Es gelang ihm, kernlose Bruchstücke von Seeigeleiern zu besamen, die sich daraufhin zu anscheinend normalen Larven entwickelten. Umgekehrt können auch aus Eiern, die nur den mütterlichen Chromo-

somensatz besitzen, Larven hervorgehen. Väterlicher und mütterlicher Chromosomenbestand enthalten also jeweils alle Faktoren, die die Bildung eines ganzen Organismus steuern. Die Chromosomen müssen demnach als Träger der Vererbung betrachtet werden. In weiteren Versuchen mit mehrfach besamten Seeigeleiern wies Boveri die individuelle Bedeutung der einzelnen Chromosomen als Erbträger nach.

Dr. Hans von Besser, Würzburg

Wichtige Grundlage für Spitzenforschung

Schwerelos – Europa forscht im
Weltraum (Beilage zu »Spektrum
der Wissenschaft«, Juli 2010)

Diese Sonderpublikation rührt an eine generelle Problematik: Die Wahrnehmung der außeramerikanischen Forschung in der Scientific Community wie auch im Wissenschaftsjournalismus ist ihrer tatsächlichen Qualität nicht angemessen. Dies hat meines Erachtens folgende Ursachen: Der amerikanische Wissenschafts- und Technologiebetrieb nimmt Forschungsergebnisse, die außerhalb der USA entstehen, nicht in ausreichendem Maß zur Kenntnis. Zum Beispiel werden ausländische Patente oder Rechtsvorschriften weit gehend ignoriert. Publikationen, die nicht in englischer Sprache vorliegen, haben kaum

eine Chance, außerhalb des eigenen Sprachraums wahrgenommen zu werden. Damit geht für die globale Wissenschaft die große Zahl von vielleicht weniger spektakulären Forschungsergebnissen verloren, die aber eine Grundlage für die Spitzenforschung darstellen.

Rolf Pausch, Köln

Woher kommt das Rätoromanische?

Wie die indogermanische Sprache
nach Europa kam, August 2010

Ich hätte dabei gerne gewusst, woher die vierte in der Schweiz gesprochene Sprache – das Rätoromanische – kommt; weiters wüsste ich gern, wie viele Menschen diese Sprachen jeweils sprechen beziehungsweise zur Muttersprache haben.

Walter Höhlhubner,
Linz a. d. Donau (Österreich)

Antwort der Autorin Ruth Berger:

Die ursprüngliche Sprache der Räter war nicht Itälich oder Romanisch, sondern eine nur in winzigen Fragmenten bekannte Sprache namens Rätisch, die möglicherweise überhaupt nicht indogermanisch war. Die Sprache gehört zu einer Gruppe von kleinen romanischen Sprachen, denen gemeinsam ist, dass sie sich seit der Römerzeit in abgelegenen Gebirgsregionen der Alpen und ihrer Ausläufer ohne viel äußeren Einfluss ent-

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Preise des Abonnements erhöhen sich ab Oktober pro Heft einschließlich Versand auf € 7,00 (Ausland € 7,70), für Schüler und Studenten auf € 5,83 (Ausland € 6,53). Der Einzelverkaufspreis wird ab der Oktober-Ausgabe € 7,90 betragen. Wir bitten um Ihr Verständnis. Die Verlagsleitung

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Hartwig Hanser (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistent: Britta Feuerstein, Petra Mers
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Bernhard Gerl, Gabriele Herbst, Ursula Loos, Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SWW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Ursula Haslauer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 31 vom 01. 01. 2010.
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: © 2010 (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 Inchoombe, 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 Brannon



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



Ist Kohlendioxid ein Treibhausgas?

Das Klima ist vergiftet, Springers Einwürfe, August 2010

Springers Abduktion

Michael Springer ist der Auffassung, die Tatsache, »dass seit Beginn der Industrialisierung der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre gestiegen ist und dass im selben Zeitraum auch die mittlere globale Temperatur zugenommen hat«, berechne zu der Schlussfolgerung, »dass die globale Erwärmung existiert und von Menschen verursacht wird«. Dabei ist der erste Teil banal, indem der Zunahme der mittleren globalen Temperatur einfach nur das (überflüssige) Prädikat zuerkannt wird, dass sie »existiert«. Der zweite Teil stellt freilich eine verdeckte Abduktion dar: den Schluss vom Resultat und der (hypothetisch unterstellten) Regel auf den Fall. Denn die Temperatur ist ja auch seit der Erklärung der Menschen-

rechte, der Verfolgung der Onanie oder dem Ende des Heiligen Römischen Reichs deutscher Nation gestiegen, Ereignisse, die aber – obwohl zeitgleich – als »Ursachen« offenbar nicht in Frage kommen. Das Bild rauchender Industrieschlote dagegen scheint so plausibel, dass die unterstellte Regel »Industrialisierung führt zu globaler Erwärmung« ohne weiteren Beweis akzeptiert wird.

Bernhard Becker, Duisburg

Korrelation und Kausalität

Leser haben Springers »Einwurf« angeklagt, dem Fehlschluss nachzuhängen, dass zwei miteinander statistisch korrelierte Sachverhalte kausal voneinander abhängen. Damit kann man in der Tat die drolligsten Dinge beweisen.

Nun ist aber, wenn jemand anerkennt, dass es einen anthropogenen CO₂-Anstieg und einen Anstieg der globalen Temperatur gibt, unabhängig von diesen Tatsachen festzustellen: Es gibt aus den Naturgesetzen herleitbar und auch experimentell überprüfbar einen Wirkungszusammenhang zwischen Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre und globaler Temperatur. Wissenschaftlich geht man ja auch immer von dem theoretisch gefundenen Wirkungszusammenhang aus und prüft dann, ob Ursache und Wirkung, wie von der Theorie vorhergesagt, in der Natur miteinander korrelieren. So machen das auch die Klimamodelle. Die prognostizieren einen Temperaturanstieg auf Grund des steigenden CO₂-Anteils, und siehe da: Die Natur verhält sich so.

Olaf Schlüter, Baldham

wickelt haben. Eine davon, aus Italien stammend, ist als »Ladinisch« im Stammbaum mit dabei. Die Wurzel ist das Vulgärlatein der jeweiligen Region. Zufällig (oder nicht?) sind diese alpinen romanischen Sondersprachen alle in der ehemaligen römischen Provinz Rätien (Raetia) entstanden. Es könnte sein (ist aber sehr umstritten), dass sie auf ein spezielles Vulgärlatein der Provinz Rätien zurückgehen, also miteinander etwas enger verwandt sind als mit den umgebenden romanischen Sprachen.

Die Zahl der Muttersprachler von Rätoromanisch (also der kleinen Schweizer Sprache) liegt, basierend auf Volkszählungsdaten von 1990, bei 66 000.

Auch die Spinne kann nichts dafür

Künstler der Evolution, August 2010

Die im letzten Absatz erwähnten Daddy-long-Leg-Spinnen sind in Australien harmlose *Pholcus*-Arten, wie sie als Zitterspinne auch in hiesigen Kellern und Garagen oft anzutreffen sind. Weder ist ihr Gift für Säugetiere giftig noch sind sie in irgendeiner Weise dem Menschen gegenüber aggressiv. Im Gegenteil – durch ihren Heißhunger leisten sie einen aktiven Beitrag zur Schädlingsbekämpfung



Dreck zur Tarnung: *Ortholasma rugosum* legt sich Erdkrümchen über den Körper.

in Gebäuden und halten bei dieser Gelegenheit sogar problematischere Spinnenarten wie (in Australien) die giftige Redback-Spinne kurz.

Frank Siegert, per E-Mail

Korrigendum Neutrinos als Boten ferner Welten Juli 2010

Wie Leser Andreas Kahnt bemerkt hat, muss das Mischungsverhältnis in der Tabelle auf S. 30 unter »Neutronzerfall«/»Mischung an der Quelle« statt 1:0:2 richtig 1:0:0 lauten.

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder direkt beim Artikel: Klicken Sie bei www.spektrum.de auf das aktuelle Heft oder auf »Magazin«, »Magazinarchiv«, das Heft und dann auf den Artikel.

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Redaktion Leserbriefe

Postfach 104840
69038 Heidelberg

E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

Die vollständigen Leserbriefe finden Sie unter: www.spektrum.de/leserbriefe

Hummeln verschlafen Mitternachtssonne



STELZER ET AL., BMC BIOLOGY

Kleine auf dem Rücken angebrachte Radiotransponder (Pfeile) gaben Auskunft über den Arbeitstag der Hummeln.

■ Für Hummeln ist das Jahr kurz und der Arbeitstag lang. In der warmen Jahreszeit sind die Arbeiterinnen unterwegs, um fleißig Futter zu sammeln. Solange es hell ist, sieht man sie von Blüte zu Blüte schwirren. Doch in einigen Regionen der Erde geht die Sonne im Sommer gar nicht unter. Arbeiten die Hummeln dort rund um die Uhr?

Um das zu prüfen, versahen Ralph Stelzer and Lars Chittka von der Queen Mary University of London (England) in ihrer nordfinnischen Versuchsstation sowohl einheimische als auch aus südlicheren Breiten importierte Hummeln mit kleinen Radiotranspondern und beobachteten die Sammelaktivitäten der Insekten während der Wochen, in denen die Sonne dort nie unter den Horizont sinkt.

Wie sich zeigte, ignorierten die Tiere den verlängerten Tag: Sie begannen ihre

Arbeit nach wie vor am frühen Morgen und fanden sich für eine nächtliche Ruhepause am späten Abend wieder in ihren Nestern ein. Dies galt für einheimische und importierte Exemplare gleichermaßen – obwohl letzteren die einbrechende Dunkelheit als Signal für die Beendigung des Tagwerks fehlte.

Stelzer and Chittka schließen daraus, dass es neben dem Wechsel von hell und dunkel weitere »Zeitgeber« im Tagesablauf einer Hummel geben muss, wie etwa Unterschiede in der Lichtqualität oder in der Temperatur zwischen Tag und Nacht. Und noch etwas folgern die Forscher aus ihrem Befund: Auch ein emsiges Insekt kann nicht immer nur schufteln, sondern braucht seinen wohlverdienten Schlaf – oder was bei Hummeln dafür steht.

BMC Biology, Bd. 8, S. 93

PALÄANTHROPOLOGIE

Frühe Besiedlung Nordeuropas

■ Vor etwa 1,8 Millionen Jahren begann der Frühmensch von Afrika aus Eurasien zu besiedeln. Doch wann er genau bis wohin gelangte, ist noch ziemlich unklar. Neue Grabungsfunde eines Teams um Nick Ashton vom British Museum belegen nun, dass unser Vorfahr unerwartet früh auch schon sehr weit nach Norden vorstieß.

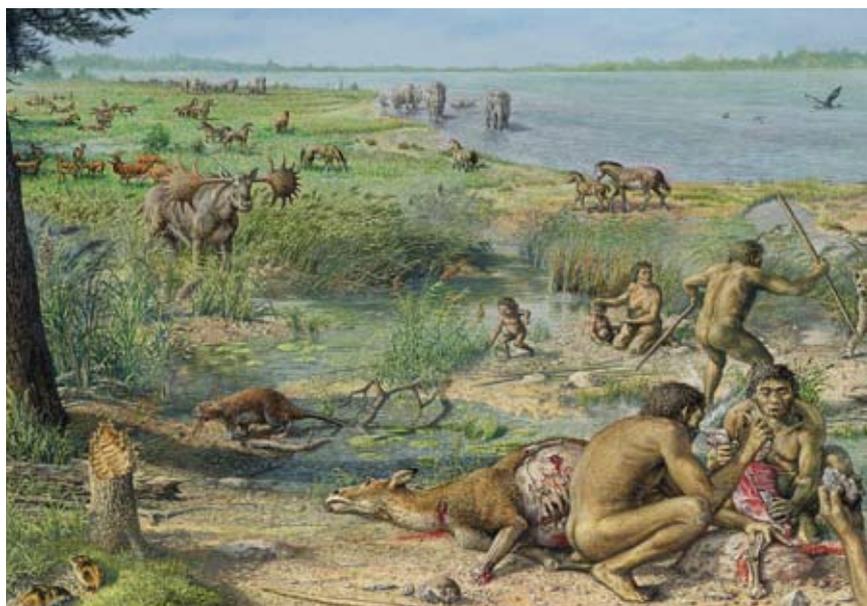
Die Paläoarchäologen entdeckten im Flusssediment von Happisburgh im englischen Norfolk Reste von Steinwerkzeugen, die sie auf ein Alter von 780 000 Jahren datieren konnten. Die Artefakte gehören damit zu den ältesten frühmenschlichen Zeugnissen in Großbritannien. Die Fundumstände in Happisburgh deuten darauf hin, dass die ersten Hominiden sich auch zu einer Zeit im Pleistozän, als es auf der Erde deutlich kälter war als heute, nicht von einer Besiedlung Nordeuropas abschrecken ließen und sich bis in Regionen vorwagten, die klimatisch der heutigen kaltgemäßigten Nadelwaldzone Nordskandinaviens entsprachen.

Die Grafik zeigt eine rekonstruierte Szene aus dem Leben der ersten Siedler in Mittelengland vor rund 800 000 Jahren.

Bisher galten die ersten Auswanderer aus dem Schwarzen Kontinent als eher kältescheu. Lediglich in Warmzeiten hätten sie den 45. Breitengrad überschritten und Gebirge wie die Pyrenäen oder die Alpen überquert, sich aber sofort wieder nach Süden zurückgezogen, als die Temperaturen erneut absackten.

Frühere, 700 000 Jahre alte Funde aus Pakefield in Suffolk waren folglich einer nur vorübergehenden Besiedelung Englands während eines Interglazials mit mediterranem Klima zugeschrieben worden. Diese Vorstellung ist nun wohl revisionsbedürftig.

Nature, Bd. 466, S. 229



JOHN SIBBLECK / ANORB

Alle Sterne sind gleich geboren

■ Indem Stefan Kraus von der University of Michigan in Ann Arbor und seine Kollegen das Licht mehrerer Teleskope am Paranal-Observatorium in Chile kombinierten, konnten sie den rund 10 000 Lichtjahre von der Erde entfernten Stern IRAS 13481-6124 nun erstmals im Detail ablichten. Als sie die Materieverteilung um das Objekt in einem Umkreis ähnlich der Größe unseres Sonnensystems untersuchten, stießen sie auf eine ovale Struktur aus Gas und Staub – mit einer Länge von 19 und einer Breite von 13 Erde-Sonne-Distanzen.

Sehr wahrscheinlich handelt es sich dabei um eine um 45 Grad geneigte Akkretionsscheibe. Das ist höchst erstaunlich – widerspricht es doch der gängigen Lehrmeinung. Bei der Entstehung massearmer Sterne wie der Sonne spielen solche Scheiben, in denen sich Gas und Staub aus der Umgebung sammeln, zwar eine zentrale Rolle. Ab etwa zehn Sonnenmassen sollte der Strahlungsdruck jedoch so groß sein, dass er die auf den Protostern einfallende Materie zerstreut. Stellare Schwergewichte dürften sich deshalb nur durch das Verschmelzen von kleineren Objekten gebildet haben.

Kraus und seine Kollegen werten ihre Beobachtung dagegen als klaren Beweis dafür, dass massereiche Sterne genau wie massearme entstehen. Wie das möglich ist, können sie freilich nicht sagen. Im Übrigen schätzen sie das Alter von IRAS 13481-6124 auf rund 60 000 Jahre. Der Stern habe seine endgültige Masse bereits erreicht, und seine Akkretionsscheibe sollte nun allmählich ausdünnen.

Nature, Bd. 466, S. 339



ESO / LUIS CALÇADA

Die Illustration zeigt einen massereichen jungen Stern inmitten einer Staub- und Gasscheibe, der in zwei Jets Materie ausstößt.

KLIMAWANDEL

Seesedimente als Kohlenstoffsenken

■ Obwohl bekannt ist, dass die großen Binnenseen mehr organischen Kohlenstoff binden als Meeresböden, wurde ihre Funktion als mögliche Kohlenstoffsenken bisher nur unzureichend untersucht. In einer Feldstudie konnten der Limnologe Cristian Gudasz von der Universität Uppsala (Schweden) und seine Kollegen nun zeigen, dass das Verhältnis von Kohlenstofffreisetzung und -einlagerung in die Sedimente – und damit das Ausmaß, in dem das Element dem globalen Kreislauf entzogen wird – hauptsächlich von der Temperatur der Binnengewässer abhängt.

Die Forscher untersuchten die Mineralisierungsraten von Sedimentproben aus acht Seen Zentralschwedens und verglichen sie mit bereits publizierten Daten aus anderen Regionen. Unabhängig vom Nährstoffgehalt und von der Art der Ablagerun-

gen zeigte sich der gleiche Effekt: Je stärker sich das Wasser erwärmt, desto mehr organischer Kohlenstoff wird von Mikroorganismen beispielsweise zu den Treibhausgasen Kohlendioxid und Methan zersetzt und so der Atmosphäre wieder zugeführt.

Unter der Annahme, dass der Eintrag vor organischem Material in die borealen Seen gleich bliebe und die Temperatur bis zum Jahr 2100 um 6,4 Grad stiege, berechneten die Limnologen daraufhin einen Rückgang der jährlichen Nettoaufnahme von Kohlenstoff durch diese Binnengewässer um bis zu 27 Prozent. Da sich fast ein Drittel aller globalen Seen in nördlichen Breiten befindet, summiert sich das zu einem erklecklichen Betrag. Die Erde würde sich dadurch noch schneller erwärmen.

Nature, Bd. 466, S. 478



CRISTIAN GUDASZ, UPPSALA UNIVERSITET

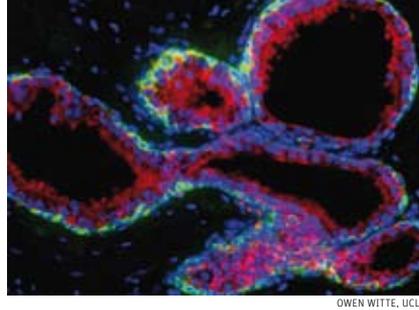
Sedimentproben eines schwedischen Waldsees wurden in Glasröhren längere Zeit auf einer bestimmten Temperatur gehalten und dann analysiert.

KREBSFORSCHUNG

Falsche Verdächtige

■ Das Prostatakarzinom ist die häufigste Krebserkrankung bei Männern. Bisher machte man für die Wucherungen in der Vorstehdrüse so genannte Luminalzellen verantwortlich – unter anderem, weil sie das prostataspezifische Antigen (PSA) produzieren, dessen Konzentration im Blut bei der Erkrankung zunimmt. Doch nun fanden Andrew Goldstein und sein Team an der University of California in Los Angeles heraus, dass der Krebs von einem anderen Drüsenzelltyp abstammt: den Basalzellen.

Die Forscher entnahmen gesundes Gewebe aus der menschlichen Prostata und isolierten daraus getrennte Populationen von Basal- und Luminalzellen. Beide pflanzten sie nach dem Einschleusen von Tumorgenen, die eine Entartung fördern, Mäusen mit unterdrücktem Immunsystem ein. Überraschenderweise stellte sich heraus, dass nur die Tiere, denen Basalzellen implantiert wurden, bösartige Wuche-



OWEN WITTE, UCLA

Basalzellen (grün fluoreszierend) kleiden die Prostata Drüsen aus; Luminalzellen (rot leuchtend) bilden das prostataspezifische Antigen und den Androgenrezeptor.

rungen ausbildeten. Diese glichen in ihren Eigenschaften üblichen Prostatatumoren.

Solche Tumore zeichnen sich bei Gewebsuntersuchungen durch eine Anhäufung von Luminal- und das Fehlen von Basalzellen aus, während im gesunden Gewebe beide Zelltypen auftreten. Laut Goldstein demonstrieren die neuen Erkenntnisse, dass eine histologische Charakterisierung von Krebsgeweben nicht immer auf die zellulären Ursachen der Krankheit schließen lässt. Anscheinend verwandeln sich beim Prostatakrebs im Zuge der Entartung die Basal- in Luminalzellen, was neue Ansätze zu seiner Bekämpfung liefern könnte.

Science, Bd. 329, S. 568

PALÄONTOLOGIE

Vielzeller weitaus älter als gedacht

■ Wissenschaftler sind sich einig, dass im so genannten Proterozoikum der Ursprung der vielzelligen Organisationsform für das irdische Leben liegt. In diesem Erdzeitalter bildete sich zum ersten Mal eine sauerstoffhaltige Atmosphäre, und mikroskopisch kleine Einzeller begannen zu kooperieren und gemeinsame Arbeitseinheiten

auszubilden. Nur: Wann genau fand dieser Übergang statt? Immerhin umfasst das Proterozoikum knapp 1,8 Milliarden Jahre.

Vielleicht lässt sich diese Frage durch Funde im afrikanischen Schiefergestein Gabuns nun klären. Dort fand Abderrazak El Albani von der Universität de Poitiers in Frankreich Fossilien, die er auf ein Alter von rund 2,1 Milliarden Jahre datieren konnte. Sie stammen demnach aus dem frühen Proterozoikum. Die bis zu zwölf Zentimeter großen, vermutlich Kolonien bildenden Makrofossilien wirken im Gestein recht unscheinbar. Eine Untersuchung mit der hochauflösenden Röntgen-tomografie offenbarte jedoch einen für Vielzeller typischen, strukturierten Aufbau.

Es gab zwar auch bisher schon Fossilfunde aus dem mittleren Proterozoikum, die manche als Überreste vielzelliger Organismen von vor einer Milliarde Jahren deuteten. Sie waren jedoch zu unspezifisch und vieldeutig, um als echte Beweise zu gelten, und blieben deshalb umstritten.

Nature, Bd. 466, S. 100

HERZ-KREISLAUF-ERKRANKUNGEN

Risikofaktor kleine Statur

■ Schon seit fast 60 Jahren gibt es medizinische Veröffentlichungen über mögliche Zusammenhänge zwischen der Körpergröße und dem Risiko, an einer Erkrankung des Herz-Kreislauf-Systems zu sterben – mit widersprüchlichen Ergebnissen. In einer Metaanalyse sichtete Tuula Paaajanen vom Institut für forensische Medizin an der Universität Tampere (Finnland) dieses Material deshalb nun kritisch. Aus rund 1900 Untersuchungen wählten die Forscherin und ihre Mitarbeiter 52 aus, in denen Menschen, die im Mittel kleiner als 160 Zentimeter waren, mit solchen verglichen wurden, die durchschnittlich mehr als 174 Zentimeter maßen. Insgesamt umfasste die Analyse über drei Millionen Krankengeschichten.



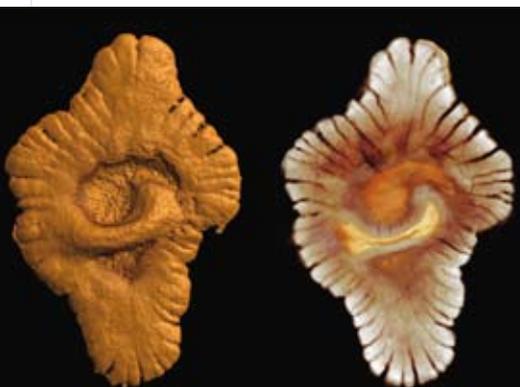
LANDESMUSEUM FÜR KUNST UND KULTURGESCHICHTE OLDENBURG / INV.NR. LMO.17.003

Ausnahme von der Regel: Trotz des enormen Größenunterschieds wurden die Komiker Pat & Patachon fast gleich alt.

Die sorgfältige Auswertung all dieser Daten lieferte ein klares Ergebnis: Das Risiko einer Erkrankung des Herz-Kreislauf-Systems mit tödlichem Ausgang ist bei kleinen Menschen etwa eineinhalbmal so hoch wie bei großen. Das gilt besonders für die generell etwas kürzer geratenen Frauen, wenn man die Daten nach den Geschlechtern aufteilt. Während stämmige Männer ein um 37 Prozent erhöhtes Sterberisiko aufweisen, liegt die Wahrscheinlichkeit von kleinen Frauen, einer Herz-Kreislauf-Erkrankung zum Opfer zu fallen, sogar um 55 Prozent höher.

Warum dieser Zusammenhang existiert, kann Paaajanen nur vermuten: »Wir glauben, dass kleinere Menschen engere Gefäße haben, die sich bei Risikopatienten schneller verschließen.«

European Heart Journal, Bd. 31, ehq155



ABDERRAZAK EL ALBANI UND ARNAUD MAZURIER, UNIVERSITÉ DE POITIERS

Mittels Mikrotomografie ließen sich die äußeren (links) und inneren (rechts) Strukturen nun entdecken fossiler Vielzeller am Computer rekonstruieren.

Wundersames Wesen der Tiefsee



Prachtvoll wie eine Orchidee präsentierte sich dieser rund zehn Zentimeter lange, bisher unbekannte Wurm den Kameras eines ferngesteuerten Tauchboots am Mittelatlantischen Rücken in 2300 Meter Meerestiefe. Ein Forscherteam unter britischer Leitung entdeckte ihn bei einer Expedition mit dem Forschungsschiff »James Cook«. Diese fand im Rahmen des großen internationalen Projekts »Census of Marine Life« statt, das sich seit zehn Jahren um eine Bestandsaufnahme der Organismenvielfalt in den Meeren bemüht. Anfang Oktober soll der Katalog der dokumentierten Tierarten – mit voraussichtlich 230 000 Einträgen – der Öffentlichkeit vorgestellt werden. Das abgebildete Tiefseewesen gehört zur Klasse der Eichelwürmer. Auffällig ist die – hier besonders üppige – Kragenregion, an deren Oberseite sich die Mundöffnung befindet. Die Tiere ernähren sich von Sediment, dessen organische Anteile sie verwerten, während sie den Rest durch den After am Ende des lang gestreckten Hinterleibs ausscheiden.

ROBOTIK  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Molekulare Spinne auf dem Vormarsch

Gezielt hergestellte Strukturen aus der Erbsubstanz DNA sind zu einer Spielwiese für Nanotechnologen geworden. Jetzt konnten US-Forscher eine molekulare Spinne auf einer vorgezeichneten Route über ein »DNA-Origami« krabbeln lassen.

Von Robert Gast

Die Raumschiffe der Immunsystem-Taskforce verbreiten Angst und Schrecken unter den Viren. Die Gleiter setzen in der Sekunde tausende Antikörper frei, die mit kleinen Gruppen von Eindringlingen kurzen Prozess machen. Wenn hingegen größere Gefahr für den menschlichen Körper droht, ruft die mobile Einsatztruppe Unterstützung herbei. Dann geht die Knüppel schwingende Polizeieinheit der weißen Blutkörperchen gegen die Angreifer vor.

Mit solch drastischen Bildern wollte die Zeichentricksendung »Es war einmal das Leben« aus den 1980er Jahren Kindern die Funktionsweise des menschlichen Körpers nahebringen. Heute schickt sich die noch junge Wissenschaftsdisziplin der Nanotechnologie an, die Fantasien von einst in die Realität umzusetzen. In erster Linie braucht sie dafür autonom auf ihre Umgebung reagierende Nanoroboter. In unserer makroskopischen Welt gibt es mittlerweile tier- oder menschenähnliche Maschinen, die sich dank hochkomplizierter Computersteuerung in ihrer Umwelt einigermaßen situationsgerecht verhalten. Doch was, wenn der Roboter so klein ist, dass in seinem Inneren kein programmierbarer Mikrochip Platz findet? Wie verleiht man ihm dann die Fähigkeit, autonom in seinem Umfeld zu agieren?

Mehrere amerikanische Forscherteams von der Columbia University, der Arizo-

na State University, der University of Michigan und dem California Institute of Technology (Caltech) haben nun gemeinsam eine Möglichkeit gefunden, einem Nanoroboter immerhin schon einmal elementare Aktionen wie »gehe geradeaus«, »gehe um eine Kurve« oder »halte an« beizubringen. Die Programmierung ihrer »molekularen Spinne« gelang den Forschern um Milan Stojanovic von der New Yorker Columbia University durch einen Trick: Statt die Kommandos im Inneren des Tierchens zu speichern, schrieben sie die Handlungsanweisungen in die Umgebung, durch die es sich bewegt.

Dabei nutzten sie grundlegende Eigenschaften des Erbmoleküls DNA. In der Natur besteht dieses aus zwei zu einer Doppelhelix verdrehten Strängen, auf deren Innenseite jeweils die vier Basen Adenin, Guanin, Thymin und Cytosin angeordnet sind. Wechselwirkungen zwischen diesen Basen halten die doppelte Wendeltreppe zusammen. Dabei gelten allerdings strenge Regeln: Zu Paaren vereinigen sich nur Adenin und Thymin sowie Guanin und Cytosin. Damit sich ein DNA-Strang mit einem zweiten zur Doppelhelix zusammenlagert, muss dessen Basensequenz also entsprechend komplementär sein.

Die US-Forscher machten sich weiter zu Nutze, dass seit 1994 etliche so genannte Desoxyribozyme entdeckt wurden: kurze einzelsträngige DNA-Moleküle, die als Enzyme wirken. Einige können zum Beispiel DNA-Stränge, mit denen sie sich zur Doppelhelix paaren, in

der Mitte durchschneiden, wenn dort ein RNA-Baustein sitzt (der sich von den DNA-Komponenten nur durch ein zusätzliches Sauerstoffatom unterscheidet). Aus solchen, etwa 30 Basen langen Desoxyribozymen konstruierten die Wissenschaftler drei Beine ihrer molekularen Spinne, deren etwa vier Nanometer großer Körper aus dem Protein Streptavidin bestand.

Eine passende Unterlage für die Gehversuche des Tierchens erzeugten Stojanovic und seine Kollegen mit Hilfe der DNA-Origami-Technik, die Paul Rothemund vom Caltech 2006 erfunden hat. Damit lassen sich DNA-Stränge zu beliebigen Formen zusammenlegen, etwa zu einem Smiley oder einem Modell des

Ein spinnenartiger Nanoroboter aus dem Protein Streptavidin (blau) mit drei Beinen, die aus DNA-Enzymen bestehen (grün), krabbelt zielstrebig über eine Fläche aus gefalteten DNA-Strängen. Geleitet wird er dabei von einem Muster aus DNA-Fäden, die wie Grashalme aus der Unterlage emporragen. Sie bringen die Spinnenbeine dazu, sich an sie zu heften, werden von diesen aber abgeschnitten. So verhält sich der Nanoroboter wie ein Rasenmäher, der einem Grasstreifen automatisch folgt, während er ihn abrasiert. Für die 90 Nanometer lange Strecke brauchte er eine halbe Stunde. Schließlich wurde er von schnittfesten Stopp-Strängen (rot) angehalten. In dieser Schemazeichnung nicht zu sehen: Die Spinne lief auch um die Kurve.

amerikanischen Kontinents (Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 10). In diesem Fall begnügten sich die US-Forscher mit einem schlichten, 65 mal 90 Nanometer messenden Teppich. Darauf brachten sie, um den Gehweg der Spinne vorzuzeichnen, ein Streifenmuster aus losen DNA-Fäden an, die aus der Unterlage herausragten wie stehen gebliebene Grashalme auf einer frisch gemähten Wiese.

Ein autonomer Rasenmäher

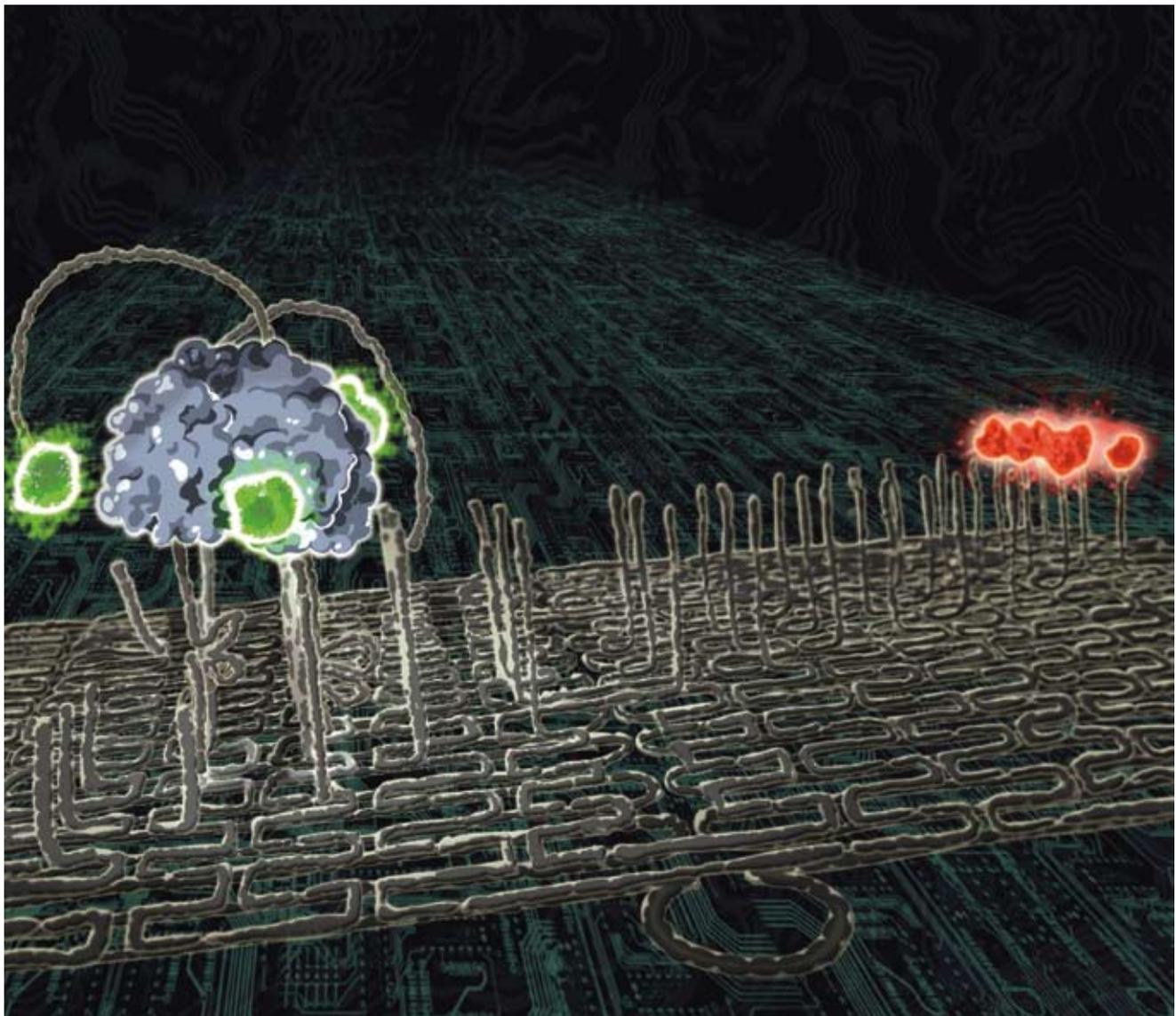
In ihrer Basensequenz waren die Fäden komplementär zu den drei Spinnenbeinen, so dass sie diesen die Gelegenheit boten, sich mit ihnen zu einer Doppelhelix zu verbinden. Außerdem enthielten sie aber einen RNA-Baustein in der Mitte. Sobald sich ein Spinnenbein angelagert hatte, schnitt es den Faden deshalb

auf halber Höhe durch. Derart verkürzt, bot der »Grashalm« nicht mehr genügend Halt. Das Spinnenbein löste sich folglich von ihm ab und klammerte sich an den nächsten intakten Faden, den es allerdings auch sogleich wieder kappte und so weiter. Auf diese Weise wirkte der Nanoroboter wie ein Rasenmäher, der einem Grasstreifen automatisch folgt, während er ihn abrasiert. Wo die drei Halme breite Bahn ihre Richtung änderte, bog auch die Spinne ab.

Ein Stoppschild konnten die Forscher ebenfalls leicht realisieren. Es besteht einfach aus Fäden, denen das RNA-Element fehlt. Sobald sich die Spinnenbeine an sie heften, bleiben sie dauerhaft daran hängen, weil sie diese Stränge nicht zerschneiden können. Und schon hält das Nanotierchen an.

Ähnlich funktionierte das Startsignal. Als viertes Bein verfügte die Spinne über einen nicht enzymatisch aktiven DNA-Strang, dessen Basensequenz komplementär zu einem am Anfang der Strecke angebrachten Faden war. Durch Zugabe einer Lösung aus Zinkionen, welche die Aufspaltung der Doppelhelix begünstigen, und von losen DNA-Stücken, deren Basenfolge ebenfalls komplementär zu der des vierten Spinnenbeins war, ließ sich dieses ablösen: Die Spinne machte sich auf den Weg über die Substratstrecke.

Schnappschüsse von der Wanderung des Nanokrabblers über das Origami gelangen mit einem Rasterkraftmikroskop. Mit Hilfe der Einzelmolekül-Fluoreszenz-Mikroskopie, bei der die Spinne sowie der Stoppunkt leuchtende Cy-



PAUL MICHELOTTI, UNIVERSITY OF MICHIGAN

ninmoleküle trugen, ließ sich die Bewegung des Tierchens sogar in Echtzeit verfolgen. All diese Aufnahmen zeigten, dass der Nanoroboter die vorgegebene, etwa 90 Nanometer lange Strecke komplett durchmaß und etwa eine halbe Stunde dafür benötigte.

Das Besondere sei jedoch nicht der weite Weg, den die Spinne zurücklegte, betont der am Experiment beteiligte Erik Winfree, Associate Professor für Informatik, neuronale Systeme und Bioingenieurswesen am Caltech. »Das Aufregende ist, dass wir ihr aufgeben können, einen bestimmten Kurs zu laufen, und sie tut es ganz von allein – völlig autonom.«

»Der nächste Schritt besteht darin, einen zweiten Läufer hinzuzufügen, so dass beide unmittelbar miteinander und mit der Umgebung kommunizieren können«, meint derzeit Stojanovic. »Die Spinnen könnten dann zusammenarbeiten, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen.« Doch zugleich warnt der Forscher vor zu hohen Erwartungen: Trotz des jüngsten Erfolgs sei der Weg zu medizinisch einsetzbaren Nanorobotern, die etwa Arzneimittel zu den Rezeptoren einer Zelle transportieren und dort freigeben, noch sehr weit.

Einen anderen wichtigen Fortschritt erreichte eine Forschergruppe um Hong-

zhou Gu von der New York University. Sie brachte einen Nanoroboter dazu, eine Fracht zu transportieren. Obwohl der Lastträger dabei auf periodische, externe Kommandos angewiesen war, lässt sich diese molekulare Fertigungsstraße eines Tages vielleicht zu einer molekularen Fabrik ausbauen. Insgesamt sind nach den jüngsten Versuchen handlungsfähige Nanohelfer jedenfalls ein Stück nähergerückt. Man darf gespannt sein, welche Kunststücke sie als Nächstes vollbringen werden.

Robert Gast ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist.

GEOWISSENSCHAFTEN

Neues zum Ursprung der Karibik

In der Karibik gab es einst viel mehr Inseln als heute. Außerdem scheint ein gemeinlich als Festlandssockel gedeutetes submarines Plateau aus demselben Flutbasalt zu bestehen wie der Meeresgrund der karibischen See. Das ergab eine sechswöchige Expedition in die Region.

Von Martin Meschede,
Peter Baumgartner und Reinhard Werner

Die Karibik ist nicht nur ein traumhaftes Urlaubsziel, sondern auch eine attraktive Untersuchungsregion für Geowissenschaftler. So gibt die Herkunft der Karibischen Platte – des Blocks aus Erdkruste und starrer oberster Mantelschicht, der an dieser Stelle die Erdschale bildet – noch immer Rätsel auf. Zwei rivalisierende Theorien werden diskutiert.

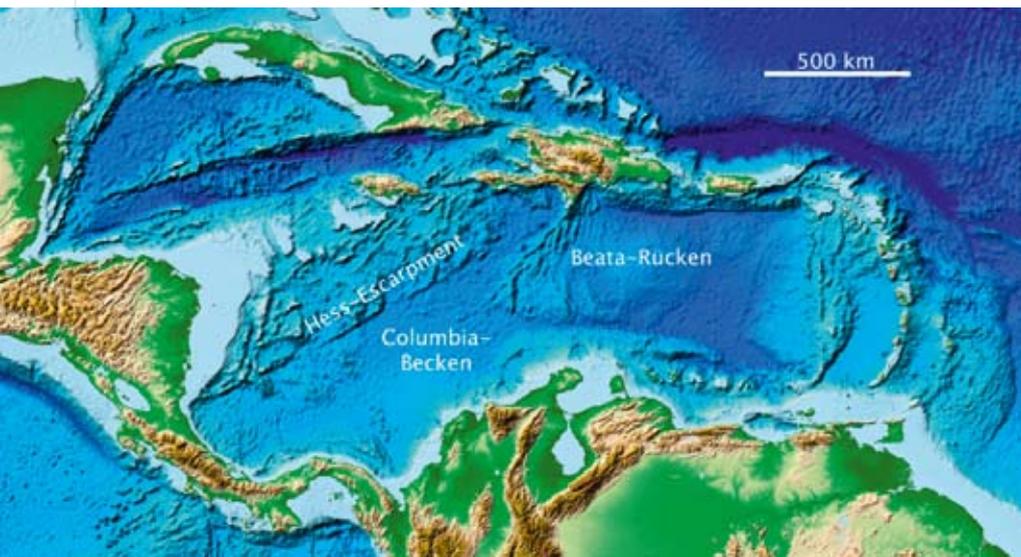
Nach der einen handelt es sich großenteils um einen Fremdkörper, der aus dem Pazifik stammt und sich zwischen Nord- und Südamerika geschoben hat. Nach der anderen ist die Karibische Platte nur wenig östlich von ihrer heutigen Position im Atlantik entstanden.

Einen Beitrag zur Klärung dieser Frage wollten wir leisten, als wir zusammen mit unseren Kollegen Kaj Hoernle, Doris Maicher, Heiko Hüneke und Udo Barckhausen im März für sechs Wochen

mit dem Forschungsschiff »Meteor« in die karibische See aufbrachen. Vor allem interessierten wir uns für die große submarine Flutbasaltdecke, die *Caribbean Large Igneous Province* (CLIP), die dort einen großen Teil des Meeresbodens bedeckt.

Derartige Formationen sind allein schon deshalb von erheblichem Interesse, weil sie Relikte der gewaltigsten vulkanischen Ereignisse auf der Erde darstellen, in deren Verlauf Lavaströme riesige Gebiete überfluteten. Bei solch verheerenden Ausbrüchen gelangten Unmengen an klimawirksamen Gasen wie Kohlendioxid in die Atmosphäre. Sofern die Eruptionen am Meeresgrund stattfanden, änderten sie auch die chemische Zusammensetzung des Meerwassers sowie die Meeresströmungen.

Ziel der Expedition der Autoren mit dem Forschungsschiff »Meteor« in die Karibik waren der Beata-Rücken, der sich von der Insel Hispaniola aus etwa 600 Kilometer in südwestlicher Richtung erstreckt, sowie das Hess-Escarpment, eine bis zu mehrere tausend Meter hohe Steilstufe, die sich über eine Distanz von 1000 Kilometern in der westlichen Karibik verfolgen lässt.



C. AMANTE UND B.W. EAKINS, ETOP01, NOAA TECHNICAL MEMORANDUM NMFS 118, 19. MÄRZ 2009

Flutbasalte könnten deshalb für einige der größten Katastrophen in der Erdgeschichte verantwortlich sein, als in kürzester Zeit jeweils ein großer Teil der biologischen Arten ausstarb. Möglicherweise spielten sie auch eine bedeutende Rolle beim Auseinanderbrechen von Kontinenten.

Weil die karibische Flutbasaltdecke überwiegend unter Wasser liegt, ist noch wenig über sie bekannt. Selbst ihre Ausdehnung steht nicht fest. Diese Wissenslücke wollten wir schließen helfen. Von Erkenntnissen über Umfang, chemische Zusammensetzung und Entstehungsort der CLIP-Basalte erhofften wir uns aber auch nähere Auskünfte über die Herkunft der Karibischen Platte, die zu großen Teilen davon bedeckt ist.

Unsere Forschungsfahrt konzentrierte sich auf zwei Regionen: den untermeerischen Beata-Rücken, der sich von der Insel Hispaniola aus etwa 600 Kilometer in südwestlicher Richtung erstreckt, sowie das Hess-Escarpment, eine bis zu mehrere tausend Meter hohe Steilstufe, die sich über eine Distanz von 1000 Kilometern in der westlichen Karibik verfolgen lässt (Karte links unten).

In beiden Gebieten sammelten wir Gesteinsproben vom Meeresgrund. Außerdem nahmen wir im Columbia-Bekken, das im Süden an die zwei Strukturen grenzt, ausgedehnte magnetische Profile auf. Von ihnen erwarteten wir zusätzliche Informationen über die Entstehungsgeschichte der Region. Beim Erstarren von Lava wird das momentane lokale Erdmagnetfeld im Basalt eingefroren. Der Magnetismus eines Gesteinsblocks kann deshalb in gewissem Umfang Auskunft über seine ehemalige Orientierung in Nord-Süd-Richtung sowie über die geografische Breite seiner Ursprungsregion geben. Wegen der wiederholten Umpolungen des Erdmagnetfelds lässt sich unter Umständen auch auf das Alter zurückschließen.

Während der Fahrten zwischen den Probennahmestationen und entlang der Magnetikprofile führten wir außerdem Tiefenmessungen mit dem Fächerecholot durch. Das Instrument erlaubt, einen mehrere Kilometer breiten Meeresbodenstreifen mit allen topografischen Details sehr genau zu kartieren.

Hier erlebten wir unsere erste Überraschung. Die vorhandenen Meeresbodenkarten für die Karibik fußen auf satellitenaltimetrischen Daten, die jedoch oft



sehr ungenau sind. Manche darauf verzeichneten Berge und Täler gibt es, wie sich zeigte, überhaupt nicht. Umgekehrt erwiesen sich einige Bereiche, die in den Karten relativ eben erscheinen, als gebirgig und stark zerklüftet.

Im ersten Abschnitt der Forschungsfahrt untersuchten wir den Beata-Rücken. Dabei setzten wir einen Tauchroboter ein: das »ROV Kiel 6000« (Bild oben). Er liefert nicht nur Fotos vom Meeresboden, sondern erlaubt auch, in Wassertiefen bis 6000 Meter gezielt Gesteinsproben zu entnehmen. Ein achtköpfiges Spezialistenteam bedient das Hightechgerät vom Schiff aus.

Der Meeresgrund lag vielleicht weniger tief

Die Sondierung des Meeresgrunds mit dem Tauchroboter offenbarte eine überraschend vielgestaltige Unterwasserlandschaft. Da waren nicht nur die erwarteten Kissenlaven, zu denen austretendes dünnflüssiges Magma unter Wasser erstarrt, sondern auch zerbrochenes Vulkangestein sowie steil gestellte oder gefaltete Sedimentlagen. Sie deuten auf geologische Aktivität hin, welche die ursprünglichen Schichten nachträglich verformte oder kippte und abrutschen ließ.

Noch interessanter waren zwei spezielle Proben, die der Roboter heraufbrachte. Es handelte sich um akkretionäre Lapilli, die aus einem Gesteinskern bestehen, der von feinkörniger Asche ummantelt ist. Solche Gebilde entstehen nicht im Wasser, sondern nur unter freiem Himmel, wenn ein Vulkan bei einem ex-

Der Tauchroboter »ROV Kiel 6000«, der bei der Untersuchung des Beata-Rückens zum Einsatz kam, liefert nicht nur Bilder vom Meeresboden, sondern erlaubt auch, in Wassertiefen bis 6000 Meter gezielt Gesteinsproben zu entnehmen. Hier wird er gerade zu Wasser gelassen.

plosiven Ausbruch kleinteiliges Material ausschleudert. Das Vorkommen solcher akkretionären Lapilli zeigt also, dass auf Teilen des Beata-Rückens einst Vulkane aktiv waren, die aus dem Wasser ragten. Demnach gab es in der Frühzeit der Karibik auch dort Inseln, wo heute keine mehr sind. Vielleicht lag der Meeresgrund insgesamt weniger tief.

Dafür spricht auch die Untersuchung einiger submariner Berge mit ungewöhnlich flachen Gipfelbereichen, die wir während des zweiten Fahrtabschnitts abseits des Beata-Rückens mit dem Fächerecholot kartierten. Von ihren Flanken sammelten wir Gesteinsproben. Dazu benutzten wir in diesem Fall eine Dredge. Das ist ein etwa zwei Meter großer Stahlkorb, der an einer mehrere Kilometer langen Trosse abgesenkt und ein kurzes Stück über den Meeresboden geschleift wird. Auf diese Weise lassen sich relativ schnell und kostengünstig Gesteine bergen, die in einem bisher unbekanntem Gebiet wertvolle Erkenntnisse über die Beschaffenheit des Meeresbodens liefern.

Von den Tiefseevulkanen brachte die Dredge unter anderem Korallenfragmente (siehe Bild S. 16), Seichtwasserschnecken und Rotalgenknollen herauf. Diese völlig

Auf diesem angeschnittenen Stück Kalkstein von einem submarinen Tafelberg in der Karibik ist ein fossiles, fingerförmiges Korallenfragment erkennbar. Solche Funde belegen, dass die Erhebungen, deren Gipfel heute 800 bis 1000 Meter unter dem Meeresspiegel liegen, einst Atolle oder Inseln waren.

unerwarteten Fundstücke belegen, dass die submarinen Tafelberge, deren Gipfel heute 800 bis 1000 Meter unter dem Meeresspiegel liegen, ehemals Atolle oder Inseln waren. Während sie langsam absanken, bildeten sich auf ihnen Korallenriffe, wie sie häufig in seichten tropischen Gewässern entstehen. Einige Zeit konnte das Wachstum dieser Riffe mit dem stetigen Absinken des Untergrundes mithalten. Dann jedoch starben sie ab und verschwanden allmählich in der Tiefe.

Das genaue Alter der Karbonatgesteine muss noch bestimmt werden, es lässt sich aber anhand einiger vorläufig identifizierter Fossilien wie Nummuliten, Discocyclinen und anderer Großforaminiferen auf die Zeit vor 23 bis 65 Millionen Jahren eingrenzen. Proben vom Fuß der Tiefseeberge haben ein höheres Alter. Kalke in sedimentären Spaltenfüllungen sind dagegen jünger und belegen das rasche Absinken der submarinen Tafelberge.

Diese Berge erheben sich auf viel größeren Plattformen, die heute ungefähr 1600 bis 1800 Meter unter dem Meeresspiegel liegen – deutlich über der Tiefseeebene in etwa 4000 Meter Wassertiefe. Sie sind das Ergebnis jener gewaltigen La-



PETER BAUMGARTNER

vafluten, die vermutlich in der mittleren Kreidezeit – vor etwa 90 Millionen Jahren – austraten und den Boden großer Teile der damaligen karibischen See mit einer mächtigen Basaltschicht bedeckten.

Wie weit reichen diese CLIP-Basalte? Offenbar weiter als bisher angenommen. Dafür sprechen Proben, die wir von dem Hochplateau nördlich des Hess-Escarps gewannen. Nach Ansicht mancher Geowissenschaftler soll dieses Plateau aus Schollen kontinentaler Kruste bestehen. Wir fanden jedoch keinerlei Hinweise darauf. Die heraufgeholtten Gesteine waren vielmehr überwiegend basaltische Laven, die möglicherweise mit der CLIP in Verbindung stehen. In diesem Fall würden sich die Flutbasalte praktisch über die gesamte Karibik erstrecken. Ob sich ein so großer Krustenblock zwischen Nord- und Südamerika hindurchzwängen konnte, muss dann sicher erneut diskutiert werden.

Die Auswertung der zahlreichen gesammelten Proben und Daten läuft gerade erst an. Ein Hauptziel ist es, den Zeitraum einzugrenzen, in dem die Lavaströme der karibischen Flutbasalte austraten. War es ein singuläres Ereignis oder gab es mehrere aufeinander folgende Perioden vulkanischer Aktivität? Wenn wir darauf eine Antwort erhalten haben, ergeben sich womöglich auch weiter reichende Schlussfolgerungen, die das alte Rätsel, woher die Karibische Platte stammt, einer Lösung näher bringen.

Martin Meschede ist Professor für Regionale und Strukturgeologie und Leiter des Instituts für Geografie und Geologie der Universität Greifswald. **Peter Baumgartner** ist Professor für Mikropaläontologie an der Universität de Lausanne (Schweiz), wo er das Institut für Geologie und Paläontologie leitet. **Reinhard Werner** ist promovierter Geologe und im Forschungsbereich »Dynamik des Meeresbodens« am IFM Geomar in Kiel tätig.

NANOTECHNOLOGIE 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Eine Antenne für die Nanowelt

Forscher habe eine winzige Version der bekannten Dachantenne erzeugt. Wegen ihrer Abmessungen empfängt und sendet sie Wellen allerdings nicht im Radio-, sondern im sichtbaren Spektralbereich. Damit könnte sie als Nano-Spotlight dienen.

Von Stefan A. Maier

Auf kleinstem Raum spielt die Physik oft scheinbar verrückt und widerspricht unserem vom Alltag geprägten gesunden Menschenverstand. Statt der newtonschen Gesetze gelten die teils paradoxen Regeln der Quantenmecha-

nik: Teilchen verhalten sich auf einmal wie Wellen, und alles ist, wie Werner Heisenberg feststellte, irgendwie unscharf. Da freut man sich umso mehr, wenn ab und zu eben doch etwas genauso funktioniert, wie man es aus dem Physikunterricht in der Schule kennt. Forscher der Universität Hiroshima in

Japan haben nun ein besonders schönes Beispiel für diesen Glücksfall vorgestellt: eine auf winzige Dimensionen geschrumpfte Fernsehantenne (*Nature Photonics*, Bd. 4, S. 312).

Auch im Zeitalter von Kabel- und Satellitenfernsehen hat wohl jeder schon einmal eine herkömmliche Dachanten-

ne gesehen, die in vielen beliebten Urlaubsländern ja noch gang und gäbe ist. Sie stammt übrigens auch aus Japan, und trägt nach ihren Erfindern den klangvollen Namen Yagi-Uda-Antenne. Ihr Prinzip ist bestechend einfach, besteht sie doch aus nichts anderem als einer parallelen Anordnung von Metallstäben.

Um ihre Funktionsweise zu verstehen, müssen wir nur kurz die Werkzeugkiste der Elektrotechnik öffnen. Ein einzelner Metallstab kann eine Radiowelle besonders gut empfangen, wenn er ungefähr halb so lang ist wie deren Wellenlänge. Er befindet sich dann nämlich in einer so genannten Resonanz mit ihr, was besonders starke elektrische Ströme in ihm auslöst, die zur Weiterverarbeitung abgeleitet werden können.

Ein einzelner Metallstab reicht für einen guten Empfang aber in der Regel nicht aus, weil er für Wellen aus allen Richtungen gleich empfindlich ist. Von natürlichen Quellen ausgehende Störstrahlen können deshalb den Empfang beeinträchtigen. Deshalb sollten möglichst nur aus Richtung des Senders kommende Wellen empfangen werden. Zu diesem Zweck befindet sich hinter dem Resonanzstab ein etwas längerer Reflektor, während vor ihm eine Serie von kürzeren so genannten Direktoren angebracht ist.

Richtungseffekt durch Interferenz

Bei einer derartigen Anordnung erzeugen nur Wellen aus Richtung der Direktoren einen starken Strom im Resonanzstab. Warum das so ist, lässt sich am besten verstehen, wenn man sich daran erinnert, dass eine Antenne nicht nur als Empfänger, sondern auch als Sender dienen kann. Bei Anregung des Resonanzstabs mit einem Wechselstrom strahlt sie nämlich ihrerseits Wellen ab. Von diesen werden Reflektor und Direktoren zu elektromagnetischen Schwingungen angeregt, so dass sie gleichfalls zu strahlen beginnen. Alle so ausgesandten Wellen überlagern sich nun, wobei sie sich in gewissen Richtungen auslöschen und in anderen verstärken. Durch genaue Anpassungen der Länge sowie des Abstands der Stäbe lässt sich erreichen, dass eine konstruktive Überlagerung mit gegenseitiger Verstärkung nur in Vorwärtsrichtung stattfindet – ein typisches Beispiel von Interferenz.

Die von Holger Hofmann geleitete japanische Forschergruppe hat jetzt mittels Elektronenstrahlithografie eine winzige Version einer derartigen Antenne auf einem Glasplättchen hergestellt. Sie besteht aus fünf kleinen Goldstäbchen mit Abmessungen unterhalb von 100 Nanometern: einem Reflektor, dem Resonator und drei Direktoren (Bild unten). Die Länge des Resonanzstabs wählten die Forscher so, dass er bevorzugt rotes Licht abstrahlt.

Zuvor schon hatten Computersimulationen die prinzipielle Funktionsfähigkeit einer solchen Nanoantenne erwiesen. Allerdings wollten die Wissenschaftler sie in erster Linie als Sender benutzen. Und das warf ein Problem auf: Wie ließe sich der Resonanzstab zu Schwingungen anregen? Eine elektrische Kontaktierung wäre bei den kleinen Abmessungen extrem schwierig, doch selbst wenn sie gelingen sollte, würde das nichts nutzen; denn so schnell wie Lichtwellen schwingt kein Wechselstrom. Eine naheliegende Lösung bestünde darin, die Antenne einfach mit rotem Licht zu bestrahlen. Aber dann würden alle Stäbchen gleichzeitig zu schwingen beginnen und nicht nur der Resonator – der Richtungseffekt wäre dahin.

Doch die Forscher fanden einen trickreichen Ausweg: Sie drehten den Resonanzstab um 45 Grad. Anschließend badeten sie die ganze Antenne unter einem Mikroskop in einem roten Laserstrahl. Dieser war allerdings längs der Antennenachse polarisiert: Seine elektrischen Felder schwangen nur in dieser Richtung hin und her.

Für eine Yagi-Uda Antenne ist dies genau die falsche Orientierung; bei ihr müssen die Felder parallel zu den Stäben ausgerichtet sein, um diese in Schwingungen zu versetzen. Der Laserstrahl hatte auf die Direktoren und den Reflektor also keinerlei Einfluss.

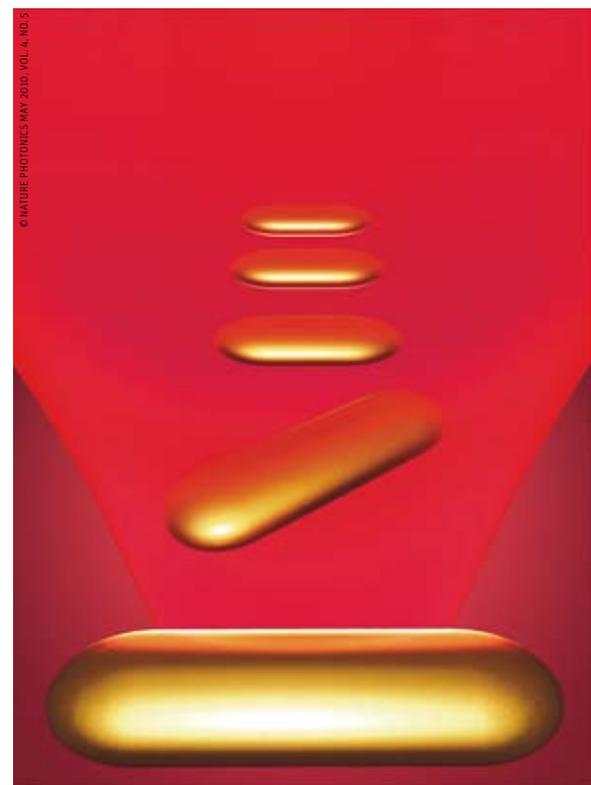
Das verdrehte Resonatorstäbchen dagegen wurde, da es nicht senkrecht, sondern nur schräg zur Polarisationsrichtung des Laserstrahls stand, sehr wohl zu elektromagnetischen Schwingungen

Eine Anordnung von fünf etwa 100 Nanometer langen Goldstäben funktioniert wie eine Fernsehantenne. Wegen ihrer winzigen Dimensionen sendet sie bei Anregung allerdings keine Funkwellen aus, sondern einen gebündelten Strahl roten Lichts.

angeregt. Als Reaktion begann es selbst Wellen abzustrahlen, die sich als Überlagerung zweier Teilwellen auffassen ließen. Die eine war in derselben Richtung polarisiert wie der ursprüngliche Laserstrahl, die andere dagegen senkrecht dazu – und damit genau parallel zur Längsrichtung der restlichen Stäbchen. Diese Teilwelle sollte deshalb wegen der oben geschilderten Interferenzeffekte als scharf gebündelter Strahl ausgesandt werden – im Gegensatz zur anderen, von der zu erwarten war, dass sie sich in alle Raumrichtungen ausbreiten würde und in jeder einzelnen nur eine geringe Intensität hätte.

Bündelung der Strahlung molekularer Lichtquellen

Um die Funktionsfähigkeit ihrer Nanoantenne zu beweisen, mussten die Forscher also lediglich die Winkelabhängigkeit der abgegebenen Strahlung messen. Dazu bedurfte es nicht viel mehr als einen Lichtdetektor, um die Nanoantenne rotieren zu lassen. Wie sich zeigte, funktionierte diese tatsächlich genauso wie ihr großer Bruder auf dem Dach: Während der Resonanzstab allein ein fast symmetrisches Strahlungsprofil aufwies, strahlte die Nanoantenne praktisch nur in Vorwärtsrichtung.



Nach Ansicht der Forscher könnte das Gerät daher schon bald eine große Rolle in der Nanotechnologie spielen. Mit solchen Antennen ließe sich die Strahlung von diffusen winzigen Lichtquellen in eine gewünschte Richtung lenken und dadurch bündeln. Das sollte den Nachweis dieser Strahlung und da-

mit beispielsweise die Identifizierung von Licht aussendenden Molekülen in der Biomedizin erleichtern. Zugleich wäre es für die Konstruktion von Quantencomputern sehr vorteilhaft.

Somit ist die gute alte Fernsehantenne wohl doch nicht dem Untergang geweiht, sondern nimmt in extrem ver-

kleinerter Form vielleicht schon bald in Forschungslabors ihre Arbeit auf – bevor sie womöglich eines Tages unerkannt auch wieder irgendwo in einem Alltagsgerät steckt.

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

SINNESPHYSIOLOGIE

Rezeptoren für jeden Geschmack

Vor zehn Jahren identifizierten Forscher die erste molekulare Antenne des Geschmackssinns. Erkenntnisse darüber, wie wir Salziges schmecken, komplettieren jetzt das Bild.

Von Michael Groß

Unser Geschmackssinn unterscheidet fünf Gruppen von Substanzen: süße, saure, salzige, bittere und solche für das fleischig-herzhafte Aroma umami. Grundlage ist jeweils ein molekularer Erkennungsprozess beim Kontakt zwischen der Nahrung und den Geschmacksknospen in Zunge und Gaumen. Erstaunlicherweise lagen die Einzelheiten dieses Vorgangs noch bis vor zehn Jahren völlig im Dunkeln.

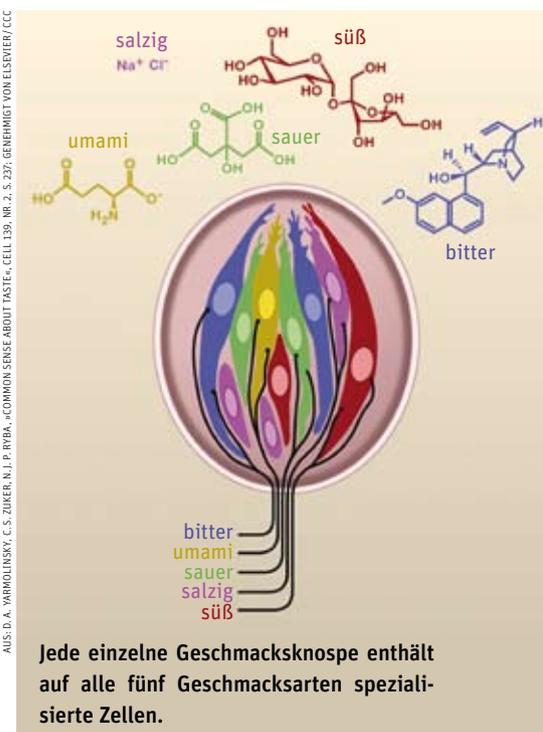
Erst zur Jahrtausendwende identifizierten die Arbeitsgruppen von Charles Zuker an der University of California in San Diego und Nicholas Ryba am National Institute of Dental and Craniofacial Research in Bethesda (Maryland) einen Rezeptor für bitteren Geschmack (Spektrum der Wissenschaft 7/2000, S. 16). Er ist in der Zellmembran angesiedelt und kommuniziert mit so genannten G-Proteinen, die auch bei der visuellen Wahrnehmung und beim Geruchssinn eine zentrale Rolle spielen.

Ähnliche G-Protein-gekoppelte Rezeptoren konnten Zuker, Ryba und Kollegen in den Jahren 2001 bis 2003 auch für die Geschmacksempfindungen süß und umami identifizieren. Damit waren die einfachen Fälle geklärt, in denen spezielle organische Moleküle wie Chinin, Glukose oder Glutamat als Reizauslöser wirken. Saure und salzige Lebensmittel enthalten dagegen große Mengen an Wasserstoff- beziehungsweise Natriumionen, die im Organismus allgegenwärtig sind. Die betreffenden Rezeptoren zu finden, erwies sich deshalb als schwieriger.

Man vermutete, dass es sich – da die Suche nach weiteren G-Protein-gekoppelten Rezeptoren erfolglos blieb – um Ionenkanäle handeln könnte: Proteine in der Zellmembran, die darauf spezialisiert sind, gewisse Arten von Ionen durchzulassen. Verschiedene Arbeitsgruppen konnten dann 2006 nachweisen, dass der Ionenkanal PKD2L1 in Zellen vorkommt, die sauren Geschmack wahrnehmen, und dass diese Geschmacksempfindung verschwindet, wenn er blockiert wird. Wie der Ionenkanal das saure Geschmacksempfinden im Einzelnen auslöst ist allerdings noch unklar. Völlig offen blieb zunächst die Frage, wie wir Salziges schmecken.

Schal oder versalzen?

Was die Suche nach der Antwort in diesem Fall zusätzlich erschwerte, war der Umstand, dass es zwei natürliche Reaktionen auf Salz gibt. In geringen Konzentrationen nehmen wir es als schmackhaft wahr und konsumieren es deshalb auch leicht in zu großen Mengen, was ein medizinisch relevantes Problem ist. Hohe Salzkonzentrationen wirken bei Mensch und Maus hingegen abstoßend, besonders wenn beide durstig sind. Diese negative Reaktion ist physiologisch offenbar völlig unabhängig von der Vorliebe für leicht salzige Nahrung. Sie beschränkt sich nämlich nicht auf Natriumionen, sondern funktioniert genauso mit anderen Salzen wie Kaliumchlorid. Außerdem wird sie nicht von dem Hemmstoff Amilorid blockiert, der die positive Reaktion auf Salz komplett ausschalten kann.



Jede einzelne Geschmacksknospe enthält auf alle fünf Geschmacksarten spezialisierte Zellen.

Ironischerweise ist schon seit 25 Jahren ein guter Kandidat für den Rezeptor bekannt, der den angenehmen Salzgeschmack vermittelt. Es handelt sich um den Epithelien-Natriumkanal EnaC. Dieser reagiert spezifisch auf Natriumionen und wird von Amilorid gehemmt. Beweisen ließ sich seine Rolle in der Geschmackswahrnehmung allerdings bisher nicht, weil EnaC offenbar auch andere, lebenswichtige Funktionen hat: Schaltet man ihn genetisch aus, wirkt das tödlich.

Jetzt konnten die Arbeitsgruppen von Zuker und Ryba diese Schwierigkeit umgehen, indem sie eine bedingte Hem-

mung des EnaC-Moleküls entwickelten, die nur in Geschmackszellen wirkt. In der Tat ließ sich auf diese Weise die positive Reaktion auf Natriumionen unterdrücken, während alle anderen Geschmacksempfindungen einschließlich der Aversion gegen versalzene Nahrung unverändert blieben (*Nature*, Bd. 464, S. 297).

Dank dieser Testmethode konnten die Forscher außerdem nachweisen, dass für die positive Salzreaktion eine darauf spezialisierte Gruppe von Zellen zuständig ist. Das gilt übrigens für alle fünf Geschmacksarten: Jede wird von einem eigenen Zelltyp vermittelt, der nur die dafür verantwortlichen Rezeptoren trägt. Allerdings können innerhalb einer Geschmacksknospe Zellen für verschiedene Geschmacksempfindungen vorkommen und auch direkt aneinandergrenzen (Bild links).

Damit bleibt zwar offen, wie die Aversion gegen versalzene Nahrung zu Stande kommt. Ansonsten aber ist nach zehn Jahren das Repertoire der molekularen Antennen für die fünf Geschmacksempfindungen und der zugehörigen Zellen komplettiert. Strukturbiologen mögen noch den Aufbau der einzelnen Rezeptoren und die genauen Mechanismen der jeweiligen molekularen Erkennung nachliefern. Doch Zuker und Kollegen wenden sich schon der nächsten großen Herausforderung zu: der Ergründung dessen, was nach der Erkennung des Geschmacksmoleküls passiert. Wie werden die Signale verarbeitet? Findet schon in der Geschmacksknospe eine Verrechnung und Interpretation statt oder geschieht das erst im Gehirn? Spannend erscheinen den Forschern auch Vergleiche mit dem Geschmackssinn von Insekten. Obwohl er unabhängig entstanden ist, ähnelt er in manchen Aspekten dem der Säugetiere.

Zwar ist die Erforschung des Geschmackssinns mit der Identifizierung des kompletten Sortiments von Rezeptoren und Zellen zu einem gewissen Abschluss gekommen, und vielleicht winkt für dieses schöne Stück Arbeit auch schon bald der Nobelpreis. Für ein tieferes Verständnis unserer Geschmackserlebnisse hingegen, zu denen ja auch Geruch, Anblick und assoziatives Gedächtnis beitragen, war es sicher nur ein erster Schritt.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

Springers Einwürfe

Wie tanzen die Quanten?

Ein Elektron kann sogar durch Abwesenheit glänzen.

Noch vor 100 Jahren hielten manche Physiker das Atom für eine fragwürdige Hypothese: »Ham's eins g'sehn?«, höhnte seinerzeit Ernst Mach. Dem Positivisten galten Atome als »denkökonomische« Konstrukte, die nur dazu taugten, dass die – von Physikern ohnedies etwas scheel angesehenen – Chemiker Ordnung in ihre Verbindungen bringen konnten.

Das scheint Äonen her zu sein. Das Rastertunnelmikroskop zeigt uns heute Festkörperoberflächen als körnige Struktur aus einzelnen Atomen. Genauer gesagt, es tastet deren Elektronenhüllen ab. Die Unschärfe der Elektronenwolken ist kein Mangel der Methode, sondern Folge der quantenmechanischen Unbestimmtheit. Die Wellenfunktion, welche die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Hüllenelektrons angibt, gilt als »verschmiert«. Das Elektron ist nun einmal kein klassisches Teilchen mit exakt definiertem Ort, sondern präsentiert sich je nach Versuchsaufbau als Schale um einen Atomkern oder als Kondensspur in der Nebelkammer.

Elektronenhüllen verändern sich, wenn Atome Verbindungen eingehen – oder wenn man ein Atom durch Raub eines Elektrons ionisiert. Solche Vorgänge finden in der Größenordnung von Attosekunden statt; das sind trillionstel Sekunden. Wieder könnte ein Ernst Mach spotten: Solche unvorstellbar schnellen Prozesse wird nie ein Mensch beobachten, also sind sie praktisch unreal.

Doch das Labor für Attosekundenphysik unter Ferenc Krausz am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching gibt es wirklich. Dort gelingen echte Momentaufnahmen der Elektronenbewegung, wobei als Blitzlicht Ultraviolett-Laserpulse von rund 100 Attosekunden Dauer dienen. Der neueste Coup einer Gruppe um Eleftherios Goulielmakis demonstriert das Pulsieren der Elektronenhülle eines Kryptonatoms, das ein etwas größerer Laserblitz soeben um ein Elektron dezimiert hat.

Allerdings ist das, was da unvorstellbar schnell zwischen Hantel- und Ellipsoidform oszilliert, doch ziemlich gespenstisch, jedenfalls im Alltagssinn nicht ganz real. Es handelt sich nämlich um die Wellenfunktion des wegionisierten Elektrons, also um den pulsierend verschmierten Ort des durch die Ionisierung erzeugten Lochs.

Dennoch vermittelt das Experiment, wenn auch um komplizierte Ecken, einen anschaulichen Eindruck von den rasend schnellen Veränderungen, die in den Elektronenhüllen vor sich gehen, wenn Atome ionisiert werden oder sich chemisch binden.

Für mich werfen solche bis vor Kurzem undenkbaren Einblicke in die Quantenwelt eine prinzipielle Frage auf. Nach der herrschenden Kopenhagener Deutung zerfällt die Welt säuberlich in zwei Domänen. In der einen, die den Versuchsaufbau beschreibt, soll die klassische Physik gelten. Die Quantenmechanik sei nur für die zweite Domäne zuständig – für die Atome und Elektronen, die man gerade untersucht.

Das war zu der Zeit, als die Kopenhagener Deutung entstand, eine naheliegende Beschreibung: Große Apparate wie Nebelkammern oder Teilchenbeschleuniger messen winzig kleine Quantenprozesse. Aber lässt sich im Licht des geschilderten Experiments eine klassische Domäne von der Quantenwelt separieren? Sind der ionisierende Laserpuls und die nachfolgenden Attosekundenblitze wirklich Teil einer rein klassischen Apparatur? Jedenfalls ist ihre Wechselwirkung mit dem untersuchten Atom nur quantenmechanisch beschreibbar. Darum mein Verdacht: Solche Kunststücke wie das beschriebene machen die Kopenhagener Zwei-Welten-Deutung unplausibel. Auch der Versuchsapparat ist Teil der Quantenwelt. Die Quantenmechanik herrscht unumschränkt.



Michael Springer

Mit der ISS der DUNKLEN MATERIE auf der Spur

Mit dem Alpha-Magnet-Spektrometer (AMS), dem bislang aufwändigsten Weltraumobservatorium für geladene kosmische Strahlung, nimmt die Internationale Raumstation die astrophysikalische Grundlagenforschung auf. AMS soll die Dunkle Materie enträtseln helfen, aber auch nach Antimaterie suchen.

Von Stefan Schael und Jan Hattenbach

In Kürze

- ▶ In wenigen Monaten bringt ein Spaceshuttle das **Alpha-Magnet-Spektrometer (AMS)** zur Internationalen Raumstation. Es könnte sich als die vom wissenschaftlichen Standpunkt aus interessanteste Komponente unseres Außenpostens im All erweisen.
- ▶ Sein Ziel ist es, die geladenen **Teilchen der kosmischen Strahlung** zu untersuchen und so zu Erkenntnissen über ihre Quellen in den Tiefen des Universums zu gelangen.
- ▶ Vor allem auch das **Rätsel der Dunklen Materie** soll der Teilchendetektor lösen helfen. Die wichtigsten Hinweise erhoffen sich die Forscher von Positronen. Sind sie in der Strahlung häufiger als erwartet, lässt sich dies möglicherweise auf die **Zerstrahlung von Dunkle-Materie-Teilchen** zurückführen.

Am 26. Februar 2011 wird es so weit sein: Eines der ambitioniertesten astrophysikalischen Grundlagenexperimente hebt mit dem Spaceshuttle Endeavour vom John-F.-Kennedy-Raumfahrtzentrum in Florida ab. Rund einen halben Tag später wird es bei seinem Ziel in 400 Kilometer Höhe über dem Erdboden angelangt sein, der Internationalen Raumstation (ISS). Dort fährt der Shuttle seinen Roboterarm aus, hebt das Alpha-Magnet-Spektrometer (AMS) aus der Ladebuch und reicht es an den Roboterarm der ISS weiter. Dieser, gesteuert von den Astronauten an Bord der ISS und des Shuttles, manövriert AMS erst an seine endgültige Position. Nach mehr als zehn Jahren Bau- und Entwicklungsarbeiten schlägt dann endlich die Stunde der Astroteilchenphysiker. Mindestens zehn Jahre lang soll AMS die kosmische Strahlung beobachten und so vor allem eines der größten Rätsel der Astrophysik lösen helfen: das der Dunklen Materie.

Das rund 1,5 Milliarden Euro teure, fast sieben Tonnen schwere und knapp vier Meter hohe Instrument ist in gewisser Weise eine Kamera für geladene Teilchen. Statt aber Licht verschiedenster Wellenlängen zu registrieren, »fotografiert« AMS die kosmische Partikelstrahlung über einen weiten Energiebereich hinweg. 2000 Bilder pro Sekunde schafft das hochkomplexe Instrument, und sein »Aufnahmechip«, dessen Auflösung 200 000 Pixel beträgt, misst gleich sechs Quadratmeter.

Während Astronomen oft nur die elektromagnetische Strahlung registrieren, die von fernen Orten zu uns gelangt, erlaubt es AMS, Materie aus den entferntesten Winkeln des Weltalls direkt in einem Detektor zu untersu-



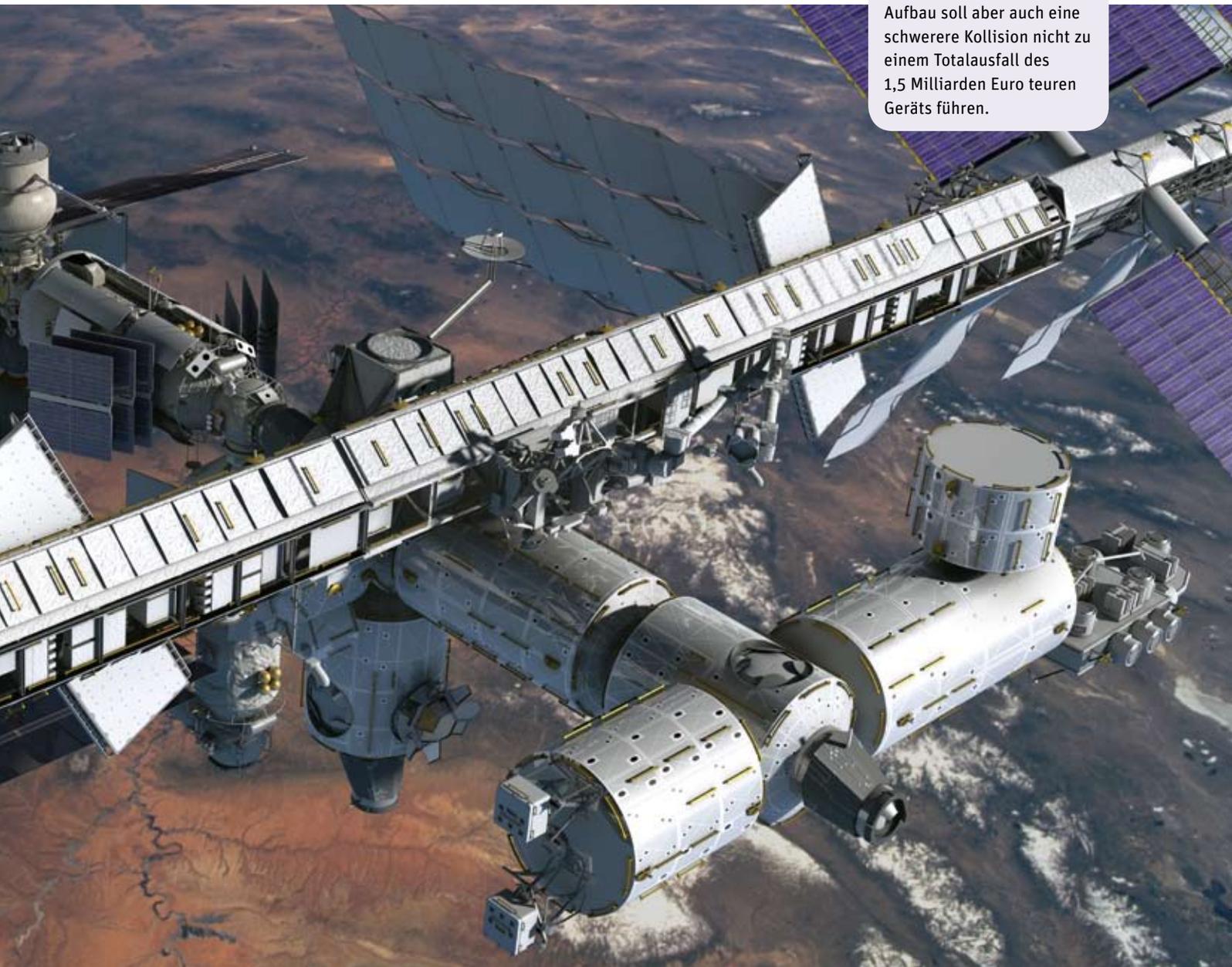
chen (siehe »Auf der Spur der kosmischen Beschleuniger«, SdW 7/2009, S. 28). Die Teilchen in der kosmischen Strahlung zeugen von den Überresten gewaltiger Supernova-Explosionen, von Pulsaren, Schwarzen Löchern oder aktiven Galaxienkernen. In solchen Regionen extremer physikalischer Bedingungen werden sie auf Energien beschleunigt, die wir auch mit den leistungsfähigsten Maschinen auf der Erde nie werden erreichen können.

Die Zusammensetzung der Strahlung ist indes simpel: Wasserstoff- und Heliumkerne, also Protonen und Alphateilchen – die Grundbausteine des Kosmos –, stellen zusammen fast 99 Prozent der kosmischen Partikel. Protonen sind dabei zehnmal häufiger als Heliumkerne.

(Die Zusammensetzung der Strahlung variiert mit der Energie der Teilchen.) Das Interesse der Forscher gilt aber vor allem dem restlichen Prozent, in dem zu einem geringen Bruchteil Antimaterie enthalten ist. Insbesondere Antielektronen, so genannte Positronen, könnten Antworten auf zentrale Fragen der Astrophysik und Kosmologie liefern.

Die Positronen sollten in der kosmischen Strahlung eigentlich nur als Sekundärteilchen enthalten sein: Sie entstehen, wenn Protonen auf interstellare Materie prallen. Danach verlieren sie durch Wechselwirkungen mit dem interstellaren Medium und den galaktischen Magnetfeldern schnell ihre Energie, was ihre Reichweite auf etwa 1000 Lichtjahre be-

Das **Alpha-Magnet-Spektrometer AMS** (Kreis) hat auf dieser Computergrafik bereits an die Raumstation ISS angedockt. Tatsächlich werden aber nur die Strahlungsschilde (im Vordergrund) und die Abschirmung gegen energiearme Teilchen (oben) zu sehen sein; den Rest des Instruments wird eine isolierende Hülle umgeben. Kleineren Welterschrottpartikeln halten die Schilde ebenso wie die Instrumente selbst stand. Dank deren modularem Aufbau soll aber auch eine schwerere Kollision nicht zu einem Totalausfall des 1,5 Milliarden Euro teuren Geräts führen.



WAS IST DIE DUNKLE MATERIE?

Seit der schweizerisch-amerikanische Astronom Fritz Zwicky in den 1930er Jahren beobachtete, dass sich Galaxien in großen Galaxienhaufen viel schneller bewegen, als sich durch ihre Masse erklären lässt, rätseln die Forscher: Beherrbergen die Galaxien mehr Masse, als wir vermuten, ist sie einfach nur nicht sichtbar? Die zur Erklärung nötige, aber noch hypothetische Dunkle Materie trägt ihren Namen, weil sie elektromagnetische Strahlung weder emittiert noch absorbiert und sich bisher nur durch ihre Massenanziehung nachweisen lässt. Sie ist allerdings weit mehr als ein astronomisches Kuriosum. Normale, so genannte baryonische Materie, aus der Himmelskörper ebenso wie Menschen bestehen, repräsentiert nur vier Prozent der Energie im Universum. Ohne die zusätzliche Schwerkraft der Dunklen Materie hätte die Entwicklung von Galaxien, Sternen und Planeten, so wie wir sie kennen, überhaupt nicht stattfinden können – und dann wäre auch kein Leben entstanden.

schränkt. Auf Grund ihrer Seltenheit gelten sie jedoch als sehr empfindliche Proben für neue Physik. Pointiert gesprochen: Jedes unerwartete zusätzliche Positron weist darauf hin, dass an seiner Quelle etwas Interessantes vor sich geht.

Die ersten Hinweise auf die Existenz der kosmischen Strahlung hatte der österreichische Physiker Victor F. Hess im Jahr 1912 entdeckt. Mit Hilfe eines Ballons, der in die dünne Hochatmosphäre vordrang, nahm er Messungen der Radioaktivität vor und stellte fest, dass diese mit der Höhe zunahm. Die »Höhenstrahlung«, mit der Hess dieses Phänomen erklärte, erwies sich später als Teilchenstrahlung aus den Tiefen des Weltalls. Zu ihrer Untersuchung benutzen Physiker auch heute noch Spezialballons, von denen sie ihre Detektoren in bis zu 40 Kilometer Höhe tragen lassen. Sind die zirkumpolaren Winde günstig, werden bei Flügen um den Südpol Messzeiten von bis zu 44 Tagen erreicht.

AMS, das den offiziellen Namen AMS-02 trägt, stößt hingegen in völlig neue experimentelle Dimensionen vor. Von der Raumstation kontinuierlich mit Energie versorgt, kann der hochkomplexe Teilchendetektor eine Messzeit von vielen Jahren erreichen. Die Machbarkeit eines solchen Vorhabens hatte das AMS-Konsortium schon im Juli 1998 unter Beweis gestellt. An Bord des Spaceshuttles Discovery umrundete ein Prototyp, AMS-01, zehn Tage

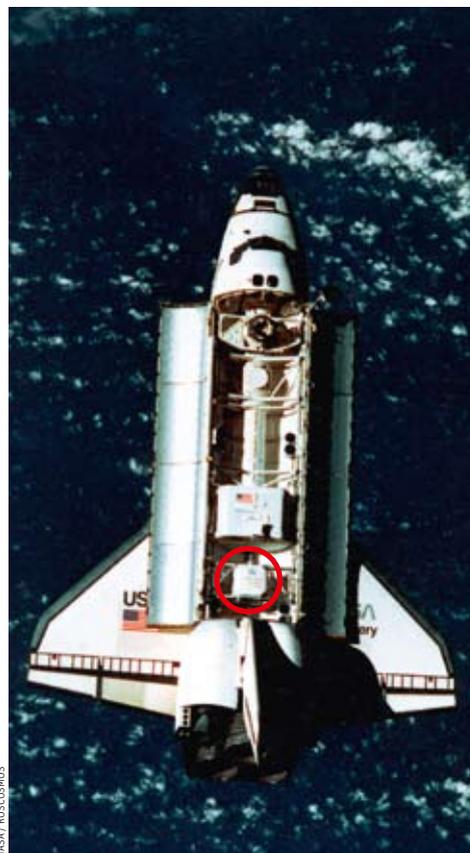
lang die Erde. Bereits auf diesem kurzen Flug vermaß das Instrument über 100 Millionen geladene Teilchen. Und schon damals waren das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum (DLR) und die RWTH Aachen beteiligt. Klaus Lübelmeyer, Vorgänger einer der Autoren (Schael) auf dem Lehrstuhl für Experimentalphysik, hatte das Projekt mitinitiiert und gehört noch heute zu den führenden AMS-Forschern.

Ausgezeichnete Versteckspieler

Photonen und Neutrinos durchqueren den Kosmos praktisch auf gerader Linie, weil sie keine elektrische Ladung tragen. Ihre Vermessung kann darum auch Aufschluss über den Ort ihrer Entstehung geben. Anders die geladenen Teilchen, nach denen AMS fahndet: Sie bewegen sich nahezu chaotisch durch das Weltall, denn dort sind sie Magnetfeldern ausgesetzt, die sie immer wieder aufs Neue ablenken. Sie treffen daher aus allen möglichen Richtungen ein und selbst ein Instrument wie AMS kann kein Abbild ihrer Quellen liefern. Stattdessen identifiziert es die gemessenen Teilchen mittels dreier wesentlicher Kenngrößen: ihrer Masse, ihrer elektrischen Ladung und ihrer Energie.

Im Zentrum der Suche stehen Teilchen, von denen wir bis heute nicht sicher wissen, ob es sie gibt: WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*; massebehaftete, schwach wechselwirkende Teilchen). Ihre Entdeckung wäre ein gewaltiger Fortschritt, denn die meisten Teilchenphysiker sind davon überzeugt, dass die Dunkle Materie (siehe Randspalte und »Die Suche nach Dunkler Materie«, SdW 10/2003, S. 44) aus diesen bislang noch nicht nachgewiesenen Elementarteilchen besteht. Sie vereinen wahrscheinlich die Masse von mehr als 100 Wasserstoffkernen auf sich, sollen elektrisch ungeladen und natürlich langlebig sein. Zudem treten sie bestenfalls über die zwei Fundamentalkräfte Gravitation und schwache Wechselwirkung mit gewöhnlicher Materie in Austausch. Das macht sie zu ausgezeichneten Versteckspielern, die bei Experimenten oder Beobachtungen kaum in Erscheinung treten.

Was aber ist ein WIMP genau? Das könnten neue physikalische Theorien wie zum Beispiel die Supersymmetrie erklären. Dieser bislang hypothetische Ansatz versucht, einige der fundamentalen Probleme zu lösen, denen sich das Standardmodell der Elementarteilchenphysik gegenüberstellt (siehe »Weltbild vor dem Umbruch«, SdW 11/2008, S. 12). In der Theorie der Supersymmetrie treten neue, noch unbekannte Elementarteilchen auf. Die meisten von ihnen zerfallen nach kurzer Zeit, doch in manchen Theorievarianten ist zumindest das leichteste supersymmetrische Teilchen stabil. Da



NASA / ROSCOSMOS

Flug mit offenem Verdeck: Das von der russischen Raumstation Mir aus aufgenommene Foto zeigt den Spaceshuttle Discovery, der 1998 den Prototyp AMS-01 (Kreis) zehn Tage lang um die Erde flog.

dieses so genannte Neutralino zudem elektrisch neutral ist und über die »richtigen« Wechselwirkungen verfügt, wäre es ein nahezu idealer Kandidat für die Dunkle Materie.

Wegen ihrer geringen Wechselwirkungsfreude und fehlenden Ladung kann zwar auch AMS die WIMPs nicht direkt registrieren. Doch weil sie zugleich ihre eigenen Antiteilchen sind, zerstrahlen sie, wenn sie mit ihresgleichen kollidieren. Aus der Energie, die bei einer solchen Annihilation von WIMPs frei wird, entstehen dann wieder gewöhnliche Partikel, unter anderem Positronen (Bild rechts). Diese mischen sich unter die Teilchen der kosmischen Strahlung und können als so genannter Überschuss im Energiespektrum in Erscheinung treten.

Tatsächlich stießen Forscher in der kosmischen Strahlung bereits auf überschüssige Teilchen. So entdeckte das Ballonexperiment HEAT bei zwei Flügen in den Jahren 1995 und 2000 mehr Positronen als erwartet. Nimmt man an, dass sie von Protonen stammen, die mit interstellarer Materie kollidieren, müsste der so genannte Positronenuntergrund mit wachsender Energie abnehmen. Stattdessen aber nimmt er ab einer bestimmten Energie wieder zu. Eine solche klare Änderung im so genannten spektralen Index lässt nur eine einzige mögliche Erklärung zu: Es muss eine noch unbekannte Positronenquelle existieren.

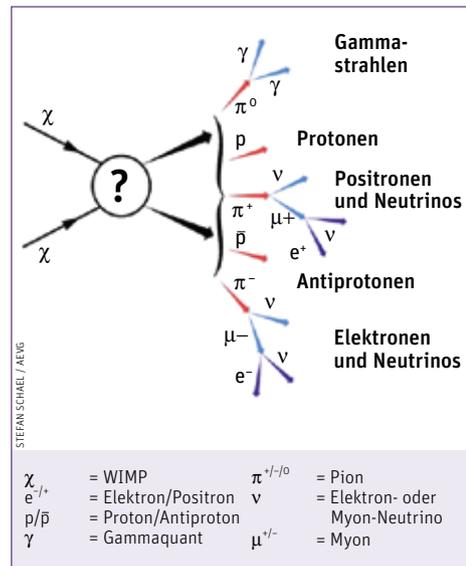
Manche Forscher wandten zwar ein, dass für den Überschuss auch Sekundärprozesse in der oberen Erdatmosphäre in Frage kommen könnten, die bislang noch unzureichend verstanden sind. Doch mit Hilfe der Daten, die AMS-01 jenseits der Atmosphäre aufgezeichnet hatte, konnte die Arbeitsgruppe der RWTH Aachen die Beobachtungen von HEAT im Jahr 2004 erstmals bestätigen und damit auch diese Einwände ausräumen.

Täuschungsmanöver aus dem Untergrund

Die erforderliche Präzision, um den Effekt statistisch zweifelsfrei zu belegen, ließ sich aber erst mit dem Satellitenexperiment PAMELA (*Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) erreichen. Die seit 2006 gewonnenen Daten zeigen einen Anstieg des Positronenflusses ab etwa zehn Gigaelektronvolt (GeV). Er setzt sich in jedem Fall bis etwa 100 GeV fort; in Kürze werden auch die Auswertungen bis zur technischen Messgrenze des Detektors bei 500 GeV veröffentlicht. Bei weiteren Experimenten, die leider nicht zwischen Elektronen und Positronen unterschieden, wurde auch für die Summe beider Teilchensorten im Energiebereich von 500 bis 1000 GeV ein signifikanter Überschuss ermittelt.

Die Messungen sind extrem schwierig. Denn um den Positronenfluss bestimmen zu können, muss zunächst der Untergrund der ebenfalls positiv geladenen Protonen »unterdrückt«, also von den Messungen abgezogen werden. Auf jedes Positron in der kosmischen Strahlung kommen aber je nach Energie zehnt- oder gar hunderttausend Protonen (Bild unten). Darum bestehen bei den Messungen bis heute große systematische Unsicherheiten. Sollte der Untergrund deshalb falsch bestimmt worden sein – was aber unwahrscheinlich ist –, täuschen die Ergebnisse einen Positronenüberschuss nur vor. Für eine endgültige Entscheidung kann indessen erst AMS sorgen.

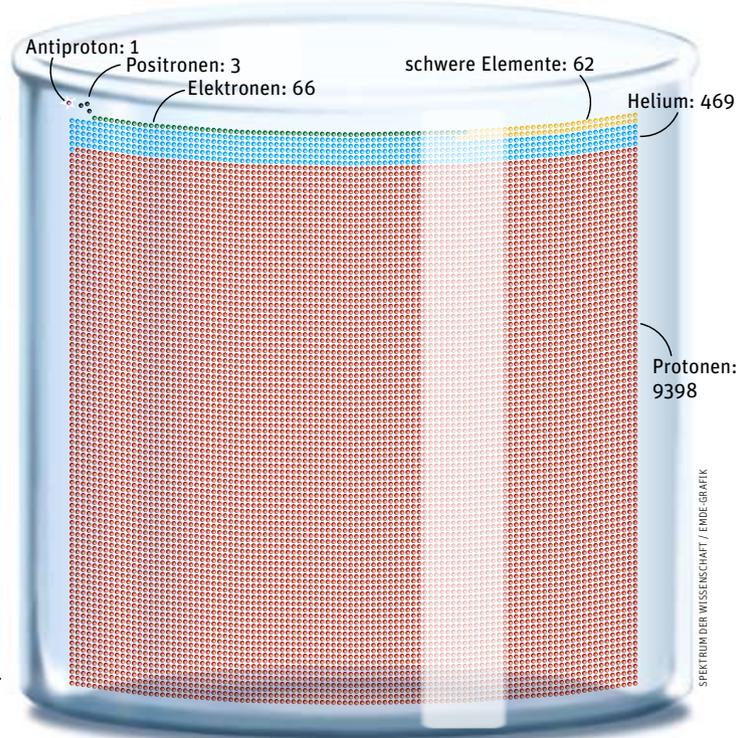
Um die beobachteten Anomalien im Positronenspektrum (und entsprechende Auffälligkeiten im Elektronspektrum) zu erklären, favorisieren Astroteilchenphysiker zwei Ansätze. Entweder sind wir tatsächlich bereits auf Annihilationssignale der Dunklen Materie gestoßen. Dann lassen sich aus der Form des Positronenspektrums zumindest im Prinzip Rückschlüsse auf die physikalischen Eigenschaften der WIMPs ziehen. Zuvor müssten wir allerdings die Obergrenze der Energie kennen, bis zu der sich ein Überschuss nachweisen lässt (siehe Diagramm auf der Folgeseite). Diese Obergrenze könnte AMS liefern, denn es wird den Messbereich von PAMELA auf Energien von mehr als 1000 GeV verdoppeln und so-



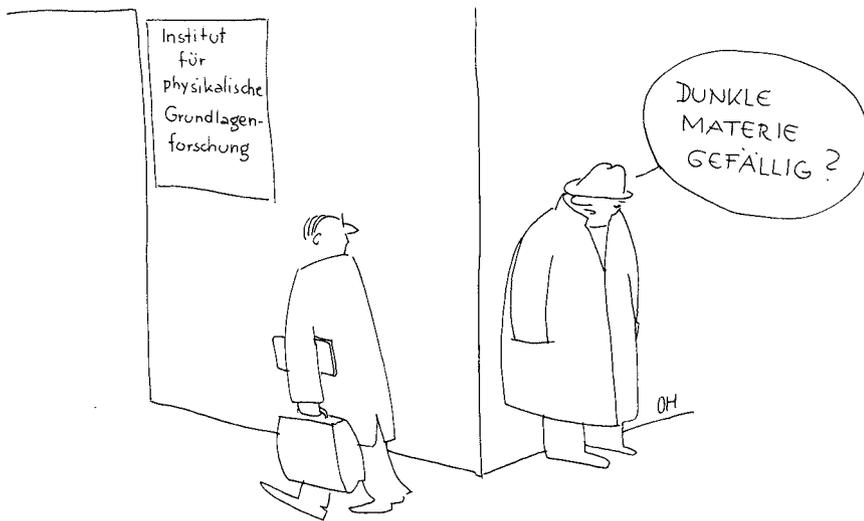
Die Zerstrahlung zweier Dunkle-Materie-Teilchen (WIMPs) führt zu einer Kaskade von Teilchenzerfällen. Für das AMS sind insbesondere die entstehenden Elektronen und Positronen von Bedeutung. Die schematische Darstellung zeigt nur die wesentlichen Komponenten des Prozesses.

WIE IST DIE KOSMISCHE STRALUNG ZUSAMMENGESETZT?

Bei einer Energie von zehn Gigaelektronvolt kommen auf 9398 Protonen in der kosmischen Strahlung gerade einmal drei der physikalisch viel interessanteren Positronen. Weil sich die Zusammensetzung der Strahlung energieabhängig verändert, kann das Verhältnis auch noch ungünstiger sein und die Unterscheidung weiter erschweren.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE GRAFIK



Positronen in der kosmischen Strahlung, so erwarteten Forscher ursprünglich, sollten von Protonen stammen, die mit interstellarer Materie kollidieren. Dann würde ihr Anteil in der Strahlung etwa der schwarzen Linie im Diagramm folgen. Das solare Magnetfeld ruft im Lauf der Zeit aber Variationen hervor (gelber Bereich). Tatsächlich zählte das PAMELA-Experiment ab etwa zehn Gigaelektronvolt mehr Positronen als erwartet. Die künftigen AMS-Daten könnten zeigen, ob sie aus der Zerstrahlung von WIMPs stammen oder von einem Pulsar.

wohl Elektronen als auch Positronen zuverlässig registrieren und unterscheiden.

Allerdings lässt sich auch eine weniger exotische Variante mit den Messdaten in Einklang bringen: Die Teilchen könnten von einem nahen Pulsar stammen. Ein solcher ultrakompakter Neutronenstern, der Überrest eines als Supernova explodierten Sterns, rotiert sehr schnell um seine Polachse und beschleunigt durch sein starkes Magnetfeld geladene Teilchen auf extrem hohe Energien. Dadurch werden die Partikel angeregt, in Richtung der Achse so genannte Synchrotronstrahlung im Gammabereich auszustrahlen. Zeigt die Achse in Richtung der Erde, dann scheint der Stern in einem festen Rhythmus aufzublitzeln.

Die geladenen Elektronen und Positronen selbst verteilen sich unterdessen im Raum und gelangen so auch in Richtung Erde, wo sie uns als Anomalien in den Spektren auffallen. Modellrechnungen zeigen, dass die Quelle der überschüssigen Teilchen tatsächlich bei einem

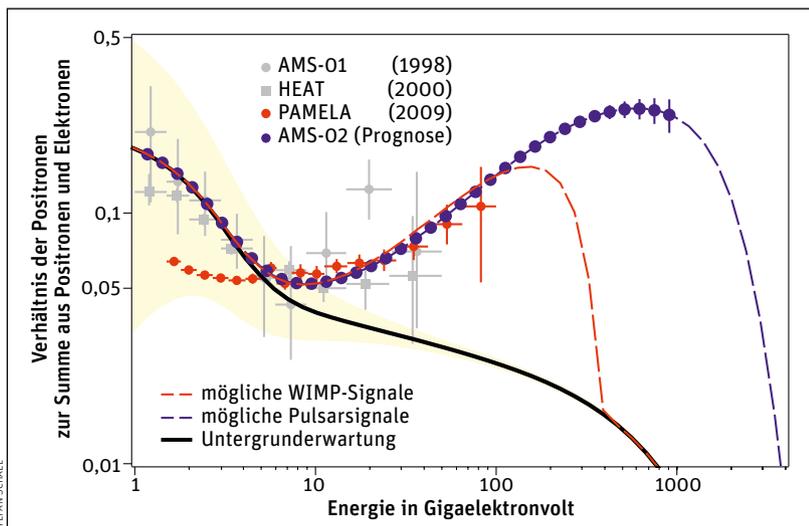
oder mehreren Pulsaren in der kosmischen Nachbarschaft liegen könnte. Geeignete Kandidaten wären unter anderem Vela und Geminga, die weniger als 1000 Lichtjahre entfernt sind. Astronomen nehmen aber auch die Existenz weiterer, bislang unentdeckter Pulsare in der näheren Umgebung an.

Dunkle Materie sollte allerdings gleichmäßig über den Himmel verteilt sein, während ein benachbarter Pulsar zu einer messbaren räumlichen Anisotropie führen würde. Weil AMS eine komplette Himmelskarte im »Licht« energiereicher Elektronen und Positronen erstellen wird, kann es zwischen diesen Szenarien also möglicherweise experimentell unterscheiden.

Doch das Instrument kann auch weitere Hinweise liefern. In dem von PAMELA vermessenen Energiebereich unterscheiden sich die Vorhersagen der Modelle kaum, egal ob ein Pulsar oder Dunkle Materie als zusätzliche Quelle angenommen wird. Oberhalb dieses Werts müssten jedoch signifikante Unterschiede auftreten: So ist für den Fall eines Pulsars ein stetiger Anstieg des Positronenflusses bis zu Energien von – je nach Modell – 1000 GeV oder mehr zu erwarten. Sind hingegen WIMPs für den Teilchenexzess verantwortlich, sollte das Spektrum weniger stark ansteigen und schon viel früher – abhängig von der noch unbekannt WIMP-Masse – steil abfallen (siehe Grafik unten links).

Doch wie groß ist überhaupt der Untergrund? Erst wenn wir diesen kennen, können wir den Überschuss genau bestimmen. Bis etwa zehn GeV messen wir genau so viele Positronen, wie wir erwarten; die Modelle sind also zuverlässig. Für höhere Energien müssen wir dies aber erst noch nachweisen. Mit Hilfe aufwändiger Computersimulationen muss dazu die von »gewöhnlichen« Quellen ausgehende Strahlung möglichst genau berechnet werden. Dafür wurden eine Reihe von Modellen entwickelt, die aber wiederum zahlreiche freie Parameter besitzen, die sich nur durch Beobachtungen eingrenzen lassen. AMS wurde deshalb auch dafür optimiert, dass wir diese Parameter möglichst genau bestimmen können. Diesem Zweck dienen etwa seine Messungen der Energiespektren von schweren Isotopen in der kosmischen Strahlung.

Die Frage nach der Natur der Dunklen Materie hat sich, wie allein schon die bisherigen Anmerkungen zeigen, als sehr komplex erwiesen. Weil die Messergebnisse häufig verschiedene Interpretationsmöglichkeiten zulassen, wird AMS das Rätsel ohnehin nicht alleine lösen können. Um zusätzliche unabhängige Beobachtungen zu machen, arbeiten wir daher auch intensiv am Teilchenbeschleuniger LHC



mit, wo einer von uns (Schael) maßgeblich an Entwicklung und Betrieb des CMS-Experiments beteiligt ist. Vielleicht gelingt es, hier Dunkle Materie künstlich zu erzeugen und im CMS- oder ATLAS-Detektor nachzuweisen.

Doch auch am LHC lassen sich nicht alle Fragen klären. Zwar ist ein solches Labor ein idealer Ort, um die Eigenschaften neu entdeckter Teilchen genauestens zu bestimmen. Andererseits lässt sich hier nicht entscheiden, ob sie tatsächlich etwas mit der Dunklen Materie im Kosmos zu tun haben. Weltweit verfolgen Forscher darum weitere und ganz unterschiedliche experimentelle Ansätze. An der Suche nach WIMPs beteiligen sich unter anderem das CDMS-Experiment in einer Mine im US-Bundesstaat Minnesota, die Tscherenkow-Teleskope HESS (siehe SdW 7/2009, S. 28) und Magic, der Gammasatellit Fermi (siehe SdW Dossier 5/2008, S. 56) und das Neutrinoexperiment IceCube am Südpol (siehe SdW Dossier 5/2008, S. 14).

Präzise Ausrichtung des Detektors an Fixsternen

Demnächst nimmt nun auch AMS die Arbeit auf. Das Herzstück des mit sechs Subdetektoren ausgestatteten Instruments bildet der von einem Permanentmagnet umgebene Spurdetektor. Zusammen bilden diese Bauteile das Spektrometer, dem AMS seinen Namen verdankt. Der Magnet zwingt geladene Teilchen, die das Experiment von oben nach unten durchfliegen, auf eine leicht gekrümmte Kreisbahn. Diese Flugbahn vermisst der aus neun Lagen mikrostrukturierter Siliziumstreifendetektoren aufgebaute Spurdetektor an neun Punkten mit einer Genauigkeit von jeweils 0,01 Millimeter. In jeder Lage hinterlässt das geladene Teilchen einen geringen Bruchteil seiner Energie, so dass sich dank der segmentierten Auslesestruktur der Siliziumdetektoren seine Flugbahn rekonstruieren lässt. Aus der Krümmung der Bahn können wir schließlich das Vorzeichen der elektrischen Ladung und den Impuls des Teilchens bestimmen (aber nicht seine Masse). Tatsächlich ist der Spurdetektor derjenige Teil von AMS, der einem Kamerachip am ähnlichsten ist: Die sechs Quadratmeter »Chipgröße« beziehen sich auf die Gesamtfläche der Siliziumstreifendetektoren, die Auflösung von 200 000 »Pixeln« entspricht der Zahl der Auslesekanäle des Spurdetektors.

Umgeben wird das Instrument von dem 80 Zentimeter hohen und rund 1,2 Meter durchmessenden Permanentmagneten. Dieser ist das einzige Bauteil des AMS, das – dank seines Einsatzes bei AMS-01 – schon über Weltraumerfahrung verfügt. In seinem Inneren erzeugt er ein Feld der Stärke 0,14 Tesla, was etwa dem



3000-fachen des Erdmagnetfelds entspricht. Zudem ist er selbstkompensierend, besitzt also praktisch kein magnetisches Dipolmoment. Sonst würde er durch seine Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld die Raumstation ins Taumeln bringen, während sie die Erde umkreist.

Das AMS-Spektrometer weist nicht nur geladene Teilchen nach, sondern auch ungeladene Photonen. Diese nämlich können sich in den Detektorkomponenten oberhalb des Spurdetektors in ein Elektron-Positron-Paar umwandeln, das dann mit exzellenter Energie-, Winkel- und Zeitaufösung gemessen werden kann. Um die Photonen mit astronomischen Objekten in Verbindung bringen zu können, muss die Orientierung von AMS allerdings genauer registriert werden, als es die Lageregelung der Raumstation vermag. Deshalb verfügt AMS auch über einen so genannten Star Tracker, ein optisches System, das Fixsterne am Himmel anpeilt und so die Ausrichtung des Detektors im Weltraum ermittelt.

Vor allem aber sind die Positronen von Interesse. Zwischen ihnen und den 2000-mal massereicheren Protonen kann das Spektrometer jedoch nicht sicher unterscheiden: Beide tragen dieselbe Ladung, ein energiereiches Positron kann darum dieselbe Signatur wie ein energiearmes Proton hinterlassen.

Diese große experimentelle Schwierigkeit bei der Positronenspektroskopie überwindet AMS durch zwei weitere Subdetektoren: ein elektromagnetisches Kalorimeter sowie einen Übergangsstrahlungsdetektor. Das Kalorimeter

Fast sieben Tonnen schwer und knapp vier Meter hoch ist AMS. Hier ist es nach dem Probezusammenbau im Jahr 2008 in einem Reinraum am Teilchenforschungszentrum CERN zu sehen. Gehalten wird es von einer Stützstruktur (Aluminiumstreben rechts und links). Diese hatte in Experimenten nachweisen müssen, dass sie den mit siebenfachen Erdbeschleunigung einhergehenden Start des Space shuttles unbeschadet überstehen wird.

DIE KOMPONENTEN DES ALPHA-MAGNET-SPEKTROMETERS

Die Solarpaneele der ISS versorgen den 6850 Kilogramm schweren AMS-Detektor (siehe Grafik rechts) mit einer Leistung von rund zwei Kilowatt. Ein großer Teil davon wird für die Datenerfassungssysteme der einzelnen Komponenten benötigt. Das Instrument besteht aus sechs Subdetektoren sowie einem Magneten.

Der Übergangsstrahlungsdetektor an der Spitze des AMS dient der Unterscheidung zwischen leichten und schweren Teilchen. Er besteht aus einer 20-lagigen Abfolge von Kunststoffasermatten, dem so genannten Radiator, sowie Detektorkammern, die mit einem Gemisch aus Xenon und Kohlendioxid gefüllt sind. Die 20 Millimeter dicken Matten bestehen aus hunderten extrem dünnen Polypropylen-Polyethylen-Fasern. Die 328 Detektorkammern, jede sechs Millimeter dick, sind aus jeweils 16 einzelnen, waagrecht liegenden Detektorröhrchen aufgebaut.

Der Radiator dient als Medium, in dem geladene Teilchen an der Grenzfläche zwischen jeder Faser und dem Vakuum Übergangsstrahlung im Röntgenbereich erzeugen. Die Intensität die-

ser Strahlung hängt vom Verhältnis der Gesamtenergie eines Partikels zu seiner Ruhemasse ab. Registriert werden sowohl die Energie, die bei der Ionisation des Xenongases im Instrument deponiert wird, als auch die Energie der Röntgenphotonen. Eine achteckige Struktur aus Kohlefaserverbundmaterial hält die gesamte Anordnung aus Kammern und Radiator auf 0,1 Millimeter genau in Position.

Der Spurdetektor ist gemeinsam mit dem ihn umgebenden Magneten, der die eindringenden Teilchen auf gekrümmte Bahnen zwingt, das Herzstück von AMS und besteht aus neun Siliziumlagen. Die Positionen der inneren sieben Lagen werden relativ zueinander von einem Lasersystem überwacht. In diesen Lagen deponieren die Teilchen beim Durchflug Energie, indem sie Ladungsträger freisetzen, die dann ähnlich wie bei einer digitalen Kamera elektronisch nachgewiesen werden.

Weil die Siliziumlagen auf fotolithografischem Weg in feine Streifen mit jeweils 30 Mikrometer Abstand unterteilt wurden, lässt sich der Durchstoßpunkt der geladenen Teilchen durch die jeweilige Lage auf 0,01 Millimeter genau bestimmen. Zudem sind die Streifen der einzelnen Lagen gekreuzt angeordnet, so dass die dreidimensionale Flugbahn des Teilchens rekonstruiert werden kann. Radius und Richtung der Bahn gibt den Forschern dann Aufschluss über Impuls und Ladung der Partikel. Der Spurdetektor besitzt rund 200 000 »Pixel«, also einzelne Auslesekanäle.

Der Permanentmagnet, der den Spurdetektor umgibt, kam bereits 1998 im AMS-Prototypen AMS-01 zum Einsatz. Er besteht aus 6400 Blöcken einer Niob-Eisen-Bor-Verbindung, die zu einem Ringzylinder mit einem Durchmesser von 1,2 Metern und einer Höhe von 0,8 Metern angeordnet sind. In seinem Inneren herrscht ein Magnetfeld von 0,14 Tesla. Konstruiert ist er als so genannter selbstkompensierender Magnet. Sein Außenfeld ist also so klein, dass es die Raumstation durch seine Wechselwirkung mit dem Erdmagnetfeld nicht ins Taumeln bringen kann.



besteht im Wesentlichen aus Blei und darin eingebetteten Szintillatorfasern. Beim Durchgang durch die Fasern erzeugen geladene Teilchen so genanntes Szintillationslicht, das am Ende der Fasern von Fotovervielfachern gemessen wird. Die leichten Teilchen, also insbesondere die Positronen, verlieren im Kalorimeter ihre gesamte Energie: Sie lassen eine elektromagnetische Teilchenkaskade entstehen, deren Energie und Form das Instrument vollständig vermessen kann. Schwerere Partikel wie Protonen deponieren hingegen nur einen sehr geringen Teil ihrer Energie (vor allem, indem sie mit Atomkernen zusammenstoßen) und verlassen den Detektor an seiner Unterseite wieder. Aus dem Vergleich zwischen Energie und dem zuvor im Spektrometer gemessenen Impuls lässt sich also ermitteln, ob es sich um ein Proton oder um ein Positron gehandelt hat.

Elektromagnetische Kalorimeter werden bei vielen Experimenten wie etwa auch Fermi eingesetzt. Und schon die PAMELA-Forscher haben es mit einem Spektrometer kombiniert und so die Unterscheidung zwischen Elektronen, Positronen und Protonen ermöglicht. Ein Problem für Ballon- ebenso wie für Weltraumexperimente ist das Gewicht von Magnet und Kalorimeter. Je größer die geometrische Akzeptanz sein soll, also das Produkt aus Sensorfläche und Öffnungswinkel, desto mehr steigt die Masse. Um große Detektoren kommen die Forscher aber auch deshalb nicht herum, weil der Elektron- und Positronfluss in der kosmischen Strahlung schneller als mit der dritten Potenz der Energie abnimmt und sie dennoch genügend Teilchen einfangen wollen.

Es gibt aber noch eine weitere Schwierigkeit. Denn gelegentlich erzeugt das Proton

EIN INSTRUMENT, VIELE TEAMS

Der Übergangsstrahlungsdetektor ist ein typisches Beispiel für die komplexe internationale Zusammenarbeit, die es zur Realisierung großer Projekte der Grundlagenforschung bedarf. Gebaut und entwickelte wurde er vom Team des Autors an der RWTH Aachen. Das zugehörige Datenerfassungssystem

»» FORTSETZUNG AUF DER NÄCHSTEN SEITE

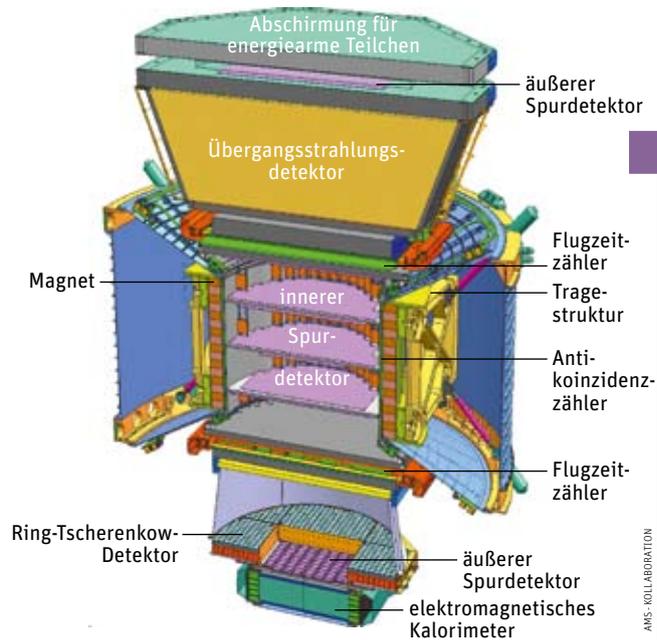
Als so genannte **Flugzeitzähler (TOF)** dienen je zwei gekreuzte Lagen von Plastikszintillatoren ober- und unterhalb des Spurdetektors. In diesem Material lösen passierende Teilchen kurze Lichtblitze aus, die der Messung von Flugeschwindigkeit und Flugrichtung dienen. Sobald sie auf ein Teilchen ansprechen, senden die Flugzeitzähler außerdem ein Signal an den Spurdetektor, den Übergangsstrahlungsdetektor und alle anderen Instrumente: Jetzt Daten auslesen!

Der Anti-Koinzidenz-Zähler besteht aus Plastikszintillatoren, mit denen die Seiten des Spurdetektors ausgekleidet sind. Sie senden bei seitlich eindringenden Teilchen ein so genanntes Vetosignal. So verhindert der Zähler, dass die entsprechenden Messungen fehlinterpretiert werden. Seine Szintillatoren (nicht im Bild) umgeben einen Stützzylinder aus Kohlefasern, der den Spurdetektor (schwarzer Zylinder) aufnimmt. Ihre Signale werden über Lichtleiterkabel (schwarz) zu Fotovervielfachern (goldfarbene Boxen) geführt und von diesen verstärkt.



Der Spurdetektor wird in den Stützzylinder eingelassen.

AMS-02 KOLLABORATION



AMS-02 KOLLABORATION

Der abbildende Ring-Tscherenkow-Detektor

Unterhalb des Spurdetektors treten die Teilchen in einen Radiator aus silikatischem Aerogel ein – ein in hohem Maß von Poren durchsetzter Festkörper –, in dem sie auf Grund ihrer hohen Geschwindigkeit so genanntes Tscherenkowlicht erzeugen. Dessen kegelförmige Abstrahlung führt auf Sensoren in einem Abstand von 45 Zentimeter zu charakteristischen Ringstrukturen. Die Messungen erlauben die Bestimmung von Atomkernmassen und die Identifizierung verschiedener Isotope.

Das elektromagnetische Kalorimeter

Am unteren Ende des AMS-Detektors, das die Teilchen zuletzt erreichen, ist ein elektromagnetisches Kalorimeter angebracht, das sandwichartig aus gekreuzten Blei- und Szintillatorfibern aufgebaut ist. Hier geben Elektronen und Positronen ihre Energie vollständig ab, indem sie einen elektromagnetischen Schauer auslösen; schwerere Partikel verlieren nur wenig Energie und durchdringen das Instrument. Das Kalorimeter dient der Unterscheidung der Teilchensorten, indem es die Impuls- und Ladungsmessung des Spektrometers durch eine Energiemessung ergänzt.

auch ein neutrales Pion, das noch im Detektor in zwei Photonen zerfällt. Diese lösen ihrerseits wieder einen elektromagnetischen Schauer aus. Eine solche Signatur ist in einigen Fällen nicht allein mit dem Kalorimeter von der eines Positrons zu unterscheiden. Zwar sorgt nur ein geringer Anteil von Protonen für solche Ereignisse; doch weil die Partikel in der kosmischen Strahlung so häufig sind, macht auch dieser Fall den Experimentatoren das Leben schwer.

Die wesentliche Verbesserung von AMS gegenüber PAMELA ist daher nicht nur die 20-mal größere geometrische Akzeptanz. Erstmals bei einem Weltraumexperiment kombiniert AMS ein Kalorimeter mit einem Übergangsstrahlungsdetektor (siehe Randspalten), um den Protonenuntergrund zu verringern. Entwickelt und gebaut wurde er an der RWTH Aachen, während Industrieunternehmen die ein-

zelnen Komponenten geliefert haben. Der Detektor separiert die Teilchen, indem er die Tatsache nutzt, dass geladene Teilchen Röntgenstrahlung emittieren, so genannte Übergangsstrahlung, wenn sie die Grenzfläche zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten passieren. Die Teilchen durchlaufen darum mehrere Lagen aus Radiatoren, in denen die Strahlung erzeugt wird, und dazwischen liegenden Detektorkammern, in denen die Teilchen zusammen mit der Strahlung nachgewiesen werden. Die masseren Positronen geben sich leicht zu erkennen, weil sie bei gleicher Energie weitaus mehr Übergangsstrahlung als Protonen emittieren.

Allerdings ist die Übergangsstrahlung ein relativistischer Effekt, hängt also vom Verhältnis zwischen Energie und Masse des Teilchens ab. Bei sehr hohen Energien von mehr als 400

>>> FORTSETZUNG VON DER VORHERIGEN SEITE

realisierte das Team um Wim de Boer vom Karlsruhe Institute of Technology, das Gasversorgungssystem stammt von Ulrich Becker vom Massachusetts Institute of Technology und dessen Regelungselektronik wiederum von Bruno Borgia von der Università degli Studi di Roma (La Sapienza).

Detektor: ↓	Elektron	Proton	Helium, Lithium, ..., Eisen	Photon		Positron	Antiproton, Antideuterium	Antihelium, Antikohlenstoff
				Konversion in Elektron-Positron-Paar	direkter Nachweis			
Übergangsstrahlungsdetektor								
Flugzeitzähler								
Spurdetektor								
Ring-Tscherenkow-Detektor								
Kalorimeter								
relevant für:	Physik der kosmischen Höhenstrahlung					Dunkle Materie		Antimaterie

AMS-KOLLABORATION

Erst das Zusammenspiel seiner Subdetektoren macht AMS zu einem so mächtigen Werkzeug. Die Tabelle visualisiert schematisch das Ansprechverhalten der einzelnen Instrumente. Dabei stehen die Symbole für die unterschiedlichen Signalformen und -höhen. Letztere werden durch die Dicke der Linie angegeben. Im Fall des Spurdetektors ist auch die Krümmung der (Flug-)Kurve entscheidend. Aus der Tabelle kann man beispielsweise herauslesen, dass sich Protonen und Positronen nicht allein anhand des Spurdetektors unterscheiden lassen – erst die Signalstärken von Übergangsstrahlungsdetektor und Kalorimeter erlauben es, die Teilchen korrekt zu identifizieren. Ein weiteres Beispiel: Die Unterscheidung zwischen schwereren Teilchen anhand ihrer jeweiligen Kernladung gelingt dank des Tscherenkow-Detektors, dessen Daten mit denen von Flugzeitzähler und Spurdetektor kombiniert werden.

GeV beginnen daher auch Protonen, Übergangsstrahlung zu erzeugen, so dass die Fähigkeit des Detektors, zwischen Positronen und Protonen zu unterscheiden, entsprechend abnimmt. Bereits im Energiebereich bis 100 GeV sorgt er aber für eine im Vergleich mit PAMELA um das Tausendfache verbesserte Protonenunterdrückung.

Die 328 Detektorkammern zum Nachweis der Übergangsstrahlung setzen sich aus insgesamt 5248 bis zu 2,5 Meter langen und sechs Millimeter durchmessenden Röhrchen zusammen. Die auch »Strohhalme« genannten Röhrchen bestehen aus einer speziellen Kunststoffolie, die mit einem Zählgasgemisch aus Xenon und Kohlendioxid gefüllt ist. In jedem von ihnen ist ein vergoldeter Wolframdraht von 0,03 Millimeter Durchmesser gespannt, an dem eine Hochspannung von 1500 Volt anliegt. Werden die Moleküle des Zählgases von Teilchen oder Photonen der Übergangsstrahlung ionisiert, trennt die Hochspannung die entstehenden Ionsationsladungen und verstärkt das Signal, so dass es registriert werden kann.

Wie übersteht die Präzisionsmaschine siebenfache Erdbeschleunigung?

Eine besondere Schwierigkeit neben vielen anderen war beim Bau der Detektorkammern zu überwinden. Ihre Wände sind nur 0,07 Millimeter stark, damit sie die Photonen der Übergangsstrahlung nicht absorbieren. Gleichzeitig müssen sie der mechanischen Belastung von bis zu siebenfacher Erdbeschleunigung beim Start des Spaceshuttles standhalten und auch danach noch ausreichend gasdicht sein, um auf der Raumstation – also im Vakuum – das Zählgasgemisch festzuhalten. Darüber hinaus

hängt das Ansprechverhalten des Detektors von der Homogenität des elektrischen Felds im Innern der Röhrchen ab und damit von der Präzision, mit der der Draht zentriert ist. Da die Röhrchen fast keine Eigensteifigkeit besitzen, müssen sie über ihre Länge von bis zu 2,5 Metern unterstützt werden. Die geometrisch anspruchsvolle Tragestruktur aus Kohlefaserverbundmaterial verfügt über eine mechanische Präzision von 0,1 Millimeter, um die Geradlinigkeit der Detektorkammern und damit die Homogenität des elektrischen Felds mit der notwendigen Präzision zu gewährleisten.

Schließlich verfügt AMS noch über einen sechsten Subdetektor: den abbildenden Ring-Tscherenkow-Detektor, der präzise Massenbestimmungen erlaubt. So lässt sich etwa das Verhältnis der verschiedenen Helium- und Berylliumisotope in der kosmischen Strahlung ermitteln oder auch das Verhältnis von Bor- zu Kohlenstoffkernen. Diese Daten fließen in Modelle und Simulationsrechnungen ein, mit welchen die kosmischen Strahlungsflüsse und die Wege der Teilchen von ihren Quellen zur Erde berechnet werden. Die Messdaten von AMS-02 werden die Zuverlässigkeit dieser Modelle deutlich verbessern.

AMS birgt große Chancen. Sollten die beobachteten Anomalien tatsächlich von Dunkler Materie stammen, dann wird es dazu beitragen, dass wir deren Natur endlich aufklären können. Doch sein wissenschaftliches Programm ist wesentlich breiter angelegt. Auch der Verbleib der kosmischen Antimaterie ist eine drängende Frage, die sich Elementarteilchenphysiker wie Kosmologen gleichermaßen stellen. Denn bislang ist völlig ungeklärt, warum im Universum offenbar nur Materie, aber

ne Antimaterie existiert, obwohl der Urknalltheorie zufolge beide Materiearten in gleichem Verhältnis hätten entstehen müssen. Kam es also – und aus welchen Gründen – zu einem Ungleichgewicht? Oder befindet sich Antimaterie im Universum, ist aber von der übrigen Materie isoliert? Dank AMS werden wir unser Wissen über das Vorhandensein von Antimaterie nun bis an den Rand des beobachtbaren Universums erweitern können.

Von Antiwasserstoffkernen wissen wir bereits, dass er in der kosmischen Strahlung zu finden ist. Doch weil er bei Kollisionen von Protonen in galaktischen Gaswolken permanent gebildet wird, muss er nicht unbedingt ein Relikt des Urknalls sein. Schon der Nachweis eines einzigen Antiheliumkerns würde hingegen belegen, dass Antimaterie aus dem Urknall noch heute existiert. Fände man Antimateriekern, die noch schwerer sind, so bewiese dies gar die Existenz von Sternen aus reiner Antimaterie, denn schwere Elemente können nur in stellaren Fusionsöfen erbrütet worden sein.

Flug mit dem allerletzten Shuttle

Es war ein weiter Weg bis zur Fertigstellung von AMS und er verlief selten geradlinig. So sollte das Instrument ursprünglich nur drei Jahre lang in Betrieb sein und danach mit einem Shuttle zur Erde zurückkehren, um Platz für andere Experimente zu machen. Diese Variante ist aber vom Tisch, seit klar ist, dass das Shuttleprogramm ausläuft. Im Jahr 2005 hatte die NASA das AMS-Projekt sogar ganz von ihrem Flugplan gestrichen, denn bemannte Flüge zu Mond und Mars waren plötzlich wichtiger. Das Konsortium entwarf daraufhin Alternativen, etwa die Konstruktion eines Satelliten, der auf einer unbemannten Rakete hätte starten können. Doch 2008 wendete sich das Blatt erneut: Damals entschied der US-Kongress, einen weiteren Shuttleflug durchzuführen, der AMS wie geplant zur Raumstation bringt. Und inzwischen sind auch die Ambitionen der USA, zu Mond und Mars zu fliegen, wieder in den Hintergrund gerückt.

Weil Anfang 2010 auch die Betriebsdauer der ISS über das Jahr 2020 hinaus verlängert wurde, haben sich für AMS neue Möglichkeiten ergeben: Der Detektor kann nun wohl als Dauerpassagier im Orbit bleiben. Zudem stellte sich bei Tests des supraleitenden Magneten im Frühjahr 2010 heraus, dass er auf der Raumstation eine Lebensdauer von nur 20 Monaten erreichen würde. Ursprünglich hätte ihn ein Tank mit flüssigem Helium für den gesamten Dreijahreszeitraum auf Betriebstemperatur halten sollen.

In den letzten Monaten vor dem Start wurde er daher durch einen schwächeren Permanentmagneten identischer Abmessung ersetzt. Dieser stärkt mit seiner im Prinzip unendlichen Lebensdauer vor allem auch das Physikprogramm von AMS.

Koordiniert wurde der Umbau von Klaus Lübelmeyer, und ein Großteil der erforderlichen Arbeiten wurde an der RWTH Aachen durchgeführt. Dabei mussten, um das schwächere Magnetfeld zu kompensieren, zwei der Siliziumstreifenlagen des Spurdetektors weiter nach außen verlegt werden. Die Messgenauigkeit des Detektors ist dadurch praktisch gleich geblieben, allerdings verringerte sich sein »Gesichtsfeld«, er sieht also weniger Teilchen pro Zeiteinheit. Diesen Nachteil gleicht aber die erheblich verlängerte Messzeit mehr als aus.

Außerdem hat sich der eigentlich für Juli 2010 vorgesehene Starttermin zwei weitere Male verschoben: Jetzt ist der 26. Februar anvisiert. Weil das Shuttleprogramm im Jahr 2011 endet, ist dies wohl die letzte Chance für AMS, auf die Raumstation zu gelangen. An diesem Tag wird die spannendste Phase der Arbeit von mehr als 500 beteiligten Forschern und Ingenieuren aus 16 verschiedenen Ländern beginnen. Seit über zehn Jahren arbeiten sie unter Leitung des US-amerikanischen Nobelpreisträgers Samuel Ting, der 1974 das Charm-Quark entdeckte, an dem Projekt. Ist der Start erfolgreich, wird die Internationale Raumstation endlich ihr Versprechen erfüllen, eine Forschungsplattform auch für die astrophysikalische Grundlagenforschung im Weltall zu sein. Gemessen an dem Aufwand, der weltweit dafür getrieben wird, spielt AMS in einer Liga mit dem Weltraumteleskop Hubble und anderen wichtigen Weltraumexperimenten wie Fermi, Planck oder WMAP. Seine Ergebnisse dürften unser Verständnis vom Aufbau der Welt ebenso nachhaltig beeinflussen.

Wirklich bahnbrechende Experimente haben sich aber immer auch durch unerwartete Ergebnisse ausgezeichnet. Nur zwei prominente Beispiele: Das japanische Superkamiokande-Experiment war gebaut worden, um die Lebensdauer des Protons zu messen; doch seine wichtigste Entdeckung ist die Tatsache, dass Neutrinos eine Masse besitzen. Das Weltraumteleskop Hubble sollte vor allem entfernte Galaxien studieren; sein größter Erfolg ist jedoch der Nachweis der beschleunigten Expansion des Universums. Noch wissen wir nicht, welche Überraschungen die Natur auch in Zukunft für uns bereithält. Aber wenn wir Glück haben, wird AMS uns schon bald Einblicke in neue wissenschaftliche Fragestellungen geben, an die wir vorher noch gar nicht gedacht haben. ◀



Stefan Schael (links) lehrt und forscht seit dem Jahr 2000 als Professor an der RWTH Aachen auf dem Gebiet der Experimentalphysik, nachdem er zuvor am Max-Planck-Institut für Physik und am Teilchenforschungszentrum CERN gearbeitet hatte. Im Fokus seiner Arbeit, bei der er Experimente an Beschleunigern und Ergebnisse der Astroteilchenphysik miteinander verknüpft, stehen Fragen zur Natur der Dunklen Materie. Im Rahmen des AMS-Projekts koordiniert er die deutschen Beiträge und hat mit seiner Gruppe maßgeblichen Anteil am Physikprogramm von AMS und an Entwicklung und Bau des Übergangsstrahlungsdetektors, des Spurdetektors und des Antikoinzidenzzählers. Außerdem war er führend an Entwicklung und Bau des Spurdetektors für das CMS-Experiment am Beschleuniger LHC beteiligt. **Jan Hattenbach** ist Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er hat im Rahmen seiner Diplomarbeit am Bau des AMS-Übergangsstrahlungsdetektors mitgearbeitet.

Adriani, O. et al.: An Anomalous Positron Abundance in Cosmic Rays with Energies 1.5–100 GeV. In: Nature 458, S. 607–609, 2. April 2009.

Aguilar, M. et al.: Cosmic-Ray Positron Fraction Measurement from 1 to 30-GeV with AMS-01. In: Physics Letters B 646, S. 145–154, März 2007.

Alcaraz, J. et al.: The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station: Part I – Results from the Test Flight on the Space Shuttle. In: Physics Reports 366, S. 331–405, 2002.

Beischer, B. et al.: Perspectives for Indirect Dark Matter Search with AMS-2 Using Cosmic-Ray Electrons and Positrons. In: New Journal of Physics 11, S. 105021, Oktober 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040552.

Mondphasen im Apfelbaum

*Der Mond hat kein Licht von sich aus,
und so viel die Sonne von ihm sieht, so viel beleuchtet sie;
und von dieser Beleuchtung sehen wir so viel, wie viel davon uns sieht.*

Leonardo da Vinci (1452–1519)



Wie vermessen, den Mond mit einem Apfel oder gar einem Tischtennisball zu vergleichen. Erst Galileo Galilei erkennt, dass man ihn als einen Gegenstand denken kann, der »sich in die Hand nehmen lässt«.

ALLE ABBILDUNGEN: H. JOACHIM SCHLICHTING

Von H. Joachim Schlichting

Auf prägnante und leicht animistische Weise beschreibt Leonardo da Vinci hier ein sehr vertrautes Phänomen. Aber wie viele Menschen haben es wirklich verstanden und leben in dieser Hinsicht eben nicht hinter dem Mond? Die geradezu visionäre Visualisierung, mittels derer Leonardo das Problem der Mondphasen auf den Punkt bringt, zeugt nicht nur von seinem anschaulichen Verständnis der Vorgänge, sondern zeigt außerdem, dass er die euklidische Vorstellung von der Geradlinigkeit der Lichtausbreitung und der Umkehrbarkeit des Lichtwegs voll verinnerlicht hat. Man kann seine Einsicht nicht genug bewundern, denn sie geht fast auf das Jahr 1500 zurück. Damals können sich die meisten Menschen noch nicht einmal vorstellen, dass sich die Erde um die Sonne dreht: Kopernikus' »Von den Umdrehungen der Himmelssphären« (»De revolutionibus orbium coelestium«) erscheint erst Jahrzehnte später, in dessen Todesjahr 1543.

Der Mond verhält sich im Prinzip nicht anders als eine sonnenbeschienene Frucht. Darauf hat schon Barthold Hinrich Brockes in einem seiner Naturgedichte am Beispiel einer Beere ausdrucksstark und detailliert hingewiesen (linke Spalte). Eine Beere war nicht zur Hand, so dass wir stattdessen Äpfel zum Einsatz bringen (oben, Bild links). Auch bei ihnen erscheint nur diejenige Seite hell, die »in der Sonne liegt«. Zudem befinden wir uns, wenn

der Mythos nicht trägt, mit unserem Vergleich von Apfel und Mond in guter Gesellschaft eines großen Aufklärers und Physikers. In seinem »Timorus« schreibt Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799): »Warum der Mond ohne Nagel und Strick dort oben hängt, ohne uns auf die Köpfe zu fallen, wenn wir drunter weggehen, hat ein alter Inspektor bei der Münze zu London erraten, als ihm einmal ein Apfel, der nicht größer als eine Faust war, von einem Baume auf die Nase fiel.«

Newtons Werk ist aber bereits getan und so können wir uns auch von seinen Hilfsmitteln lösen. Denn eindrucksvoller noch als mit einem grünen Apfel lässt sich das Schattentheater am Himmel mit einem mondweißen Tischtennisball nachstellen. Einen solchen trage man an einem wolkenlosen Sommertag einfach um einen interessierten Beobachter herum und erläutere diesem die »Ballphasen« (oben, Bild rechts).

Ball- und Mondphase unterscheiden sich weniger, als es auf den ersten Blick den Anschein hat. Zwar zeigt uns der Ball auch seine von der Sonne nicht beleuchteten Flächen (denn diese liegen im Streulicht des Himmels und der näheren irdischen Umgebung), während der Mond kaum Streulicht erhält. Doch die Betonung liegt auf »kaum«, denn unter günstigen Umständen zeigt sich uns auch die im Sonnenschatten liegende Mondseite. Dies ist insbesondere kurz vor oder nach Neumond zu beobachten, wenn die der Erde zugewandte Seite des Mondes weit gehend im Schatten

Die Trauben (Auszug)

*Es scheint, wenn auf einer
glatten Beere
Der Sonnen Licht oft eine Stell'
erhellet,
Und dann von Stengeln drauff
ein kleiner Schatten fällt;
Als ob ein Stengel recht darauf
gezeichnet wäre.
So wie der Mond, nachdem auf
ihn die Sonne stral't,
Sich bald im halben Licht',
und bald im ganzen mal't;
So wird von diesen runden
Beeren
Die eine Seiten=wärts, die
and're ganz,
Nachdem bald Seiten=wärts,
bald vorn der Sonnen Glanz
Sie rüret; angestral't und hell
gemacht,
So daß ich oft in ihrer kleinen
Ründe
Zugleich ein kleines Bild von
Mond und Sonne finde.*

Barthold Hinrich Brockes
(1680–1747)

und die dem Mond zugewandte Erde nahezu im vollen Sonnenlicht liegt (Bild rechts).

Auch für dieses Phänomen des *lumen cinerum*, des aschgrauen Lichts oder auch Erdlichts des Mondes, hat Leonardo da Vinci in seinen »Philosophischen Tagebüchern« wohl erstmalig eine Antwort gefunden. Auf den ersten Blick klingt sie zudem verblüffend einfach: Des Mondes »Nacht empfängt so viel Helligkeit, wie unsere Gewässer ihm spenden, indem sie das Bild der Sonne widerspiegeln, die sich in allen jenen (Gewässern) spiegelt, welche die Sonne und den Mond sehen«.

In der Tat, im aschgrauen Licht des Mondes sehen wir das Streulicht jener Regionen der Erde, die im Licht der Sonne liegen und es teilweise in den Weltraum zurückstrahlen. Die Intensität dieses Erdlichts schwankt daher auch mit dem bewölkungs- und landschaftsabhängigen Rückstrahlvermögen der Erde, ihrer Albedo; aus dem Erdlicht wurden sogar schon meteorologische Aussagen über die Wolkenbedeckung der Erde gewonnen.

Die Vorstellungskraft arg auf die Probe gestellt

Diese Zusammenhänge klingen theoretisch so einsichtig, dass man sie unmittelbar glauben mag. Aber ist denn das Streulicht tatsächlich so intensiv, dass es bis zum Mond reicht und von dort, abermals gestreut, auf der Erde einen sichtbaren Effekt hinterlässt? Das stellt unsere Vorstellungskraft schon arg auf die Probe (Grafik rechts). Doch man stelle sich vor, wir seien als Beobachter auf den Mond versetzt und blickten von dort auf die Vollerde. In der »Mondnacht« erscheint sie etwa 50-mal heller als auf der Erde der Vollmond. Und dessen Licht ist bereits hell genug, einem nächtlichen Wanderer den Weg zu weisen. Dieser Perspektivwechsel macht das Phänomen des aschgrauen Lichts unmittelbar einleuchtend – geradezu im doppelten Wortsinn.

Der häufige Eindruck, dass der im aschgrauen Licht erkennbare Teil des Mondes den hellen Sichelmond nicht perfekt ergänzt, sondern scheinbar nur zu einer kleineren Scheibe passt, ist übrigens eine Täuschung, die auf der Überstrahlung oder Irradiation durch den großen Helligkeitsunterschied beruht (siehe SdW 9/2009, S. 38). Jetzt bleibt nur noch eine Kleinigkeit zu klären: Warum sieht man das aschgraue Licht nicht bei Neumond, wenn aus Sicht des Mondes Vollerde ist? Der Neumond ist nur bei Tageslicht oberhalb des Horizonts zu sehen, und dann überstrahlt ihn das Licht in der Atmosphäre.

Doch wie vermessen, den Mond mit einem Tischtennisball zu vergleichen. Hier der in

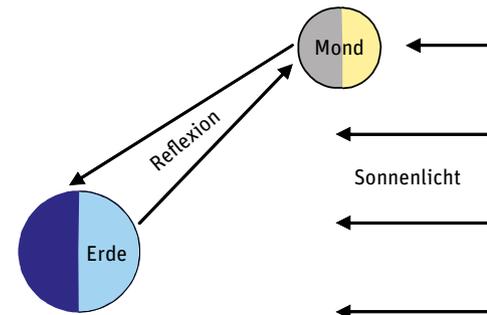


Händen zu haltende Gegenstand, dort der unerreichbare, aus der Sicht der Zeitgenossen Leonardos nicht (an)fassbare Himmelskörper. Erst Galileo Galilei, der den Mond als einer der ersten Menschen durch ein Fernrohr betrachtet, erkennt, dass dieser der Erde gleicht, über Berge, Täler und – wie er meint – Flüsse und »Mare« verfügt. Vom Mond zu sprechen, so formuliert Paul Valéry, bedeute für Galilei spätestens ab diesem Moment, »einen Gegenstand an(zu)nehmen, der sich in die Hand nehmen lässt«. Letzteres wurde im letzten Jahrhundert durch die Landung von Menschen auf dem Mond dann ja auch im vollen Wortsinn realisiert.

Und der 1996 verstorbene deutsche Philosoph Hans Blumenberg schreibt, als »Mann von einer vertrackt reflektierten Optik« gehe Galilei in seiner Kühnheit noch wesentlich weiter: »Er richtet das Fernrohr auf den Mond, und was er sieht, ist die Erde als Stern im Weltall.« Dieser durch den Blick auf den Mond ausgelöste Gedanke muss im Rahmen der neuzeitlichen Physik als eine der wesentlichen Voraussetzungen dafür angesehen werden, dass das kopernikanische Weltbild auch für die Anschauung annehmbar wurde.

Insgesamt können wir Blumenberg nur beipflichten. Er sah im Mond als »Gestirn« eine sinnliche Singularität: »Er ist nicht graduell größer als andere Himmelsgebilde, sondern er allein hat eine wahrnehmbare Ausdehnung, eine strukturierte Fläche, eine kurzfristige ›Geschichte‹ erlebbarer Veränderung vom gänzlichen Verschwinden bis zur vollen Rundung. Er ›beschäftigt‹ die Wahrnehmung ohne Wissen, ohne Phantasie; selbst der ›Fortschritt‹ zu seiner Identifikation über seine Nichterscheinung hinweg war, obwohl eine frühe Vernunftleistung, keine vergleichbare ›Affektion‹ wie die Erfassung der Identität von Morgenstern und Abendstern. Der Mond ist einzig.« Das wissen auch die Dichter und die Liebenden, wenn sie eine romantische Mondnacht erleben.

»Der alte Mond in den Armen des neuen« ist eine der poetischen Umschreibungen des aschgrauen Lichts, das unter günstigen Umständen die im Sonnenschatten liegende Mondseite erkennbar macht.



Theoretisch ist sofort einsichtig, dass das einfallende Sonnenlicht erst diffus von der Erde zum Mond reflektiert wird und von dort wieder zurückgelangt. Anschaulich ist das weniger klar: Ist das Licht wirklich so intensiv, dass es der irdische Beobachter noch wahrnehmen kann?



H. Joachim Schlichting ist Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Er erhielt 2008

den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für seine didaktischen Konzepte.

Blumenberg, H.: Das Fernrohr und die Ohnmacht der Wahrheit. In: Galileo Galilei, Sidereus Nuncius. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1980, S. 22.

Blumenberg, H.: Die Vollzähligkeit der Sterne. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1997, S. 471.

Lichtenberg, G. C.: Timorus. In: Schriften und Briefe III. Hanser, München 1972, S. 229 f.

Valéry, P.: Cahiers 2. Suhrkamp, Frankfurt am Main 1988, S. 159.

Vinci, Leonardo da: Philosophische Tagebücher. Rowohlt, Hamburg 1958, S. 69.

Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040565.

Seit Anfang dieses Jahres läuft er endlich, der Large Hadron Collider am Forschungszentrum CERN bei Genf. Mit diesem Beitrag beginnen wir daher eine lockere Serie, in der beteiligte Forscher die wesentlichen Großanlagen dieses derzeit größten Physikexperiments der Menschheit präsentieren. Sie werden konkret über ihre Vorhaben und die neuesten Resultate berichten. Zu Beginn gibt der freie Technikjournalist Gerhard Samulat einen Überblick über den heutigen Stand und die derzeitige Experimentierstrategie des LHC.

Experimentieren am Limit

Den weltgrößten Teilchenbeschleuniger kann man nicht einfach einschalten. Angesichts der Komplexität des Large Hadron Collider ist es umso erstaunlicher, dass die Riesenmaschine schon jetzt Ergebnisse liefert.

In Kürze

- ▶ Nach langer Reparaturphase ist der Teilchenbeschleuniger LHC seit Monaten nahezu kontinuierlich in Betrieb. Seit Ende März kollidieren Protonen erstmals mit einer Energie von **sieben Teraelektronvolt**.
- ▶ Vorerst gilt das Interesse der Physiker vor allem der Überprüfung des Standardmodells der Teilchenphysik bei höheren Energien. Aber **auch auf Unerwartetes stießen** sie bereits.
- ▶ Schrittweise soll das Instrument bis 2016 seine maximale Leistung erreichen. Den Ingenieuren stehen dabei noch riskante Herausforderungen bevor. Doch schon jetzt liefert der LHC **schneller Ergebnisse als jeder andere Beschleuniger zuvor**.

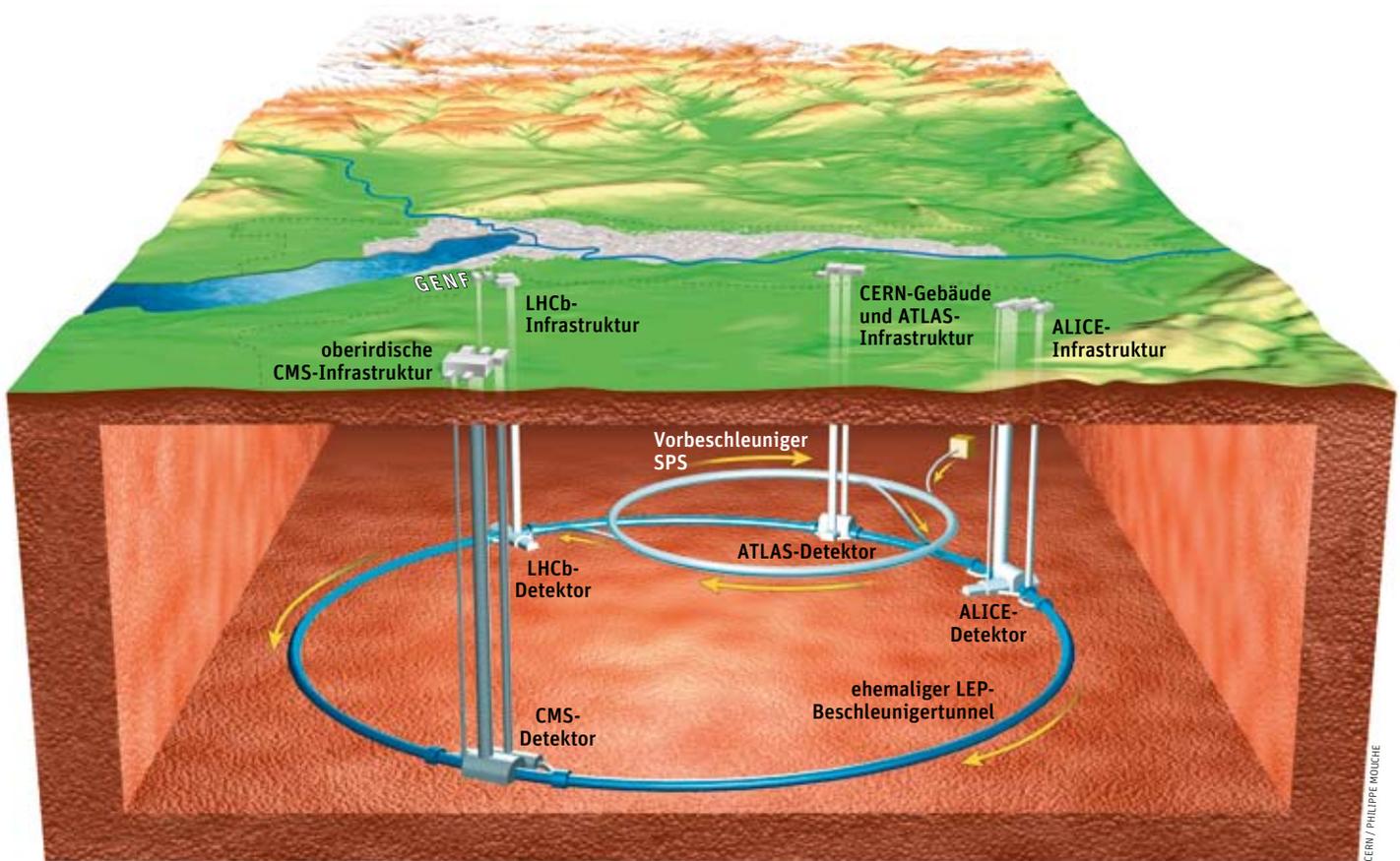
Von Gerhard Samulat

Nach vielen Pannen und Verzögerungen ist der Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN bei Genf nun endlich angelaufen – nach gut 20 Jahren Entwicklungs- und Bauzeit. Der größte, leistungsstärkste und mit rund drei Milliarden Euro teuerste Teilchenbeschleuniger der Welt sei eben keine »turn-key«-Maschine, die man einfach anschalten könne, betont Rolf Heuer, der Generaldirektor des CERN. Sie gleiche eher einem gewaltigen Orchester, bei dem Tausende von Instrumenten harmonisch aufeinander abgestimmt sein müssen.

Pannen vor der Generalprobe gab es viele. Einige waren richtiggehend skurril: So sorgte ein Stückchen Brot, das vermutlich ein Vogel fallen gelassen hatte, einmal für einen Kurzschluss in einem Stromverteiler. Ein anderes Mal ging etwas schief, als ein Teil des sonst in ultrakaltem Zustand betriebenen Beschleunigerings aufgewärmt wurde: Einige Metallfinger, die einen sauberen elektrischen Übergang zwischen den luftleer gepumpten Röhren garantieren, in denen mittlerweile die Protonen fliegen, bogen sich plötzlich mehrere Zentimeter in die Kammern hinein – sie hätten die be-

schleunigten Teilchen unverzüglich aus der Bahn geworfen. Ganz zu schweigen von den vielen Kurzschlüssen und Notabschaltungen der Geräte für die Stromversorgung, von denen es am Beschleuniger einige Zigtausend gibt.

Der folgenreichste Vorfall hatte sich jedoch am 19. September 2008 ereignet. Während eines Systemtests kam es im LHC-Speicherring auf Grund eines fehlerhaft verlöteten Stromkontakts zu einem Debakel. Weil der Kontakt einen gut 1000-fach zu hohen elektrischen Widerstand aufwies, stieg im Sektor 3-4 die Stromstärke zwischen einem Ablenkmagneten (Dipol) und einem Fokussiermagneten (Quadrupol) unerwartet auf fast 9000 Ampere. Binnen weniger als einer Sekunde entflammte dort ein Lichtbogen und brannte blitzschnell ein Loch in die Heliumummantelung sowie in die Vakuumsolation. Ein Teil der insgesamt rund 140 Tonnen suprafluiden Heliums, welche die Beschleunigeranlage auf 1,9 Kelvin kühlen, verdampfte explosionsartig und ließ die Supraleitfähigkeit der Magnete auf einen Schlag zusammenbrechen. So stark war die Druckwelle, dass sie auch von den vorsorglich eingebauten Entlastungsventilen nicht abgeschwächt werden konnte. »Die gut 20 Tonnen schweren Magnete sind bei dem Unfall um rund 30 Zentimeter verschoben worden«, berichtet Brian Cox, Teilchenphysi-



CERN / PHILIPPE MOULCHE

ker der University of Manchester und Mitglied des ATLAS-Konsortiums, das einen der vier Detektoren am LHC entwickelt hat und nun betreibt.

Weil der Tunnel bei Betrieb stets eine Sperrzone ist, in der sich niemand aufhalten darf, bestand aber zu keinem Zeitpunkt Gefahr für Menschen. Ein Wissenschaftler erzählt zudem, dass sogar die Sicherheitskräfte mehrere Tage nicht in den Tunnel gelassen wurden. Denn die Magnete ebenso wie das Tunnelinnere waren vereist und niemand konnte vorhersagen, ob sich die schweren Apparaturen beim Auftauen noch verschieben würden.

Die Reparaturen haben sogar Geld gespart

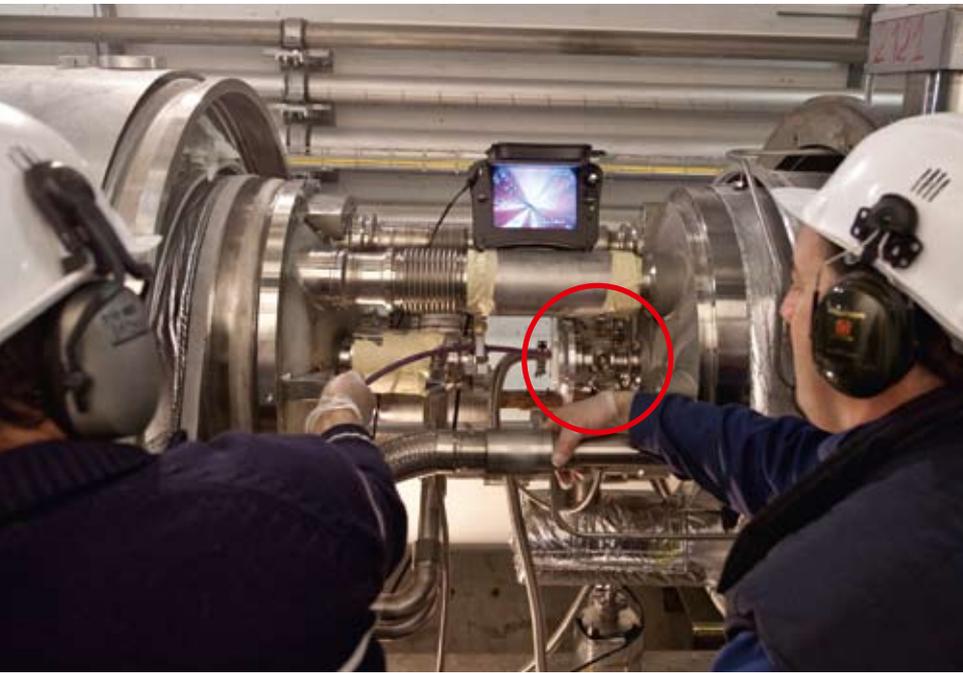
Die Schadensbilanz war katastrophal. 39 Dipole und 14 Quadrupole mussten ausgetauscht und ihre elektrischen Verbindungen erneuert werden. Die beiden Vakuumröhren waren auf einer Länge von vier Kilometern von Ruß verschmutzt. Das Heliumsystem erhielt rund 900 neue Überdruckventile. 50 Quadrupole bekamen zusätzliche Führungsschienen, die eine Querbewegung der Magnete künftig verhindern sollen. Auch ein neues Quench Protection System wurde installiert. Es soll den erneuten unkontrollierten Zusammenbruch (»Quench«) der Supraleitung in den Magneten

oder ihren Verbindungen verhindern. Allein dafür wurden über 6000 weitere Sensoren installiert, sie können Abweichungen der Widerstände vom Sollwert auf ein milliardstel Ohm genau registrieren. 250 Kilometer Kabel mussten die Techniker dazu neu verlegen und über 10000 elektrische Verbindungen nachmessen.

Die Kosten der 14 Monate dauernden Reparatur beziffert das CERN auf etwa 28 Millionen Euro. Die Summe konnte das Forschungszentrum allerdings aus dem laufenden Budget nehmen, ohne um Extramittel bitten zu müssen. Im Gegenteil, es hat sogar Geld gespart: Ohne Zwangspause hätte der Betrieb des LHC gut 1000 Gigawattstunden an Strom verschlungen. Immerhin zieht er bisweilen so viel Leistung aus dem Netz wie alle 450000 Einwohner des Kantons Genf zusammen.

Das Ersparte wird nun für die höheren Energiekosten im kommenden Winter eingesetzt. Denn erstmals in der Geschichte des CERN, das schon seit den späten 1950er Jahren Beschleuniger betreibt, verzichtet das Management auf die von November bis Mai dauernde Winterpause. Nach Aussage von Generaldirektor Heuer wird es diese auch künftig nicht mehr regelmäßig geben. »Wir benötigen gut einen Monat, um den LHC von Betriebstemperatur auf Umgebungstemperatur zu bringen«, erläutert Heuer, »und ebenfalls einen

Der bei Genf gelegene unterirdische Tunnel in rund 100 Meter Tiefe war schon fertig, als die Planer des LHC ihre Arbeit begannen. Er beherbergte zuvor den CERN-Beschleuniger LEP, den Large Electron-Positron Collider. Für den LHC wurden hier unter anderem neue Vakuumröhren, neue Magnete und vor allem auch die Detektoren ATLAS, CMS, LHCb und ALICE untergebracht.



CERN / MAXIMILIEN BRICE

Im Frühjahr 2009 mussten Techniker die beiden Strahlrohre (Kreis) des Beschleunigers auf vier Kilometer Länge von Ruß befreien, der sich dort durch einen schweren Störfall abgesetzt hatte. Links und rechts der Verbindungsstelle sind zwei der 1232 Hauptdipolmagnete des Beschleunigers zu sehen. Sie zwingen die Teilchen in den Strahlrohren auf eine Kreisbahn. Jeder von ihnen ist 15 Meter lang und wiegt über 20 Tonnen.

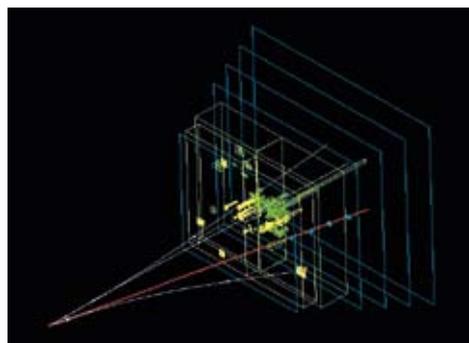
Wie gut funktioniert das Standardmodell der Elementarteilchenphysik bei den hohen Energien, wie sie der LHC erreicht? Um dies zu überprüfen, untersuchen die Forscher zunächst längst bekannte Teilchen. Diese Visualisierung zeigt das erste Auftauchen eines W-Bosons, eines Trägerteilchens der schwachen Kraft, im LHCb-Detektor (als rote Linie zu sehen ist nur das Myon, in das es zerfallen ist). Im Juli stieß der Detektor auch auf das verwandte Z-Boson.

Monat, um ihn wieder abzukühlen.« Da mache ein Shutdown von normalerweise vier Monaten keinen Sinn mehr, weil zu wenig Zeit für die eigentlichen Experimente verbleibe.

Für die Reparatur reaktivierte das CERN nahezu alle Ersatzmagnete. In der Zwischenzeit hatten allerdings die meisten von ihnen draußen auf kaltem Beton Wind und Wetter trotzen müssen. Besser wurden sie dadurch nicht, verrieten Beschleunigerexperten. Alle Spulen waren auf den Zusammenbruch der Supraleitung »trainiert«, doch viele der Ersatzkomponenten sind nun aus dem Training – einer der Gründe, aus denen die Betreiber ihre Maschine bislang nur mit halber Kraft laufen lassen.

Zwar bereiten die Techniker gut ein Drittel der beim Störfall nicht allzu sehr beschädigten Magnete als Ersatz wieder auf. Doch noch so ein Unfall, und das CERN hätte ein gewaltiges Problem. Weil nicht geplant ist, neue Dipole oder Quadrupole herstellen zu lassen, haben die Industriepartner ihre Fertigungsanlagen bereits größtenteils demontiert.

Misslich ist zudem, dass die genaue Ursache für die fehlerhafte Verbindung weiterhin



CERN

unklar ist, da diese im Lichtbogen verglühte. Spekuliert wird, dass eine Führungsschiene aus Kupfer, in welche die supraleitenden Stromkabel der Magnete eingebettet sind, schlecht verlötet war. Diese Kupferstabilisatoren sollen im Fall eines Quenchs den starken Strom aufnehmen. Gut zwei Jahre lang war ein französisch-niederländisches Konsortium mit rund 200 Ingenieuren und Technikern damit beschäftigt gewesen, die rund 24 000 Nahtstellen in jeweils bis zu sechs Arbeitsschritten zu verbinden. Gute Kenner des CERN – Physiker, die dort regelmäßig zu Gast sind – berichten aber, dass wegen des Zeitdrucks zum Schluss auch externe und nur unzureichend geschulte Fachkräfte diese Arbeiten verrichtet haben. Auch einige Messungen konnten nicht mehr durchgeführt werden.

Unmittelbar nach dem Unfall hatten Prüfungen zudem gezeigt, dass weitere dieser Verbindungen einen zu hohen Widerstand aufwiesen. Hätte man den Beschleuniger mit der Maximalenergie von je sieben Teraelektronvolt (TeV, Billionen Elektronenvolt) pro Teilchenstrahl betrieben, wäre dasselbe erneut passiert – ein weiterer Grund, aus dem sich das CERN-Management darauf verständigte, die Maschine noch nicht ganz hochzufahren. Die Protonenstrahlen sollen vorerst mit jeweils nur 3,5 TeV, dem halben Designwert, kollidieren (und dabei eine Schwerpunktenergie von sieben TeV erreichen). Selbst der Plan, die Maschine vorübergehend auch mit fünf TeV zu betreiben, wurde schnell wieder fallen gelassen.

Physikalisches Neuland in Sicht

Doch bereits jetzt beschreitet der LHC physikalisches Neuland. Die Energie ist nun etwa dreieinhalbmal höher als der Wert, den der zuvor stärkste Beschleuniger, das Fermilab in den Vereinigten Staaten, erreichte. »Unser Ziel ist es«, ließ Rolf Heuer überdies verlautbaren, »in den nächsten 18 bis 24 Monaten ein inverses Femtobarn an Daten zu liefern.« Am Fermilab wurde dieser Wert erst nach über einer Dekade erreicht, er entspricht vielen Billionen Kollisionen zwischen den Bestandteilen zweier Protonen.

Nach einem von der Öffentlichkeit kaum beachteten rund sechswöchigen Probelauf gegen Ende 2009 läutete dann der so genannte First Physics Day am 30. März 2010 die lang ersehnte kontinuierliche Datennahme bei einer Schwerpunktenergie von sieben TeV ein. Wichtige Erkenntnisse hatte aber auch die vorangegangene kurze Messperiode bereits gebracht. Nachdem die Nachweisgeräte zuvor ausschließlich mit kosmischer Höhenstrahlung getestet werden konnten, standen den Physikern seither weitere Verfahren zur Verfügung,

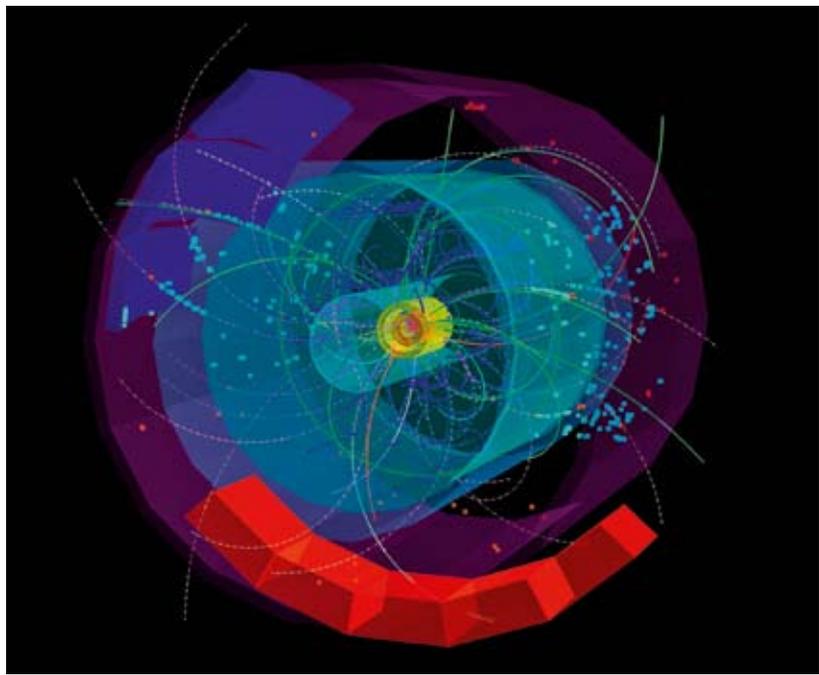
um ihre Anlagen zu justieren. Wechselwirkungen der Protonen mit dem Restgas in den Vakuumkammern simulierten erste Kollisionen. Und um so genannte *beam splashes* zu erzeugen, ließen die Forscher die schnellen Teilchen bereits rund 300 Meter vor den Experimenten auf Absorber prallen. Bei diesen abrupten Stopps entstehen Teilchenschauer, mit denen sich die einzelnen Detektorkomponenten zeitlich und räumlich eichen lassen. Dann ging es richtig los. Die ersten Kollisionen umlaufender Protonen fanden bei zunächst 450 GeV (Milliarden Elektronvolt) statt, bei der Energie also, mit der die Teilchen aus dem Vorbeschleuniger SPS in den LHC-Ring geschossen werden. Später wurden die Teilchen im LHC auf 540 GeV, dann auf 1080 GeV und schließlich auf 1,18 TeV beschleunigt.

Für eine so komplexe Anlage, wie sie der LHC ist, erreicht er außergewöhnlich schnell vorzeigbare Ergebnisse (siehe auch SdW 6/2010, S. 16). Bereits nach zehn Wochen war der Beschleuniger zu über 65 Prozent für Tests und Experimente verfügbar, resümiert CERN-Chef Heuer. »Normalerweise benötigt ein neuer Beschleuniger dafür Jahre«, sagt er.

Sobald das Zwischenziel von einem inversen Femtobarn an Daten erreicht ist, verfügen die Physiker über ausreichend Material, um neue Erkenntnisse gewinnen zu können. Zum Beispiel über supersymmetrische Teilchen: Diese hypothetischen Partikel könnten, wenn sie denn existieren, den Weg zur »Weltformel« ebnen. Experimente an anderen Beschleunigern hätten nur solche supersymmetrischen Teilchen entdecken können, deren Masse maximal etwa 400 GeV beträgt. Ein inverses Femtobarn am LHC gestattet hingegen, diese Grenze auf rund 800 GeV zu verdoppeln.

Außerdem könnten die Forscherinnen und Forscher nun die lang gesuchten Higgs-Partikel aufspüren. Weil sich die Ergebnisse der beiden Nachweisgeräte ATLAS und CMS kombinieren lassen, wird ihnen das voraussichtlich selbst dann gelingen, wenn die Teilchen eine Masse von bis zu 160 GeV besitzen sollten. Deren Existenz hatte der britische Physiker Peter Higgs bereits 1964 vorausgesagt: Sie sollen den Elementarteilchen, die vom Standardmodell der Teilchenphysik als masselos beschrieben werden, erst richtig »Gewicht« verleihen, indem sie ihnen ihre Massen zuweisen.

Ferner könnten die Experimente am LHC Hinweise auf Extradimensionen geben. Sie würden in Form »neuer massebehafteter Teilchen« auftauchen – so umschreiben die Öffentlichkeitsarbeiter am CERN derzeit offenbar die gemeinhin als Schwarze Minilöcher bekannten Phänomene. Entstehen könnten diese mikroskopischen Raum-Zeit-Verkrümmungen,



CERN / DESPINA CHAZOTAROU

falls die Welt mehr als die drei von uns wahrgenommenen Raumdimensionen besitzt und sich die Gravitation in diesen Dimensionen überdies als stärker erweisen sollte, als sie es in unserem Alltag ist. Zwar sind auch die Minilöcher extrem kompakt, so dass ihnen weder klassische Materie noch die Photonen des Lichts entfliehen können. Doch nach gängiger Theorie zerstrahlen sie nach einer un beobachtbar kurzen Lebenszeit spontan wieder – ihr Zerfall ließe sich so sogar nachweisen.

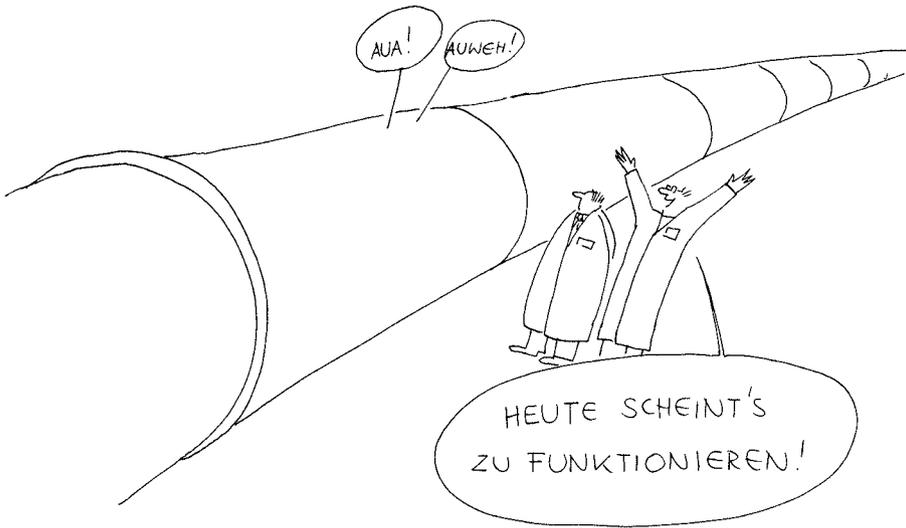
Fürchten müsse man sich vor diesen Miniaturungeheuern aber nicht, meint Peter Braun-Munzinger, Wissenschaftlicher Direktor des ExtreMe Matter Institute am Darmstädter GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. In den vielen Milliarden Jahren, in denen die Erde bereits existiert, hätten die Protonen der kosmischen Höhenstrahlung bereits unzählige dieser zwergenhaften Schwarzen Löcher in der oberen Atmosphäre entstehen lassen müssen. Oft treffen sie dort sogar mit höheren Energien auf, als sie die Protonen im LHC erreichen. »Die bloße Tatsache, dass wir uns darüber Gedanken machen können, ist ein schlagkräftiger Beweis dafür, dass sie ungefährlich sind«, zieht Braun-Munzinger die logische Konsequenz.

Zunächst haben die vier am LHC arbeitenden Nachweisgeräte ATLAS, CMS, ALICE und LHCb aber bodenständigere Ergebnisse produziert. Im Schnitt registrieren die Detektoren bei stabilen Strahlbedingungen von teilweise 18 Stunden oder länger anfangs etwa 1000 Kollisionen pro Sekunde. Das ist zwar noch weit weg von der so genannten Design-Luminosität von etwa 40 Millionen Ereignissen pro Sekunde, brachte aber bereits erste be-

Immer energiereichere Kollisionen vermessen die Detektoren am LHC. Die Darstellung zeigt die vom ALICE-Detektor bei einer Schwerpunktennergie von sieben Teraelektronvolt registrierten Teilchenspuren.

KOMPLEXER CRASH

Anders als bei Zusammenstößen zwischen Elektronen mit ihrer Antimaterie, den Positronen, ist bei der Kollision von komplex aufgebauten Teilchen wie den Protonen normalerweise nur ein Teil der Schwerpunktennergie für die Produktion neuer Materie nutzbar. Schließlich kollidieren bei solch hohen Energien genau genommen nicht die Protonen, sondern ihre Bestandteile: Quarks und Gluonen (Gluonen sind die Austauscheteilchen der starken Wechselwirkung, welche die Quarks in den Protonen aneinanderbindet). Diese Kollisionen finden aber jeweils nur mit etwa einem Sechstel der Schwerpunktennergie statt. Bei sieben Teraelektronvolt ist das also knapp über ein TeV.



Johanna Stachel von der Universität Heidelberg leitet Entwicklung und Betrieb des Übergangsstrahlungsdetektors, eines zentralen Bauteils des ALICE-Experiments. Auch zahlreiche weitere deutsche Forschungseinrichtungen leisten maßgebliche Beiträge zum LHC.



CERN / ANTONIO SABA

merkenswerte Erkenntnisse. Auffällig ist beispielsweise, dass bei höheren Energien offenbar mehr Teilchen entstehen – insbesondere mehr so genannte Pionen und Kaonen –, als es die CERN-Forscher erwartet haben. »Ihre Anzahl ist etwas höher, als es die Modelle vorhersagen«, sagt CMS-Wissenschaftler Gunther Roland, »und es sieht so aus, als würde dieser Effekt mit zunehmender Energie deutlicher werden.« Noch können die Physiker aber nicht genau sagen, ob sich der Trend bestätigt oder ob einfach die Monte-Carlo-Simulationen nachgebessert werden müssen. Mit solchen Berechnungen haben die Physiker und Konstrukteure die Reaktionen der Detektoren vorher genauestens am Computer durchexerziert.

Ansonsten vermelden die Arbeitsgruppen unisono, dass sich die Ergebnisse sehr gut mit den Monte-Carlo-Modellen decken. Derzeit versuchen sie, das bekannte Standardmodell zu verifizieren, um später sicher sein zu können, dass die Messergebnisse bei höheren Energien wirklich auf eine neue Physik zurückzuführen sind und nicht auf Artefakte des Detektors. Kurz nach dem Anlaufen der Nachweisgeräte konnten bereits erste so genannte Jets gemessen werden. Sie stammen von Quarks oder Gluonen, die beim Zusammenprall aus den Protonen herausgeschleudert wurden und zu einem Zoo bekannter Teilchen aufschauern. Überdies wurden bereits Teilchenzerfälle registriert, die auf die Produktion von W-Bosonen hinweisen. Das sind die geladenen Austauschteilchen der elektroschwachen Wechselwirkung, die 1983 erstmals am CERN aufgespürt wurden. Bereits ein Jahr später konnte der ehemalige CERN-Generaldirektor Carlo Rubbia zusammen mit Simon van der Meer dafür den Nobelpreis für Physik einheimsen. Und kürzlich vermeldete die LHCb-Gruppe, man hätte durch Rekonstruktion von rund 100 Teilchenspuren ein erstes B-Meson identifizieren können. Von den

Beobachtungen, wie dieses zerfällt, erhoffen sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler neue Erkenntnisse darüber, warum es im Universum nahezu ausschließlich Materie und kaum Antimaterie zu geben scheint.

Fast so schnell wie mit den ersten Ergebnissen waren die Physiker mit ihren Publikationen. Auf dem internationalen Onlineserver für wissenschaftliche Abhandlungen und Studien, arXiv.org, wurde nur wenige Tage nach Anlaufen der Maschine Ende 2009 eine erste Studie zur Dichte der Pseudorapidität veröffentlicht. Dieses Maß für den Winkel der Teilchenbahnen in Bezug zur Strahlachse hatten die Forscher aus Daten von 284 Kollisionen im ALICE-Detektor gewonnen. »Der Sprecher unserer Kollaboration hat die Arbeit persönlich beim Chefredakteur abgegeben«, verrät Johanna Stachel (Foto links). Die Professorin an der Universität Heidelberg ist Mitglied der ALICE-Gruppe, von der die Untersuchung durchgeführt wurde. Das Ergebnis der Studie deckt sich übrigens vorzüglich mit dem Wert, der in den 1980er Jahren bereits am CERN gemessen wurde.

**Mancher prophezeit:
»Es wird länger dauern«**

Für aussagekräftigere Ergebnisse, die über das Standardmodell hinausgehen, müssen die Operateure neben der Energie nun aber auch die Trefferrate der Teilchenkollisionen steigern. Zu Beginn der Versuche lenkten sie zwei mal zwei Teilchenpakete mit je rund zwei Milliarden Protonen gegenläufig durch die Vakuumröhren des LHC-Beschleunigers. (Nur so ist sichergestellt, dass alle vier Experimente gleichzeitig mit Kollisionen versorgt werden.) Mitte April dieses Jahres erhöhten sie die Intensität der Teilchenpakete auf 20 Milliarden Protonen pro Paket und planen nun, diesen Wert nach und nach auf über 100 Milliarden zu steigern.

Bis Ende 2010 sollen bis zu 720 Protonenpakete pro Strahlrohr durch den LHC zirkulieren. Die maximale Kapazität liegt bei 2808 Paketen pro Richtung, wengleich manche Stimmen behaupten, das ließe sich wohl nicht vor dem Jahr 2016 erreichen. Ferner ist vorgesehen, noch vor Ende 2010 die ersten Kollisionen mit Bleiionen durchzuführen.

Technisch sind das jeweils gewaltige und riskante Herausforderungen. Zwar besitzt jedes auf ein Teraelektronvolt beschleunigte Proton gerade einmal die Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Man stelle sich aber die Wucht von fast 3000 Schwärmen mit jeweils gut 100 Milliarden Mücken vor, die allesamt in die gleiche Richtung fliegen und auf ein einziges Ziel prallen. Das entspricht der Wucht eines 400 Tonnen schweren ICE-Zugs,

INTERVIEW

»Neue Physik im nächsten Jahr«

Im Juli stellten LHC-Forscher auf der internationalen ICHEP-Konferenz zur Hochenergiephysik in Paris jüngste Ergebnisse vor. Gerhard Samulat sprach mit Professor Joachim Mnich vom Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg.



Joachim Mnich

Spektrum: Der LHC liefert seit Monaten kontinuierlich Daten. Was waren in Paris die Highlights?

Joachim Mnich: Der Fortschritt des LHC ist absolut beeindruckend: Seit den ersten Kollisionen bei der Rekordenergie von sieben TeV Ende März gelang in nur vier Monaten eine Erhöhung der Luminosität, das heißt der Kollisionsrate, um mehr als einen Faktor 1000. Auch die Detektoren arbeiten ausgezeichnet. Ferner bewältigte das weltweite LHC-Computing-Grid den Ansturm der Daten problemlos. Die Nachweisgeräte konnten inzwischen alle bekannten Teilchen des Standardmodells der Teilchenphysik nachweisen. Als Letztes das Top-Quark, das schwerste Elementarteilchen, das somit zum ersten Mal in Europa erzeugt wur-

de. Der Beschleuniger ist auf bestem Weg, mit der eigentlichen Aufgabe zu beginnen: der Suche nach einer neuen Physik.

Spektrum: Anfang des Jahres berichteten die Experimentatoren, dass sie überrascht waren von der großen Zahl an Teilchen, die bei hohen Energien entstehen. Hat sich dieser Trend bestätigt?

Mnich: Die gegenüber den Erwartungen erhöhte Teilchendichte bei den höchsten Energien scheint sich in den Messungen zu bestätigen. Allerdings sind noch detaillierte Studien notwendig, um zu entscheiden: Handelt es sich um einen neuen Effekt? Oder müssen die Simulationen angepasst werden?

Spektrum: Wann kann damit gerechnet werden, das Higgs-Teilchen am LHC zu finden?

Mnich: In der Tat wurden kürzlich Ergebnisse von Experimenten am Tevatron in den USA vorgestellt, die den erlaubten Massenbereich für das Higgs-Teilchen weiter einschränken. Es sieht immer mehr danach aus, dass es sich in der am schwierigsten zugänglichen Ecke versteckt, nämlich nur wenig über der unteren experimentellen Schranke von 114 GeV.

Spektrum: Gibt es bereits erste Hinweise auf eine »neue« Physik?

Mnich: Dafür ist es noch zu früh, die bisherigen Daten reichen noch nicht aus. Aber spätestens 2011 könnte der LHC in Bereiche vorstoßen, in denen eine neue Physik möglich wäre.

Das ausführliche Interview lesen Sie auf: www.spektrum.de/artikel/1040951

der mit einer Geschwindigkeit von 150 Kilometern pro Stunde dahinschaut.

Die geballte Energie – im Maximum immerhin rund 350 Megajoule – birgt große Gefahren: »In früheren Beschleunigern wie Hera in Hamburg oder dem Tevatron in den Vereinigten Staaten dienten Kollimatoren, also Blenden im Strahlrohr, dazu, die Experimente vor herumfliegenden Protonen zu schützen, die von der Bahn abgekommen sind«, sagt Jörg Wenninger, Maschinenphysiker am CERN. »Beim LHC schützen sie auch die Ablenkermagnete«, fügt er hinzu. Denn dringen energiereiche Protonen in einen supraleitenden Dipol oder Quadrupol, können sie dort so viel Energie deponieren – einige Millijoule reichen bereits aus –, dass sich der Magnet lokal erwärmt und quent. Dann ließe sich der Strahl nicht mehr auf der Bahn halten und müsste gezielt ausgelenkt werden. Aus diesem Grund besitzt der LHC über den gesamten Ring verteilt Hunderte solcher Blenden.

Auch das Entsorgen des Strahls ist extrem kritisch: Auf die Mikrosekunde genau müssen 15 so genannte *extraction kickers* und zwölf Septa genannte Strukturen die energiereichen

Protonen aus der Maschine lenken. Sie schießen sie in zwei jeweils sieben Meter lange Blöcke aus wassergekühltem Graphit, um die herum massive Eisenblöcke mit 750 Tonnen Gewicht gestapelt sind. Der Beschuss kann diese *beam dumps* genannten Protonengräber auf bis zu 800 Grad Celsius erhitzen. Für die Extraktion, das »Herausnehmen«, benötigen die Operateure zudem ein etwa drei Mikrosekunden langes »Loch« im Teilchenstrahl, in dem keine Protonen enthalten sein dürfen. Denn wird die Population dort zu groß, quentchen mit großer Sicherheit die benachbarten Ablenkermagnete.

Noch haben die Operateure genug Zeit, diese Prozeduren zu perfektionieren. Derzeit arbeitet der LHC mit nur einigen Kilojoule gespeicherter Energie und oft mit weniger als einem Promille des Designwerts. Erst im Jahr 2013, beim Neustart nach der großen Umbaupause, die Ende 2011 beginnen soll, wird die Maschine wohl auf sechs, ein Jahr später dann auf den Designwert von sieben TeV gebracht. Spätestens dann muss der LHC beweisen, ob er die in ihn gesetzten Erwartungen erfüllen kann. ◀



Gerhard Samulat ist Diplomphysiker. Er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden.

The ALICE Collaboration et al.:

First Proton-Proton Collisions at the LHC as Observed with the ALICE Detector: Measurement of the Charged Particle Pseudorapidity Density at $\sqrt{s} = 900$ GeV. In: The European Physical Journal C, 65(1-2), S. 111–125, Januar 2010.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040553.

Die Macht der stummen Mutationen

Geringfügige Veränderungen der DNA, die bis vor Kurzem noch als belanglos galten, sind nach neueren Erkenntnissen Auslöser vieler Erkrankungen. Damit spielen sie nicht nur eine wichtige Rolle in der Evolution, sondern haben auch große Bedeutung für Medizin und Biotechnologie.

Von Jean V. Chamary
und Laurence D. Hurst

Lange Zeit meinten Biologen genau zu wissen, wie Genmutationen Krankheiten verursachen. Jüngsten Befunden zufolge sind die Verhältnisse jedoch komplizierter als vermutet. Wie sich zeigte, können Änderungen der DNA auf überraschende, ja widersinnige Weise krank machen. Das gilt speziell für »stumme« Mutationen, welche die Zusammensetzung des betroffenen Eiweißstoffs nicht beeinflussen.

Proteine sind an praktisch allen zellulären Funktionen beteiligt, von der Katalyse biochemischer Reaktionen bis zur Erkennung von Krankheitserregern. Wie sie entstehen, schien den Biologen unerheblich, solange ihre Struktur am Ende korrekt ist. Dennoch ließ sich vereinzelt in detektivischer Kleinarbeit nachweisen, dass eine Erkrankung auf einer stummen Mutation beruhen müsse – auch wenn die Mehrheit der Forscher lange bestritt, dass dies die gesuchte Ursache sein könne. Ähnlich rätselhafte Befunde erbrachten Untersuchungen zur Evolution kompletter Genome: Wie das Muster von DNA-Änderungen bei verschiedenen Tierarten ergab, wurden viele stumme Mutationen über lange Zeit konserviert; demnach sollten sie ihren Trägern einen Vorteil verschafft haben. Oft schienen sie die Effektivität der Proteinsynthese zu erhöhen.

Inzwischen ist die Bedeutung solcher keineswegs stummen Mutationen vielfach belegt. Auch zeichnet sich immer klarer ab, wie sie beim Menschen die Gesundheit beeinträchtigen können. Die neuen Erkenntnisse verhelten aber nicht nur zu einem besseren Verständnis von Erbkrankheiten, sondern dürften auch hochinteressante Möglichkeiten zur Optimierung von DNA-Sequenzen für die Gentechnologie oder -therapie eröffnen.

Wie kann ein Gen eigentlich mutieren, ohne dass sich die Zusammensetzung des zugehörigen Eiweißstoffs ändert? Antwort gibt ein Blick auf die zelluläre Proteinsynthese, die nach einem simplen Schema abläuft: Von einem DNA-Abschnitt im Zellkern, der die Bauanleitung für einen Eiweißstoff enthält, entstehen zahlreiche RNA-Arbeitskopien und wandern ins Zellplasma, wo nach ihren Instruktionen Ketten aus Aminosäuren zusammengebaut werden, die sich schließlich zu funktionsfähigen Proteinmolekülen falten.

Doch schauen wir uns den Vorgang etwas genauer an. Die Bauanleitung ist mit den vier Buchstaben des chemischen Alphabets der Nukleinsäuren verfasst: den Basen Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T), dessen Rolle in der RNA das Uracil (U) übernimmt. Sie sind in langen Nukleotidsträngen in einer bestimmten Abfolge aneinandergereiht, die ihre Botschaft repräsentiert. In der DNA liegen zwei solche Stränge mit komplementärer Basensequenz – wobei sich A und T sowie G und C gegenüberstehen und Paare bilden – aneinandergelagert als Doppelhelix vor. Soll von einem Gen das zugehörige Protein gebildet werden – Biologen sprechen von Expression –, müssen sie sich zunächst trennen. Dann fertigt die so genannte Transkriptionsmaschinerie von demjenigen mit der Bauanleitung RNA-Kopien an. Aus dieser Abschrift, dem primären Transkript, müssen oft noch Teile herausgeschnitten werden. Das Ergebnis ist eine »reife Boten-RNA« (mRNA), die schließlich als Vorlage zur Synthese des entsprechenden Proteins dient.

Bewerkstelligt wird der Zusammenbau des Eiweißstoffs von den Ribosomen. Diese großen Multienzymkomplexe müssen die im Nukleinsäure-Alphabet kodierten Instruktionen dabei in die Sprache der Aminosäuren übersetzen, ein als Translation bezeichneter Vorgang. Dazu benötigen sie Transfer-RNAs (tRNAs),

In Kürze

- ▶ Über viele Jahrzehnte galt als selbstverständlich, dass Mutationen, welche die in einem Gen kodierte Aminosäuresequenz nicht verändern, **keine Auswirkungen** haben, also stumm bleiben.
- ▶ Vergleichende genetische Untersuchungen zeigten jedoch, dass solche Mutationen an vielen Stellen des Genoms ungewöhnlich selten auftreten und somit **einem Selektionsdruck ausgesetzt** sein müssen.
- ▶ Außerdem greifen sie, wie neuere experimentelle Befunde ergaben, sehr wohl in die Funktion von Zellen ein und **können Erkrankungen auslösen**.
- ▶ Jüngste Erkenntnisse, wonach der Weg vom Gen zum Protein viel komplizierter ist als gedacht, liefern eine **Erklärung für diesen unerwarteten Einfluss**.

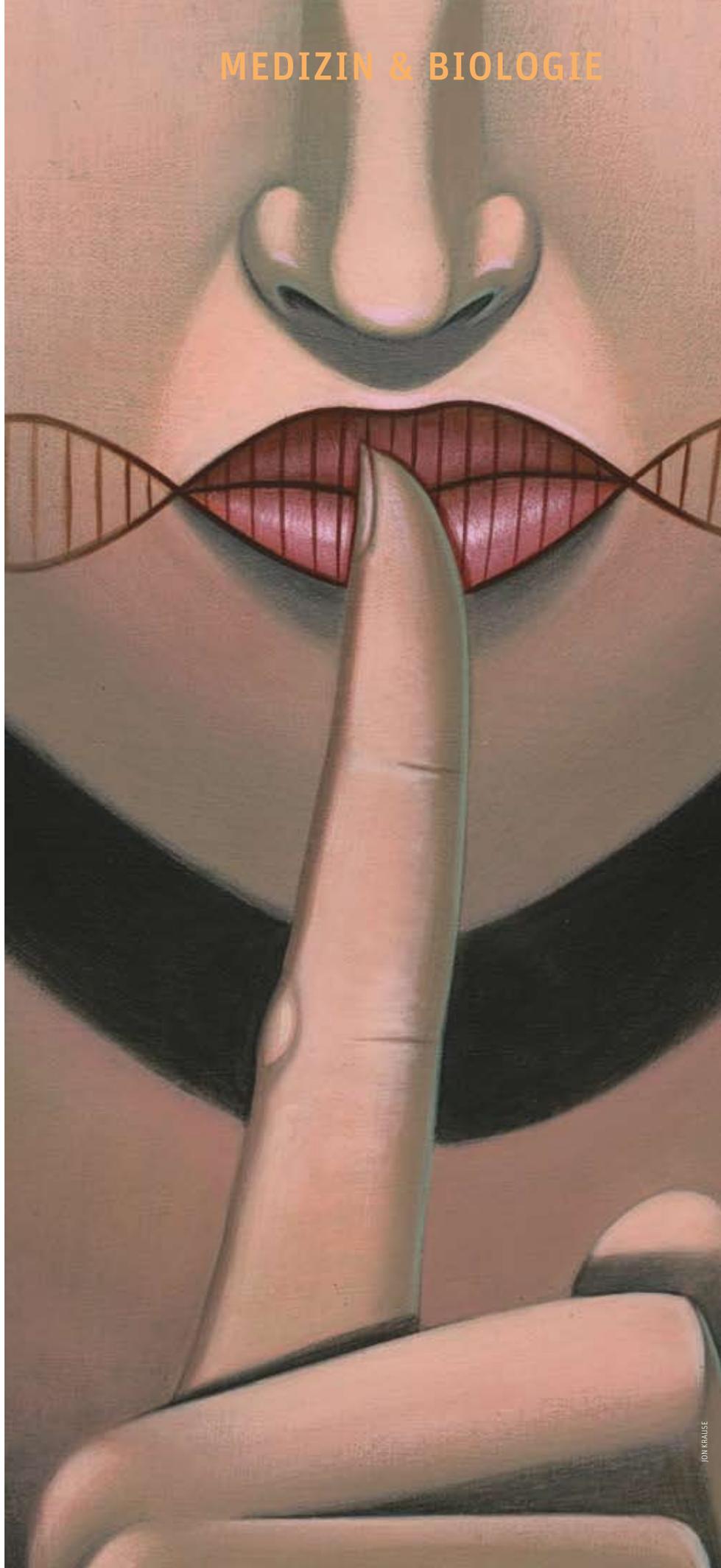
welche den jeweils passenden Proteinbaustein anliefern. Diese tRNAs gibt es in verschiedenen Typen, die jeweils nur eine ganz bestimmte Aminosäure transportieren. Außerdem erkennen sie spezifisch eine definierte Abfolge von drei Basen (ein Triplet) auf der mRNA und binden sich daran. Sobald das geschehen ist, fügt das Ribosom die Aminosäure der tRNA an die wachsende Kette an.

Hinter dem berühmten genetischen Kode, nach dem die Zellen »Texte« der DNA und RNA in Proteinsequenzen übersetzen, steckt also nur die Frage, welche tRNA welche Aminosäure trägt. Dass der Text der Gene und der entsprechenden mRNAs in Form dreibuchstabiger Wörter – Codons – organisiert ist, führt dabei zu einer beträchtlichen Redundanz. Aus den vier verschiedenen Buchstaben des Nukleotalphabets lassen sich 64 Triplets bilden. Benötigt werden aber nur 20 verschiedene Aminosäuren und ein Stoppsignal. Deshalb gibt es reihenweise synonyme Codons, die dasselbe bedeuten. So werden alle, die mit GG anfangen (GGA, GGC, GGG, GGU), in die Aminosäure Glycin übersetzt. Desgleichen existieren drei verschiedene Triplets für das Stoppsignal.

Hinweise auf Diskriminierung

Der Austausch eines einzelnen Nukleotids in einem Codon – also eine Punktmutation – kann dazu führen, dass es eine andere Aminosäure kodiert (Missense-Mutation). Eventuell wird es aber auch zu einem Stoppsignal (Nonsense-Mutation), das die Synthese des entsprechenden Proteins vorzeitig beendet. Ferner kann ein Einzelnukleotidaustausch ein Stoppsignal in ein kodierendes Triplet verwandeln (Sense-Mutation), was ein verlängertes Protein ergibt. Und schließlich besteht die Möglichkeit, dass der Austausch ein synonymes Codon erzeugt, das für die gleiche Aminosäure steht wie das ursprüngliche Triplet. In diesem Fall spricht man von einer stummen Mutation.

Beispiele für schädliche Auswirkungen der ersten drei Mutationstypen gibt es zuhauf. So verursachen drei Punktmutationen in den Genen für die Proteinketten des roten Blutfarbstoffs beim Menschen drei schwere Erkrankungen. Im Fall der Sichelzellanämie führt eine Missense-Mutation zum Austausch einer hydrophilen (Wasser anziehenden) gegen eine hydrophobe (Wasser abstoßende) Aminosäure. Dadurch verklumpen die Hämoglobin-Moleküle, und die roten Blutkörperchen nehmen eine charakteristische Sichelform an. Bei der Polyzythämie verkürzt eine Nonsense-Mutation eine der Hämoglobin-Proteinketten, wodurch sich das Blut verdickt. Bei der



GEBROCHENES SCHWEIGEN

Bei etwa 50 Krankheiten wurde inzwischen nachgewiesen, dass sie ganz oder teilweise auf stummen Mutationen beruhen, die keineswegs stumm bleiben. Sie stören in den hier aufgeführten Fällen das als Spleißen bezeichnete Entfernen nichtkodierender Bereiche aus den RNA-Ab-schriften von Genen und führen so zur Bildung defekter Proteine.

- Androgeninsensitivitäts-syndrom
- Louis-Bar-Syndrom
- Cholesterinester-Spei-cherkrankheit
- septische Granulomatose
- familiäre adenomatöse Polyposis
- hereditäres non-poly-pöses kolorektales Karzinom
- kongenitales Megakolon
- Marfan-Syndrom
- Morbus McArdle
- Phenylketonurie
- Seckel-Syndrom
- X-chromosomaler Hydro-zephalus



Marfan-Patienten haben ungewöhnlich lange Extremitäten. Sie sind Träger von zwei stummen Mutationen, die das Spleißen der RNA stören.

Thalassämie wiederum verwandelt eine Sense-Mutation ein Stopp-Codon (TAA) in eines für die Aminosäure Glutamin (CAA), so dass ein wesentlich längeres, funktionsgestörtes Protein entsteht.

Erst in den 1980er Jahren stellte sich heraus, dass auch stumme Mutationen die Proteinsynthese beeinflussen können – zumindest in Bakterien und Hefepilzen. Diese Organismen verwenden – so die bahnbrechende Erkenntnis von damals – synonyme Codons nicht gleich häufig. Als Verschlüsselung für die Aminosäure Asparagin dient zum Beispiel beim Bakterium *Escherichia coli* wesentlich öfter das Triplett AAC als AAT. Schon bald kristallisierte sich der Grund für die Vorlieben heraus: Die Bakterien nutzen bevorzugt bestimmte Codons, weil das die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Proteinsynthese erhöht.

Wie sich erwies, kommen die tRNAs für synonyme Triplets in den Zellen nicht gleich häufig vor. Deshalb wird ein Gen schneller exprimiert, wenn es mehr Codons enthält, die zu reichlicher vorhandenen tRNAs passen; denn die sind bei Bedarf mit größerer Wahrscheinlichkeit sofort verfügbar. In anderen Fällen kann eine tRNA mehrere synonyme Codons erkennen, bindet jedoch das eine stärker als das andere. Dessen Verwendung verbessert folglich die Genauigkeit der Translation. Die Zelle hat also gute Gründe, nicht alle synonymen Codons im selben Maß zu nutzen. Bei Genen, deren Produkte die Bakterien oder Hefen in besonders großen Mengen benötigen, ist die Abweichung von der Gleichverteilung am ausgeprägtesten; die bevorzugten Codons entsprechen dabei den häufigeren und besser passenden tRNAs.

Spätere Untersuchungen bei höheren Organismen – darunter Pflanzen, Fliegen und Würmer – offenbarten ein ähnliches Ungleichgewicht. Eine derart weite Verbreitung dieser Methode zur Optimierung der Proteinsynthese nährte die Vermutung, dass auch Säugetiere davon Gebrauch machen. Tatsächlich zeigten Genanalysen bei ihnen später ebenfalls Tendenzen zur bevorzugten Verwendung bestimmter Codons.

Doch der Grund dafür ist, wie sich herausstellte, ein anderer. Niemand weiß bisher warum, aber die Genome der Säuger bestehen aus größeren Blöcken mit unterschiedlicher Nukleotidverteilung. Manche Regionen enthalten besonders viel G und C, andere mehr A und T. Gene in GC- oder AT- reichen Regionen verwenden deshalb auch mehr Codons, in denen diese Basen vorkommen. In unserem Erbgut gibt es also gleichfalls eine Präferenz für bestimmte Codons, doch im Gegensatz zu einfacheren Organismen lässt das Verteilungs-

muster nicht darauf schließen, dass der Zweck die Optimierung der Proteinsynthese ist.

Demnach schien es zunächst so, als hätten stumme Mutationen bei Säugetieren doch keinen Einfluss auf Körperfunktionen. Aber vor knapp zehn Jahren gab es erste Hinweise, dass dem sehr wohl so ist. Sie betrafen die Geschwindigkeit, mit der sich Gene verschiedener Säuger auseinanderentwickelt haben. Um sie zu ermitteln, verglichen Forscher, an welchen Stellen sich ein Nukleotid verändert hatte und an welchen nicht. Grundsätzlich ist eine Mutation, welche die Funktion eines Organismus nicht tangiert, für die natürliche Selektion »unsichtbar«. Dazu zählten nach einstiger Sicht stumme Mutationen innerhalb von Genen ebenso wie die 98 Prozent des übrigen Erbguts, bei denen es sich um nichtkodierende DNA handelt, die keine Baupläne für Proteine enthält. Beim Vergleich der Mutationshäufigkeit von beiden aber zeigten sich unerwartete Unterschiede – ein Hinweis, dass stumme Mutationen wohl doch irgendeine Auswirkung auf die Zellfunktion haben.

Beredete Stille

Anfangs war völlig unklar, wie solche Mutationen die Proteinsynthese bei Säugetieren beeinträchtigen könnten. Jüngst aber lieferten Untersuchungen über Erbkrankheiten beim Menschen gleich mehrere mögliche Erklärungen. Demnach können stumme Mutationen diverse Stadien der Proteinsynthese stören – vom Abschreiben des Gens bis zur Übersetzung der mRNA in eine Aminosäurekette.

Beispielsweise beeinflussen stumme Mutationen in manchen Fällen die Bearbeitung des primären Transkripts, bei der nichtkodierende Abschnitte, die so genannten Introns, entfernt werden. Wie der Cutter beim Film unwichtige Teile der Aufnahme herauschneidet, lässt die zelluläre Maschinerie nur die »guten«, informationshaltigen Teile der RNA übrig und verbindet diese Exons zur fertigen mRNA – ein als Spleißen bezeichneter Prozess. Mit durchschnittlich acht langen Introns enthalten menschliche Gene besonders viele nichtkodierende Regionen. Die Spleißenzyme müssen die Schnittstellen also zuverlässig erkennen können.

Dafür enthalten Exons, wie Untersuchungen der letzten Jahre zeigten, entsprechende Signale. Am wichtigsten sind die ESE-Motive (*Exonic Splicing Enhancer*): kurze Abfolgen von drei bis acht Nukleotiden. Sie befinden sich dicht vor dem Ende eines Exons und markieren für die Spleißenzyme die genaue Schnittstelle. Die Notwendigkeit solcher Motive kann eine Präferenz für bestimmte Codons in menschlichen Genen erklären. So

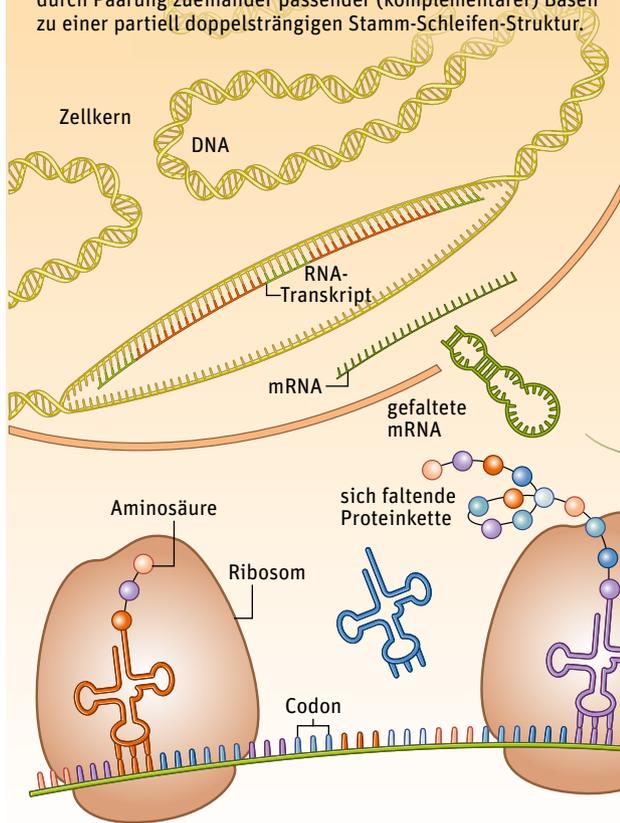
SYNONYME IM GENETISCHEN KODE

Der genetische Kode bestimmt, wie Zellen die Informationen im DNA-»Handbuch« des Genoms, die aus einer Abfolge von vier »Buchstaben« bestehen, in Aminosäuresequenzen übersetzen. Den in Form einer mRNA abbeschriebenen genetischen Text interpretiert die Proteinsynthesemaschinerie in dreibuchstabigen Wörtern, den Codons, die jeweils eine von

20 verschiedenen Aminosäuren bezeichnen (Tabelle). Da das Nukleotidalphabet vier Buchstaben hat, gibt es 64 mögliche Codons. Mehrere davon können aus diesem Grund für die gleiche Aminosäure stehen. Eine Mutation, die ein Codon in eines seiner Synonyme überführt, sollte folglich auf Proteinebene »stumm« sein.

TRANSKRIPTION UND SPLEISSEN

Im Zellkern trennen sich die beiden Stränge der DNA-Doppelhelix im Bereich des Gens und ermöglichen die Herstellung einer RNA-Abschrift. Aus diesem primären Transkript entfernt die Zelle Sequenzen, die keine Aminosäuren kodieren. Dabei entsteht die kürzere Boten-RNA (mRNA). Diese faltet sich durch Paarung zueinander passender (komplementärer) Basen zu einer partiell doppelsträngigen Stamm-Schleifen-Struktur.



DER CODON-AMINOSÄURE-KODE

Da die vier RNA-Basen (A, C, G, U) insgesamt 64 unterschiedliche Tripletts bilden können, bezeichnen meist mehrere Codons die gleiche Aminosäure. Dabei unterscheiden sie sich oft nur in ihrer dritten Nukleotidposition.

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

TRANSLATION IN PROTEINE

Im Zellplasma entfalten Ribosomen die mRNA und erzeugen mit Hilfe der Transfer-RNAs (tRNAs) die in der Nukleotidsequenz kodierte Aminosäurekette. Jede tRNA liefert dabei eine ganz bestimmte Aminosäure und bindet sich mit einem eigenen Nukleotidtriplett (Anticodon) an das komplementäre Codon auf der mRNA. Das wachsende Protein beginnt sich schon vor seiner Fertigstellung zu seiner endgültigen dreidimensionalen Form zu falten.

kommen die Codons GGA und GGG, die für Glycin stehen, zwar beide in ESEs vor, das erstgenannte wirkt jedoch als stärkeres Signal und steigert dadurch die Effektivität des Spleißens. Daher tritt GGA an den Enden von Exons häufiger auf als GGG.

Die Bedeutung gewisser Codonsequenzen für das Spleißen ergab sich auch aus Analysen, die wir und unsere frühere Kollegin Joanna Parmley an der University of Bath (England) durchführten. Demnach zeigen Exonmotive, die als Spleißsignale zu fungieren scheinen, ein langsames Evolutionstempo als benachbarte Sequenzen, die nichts mit dem Ausschneiden von Introns zu tun haben. Das bedeutet, dass

die natürliche Selektion solche Motive bewahrt hat, weil sie ihre Aufgabe offenbar besonders gut erfüllen. Stumme Mutationen der Codons innerhalb der betreffenden ESEs verändern zwar die kodierte Aminosäuresequenz nicht, können die Proteinsynthese aber dennoch merklich beeinträchtigen, weil sie das korrekte Ausschneiden der Introns stören.

Dafür sprechen auch Untersuchungen, die William Fairbrother, inzwischen Assistant Professor an der Brown University in Providence (Rhode Island), gemeinsam mit Kollegen im Labor von Christopher Burge am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge durchgeführt hat. Demnach stimmen die End-

INFO I

Desoxyribonukleinsäure (DNA): fadenförmiges Molekül, das durch die Abfolge der Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (T) und Thymin (T) die Erbinformation speichert.

Ribonukleinsäure (RNA): Variante der DNA, die Aufgaben bei der Umsetzung der Erbinformation in Proteine übernimmt.

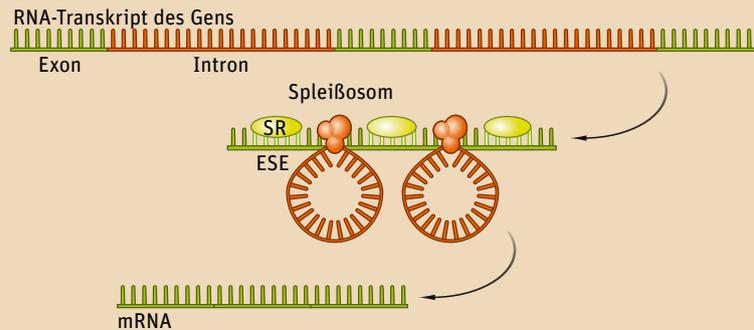
VERÄNDERTE SPLEISSIGNALE

Zwar stehen synonyme Codons für dieselbe Aminosäure, doch kann ein Wechsel zwischen ihnen den Informationsgehalt eines Gens verändern, wenn er das Spleißen des primären RNA-Transkripts beeinflusst. Viele Erkrankungen beru-

hen auf diesem Effekt. Für ein Gen, das maßgeblich zur Entstehung der Mukoviszidose beiträgt, ist hier beispielhaft gezeigt, wie auch stumme Mutationen die Struktur eines Proteins grundlegend verändern können (ganz unten).

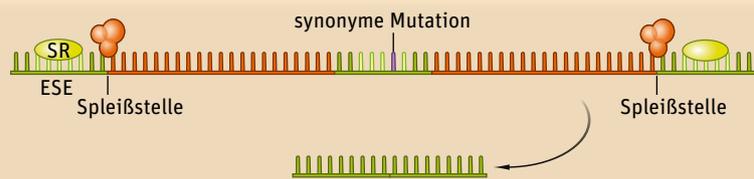
NORMALES SPLEISSEN

Das primäre RNA-Transkript eines Gens enthält Exons, auf denen Aminosäuren verschlüsselt sind, und lange nichtkodierende Introns, die entfernt werden müssen. Auf jedem Exon befinden sich kurze Nukleotidsequenzen, die der zellulären Spleißmaschinerie dessen Grenzen anzeigen und *Exonic Splicing Enhancer* (ESE) heißen. Zusammen mit Regulatorproteinen (SR), die sich daran binden, sorgen sie dafür, dass Spleißosomen sich an den Rändern der Introns anlagern, diese herauszuschneiden und die Enden der benachbarten Exons miteinander verbinden.



ÜBERSPRINGEN VON EXONS

Der Austausch synonyme Nukleotide kann einen ESE für die Spleißmaschinerie unkenntlich machen. Dadurch wird das betroffene Exon zusammen mit den benachbarten Introns herausgeschnitten und fehlt in der fertigen mRNA.



VERSTÜMMELUNG EINES PROTEINS

Mutationen im Gen des *Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Receptor* (CFTR), die ein verstümmeltes Protein liefern, verursachen die Mukoviszidose. Um herauszufinden, ob auch stumme Mutationen die Struktur des CFTR beeinflussen können, führten Forscher systematisch synonyme Ersetzungen von Nukleotiden im Exon 12 des zugehörigen Gens durch und analysierten die entsprechenden Proteine. Die gezeigten sechs Mutationen (ein Viertel der getesteten) führten alle dazu, dass das Exon 12 beim Spleißen übersprungen wurde und ein verkürztes Protein entstand.



TANI TOLPA

INFO II

Nukleotid: Grundbaustein von DNA und RNA

Genexpression: Herstellung des in einem Gen kodierten Proteins durch die Zellmaschinerie

Transkription: Erzeugen der RNA-Kopie eines Gens

Translation: Übersetzen der RNA in ein Protein

sequenzen der Exons beim Menschen in hohem Maß überein. Diese Abschnitte, die das Spleißen beeinflussen, variieren selbst dort kaum, wo eine Mutation stumm bleiben würde. Das liegt nicht daran, dass solche Mutationen nicht in normaler Häufigkeit auftreten; doch offenbar behindern sie die Proteinsynthese, weshalb sie keinen Bestand haben und aus der Population wieder verschwinden.

Nach neuesten Erkenntnissen besteht bei rund 50 Erbkrankheiten ein Zusammenhang mit stummen Mutationen, von denen viele das Ausschneiden von Introns zu erschweren scheinen. Da am Anfang und Ende jedes Exons Spleißsignale stehen, überlappen sie mit einem

erheblichen Teil der proteinkodierenden Sequenz, was die Genabschnitte, in denen stumme Mutationen toleriert werden, deutlich einschränkt. Ein augenfälliges Beispiel für die Folgen hat vor Kurzem Francisco Baralle vom Internationalen Zentrum für Genforschung und Biotechnologie in Triest entdeckt. 25 Prozent der stummen Mutationen, die seine Arbeitsgruppe in ein Exon des Gens für den Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator (CFTR) einführte, störten das Spleißen und dürften so zur Entstehung von Mukoviszidose und verwandter Erkrankungen beitragen.

Daneben gibt es andere Arten, wie stumme Mutationen Krankheiten verursachen kön-

nen. Selbst bei korrektem Spleißen kann es nämlich sein, dass sich die mRNA nicht richtig faltet. Im Gegensatz zu den vereinfachten Illustrationen in Lehrbüchern ist das Botenmolekül nämlich kein strukturloses, lineares Gebilde. Wie die Nukleotidstränge der DNA kann auch die mRNA komplementäre Regionen aufweisen, die sich paaren und so eine komplizierte räumliche Anordnung annehmen, die man als Stamm-Schleifen-Struktur (*stem-loop structure*) bezeichnet. Die Faltung einer mRNA bestimmt ihre Stabilität, die wiederum die Geschwindigkeit der Translation beeinflusst. Von ihr hängt es auch ab, wie schnell zelluläre Recyclingsysteme die mRNA wieder abbauen.

Ein Beispiel liefert der Dopaminrezeptor D2. Dieses Membranprotein bindet den Neurotransmitter Dopamin, der als chemischer Botenstoff an der Weiterleitung von Signalen zwischen Nervenzellen beteiligt ist. Stumme Mutationen in dem Gen für D2 beschleunigen den Abbau seiner mRNA. Die Zelle produziert dann weniger Rezeptorprotein, was die Leistungsfähigkeit des Gehirns beeinträchtigen kann. Eine stumme Mutation im Gen für die Catechol-O-Methyltransferase (COMT) wiederum erhöht das Ausmaß der mRNA-Faltung und erzeugt eine dicht gepackte Struktur, die sich bei der Translation möglicherweise nur zögerlich entfaltet und daher die Proteinsynthese hemmt. Wie Andrea G. Nackley und ihre Kollegen an der University of North Carolina in Chapel Hill feststellten, beeinflusst diese Mutation die Schmerztoleranz; bezeichnenderweise fand diese Untersuchung an der Fakultät für Zahnheilkunde statt.

Eine stumme Mutation in einem Gen namens *mdr-1* (*multidrug resistance 1*) wirkt sich direkt auf die Struktur des zugehörigen Proteins aus. Dabei handelt es sich um eine molekulare Pumpe, die Krebszellen dazu nutzen, die verschiedensten Arten von Chemotherapeutika aus dem Zellinneren nach außen zu befördern, was sie resistent gegen viele Wirkstoffe macht. Nach Beobachtungen von Chava Kimchy-Sarfay und ihren Kollegen am National Cancer Institute in Bethesda (Maryland) induziert die besagte stumme Mutation eine Fehlfaltung des Proteins, die seine Pumpleistung vermindert. Da sich ein Eiweißstoff schon zu verknäueln beginnt, bevor er völlig zusammengebaut ist, vermuten die Forscher, dass die Translation an dem selteneren synonymen Codon ins Stocken gerät, woraufhin sich der bereits synthetisierte Teil des Proteins in der zusätzlichen Zeit zu weit gehend faltet und dabei eine abnorme räumliche Struktur annimmt.

All diese neuen Erkenntnisse mahnen zur Vorsicht vor übereilten Schlüssen. Dass syno-

nyme Mutationen keine Auswirkungen hätten, war eine verbreitete Ansicht, solange niemand einen Mechanismus vorweisen konnte, der sie mit einer Störung der Proteinsynthese in Verbindung brachte. Doch diese Überzeugung hat sich als Irrglaube herausgestellt.

Medizinische Anwendungen

Nachdem wir nun die Macht der nicht ganz so stummen Mutationen erfahren haben, können wir sie auch zum eigenen Vorteil nutzen – etwa zur Optimierung biotechnologischer Verfahren. Sowohl die Gentherapie als auch die industrielle Herstellung von nützlichen Proteinen in tierischen Zellen oder Bakterien erfordern die Konstruktion modifizierter Gene, die dann in das Erbgut der Zielzelle eingeschleust werden. Dort sollten sie möglichst gut funktionieren. Das zu erreichen ist jedoch eine schwierige Aufgabe. Unter anderem muss man das Gen so konstruieren, dass die Zielzelle es aktiviert, weil sie nur dann ausreichende Mengen des zugehörigen Proteins erzeugt. An diesem Punkt kommen die Effekte synonyme, aber keineswegs bedeutungsloser Mutationen ins Spiel.

Die meisten Introns der menschlichen Gene scheinen entbehrlich (nur eines, im Allgemeinen das erste, ist offenbar nötig, damit die Proteinproduktion einsetzt). Folglich lassen sich Transgene durch Weglassen der ande-

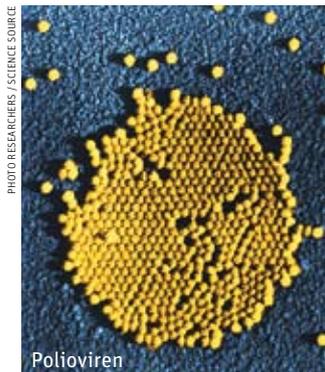


Diese transgenen Ziegen produzieren das menschliche Enzym Butyrylcholinesterase, das aus ihrer Milch gewonnen wird und als Antidot gegen Pestizide und Kampfgase dient. Bei der Konstruktion optimaler Gene für biotechnologische Zwecke hilft das Wissen darum, welche Mutationen wirklich stumm sind und welche in Wahrheit die Struktur und Synthese des betreffenden Proteins beeinflussen.

WENIGER RISKANTE LEBENDIMPFSTOFFE

Durch synonyme Mutationen lassen sich Gene so abändern, dass das zugehörige Protein schneller oder auch langsamer gebildet wird. Letzteres haben Steffen Mueller und seine Kollegen von der Stony Brook University (US-Bundesstaat New York) zur Herstellung eines weniger riskanten Polioimpfstoffs genutzt. Entschärfte, aber noch vermehrungsfähige Viren sind die wirksamsten Vakzine, weil sie beim Geimpften eine starke Immunreaktion hervorrufen. Allerdings können sie durch Mutation im Körper ihre Gefährlichkeit zurückgewinnen und dann genau die Krankheit verursachen, vor der sie eigentlich schützen sollen. Im Poliovirus sorgen bestimmte Codons für eine möglichst effiziente Proteinsynthese. Hier setzte Muellers Arbeitsgruppe an. Sie konstruierte eine Variante mit selteneren und weniger effektiven synonymen Codons in den Abschnitten des Genoms, auf denen die Proteine für das als Verpackung dienende Kapsid verschlüsselt sind.

Das derart manipulierte Virus vermehrt sich wesentlich schlechter als der Wildtyp. Mäuse, denen es injiziert wurde, zeigten keine Krankheitszeichen und waren anschließend wirksam immunisiert. Diese Methode ließe sich wohl auch bei anderen Krankheitserregern zur Herstellung abgeschwächter, vermehrungsfähiger Viren für hochwirksame und trotzdem sichere Lebendimpfstoffe verwenden.



Polioviren

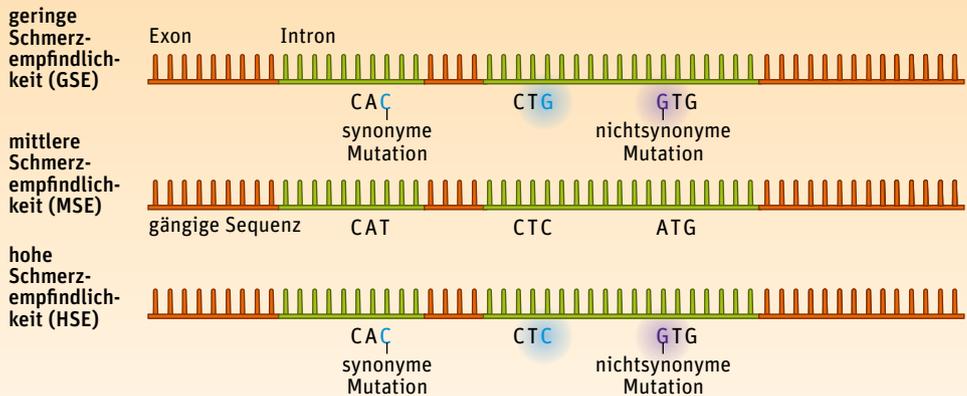
EINE FRAGE DER FALTUNG

Eine synonyme Mutation im Gen

für ein wichtiges zelluläres Enzym beeinflusst die Schmerzempfindlichkeit. Ursache sind Veränderungen in der Art, wie sich die mRNA faltet. Davon hängt es ab, wie schnell Ribosomen den Nukleotidstrang entpacken und die Translation vornehmen können. Die Faltung kommt durch Basenpaarung zwischen Nukleotiden innerhalb des mRNA-Strangs zu Stande und kann daher von stummen Mutationen beeinflusst werden.

VARIANTEN DES COMT-GENS

Drei häufig vorkommende Formen des Gens der Catechol-O-Methyltransferase (COMT) gehen mit geringer (GSE), mittlerer (MSE) und hoher Schmerzempfindlichkeit (HSE) einher. An drei Stellen in den Exons dieses Gens finden sich Unterschiede zwischen der gängigen Basenfolge (MSE) und den beiden Varianten. Eine dieser Mutationen (violett schattiert) ändert die Aminosäuresequenz des Proteins, weshalb sie lange als Ursache der unterschiedlichen Schmerzempfindlichkeit galt. Doch kann sie nicht der einzige Grund sein, weil sie bei Individuen mit hoher und niedriger Schmerztoleranz gleichermaßen vorkommt. Tatsächlich stellte sich heraus, dass eine der beiden anderen, synonymen Mutationen (blau schattiert) für sieben Prozent des Unterschieds zwischen hoher und niedriger Schmerzempfindlichkeit verantwortlich ist.



TAMU/TOIPA

INFO III

Ribosom: Enzymkomplex, an dem die Translation stattfindet

Transkript: rohe RNA-Abschrift eines Gens, oft auch als primäres Transkript bezeichnet

Boten-RNA (mRNA): bearbeitete RNA-Abschrift eines Gens, oft auch als reife mRNA bezeichnet

Aminosäure: Grundbaustein der Proteine

Intron: Abschnitt im primären Transkript, auf dem keine Aminosäuren verschlüsselt sind

Exon: Abschnitt im primären Transkript, auf dem Aminosäuren verschlüsselt sind

Spleißen: Ausschneiden der Introns aus dem primären Transkript und Verbinden der Exon-Enden

Exonic Splicing Enhancer (ESE): Spleißsignal, das die Enden der Exons kennzeichnet

ren nichtkodierenden Abschnitte kompakter gestalten. Ohne Introns können aber auch die Spleißsignale entfallen. Das eröffnet zusätzliche Möglichkeiten, synonyme Mutationen für spezielle Zwecke vorzunehmen.

Ein Beispiel für die Chancen, welche die neuen Erkenntnisse den Biotechnologen bieten, lieferte ein kürzlich am Internationalen Institut für Molekular- und Zellbiologie in Warschau durchgeführtes Experiment. Grzegorz Kudla und seine Kollegen veränderten bei drei verschiedenen Genen an den synonymen Positionen die Mengenverhältnisse der einzelnen Nukleotide und übertrugen die manipulierten Exemplare dann auf menschliche Zellen. Das Ergebnis war ebenso überraschend wie interessant: In allen drei Fällen steigerte ein erhöhter Anteil von G und C an den stummen Positionen die Effektivität der Proteinexpression gegenüber den GC-armen Versionen um das Hundertfache.

Zweifellos können die jüngsten Einsichten in die Bedeutung synonyme Mutationen auch bei der Suche nach Krankheitsursachen helfen. Eine zentrale Rolle spielen dabei die aktuellen Projekte zur Genomkartierung, deren Ziel es ist, alle vorkommenden Variationen von DNA-Sequenzen beim Menschen zu katalogisieren. Indem Forscher sämtliche Punktmutationen oder Einzelnukleotidpolymorphismen (SNPs) bei Patienten mit einer bestimmten Krankheit identifizieren, hoffen sie potenziell pathologische Varianten aufzuspüren.

Wenn mehrere Mutationen in einem Gen in Verbindung mit dem Auftreten eines gesundheitlichen Problems gefunden wurden, galten bis vor Kurzem noch diejenigen, welche die Aminosäuresequenz des betreffenden Proteins veränderten, als die Übeltäter. Tatsächlich kommt im COMT-Gen, das die Schmerztoleranz reguliert, eine Mutation vor, die einen Aminosäureaustausch hervorruft. In ihr sah man deshalb lange die Ursache der besonderen Schmerzempfindlichkeit davon betroffener Menschen.

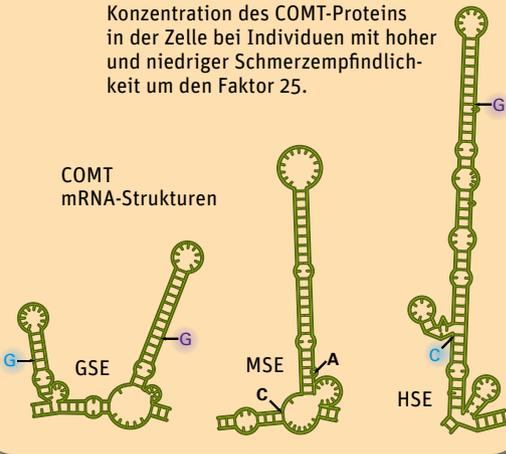
Dieselbe Mutation fand sich später allerdings auch bei Personen mit ungewöhnlich hoher Schmerztoleranz. Deshalb musste es andere Gründe für den beobachteten Unterschied in der Schmerzempfindung geben. Experimentelle Daten, die stumme Mutationen als Ursache identifizierten, wurden jedoch erst dann allgemein akzeptiert, als ein plausibler Mechanismus in Form einer unterschiedlichen Faltung der mRNA für diesen Effekt bekannt war (Kasten oben).

Vermutlich werden manche Erkrankungen zu Unrecht Mutationen zugeschrieben, die den Austausch einer Aminosäure bewirken, obwohl in Wirklichkeit synonyme Mutationen die Verursacher sind. Dies sollten Forscher im Auge behalten, die nach der mutierten Stecknadel im Heuhaufen des Genoms suchen. Außerdem weiß niemand, welche bisher unbekanntenen Erkrankungsmechanismen noch ans Licht kommen werden.

KOMPaktere RNA-STRUKTUREN HEMMEN PROTEINSYNTHESE

Wie sich zeigte, verändern die nichtsynonyme und die zweite synonyme Mutation die Faltung der mRNA im Vergleich zur gängigen Sequenz ganz erheblich. Wegen dieser Strukturunterschiede differiert die Konzentration des COMT-Proteins in der Zelle bei Individuen mit hoher und niedriger Schmerzempfindlichkeit um den Faktor 25.

COMT mRNA-Strukturen



TAMI TOLPA, NACH: A. G. NACKLEY ET AL.: HUMAN CATECHOL-O-METHYLTRANSFERASE... A. SCIENCE 2006, BEC. 22: 3144(5807)1930-33

Skeptiker könnten weiterhin auf dem Standpunkt stehen, dass stumme Mutationen zwar interessant sind und möglicherweise auch eine gewisse praktische Bedeutung haben, aber doch eher selten Gesundheitsprobleme hervorrufen. Neuere Untersuchungen zur Evolution von Genen sprechen jedoch dagegen. Vor einigen Jahren beobachtete einer von uns (Hurst) bei Nagetieren und Menschen eine ungewöhnlich langsame Veränderung an stummen Positionen in einem bestimmten Segment des *BRCA1*-Gens, für das ein Zusammenhang mit Brustkrebs schon bei jungen Frauen festgestellt wurde. Andere Sequenzen in dieser Region hingegen entwickeln sich mit normaler Geschwindigkeit.

Erheblicher Selektionsdruck

Diese Unterschiede bedeuten natürlich nicht, dass an den Positionen mit geringer Evolutionsrate seltener Mutationen auftreten als an anderen Stellen, sondern dass Individuen, die sie tragen, sterben, ohne sie an ihre Nachkommen weiterzugeben. Später zeigte sich, dass das betroffene Gensegment ein Spleißsignal enthält. Es handelt sich also um ein weiteres Beispiel für eine stumme Mutation, die so schwer wiegende Konsequenzen hat, dass ihre Träger aussterben.

Das führt auf die Frage nach der Häufigkeit von Gensegmenten, in denen ein Selektionsdruck gegen das Auftreten stummer Mutationen herrscht. Hurst und Parmley gingen

dieser Frage nach, indem sie in zahlreichen Genen nach Regionen suchten, in denen stumme Mutation deutlich seltener sind als solche, die den Austausch einer Aminosäure bewirken. Die Zahl solcher Regionen erwies sich als erstaunlich hoch. Sie kommen sogar wesentlich öfter vor als Abschnitte, in denen sich die Aminosäuresequenzen besonders rasch verändern. Ein Bereich mit stark konservierten synonymen Codons findet sich im Genom durchschnittlich alle 10000 bis 15000 Nukleotide. Anhand dieser Daten schätzen wir, dass zwischen fünf und zehn Prozent der menschlichen Gene mindestens eine Region enthalten, in der stumme Mutationen nachteilige Effekte hätten.

Peter Schattner und Mark Diekhans von der University of California in Santa Cruz führten eine ähnliche Analyse durch, bei der sie in knapp 12000 Genen nach großen Bereichen mit ungewöhnlich stark konservierten synonymen Codons suchten. Sie fanden rund 1600 solche Abschnitte, was sich in etwa mit unseren Beobachtungen deckt.

Beide Schätzwerte sind jedoch vermutlich zu niedrig, und die tatsächliche Zahl könnte wesentlich höher sein. Wenn diese konservierten Regionen die Orte krank machender stummer Mutationen anzeigen, was wahrscheinlich ist, wäre es ein verhängnisvoller Fehler, sie zu ignorieren; denn dann würde die Ursache von Erbkräften möglicherweise nicht richtig identifiziert.

Die Entdeckung, dass auch synonyme Mutationen der natürlichen Selektion unterliegen, ging Hand in Hand mit der Erkenntnis, dass die Umsetzung der genetischen Botschaft in Proteine ein wesentlich komplexerer und genauer regulierter Prozess ist als zuvor angenommen. Zudem sind Genevolution und Genfunktion in einem Maß miteinander gekoppelt, das sich vor zehn Jahren noch niemand träumen ließ. Die weitere Untersuchung beider Prozesse wird tiefere Einsichten in die bemerkenswerte Komplexität der genetischen Maschinerie zu Tage fördern.

Zum Beispiel weiß man, dass die DNA im Zellkern nicht als lineares Molekül vorliegt, sondern in Spulenform aufgewickelt ist und zur Transkription eines Gens an der betreffenden Stelle erst entwirrt werden muss. Ist es dabei gleichfalls von Bedeutung, welches synonyme Codon vorliegt? Außerdem kommen immer wieder Bereiche ans Licht, in denen sich seltene Codons auffällig häufen. Was steckt dahinter? Antworten auf solche Fragen werden nicht nur unser Verständnis der Proteinsynthese vertiefen; sie könnten auch neue Ansätze zur besseren Behandlung vieler Krankheiten liefern.



Jean V. Chamary (links) und **Laurence D. Hurst** nutzten Methoden der Bioinformatik zur Erforschung der Evolution von Gensequenzen, als Chamary Doktorand in Hursts Labor an der University of Bath in Großbritannien war. Chamary schreibt heute als Wissenschaftsjournalist für das Magazin »BBC Focus«. Hurst, der für seine Arbeiten mit dem Wolfson Research Merit Award der britischen Royal Society ausgezeichnet wurde, ist Professor für Evolutionsgenetik und erforscht vor allem die Kräfte, die Gene und Genome formen.

Chamary, J. V. et al.: Hearing Silence: Non-Neutral Evolution at Silent Sites in Mammals. In: Nature Reviews Genetics 7(2), S. 98–108, Februar 2006.

Freeland, S. J., Hurst, L. D.: Der raffinierte Code des Lebens. In: Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 86–93.

Nackley, A. G. et al.: Human Catechol-O-Methyltransferase Haplotypes Modulate Protein Expression by Altering mRNA Secondary Structure. In: Science 314, S. 1930–1933, Dezember 2006.

Sauna, Z. E. et al.: Silent Polymorphisms Speak: How They Affect Pharmacogenomics and the Treatment of Cancer. In: Cancer Research 67(20), S. 9609–9612, 15. Oktober 2007.

Wang, G.-S., Cooper, T. A.: Splicing in Disease: Disruption of the Splicing Code and the Decoding Machinery. In: Nature Reviews Genetics 8(10), S. 749–761, Oktober 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040554.

1960

Chromosomen neu sortiert

»Man weiß jetzt sicher, daß der Mensch entgegen früheren Annahmen 46 Chromosomen hat, 22 Autosomen-Paare und 2 Geschlechtschromosomen. Ein Hindernis für den Vergleich der Ergebnisse der ein-

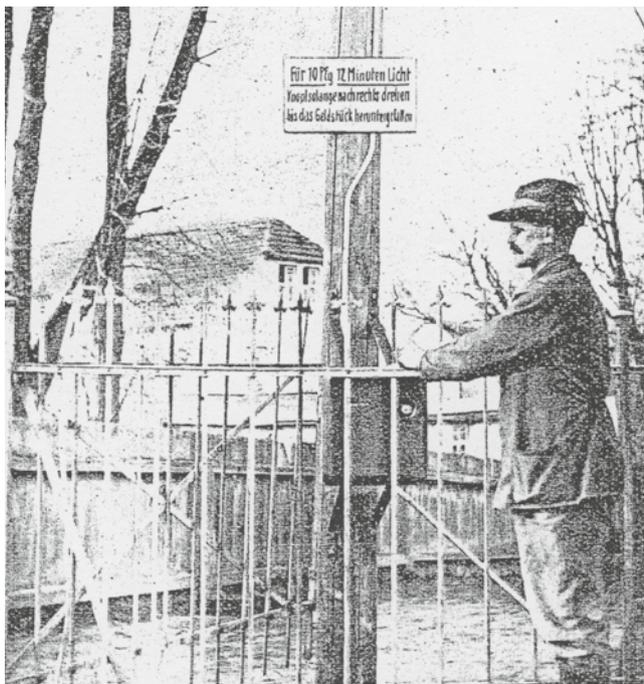
zelnen Arbeitsgruppen ist die verschiedene Bezeichnungweise der einzelnen Chromosomen. Eine Studiengruppe von Wissenschaftlern aus Frankreich, Großbritannien, Japan, Schweden und den USA hat darum Nomenklaturregeln ausgearbeitet. Danach werden die Autosomen-Paare der Länge nach geordnet und mit Nummern von 1 bis 22, die Geschlechtschromosomen mit X und Y bezeichnet.« *Deutsche medizinische Wochenschrift*, 85. Jg., Nr. 36, 2. September 1960, S. 1620

Land- oder Stadmaschine?

»Fast jeder dritte Haushalt (29 %) in der Bundesrepublik besitzt eine Waschmaschine. In Nordrhein-Westfalen verfügt sogar jede zweite Familie über eine eigene Waschmaschine, dagegen in Berlin nur jede zehnte und in Hamburg nur jede fünfte. Interessant ist die Feststellung, daß fast jeder zweite landwirtschaftliche Haushalt eine Waschmaschine besitzt.« *Elektrotechnische Zeitschrift, Ausgabe B*, Bd. 12, Heft 18, 5. September 1960, S. 444

Förderung für die Wissenschaft

»Eine Kaiserliche Wissenschaftliche Gesellschaft soll zur Förderung der Wissenschaften in Berlin gegründet werden. Der Plan ist der Erwägung erwachsen, daß fortan nicht dem Staate allein die Pflege der Wissenschaft, namentlich der Naturwissenschaften, anvertraut bleiben soll, daß vielmehr die Mitwirkung privater kapitalkräftiger Bürger dringend erwünscht ist.« *Chemiker-Zeitung*, 34. Jg., Nr. 106, 6. September, S. 941



Röntgenbild von der Sonne

»Mit einer Forschungsrakete vom Typ Aerobee High ist es gelungen, in 210 km Höhe eine Aufnahme der Sonne im Bereiche der Röntgenstrahlung zu machen. In Ermangelung photographischer Objektive für diese extrem kurzen Wellen wurde eine Lochkamera von 0,01 mm Öffnung benutzt. Um unerwünschtes Licht fernzuhalten, war der Film von einer dünnen Aluminiumfolie bedeckt.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 13. Jg., Heft 9, September 1960, S. 366



Die Röntgenstrahlung der Sonne, auf die Platte gebannt mit einer Lochkamera

Strahlende Entdeckung

»Mad. Curie ist es in Verbindung mit ihrem Mitarbeiter Debierno gelungen, Radium in reinem Zustande herzustellen. Es bildet ein weißglänzendes Metall, das an der Luft rasch

1910

sich schwärzt, Wasser zersetzt, Papier verbrennt und an Eisen haftet.« *Zeitschrift für Schwachstromtechnik*, 4. Jg., Heft 17, S. 451

Ohne Kleingeld im Dunkeln

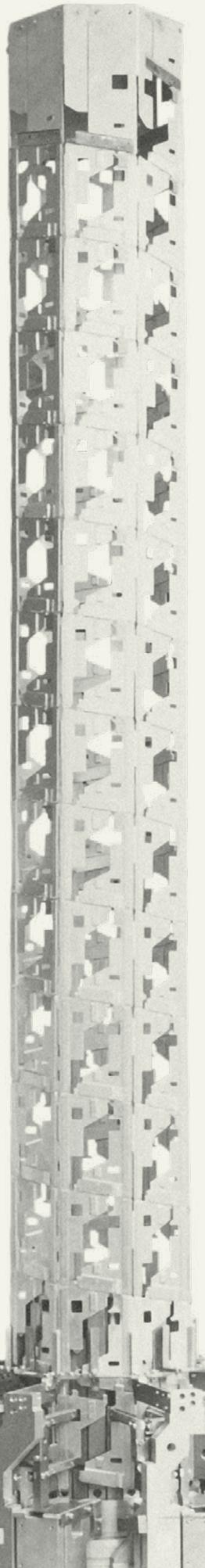
»Für zehn Pfennig zwölf Minuten Licht gibt es in dem Dorfe Zarkau bei Glogau. Dieser Ort dürfte wohl bisher das einzige deutsche Dorf sein, das sich einer automatischen elektrischen Straßenbeleuchtung erfreut. Auf der etwa 1 km betragenden Wegstrecke von der Stadtgrenze bis in die Gemeinde Zarkau sind neun große Glühlampen aufgestellt worden. Diese Lampen brennen auf Kosten der Gemeinde Zarkau bis 10 Uhr abends. Nach 10 Uhr ist aber jedermann in der Lage, durch Einwurf eines Zehnpfennigstücks in einen der beiden Automaten, die an den Endmasten angebracht sind, den Strom auf zwölf Minuten wieder einzuschalten. Diese Zeit genügt, um in bequemer Weise die fragliche Wegstrecke zurückzulegen.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 38, 17. September 1910, S. 759

Zwölf Minuten Straßenbeleuchtung für zehn Pfennig

Lautlos wachsende Mechanik

Der Helixturm von Konrad Zuse

Konrad Zuse 1992 beim Aufbau des Helixturms HT1. Die Bezeichnung veranschaulicht die Konstruktionsidee: Einzelne Bauelemente verbinden sich zu einem Kreis und schrauben sich, von einem Zahnrad angetrieben, spiralförmig nach oben, so dass ein stabiler Turm entsteht.



Als Pionier des Computers wird Konrad Zuse (1910–1995) in diesem Jahr gefeiert. Doch der Erfinder der ersten im Binärsystem arbeitenden Großrechenanlagen Z1 bis Z64 war vielseitiger als allgemein bekannt. Von seinem Hobby – Malerei und Grafik – abgesehen entwickelte Zuse in den 1980er Jahren ein »höhenvariables Turmbauwerk«, das er insbesondere als einfahrbares Fundament für Windkraftanlagen plante. Das Modell dieses Helixturms HT1, wie es von der Restauratorin Nora Eibisch für das Deutsche Museum untersucht, beschrieben und in Stand gesetzt wurde, besteht aus 6295 Bauteilen, die Zuse im Hinblick auf die industrielle Fertigung großteils aus acht Grundformen abgeleitet hat. Ein Zahnrad mit insgesamt acht Antriebsflächen wurde ursprünglich von einer Kurbel betätigt (das Exponat ist mit einem Elektromotor versehen). Es setzt Mechaniken in der Basis in Bewegung, welche die den Turm bildenden Bausteine zum Zentrum schieben. Diese Blechteile verbinden sich durch ineinandergreifende Passungen und rotieren auf einer Kreisbahn, so dass sich der gesamte Aufbau spiralförmig in die Höhe schraubt.

Die Einzelteile des Demonstrationsmodells ließ Zuse bei Siemens in Augsburg anfertigen. Doch manche Elemente klemmten und lösten sich nicht wieder voneinander. Ab 1992 arbeitete Zuse daher an Verbesserungen. Der HT2 wurde jedoch nie gebaut, da die finanziellen Mittel fehlten und Sponsoren ausblieben. Kritiker monierten, die üblichen Röhrenmodule der Windkraftanlagen seien weit ökonomischer. Vielleicht fehlte auch nur die zündende Idee für einen sinnvollen Einsatz. Die Restauratorin, die alle Macken beheben konnte, äußerte sich jedenfalls begeistert: Der Helixturm sei anderen höhenvariablen Konstruktionen weit überlegen, einfach in der Fertigung und Anwendung, dabei vielfältig einsetzbar und äußerst stabil.

Die Autorin **Sabrina Landes** leitet die Redaktion der Zeitschrift »Kultur & Technik« des Deutschen Museums.

Literatur: Eibisch, N.: Der Helixturm von Konrad Zuse – Analyse, Dokumentation und Instandsetzung eines höhenverstellbaren Turmmodells, München 2009.

Das vollständig restaurierte und funktionstüchtige Modell des Helixturms HT 1 ist derzeit in der Sonderausstellung »Konrad Zuse« im Deutschen Museum in München zu besichtigen. Ein Film auf der Website des Deutschen Museums zeigt, wie die Mechanik des Turms funktioniert.

www.deutsches-museum.de/ausstellungen/kommunikation/informatik/filme



MOTIVIEREN – aber heimlich

Menschen kann man beeinflussen, ohne dass sie es merken. Psychologen testen Auswirkungen von unterschwellig – nicht bewusst – wahrgenommenen Ereignissen auf das Handeln. Gegen den eigenen Willen lässt der Mensch sich, so folgern die Forscher, allerdings nicht zwingen.

In Kürze

- ▶ Auch wenn wir **ganz kurz gezeigte Bilder** nicht bewusst sehen, kann das Gehirn sie doch registrieren. Psychologen sprechen von unterschwelliger, subliminaler oder auch präattentiver Wahrnehmung.
- ▶ Dieses Phänomen verknüpften Forscher mit der **einfachen Lernform des Konditionierens**: Die Versuchsteilnehmer bemerkten den Verstärkungsreiz nicht bewusst.
- ▶ Es gelang so, Menschen **unterbewusst zu motivieren**, sich bei einer Aufgabe mehr anzustrengen oder subjektiv riskanter zu handeln – durchaus zu ihrem Vorteil.
- ▶ Für Werbezwecke macht eine **heimliche Einflussnahme** wenig Sinn, denn bewusst wahrgenommene Reize wirken stärker.

Von Mathias Pessiglione

Zu den bekanntesten versteckten Botschaften, die Menschen manipulieren sollen, dürften die Worte »Eat popcorn« zählen. Im Jahr 1957 wurden sie angeblich in den USA in einen Kinofilm eingeschmuggelt – so kurz, dass die Zuschauer ihrer nicht bewusst gewahr wurden. Trotzdem hätten, so hieß es, plötzlich viel mehr Leute Popcorn gekauft.

War das die Geburtsstunde einer neuartigen Werbestrategie? Können unterschwellige, das heißt nicht bewusst registrierte Botschaften die Kauflaune anstacheln? – So wohl nicht! Tatsächlich vermochten Forscher die Sache nie zu reproduzieren. Im Übrigen entpuppte sich das Ganze als Schwindel – wie die Macher der Studie zehn Jahre später selbst zugaben.

Der Mythos aber, einmal in der Welt, blieb. Viele glaubten, gegen Manipulation durch Reklame, die allein unser Unterbewusstes anspricht, könnten wir uns nicht wehren. Nicht nur für Werbezwecke, sondern selbst in Wahlkämpfen setzten Strategen verschiedentlich auf unterschwellige – so genannte subliminale – Botschaften, mit denen sie zum Beispiel Fernsehspots unterlegten. Dabei zeigen es saubere wissenschaftliche Studien ganz klar: Keine einzige brachte auch nur die geringste Wirkung

auf eine Kaufentscheidung oder das Wählerverhalten.

Aber ist das grundsätzlich nicht möglich? Oder gelingt es unter bestimmten Voraussetzungen doch, Menschen zu manipulieren, ohne dass sie es merken? Meine Kollegen vom Wellcome Trust Centre in London sowie dem Pariser Hôpital de la Pitié-Salpêtrière untersuchen unterschwellige, also nicht bewusste Motivation mit einem veränderten Ansatz. Wir haben Versuche konzipiert, bei denen wir zwei verschiedene Forschungsfelder verknüpfen: das zur unterschweligen Wahrnehmung mit dem der so genannten Konditionierung.

Letzteres untersucht einfache Lernprozesse, bei denen sich quasi mechanische Reaktionen – etwa Verhaltensweisen – auf wiederholte Reize hin vorhersagbar herausbilden. Tierpsychologen pflegen ihre Versuchsobjekte mittels kleiner Belohnungen und Strafen zu konditionieren (positive und negative Verstärkung genannt). Unsere Probanden konnten kleine Geldbeträge gewinnen oder auch verlieren. Wir hofften, so ihre Motivation zu beeinflussen. Allerdings sorgten wir mit einem etablierten Trick dafür – anders als normalerweise bei einer Konditionierung –, dass die Mitwirkenden die ganz kurz gezeigten Münzen nicht bewusst wahrnahmen.

Die Suche nach der Schwelle (lateinisch *limen*), unterhalb deren wir einen Reiz nicht



DREAMSTIME / VALENTYN 75

mehr bewusst bemerken, obwohl er uns beeinflusst, ist so alt wie die experimentelle Psychologie. Das Phänomen selbst entdeckten Forscher Ende des 19. Jahrhunderts.

In einer Sorte von Versuchen zum Beispiel saßen damals die Teilnehmer so weit von einer Tafel entfernt, dass sie Zeichen darauf nicht mehr erkennen konnten. Sie behaupteten, nichts zu sehen. Doch bat man sie zu raten, ob es sich um einen Buchstaben oder eine Zahl handle, antworteten sie überzufällig oft korrekt. Ihr Gehirn musste also doch irgend etwas registriert haben.

Der Trick mit der Maske

Im letzten Jahrhundert wurden solche Studien recht populär (Kasten S. 55). Insbesondere dank eines Tricks im Experiment, der so genannten Maskierung, verbesserte sich auch die Handhabe. Als Maske bezeichnen Psychologen einen Störreiz, der unverzüglich nach dem sehr kurzen Reiz geboten wird: etwa nach einem unterschwellig gezeigten Buchstaben ein sinnleeres Bild aus Punkten. Auf die Weise lassen sich kurze Reize von etwa 30 Millisekunden Dauer maskieren – also unterschwellig halten –, die andernfalls unter Umständen doch ins Bewusstsein dringen würden, weil auf der Netzhaut sonst noch ein Nachbild bleiben kann. Die Maske verhindert das aber.

Nachzuweisen, dass keine bewusste Wahrnehmung stattfindet, genügt allein allerdings noch nicht. Denn die Forscher müssen auch belegen, dass ihre Studienteilnehmer unterbewusst doch etwas aufgenommen haben. Dazu verwenden sie indirekte Tricks. Und zwar prüfen sie, wie gut die Probanden anschließend auf einen länger dargebotenen, damit dem Bewusstsein zugänglichen Reiz reagieren.

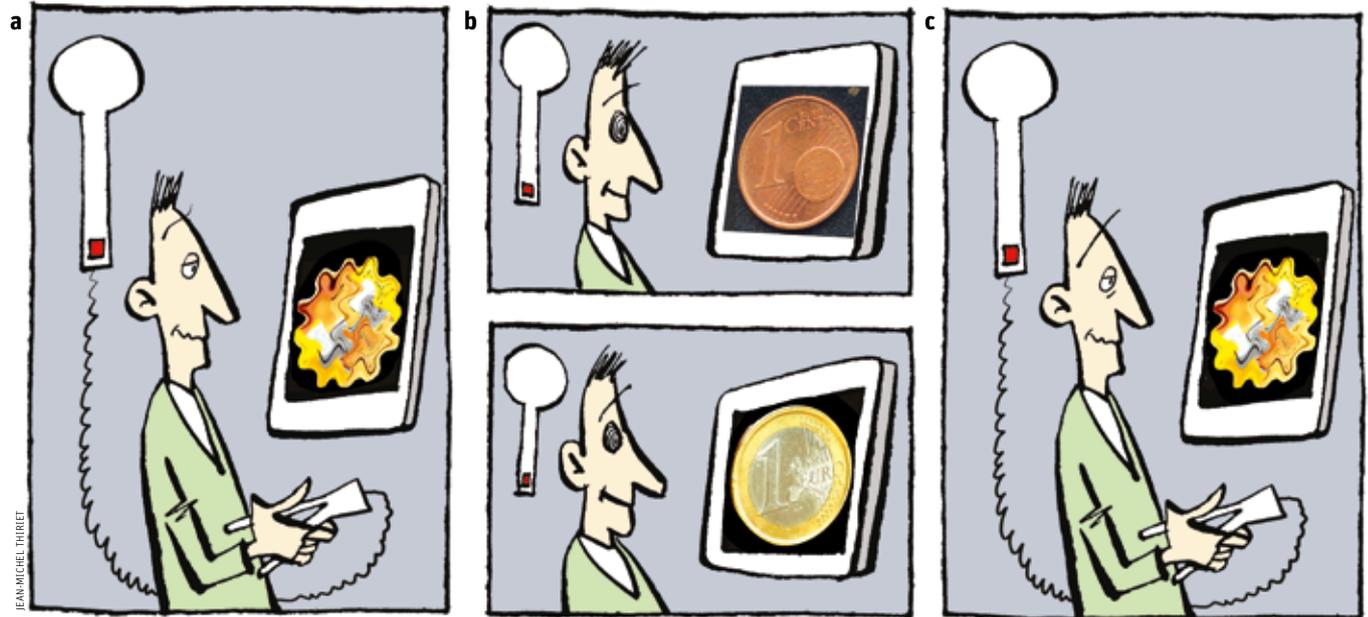
Sieht der Teilnehmer etwa unterschwellig das Wort »Tiger«, so kann man testen, ob er gleich darauf das deutlich gezeigte Wort »Löwe« schneller erfasst, als wenn ihm zuvor das Wort »Tisch« unterschwellig dargeboten wurde. Ist dies der Fall, so muss die Person unbewusst etwas von der Bedeutung des zuvor ganz kurz gezeigten Worts aufgenommen haben.

Dass es eine unterschwellige Wahrnehmung gibt, bezweifeln Psychologen heute nicht mehr. Eine viel beachtete Theorie dazu legte der französische Neurowissenschaftler und Bewusstseinsforscher Stanislas Dehaene vom Collège de France vor. Er unterscheidet zwei Wahrnehmungsstufen, eine für Merkmale niedrigen Grades, die nichtbewusst arbeitet, sowie eine für Höhergradiges, was Bewusstsein erfordert. Wo die Grenze dazwischen liegt, ist noch umstritten.

Lange glaubten Psychologen, unterschwellig seien nur einfache Attribute wie Form,

Ein Geldgewinn als Anreiz zieht immer, sogar wenn man bewusst gar nichts davon weiß. In den hier beschriebenen Versuchen motivierte die Belohnung Probanden unterschwellig.

MIT GELD VERSTECKT MOTIVIEREN



Der Grad des Überraschtseins bestimmt den Lernerfolg

Größe, Farbe zu übermitteln. Wie wir heute allerdings wissen, dürfen die Signale komplexer sein und sogar Sprachgehalt haben, also semantische Aspekte einschließen. Für strategisches Verhalten benötigen wir allerdings Bewusstsein.

Mit dem Einfluss unterschwelliger Reize auf die Motivation haben sich merkwürdigerweise nur wenige Forscher befasst. Wir verstehen unter Motivation einen inneren Prozess, durch den erwartete Belohnungen das Verhalten steuern. Die Frage ist aber, ob Belohnungen auch funktionieren, wenn der Vorgang unbewusst abläuft.

Schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts postulierten Psychologen, dass dergleichen möglich sei – stellten sie doch viele ihrer Konditionierungsexperimente mit Tieren an, die nach damaliger Ansicht kein Bewusstsein besaßen. Die Forscher unterschieden zwei Formen solchen einfachen Lernens: das pawlowsche – klassische – Konditionieren; und das operante – instrumentelle – Konditionieren.

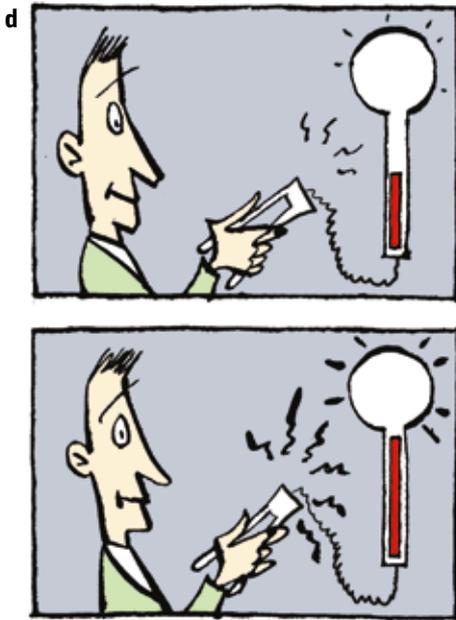
Im ersten Fall muss das Tier selbst nichts weiter tun. Ihm werden nur körperliche, unwillkürliche Reflexe angewöhnt. Berühmt ist die Studie des russischen Physiologen und Mediziners Iwan Pawlow (1849–1936) mit einem Hund, dem beim Klang einer Glocke Speichel aus dem Maul tropfte: Das Tier hatte eine Zeit lang Futter bekommen, wenn die Glocke erklang.

Eine operante Konditionierung dagegen zielt auf Verhaltensänderungen ab. Das Tier

lernt, den Reiz, die Belohnung und ein bestimmtes Verhalten miteinander zu assoziieren: Die Belohnung erhält es nach dem gewünschten Verhalten. So brachte der amerikanische Psychologe Burrhus Skinner (1906–1990) Ratten bei, Hebel zu drücken – etwa die richtige von zwei Tasten zu bedienen. Im wiederholten Versuch verfestigt sich die Assoziation, und das Tier zeigt immer häufiger die korrekte Aktion. Psychologen sprechen bei beiden Arten der Konditionierung von Verstärkung sowie bei der Belohnung auch gern vom Verstärker – nur dass bei der zweiten Art das willkürliche, also handlungssteuernde Nervensystem mitarbeitet.

In beiden Fällen liegt eine Wenn-dann-Beziehung zu Grunde. Der präsentierte Reiz beziehungsweise das Verhalten implizieren, dass die erwartete Belohnung oder Bekräftigung (etwa Futter) mit erhöhter Wahrscheinlichkeit kommt. Wichtig für den Erfolg ist zudem die enge zeitliche oder räumliche Nähe zwischen Reiz und Belohnung.

Nach einem einfachen mathematischen Gesetz, das die amerikanischen Psychologen Robert Rescorla und Allan Wagner 1972 aufstellten, spielt auch Überraschung eine wichtige Rolle. Danach bestimmt der Grad des Überraschtseins den Lernerfolg. Geschieht auf die eigene Aktion hin etwas Unerwartetes, lernt man den Zusammenhang eher und besser. Verblüfft einen das Geschehen nicht, so bedeutet dies, dass man den Zusammenhang schon kennt. Beim Lernen durch Verstärkung



Zuerst sieht der Proband ein Störbild, Maske genannt (a). Dann wird für Millisekunden ein Geldstück eingeblendet, entweder 1 Cent oder 1 Euro (b), der mögliche maximale Spielgewinn. Der Proband merkt das nicht bewusst. Darauf folgt sogleich wieder das Störbild (c). Nun soll der Teilnehmer eine Klemme drücken, und zwar möglichst kräftig, denn davon hängt die Gewinnhöhe ab. Bei der größeren Münze strengen die Leute sich viel mehr an als bei der kleinen (d).

UNTERSCHWELIGE WAHRNEHMUNG

Seit über 100 Jahren ergründen Psychologen, ob und wie wir nicht bewusst registrierte Reize verarbeiten. Trotzdem ist vieles an dem Phänomen noch strittig. Manche Experten leugnen sogar, dass eine nicht bewusste Wahrnehmung unser Verhalten wirklich entscheidend verändern kann. Naturgemäß ist es schwierig, die Grenzen zur bewussten Wahrnehmung sicher zu bestimmen. Doch die Untersuchungsmethoden werden immer raffinierter.

entspricht die Überraschung dem Vorhersageirrtum, also dem Unterschied zwischen erhaltenem und erwarteter Belohnung. Ist die Belohnung größer als erwartet, wird die Assoziation stärker; bei einer unerwartet geringen Belohnung schwächt sie sich ab.

Manchmal sind Lernblockaden sinnvoll

Zum Beispiel lässt sich der pawlowsche Hund nicht nachträglich noch gleichzeitig auf einen Sirenton konditionieren, nachdem er die Assoziation zwischen Glocke und Futter bereits gelernt hat. In dem Zusatzversuch ertönt die Sirene wiederholt gleich nach der Glocke – ohne Erfolg, auch wenn man das noch so oft wiederholt. Denn der Hund erhielt das Futter bisher ja stets zuverlässig beim Glockenton, was ihn längst nicht mehr überrascht. In der Fachsprache sagen wir, die alte Beziehung blockiert das Lernen des neuen Zusammenhangs.

Doch warum werden bestimmte Erlebnisse überhaupt als Belohnung empfunden? Lange Zeit glaubten die Forscher, dass solche Ereignisse schlicht physiologische Bedürfnisse mindern oder befriedigen, so wie Wasser Durst löscht. Doch mittlerweile zeigte sich, dass Belohnungen auch Lust bereiten. Hier wird gern der Fall eines Patienten mit einem Speiseröhrenverschluss angeführt, der über eine Magensonde ernährt werden musste. Obwohl er nichts hinunterschlucken konnte, bestand er darauf, die Nahrung zuerst in den Mund nehmen zu dürfen. Ebenso fressen in-

travenös ernährte Hunde trotzdem, wenn möglich – und werden immer dicker. Und Ratten lieben mit Süßstoff versetztes Wasser, das keinen Nährwert hat. Anscheinend ist die Nahrungsaufnahme nicht unbedingt eng an den physiologischen Bedarf gekoppelt. Manchmal steht die pure Lust am Essen im Vordergrund. Somit sollten wir Belohnungen besser als etwas verstehen, was ein Lusterlebnis verschafft und dadurch Verhalten konditioniert.

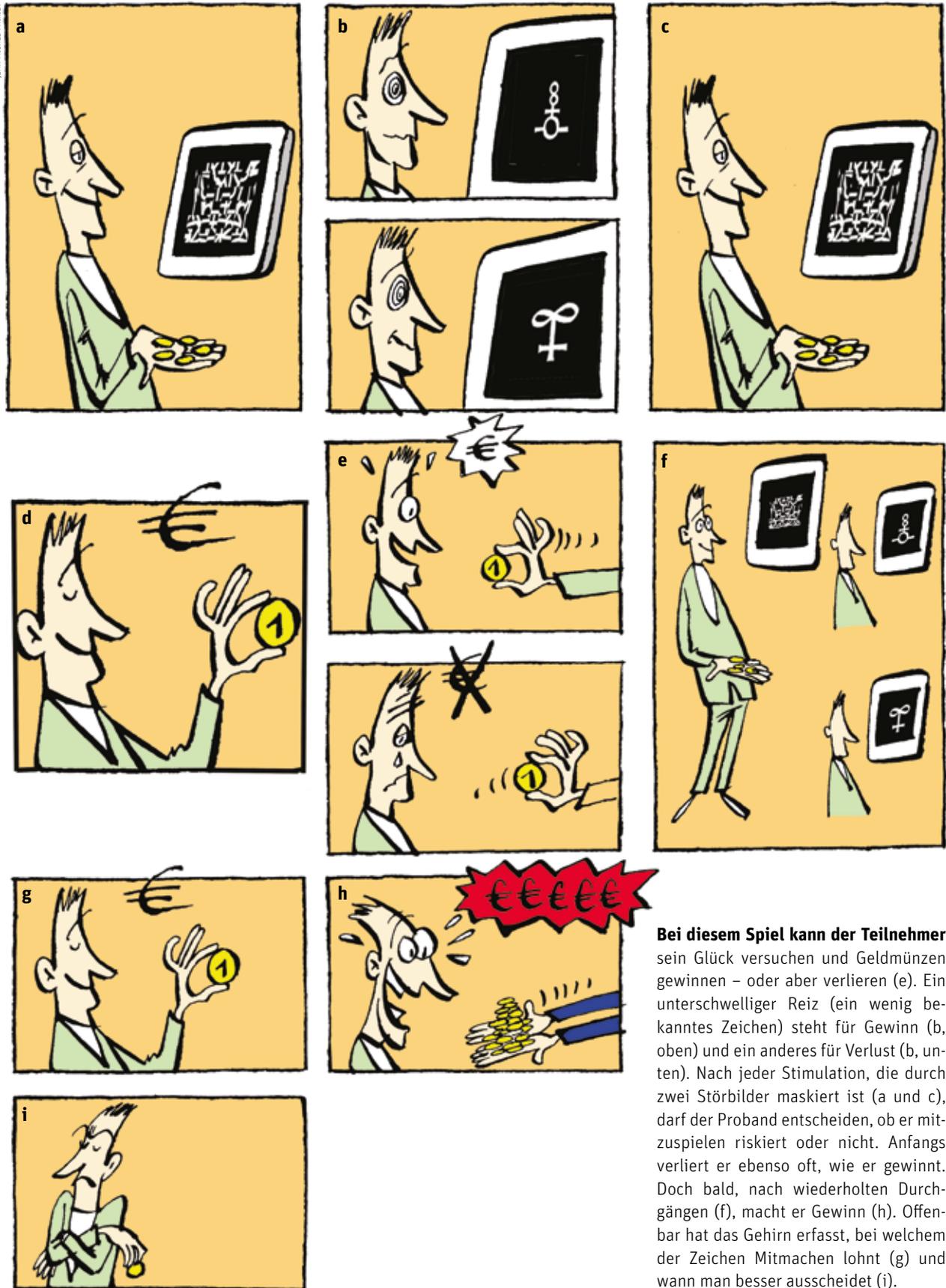
Die Frage ist aber, ob Verstärkungsreize auch eine echte Verhaltensmotivation verändern können. In dem Fall dürfte die Reaktion nicht quasi automatisch geschehen, sondern tatsächlich nur wegen der erwarteten Belohnung.

Hierzu ein Beispiel: Eine Ratte hat gelernt, ein eingeseiftes Brett hinaufzulaufen, denn oben gibt es ein paar Schluck Wasser. Doch irgendwann bekommt sie dort plötzlich Zuckerwasser, das sie noch lieber mag – für sie eine bessere Belohnung. Das Tier stutzt, schleckt dann das süße Wasser, und wird wieder unten ans Brett gesetzt. Und gleich klettert es wieder hoch – aber diesmal viel schneller als bisher. Mit Verstärkung im üblichen Sinn hat das jetzt nichts zu tun. Denn die Ratte erhält die Leckerei immer, ganz gleich, wie schnell oder langsam sie hochrennt. Aber das veränderte Angebot motiviert sie, sich mehr anzustrengen.

Ging es also früher in den wissenschaftlichen Motivationskonzepten um die reine

INTUITION – ODER DOCH UNBEWUSSTES LERNEN?

JEAN-PIERRE THIBREZ



Bei diesem Spiel kann der Teilnehmer sein Glück versuchen und Geldmünzen gewinnen – oder aber verlieren (e). Ein unterschwelliger Reiz (ein wenig bekanntes Zeichen) steht für Gewinn (b, oben) und ein anderes für Verlust (b, unten). Nach jeder Stimulation, die durch zwei Störbilder maskiert ist (a und c), darf der Proband entscheiden, ob er mitzuspielen riskiert oder nicht. Anfangs verliert er ebenso oft, wie er gewinnt. Doch bald, nach wiederholten Durchgängen (f), macht er Gewinn (h). Offenbar hat das Gehirn erfasst, bei welchem der Zeichen Mitmachen lohnt (g) und wann man besser ausscheidet (i).

Befriedigung physiologischer Bedürfnisse, so sehen wir heute das Lusterleben durch eine Verstärkung an erster Stelle. Belohnend können dann auch nicht primär bedürfnisbezogene Phänomene wirken, etwa soziale Anerkennung zu erhalten oder gemäß den eigenen moralischen Maßstäben zu handeln.

Ob ein Lusterleben stattfindet und wie stark es ist, hängt von der Bedürfnislage ab, vom Hunger zum Beispiel oder allgemeiner vom kognitiven oder geistigen Zustand. Wenn unser kognitiver Apparat etwas positiv bewertet, bedeutet das nicht nur, dass wir die betreffende Situation selbst schätzen und anstreben; für uns ist auch der Kontext solcher Belohnungen positiv besetzt, der ebenfalls erlernt ist. So freuen wir uns nach einer langen Reise immer mehr auf zu Hause, je vertrauter uns die Straßen werden.

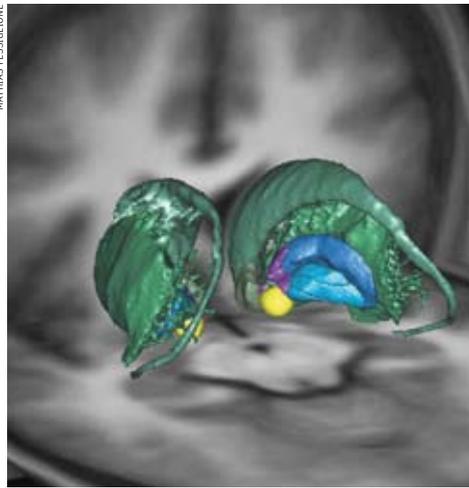
Geld als Belohnung und Strafe

Belohnungen auf Verhaltensweisen bewirken somit zweierlei: Sie richten das Verhalten auf die jeweils beste Alternative aus, und sie steigern dessen Intensität – je wichtiger die Verstärkung, umso mehr.

Mit diesem Konzept konnten wir unterschwellig beeinflusste – subliminale – Motivation experimentell untersuchen. Es sollte genügen, Hinweisreize auf Belohnungen unterschwellig zu halten, also zu maskieren. Auf die Weise haben wir geprüft, ob ein nicht bewusst wahrgenommener Reiz eine Testperson dazu bringen kann, sich in einem Versuch mehr anzustrengen beziehungsweise sich anders zu entscheiden.

Als Verstärkungsreiz wählten wir Geldstücke – in der Annahme, dass das so gut wie jeden lockt. Außerdem bekommt man davon nicht so leicht genug wie etwa bei Süßigkeiten. Ein weiterer Vorteil: Man kann die Münzwerte zugleich als Belohnung und Strafe verwenden, also dasselbe Maßsystem für Gewinn und Verlust benutzen, nur das Vorzeichen umkehren, was die Quantifizierung erleichtert.

In der ersten hier dargestellten Studie untersuchten wir, ob der Münzwert die Motivationsstärke beeinflusst. Subliminal, maskiert von Störreizen vorher und danach, zeigten wir den Versuchsteilnehmern auf einem Bildschirm ein großes oder ein kleines Geldstück, sagen wir einen Euro beziehungsweise einen Cent (Kasten S. 52/53). Vor dem eigentlichen Experiment prüften wir, bei welchen Bedingungen, insbesondere bei welcher Reizdauer sie nichts mehr bewusst wahrnahmen. Dazu sollten sie zum einen angeben, ob sie das Geld gesehen hatten, zum anderen, um welche Münze es sich handelte. Sobald sie angeblich



Tief sitzende Hirngebiete (gelb) sind aktiv, wenn man motiviert wird – zum Beispiel durch einen Anreiz, Geld zu gewinnen. Sie gehören zu den Basalganglien, Kerngebieten in der Nähe von Strukturen des limbischen Systems wie dem Hippocampus (grün), und arbeiten, ob die Motivation bewusst oder unbewusst ist. Im Hintergrund grau Teile des Gesamtgehirns

nichts mehr sahen und auch insgesamt jedes zweite Mal falsch rieten, waren wir zufrieden.

Nun zum Motivationstest: Die Teilnehmer sollten versuchen, einen möglichst großen Anteil des unterschwellig präsentierten Geldwerts zu gewinnen, indem sie die Klemme eines Dynamometers zusammendrückten. Je mehr Kraft sie dabei aufbrachten, umso höher wanderte die Anzeige (der Cursor) auf einer senkrechten Skala auf dem Bildschirm. Maximal konnten sie zum Beispiel einen Euro gewinnen – oder eben andernfalls einen Cent. Stieg die Anzeige nur bis zur Mitte der

BEWUSSTER ODER UNBEWUSSTER HINWEISREIZ?

Bis vor 50 Jahren begnügten sich Psychologen bei Studien zur unterschweligen Wahrnehmung damit, die Teilnehmer einfach zu fragen, was sie wohl gesehen hatten. Wussten die Probanden das nicht, galt ein Reiz als subliminal. Hieran kam in den 1960er Jahren Kritik auf. Ein wichtiger Einwand: Wenn nicht verlangt wird, dass die Teilnehmer angeben, was genau sie gesehen haben, vermerken sie viel öfter, etwas wahrgenommen zu haben.

Als Ausweg ersannen Tester indirekte Prüfverfahren. Sie zeigen den Teilnehmern zum Beispiel nun kurz eines von zwei möglichen Bildern, sagen wir von einem Tiger beziehungsweise einem Stuhl, und lassen sie raten, welches es war. Nur wenn die Antworten nicht besser als zufällig ausfallen, gilt der Reiz als subliminal. Vertrackterweise gilt jedoch für viele Forscher überzufällig häufiges Richtigraten gerade als Hinweis auf unbewusste Wahrnehmung.

Erwiesen wäre subliminale Wahrnehmung demnach, wenn zwar die Forderung nach direkter Unterscheidung nur Zufallswerte ergibt, sich aber bei genauen indirekten Verfahren überzufällige Werte ergeben, wie etwa zusammen mit einer Konditionierung.

Solche Unterscheidungen stoßen an Grenzen. Eine allzu strenge Auslegung würde etwa manchen erwiesenen Erscheinungen die Existenz absprechen, etwa dem so genannten Blindsehen. Es kommt zum Beispiel vor, dass Menschen mit schwer geschädigter Sehrinde davon überzeugt sind, überhaupt nichts mehr zu sehen. Trotzdem können sie überzufällig oft richtig raten, wo sich eine Lichtquelle befindet. In dem Fall ließe sich streiten, ob dies unbewusste Wahrnehmung ist oder doch auf irgendeine Weise ein Rest bewusster Wahrnehmung existiert, den Betroffene nur nicht beschreiben können.

Das Gehirn kann lernen, unterschwellige Reize mit Bedeutung zu belegen, die anfangs neutral sind

Skala, bekamen sie im günstigen Fall fünfzig Cent, im anderen einen halben. Und tatsächlich strengten sich die Leute bei großen Münzen viel mehr an als bei kleinen – obwohl sie ja gar nicht »wussten«, wann sich der Einsatz lohnte. Gleichzeitig stieg übrigens auch der Hautwiderstand proportional zum Geldwert. Das heißt, das vegetative Nervensystem sorgte für vermehrte Schweißbildung, ein Zeichen einer emotionalen Reaktion oder auch kurz für Stress.

Der gute Dämon – Zeichen der Alchemisten

Zusätzlich haben wir die Hirnaktivität von Versuchsteilnehmern im Magnetresonanztomografen beobachtet. Wir wollten wissen, welche Hirnareale auffallen, wenn wir die Geldprämie erhöhten. Wie sich herausstellte, waren nun Bereiche der so genannten Basalganglien besonders aktiv, tief sitzender Kerne des End- und Zwischenhirns (siehe Bild S. 55). Das heißt, auch wenn die Person es nicht merkt, ermessen diese Kerne den Belohnungswert. Dementsprechend wirken sie auf Gebiete der Hirnrinde ein, die für Muskelkontraktionen zuständig sind.

In diesem Versuch hatten wir Münzen von kursierendem Geld eingesetzt – eine große, eine ganz kleine –, deren Wert jeder kennt. Uns interessierte nun, ob wir durch Konditionierung auch eine Assoziation zu irgendwelchen Symbolen provozieren konnten, die den Testpersonen bisher nichts bedeutet hatten. Zu dem Zweck verwendeten wir Zeichen des Agathodaimon, einer Art Alphabet der Alchemisten im Mittelalter. (Als »guter Dämon« wurden in der Antike Schutzgottheiten bezeichnet. Auch einige Gelehrte trugen den Namen, so ein ägyptischer Alchemist.) Wir

belegten jeweils ein Symbol dieser Zeichensammlung mit Gewinn, ein anderes mit Verlust von beispielsweise einem Euro. Diese Bilder zeigten wir den Probanden nie deutlich. Sie wussten zwar, dass wir ihnen für Sekundenbruchteile etwas vorführten, hatten aber keine Ahnung, worum es sich dabei handelte.

Zum Abgleich präsentierten wir im Vorversuch zunächst je ganz kurz zwei Bilder hintereinander. Die Mitwirkenden sollten dann sagen, ob wir ihnen zwei verschiedene Zeichen geboten hatten oder zweimal dasselbe. Wenn sie sich in der Hälfte der Fälle täuschten, konnten wir sicher sein, dass sie die Zeichen nicht wirklich sahen, die Bildphase also kurz genug war. Jetzt konnten wir darangehen, ihre Motivation unterschwellig zu manipulieren, indem wir sie auf die Zeichen konditionierten (siehe Kasten S. 54), von denen, wie gesagt, eines den Gewinn, ein anderes den Verlust von einem Euro bedeutete.

Dieses Experiment war anders gestaltet als das vorher geschilderte. Auch jetzt erschien pro subliminaler Präsentation jeweils eines der beiden Bilder. Doch die Teilnehmer drückten keine Klemme, sondern durften sich danach jedes Mal entscheiden, ob sie in dieser Runde mitmachen wollten oder nicht, also das Risiko einzugehen gewillt waren oder nicht. Wenn sie mitspielten, konnten sie den Euro, je nachdem, entweder gewinnen oder verlieren – abhängig vom gezeigten Bild. Weigerten sie sich, dann erhielten sie kein Geld, verloren aber auch nichts.

Folglich lohnte das Mitmachen nur bei einem der ausgewählten Zeichen. Beim anderen war es tunlichst zu vermeiden. Nach jeder Runde erfuhr der Proband, ob er gewonnen oder verloren hatte (oder hätte). Durch wiederholte Versuche sollte so allmählich eine Assoziation zum präsentierten Zeichen entstehen.

Wer sich bei diesem Experiment einfach immer gleich entschied oder wer wirklich jedes Mal rein nach dem Zufallsprinzip wählte, hätte letztlich kein Geld gewonnen, weil sich Gewinn und Verlust statistisch ausgeglichen hätten. Doch unsere Teilnehmer machten Gewinn! Offensichtlich verstand ihr Gehirn die Bilder zu nutzen, ohne dass sie diese bewusst wahrnahmen.

Damit war erwiesen, dass eine operante Konditionierung auch mittels unterschwelliger Reize gelingen kann. Das Gehirn vermag zu lernen, unterschwellige Hinweise mit Bedeutung zu belegen und hierdurch die günstigere Entscheidung zu treffen.

In Anlehnung an das erwähnte Gesetz von Rescorla und Wagner, das Überraschung ein-



bezieht, entwarfen wir ein Verhaltensmodell mit einem Verstärkungsalgorithmus. Zur Erinnerung: Eine höhere Belohnung als erwartet steigert demnach den Wert des Hinweisreizes, eine niedrigere mindert ihn. Mit Hilfe dieses Algorithmus berechneten wir, welchen Wert die subliminalen Hinweise für die Teilnehmer theoretisch besaßen, wie stark jene Reize also Einfluss ausübten.

Auch während dieser Versuche hatten wir Hirnaufnahmen gemacht. Die Aufzeichnungen untersuchten wir nun daraufhin, ob manche Gebiete die theoretischen Werte jedes Mal sozusagen anzeigten, während die Versuchsperson sich für Mitmachen oder Aussteigen entschied. Auch diesmal wieder erwiesen sich die Basalganglien als verantwortlich. Jene tiefen Kerne lernen demnach, die subliminalen Stimuli nach ihrem Wert zu unterscheiden: bei einem Gewinn versprechenden Reiz sind sie stärker aktiv als bei drohendem Verlust.

Unsere verschiedenen Studien besagen: Es ist möglich, Motivation mit unterschweligen Reizen zu beeinflussen. Subliminale Stimuli, die mit einer Belohnung einhergehen, können uns anspornen, uns mehr anzustrengen. Sie können einen bestimmten – neuen – Wert erlangen und auf diese Weise vorteilhafte Entscheidungen begünstigen.

Offenheit hat mehr Erfolg

Aber welche Ergebnisse erhält man mit den sonst gleichen Versuchen bei einer »offenen« Konditionierung mit klar erkennbaren Reizen, wenn man also nicht mit unterschweligen Tricks arbeitet? Wenn die Teilnehmer die Geldstücke oder Symbole deutlich sehen, weisen ihre Verhaltensentscheidungen in die gleiche Richtung wie bei den hier geschilderten Versuchen. Allerdings strengen die Leute sich jetzt im Mittel mehr an beziehungsweise sind risikobereiter, wenn eine gute Belohnung winkt. Demnach wirken bewusst wahrgenommene Reize stärker als unterschwellige. Gleiches beobachteten wir bei der Hirnaktivität: Dieselben Gebiete und Netzwerke springen an und lenken das Verhalten – nur mit höherer Effizienz.

Neu war zwar die Methodik, mit der wir unterschwellige Einflüsse auf die Motivation untersucht haben. Doch das Phänomen an sich dürfte die meisten wenig überraschen. Schließlich thematisierte schon Sigmund Freud (1856–1939), der Begründer der Psychoanalyse, die Bedeutung des Unterbewusstseins für unser Handeln. Einige gewichtige Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen bestehen dennoch. Insbesondere bewertete Freud innere Quellen als Antriebe. In unseren



FOTOLOGIA / K. - U. HASSLER

Studien versprochen äußere Reize die Belohnung. Zudem glaubte Freud, unbewusste Motive würden uns zuweilen Handlungen aufzwingen, die wir so eigentlich gar nicht wollen. In unseren Versuchen entschieden die Teilnehmer dagegen im Prinzip – qualitativ – tendenziell gleich wie beim offenen Experiment, nur weniger bestimmt.

Das bedeutet: Bei bewusster Wahrnehmung hätten sie ebenso gehandelt, nur mit mehr Nachdruck und Stetigkeit. Was es der Werbebranche bringen soll, mit verdeckten Reizen zu arbeiten, sehen wir darum nicht so recht: Als Einziges würde sie damit erreichen, die erwünschte Wirkung auf die Konsumentenentscheidung abzuschwächen.

Überdies haben wir Hirnmechanismen nachgewiesen, die zwar bestimmt ohne unser Wissen, aber dennoch im Sinn von bewussten Wünschen arbeiten. Vielleicht besteht da ja ein Zusammenhang mit dem, was wir gern Intuition nennen. Beispielsweise mag ein Spieler (A) beim Pokern spüren, dass der Gegner (B) passen wird, wenn A den Einsatz erhöht. Das Gefühl kann trügen – beruht aber möglicherweise auf einer Erfahrung ähnlich wie bei einer operanten Konditionierung. Es ist nicht ausgeschlossen, dass ich am Gegner unbewusst irgendetwas wahrnehme, vielleicht eine winzige Geste oder einen kaum merklichen Ausdruck, die er in der Vergangenheit bei einem Bluff auch gezeigt hatte.

Bei unseren Versuchen haben wir uns abgesichert, dass die Teilnehmer die Erfolg verkündenden Hinweisreize nicht bewusst wahrnahmen. Denkbar wäre dennoch, dass sie durch die unterschweligen Reize bewusst eine Motivation verspürten. Ob das möglich ist, sollen weitere Studien aufklären. ◀

Manchmal verhilft Intuition zum Geldgewinn – oder unterbewusste Wahrnehmung?



Mathias Pessiglione forscht am INSERM (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale) am Hôpital de la Pitié-Salpêtrière in Paris.

Kouider, S., Dehaene, S.: Levels of Processing During Non-Conscious Perception: A Critical Review of Visual Masking. In: *Philosophical Transactions of the British Royal Society* 362, S. 857–875, 2007.

Naccache, L.: *Le Nouvel Inconscient*. Éditions Odile Jacob, Paris 2006.

Pessiglione, M. et al.: How the Brain Translates Money into Force: A Neuroimaging Study of Subliminal Motivation. In: *Science* 316, 11. Mai 2007, S. 904–906.

Pessiglione, M. et al.: Subliminal Instrumental Conditioning Demonstrated in the Human Brain. In: *Neuron* 59(4), S. 561–567, 28. August 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040555.

Teil I: Zeitwahrnehmung in Altägypten

Teil II: Vergangenheitskult in Babylonien

TEIL III: DIE ENTDECKUNG DES FORTSCHRITTS

Teil IV: Die Zeit in den Naturwissenschaften

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Vom Werden DER ZUKUNFT

Die Geburt Christi als Nullpunkt aller Datierung und das Räderwerk der mechanischen Uhr – erst diese Erfindungen des Mittelalters ermöglichten unsere heutige Vorstellung einer linearen, auf eine ergebnisoffene Zukunft hinlaufenden Zeit.

CORBIS / SCIENCE FACTION / LIBRARY OF CONGRESS DIGITAL



Von Thomas Maissen

Zeit ist ein kulturelles Phänomen. Ob wir einen Tag in 24 Stunden à 60 Minuten einteilen oder in ganz andere Einheiten, das bleibt uns überlassen. Es ist auch nicht naturgegeben, sondern lediglich durch den gregorianischen Kalender festgelegt, dass das Jahr sich am Sonnenlauf orientiert und exakt 365 Tage, 5 Stunden, 49 Minuten und 12 Sekunden dauert. In der nördlichen Hemisphäre nährt das stets aufs Neue die Hoffnung auf weiße Weihnachten, weil der 25. Dezember in den dortigen Winter fällt. Die Muslime hingegen koppeln ihren Ramadan nicht an das Sonnen-, sondern an das elf Tage kürzere Mondjahr und lassen den Feiertag somit durch die Jahreszeiten wandern. Selbst das Schmieden von Plänen für eine fernere Zukunft – von kindlichen Fantasien bis hin zu den Langzeitprognosen der Klimaforscher – ist alles andere als selbstverständlich. Denn die Idee einer ergebnisoffenen und im Prinzip grenzenlosen Zukunft kam erst im 18. Jahrhundert auf. Wichtige Voraussetzungen dafür entstanden allmählich während des europäischen Mittelalters.

Die enge Bindung der Zeiteinteilung an periodische Naturphänomene erscheint uns sinnvoll. Aber gerade weil sie uns mit Sinn erfüllt scheint, ist sie nicht von der Natur vorge-

Fortschritt und Industrialisierung sind ohne eine standardisierte Zeit nicht denkbar (im Bild: Thomas Edison an der Stempeluhr seines Labors).

geben, sondern eine Entscheidung des Menschen und damit ein kulturelles Phänomen. Beispielsweise ist eine Sekunde seit 1967 »das 9 192 631 770-Fache der Periodendauer der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustands des Zäsiumatoms (Nuklid ^{133}Cs) entspricht«. Diese Atomsekunde ist aber nicht »wahrer« als die frühere Sonnensekunde, die als 1/86400 des mittleren Sonnentags definiert war. Atomuhren messen Naturphänomene und deren Dauer lediglich mit höherer Präzision – weil unsere moderne Welt mit ihren Satelliten und elektronischen Geräten danach verlangt. Die Zeit als solche erfassen sie ebenso wenig wie eine schlichte Pendeluhr.

Dauer und Veränderung in der Natur werden nämlich erst dann zu Zeit, wenn sie jemand beobachtet und misst. Das Universum hat auch schon gedauert, bevor es uns Menschen gab, und wird dies weiter tun, wenn wir dereinst die Erde nicht mehr bevölkern. Doch Zeit kann es dann nicht mehr geben, sofern nicht andere Wesen die Dauer strukturieren und in Einheiten unterteilen. Wesen, wohlverstanden, im Plural, denn Zeit ist auch ein soziales Phänomen. Wie wir ihre Abschnitte benennen, ob wir diese als lang oder kurz empfinden – all dies erlernen wir durch Kommunikation mit unseren Mitmenschen, und mit Hilfe der Zeit organisieren wir auch das gesellschaftliche Zusammenleben.

Weil die Wahrnehmung von Zeit ein kulturelles und soziales Phänomen ist, unterliegt sie dem historischen Wandel. Das zeigt sich zum Beispiel beim Vergleich unserer heutigen Zeitvorstellungen mit denjenigen in antiken Kulturen (Spektrum der Wissenschaft 7/2010, S. 62 und 8/2010, S. 72): Die Annahme eines zyklischen, das heißt nicht linearen Ablaufs ließ kein Konzept einer fernen, aber gestaltbaren und möglicherweise besseren Zukunft zu. Die Voraussetzungen dieser in der Moderne so selbstverständlichen Idee entstanden während des europäischen Mittelalters. Wesentliche Meilensteine waren die Einführung eines einheitlichen und ausschließlichen Be-

ANGEBERLIN / HERVE CHAMPOLLION



Eine Sonnenuhr liefert geografisch und mit den Jahreszeiten wechselnde Daten (im Bild: Kathedrale von Chartres, 12. Jahrhundert).

zugsystems – die Geburt Christi als verbindlicher Nullpunkt – sowie die Entwicklung entsprechender Messsysteme für eine universale und vergleichbare Zeiteinteilung.

Danach bestand, welthistorisch betrachtet, sehr lange gar kein Bedürfnis. Für primitive, das heißt sozial wenig differenzierte Gesellschaften genügte eine mythische, geschichtslose Zeit, in der jedes vergangene Geschehen für sich allein in der jeweiligen Handlungslogik verstanden werden konnte. Jäger und Sammler mussten sich erinnern, wo und zu welcher Zeit die Beutetiere zur Quelle gingen, um die nächste Jagd abzusprechen. Sie kannten den Wechsel der Jahreszeiten und wussten

sie in ihre Planungen einzubeziehen. Doch diese Menschen hatten keinen Grund, ihre Erinnerungen in eine Chronologie einzuordnen – also eine in der Vergangenheit einsetzende Abfolge von Ereignissen –, noch, sie mit denen eines anderen Stamms zeitlich abzugleichen.

Auch die neolithische Revolution, die vor gut 12000 Jahren im Gebiet des Fruchtbaren Halbmonds ihren Anfang nahm, änderte daran wenig. Mit dem Ackerbau standen regelmäßig wiederkehrende, identische Aufgaben an, nicht aber ein Wandel, den es einzuordnen galt. Nicht eine lineare Zeit regelt bis heute die landwirtschaftliche Arbeit, sondern das zum Teil unberechenbare Diktat der Natur: Wenn

DIE VERGANGENHEIT IM BLICK – WIE AUS EREIGNISSEN GESCHICHTE WIRD

Die Moderne, die sich als welthistorische Entwicklungsstufe verstand, hat bezeichnenderweise auch die Geschichte als wissenschaftliche Disziplin hervorgebracht. Sie löste im 18. Jahrhundert eine Historiografie ab, deren Gegenstand Geschichten gewesen waren – gesammelte Ereignisse der Vergangenheit – und nicht Geschichte als ein zusammenhängender Prozess. Die neue Wissenschaft machte aus der ungeordneten Menge von Überlieferungen und Überresten der Vergangenheit eine einzige, nicht von Gott geschaffene, sondern vom Menschen verstandene Geschichte der Zivilisation. Ihre Zeit ist linear, kumulativ, unwiederholbar und irreversibel. Nichts, was einmal geschah, wird sich erneut ereignen, und was ähnlich aussieht wie Früheres, ist doch, da in einem anderen Kontext stehend, immer etwas ganz anderes.



Historiker genießen große Freiheiten in der Deutung ihres Quellenmaterials. Eine beliebte Metapher ist die »Gleichzeitigkeit des Ungleichzeitigen«, die ein Nebeneinander von Phänomenen der industrialisierten Moderne und der agrarischen Traditionen bezeichnet (im Bild: ein Fahrzeug von Amischen, einer protestantischen Gruppierung in den USA). Problematisch an dieser Metapher ist beispielsweise, dass sie eine Standardentwicklung voraussetzt.

Diese Wahrnehmung war eine Reaktion auf den beschleunigten Wandel während der industriellen und politischen Revolutionen um 1800. Anders als in agrarischen Gesellschaften trat der Sohn nicht mehr automatisch in die Fußstapfen des Vaters, und was man einmal erlebt und erlernt hatte, galt nicht mehr selbstverständlich auch noch nach einigen Jahren. Die Entwicklung der modernen Geschichtswissenschaft diente unter anderem dazu, diese ständige und immer schneller erfolgende Konfrontation mit Neuem zu bewältigen. Greifbar wird das noch heute in den Epochenbezeichnungen der universitären Lehrstühle, die atemlos dem Zug der Zeit hinterherzulaufen scheinen: Neue Geschichte, Neuere Geschichte, Neueste Geschichte, Zeitgeschichte.

Solche Epochen findet der Historiker in der Vergangenheit aber nicht vor.

In einer stets unvollständigen Überlieferung begegnet er vielmehr Hinweisen auf Ereignisse, die im Prinzip chaotisch nebeneinander stehen. Erst die Geschichtsschreibung bringt Ordnung hinein: mit symbolträchtigen Jahrhundertgrenzen, mit Chronologien und deren Abstimmung, mit Fragestellungen, die ein Thema begrenzen, mit Epochenamen, die Entwicklungsstufen verallgemeinern und voneinander abgrenzen, mit Metaphern (man denke an das »finstere Mittelalter«). Wie sehr Zeitbegriffe kulturell geprägt sind, offenbart sich gerade in ihrem Gebrauch durch den wissenschaftlich arbeitenden Historiker. Der Umgang mit der Zeit ist vielleicht derjenige Bereich, in dem er am freiesten agiert – und am literarischsten. Ein Ereignis vorzudatieren, das verbietet ihm seine Quellen. Aber ihre »Vetomacht«, wie Reinhard Koselleck, einer der maßgeblichen Historiker des 20. Jahrhunderts, dies nannte, legt nicht fest, ob das Jahr 1914 zu einem langen 19. oder zu einem kurzen 20. Jahrhundert gehört, ob damit ein fünfjähriger oder ein 30-jähriger Krieg begann. Solche Zeitdeutungen nimmt der Wissenschaftler vor, auch wenn er Ereignisse als Fortschritt, Niedergang oder Krise bewertend zusammenfasst, also mit Wörtern belegt, für die objektive Maßstäbe fehlen. Scheinbar oder wirklich Belangloses zu einem epochalen Phänomen zu erklären, selbst das liegt in seiner Macht, und in gewisser Hinsicht auch in der Logik des Wissenschaftsbetriebs, der die Entdeckung von Neuem und die Umwertung von Altem mit Publikationen und Forschungsgeldern belohnt.

die Ernte auf den Feldern steht, wird sie mit allen verfügbaren Kräften eingebracht.

Erst in Hochkulturen, wie sie im 4. Jahrtausend v. Chr. in Mesopotamien und Ägypten entstanden, benötigte man eine größere Organisationskompetenz und dafür wiederum die Kategorie Zeit. Diese trennte Erfahrungen und deren Verarbeitung voneinander und regelte den Übergang von einem Vorher zu einem Nachher – Voraussetzungen allen Planens und jeder Koordination von Individuen. Doch auch diese Zeitwahrnehmung blieb jeweils an ein konkretes Handlungsfeld gebunden und wurde nur ansatzweise zu einer anderen in Beziehung gesetzt: Inschriftlich erhaltene Daten etwa zum Bau von Monumenten bezogen sich auf die Thronbesteigung des jeweils regierenden Pharaos, Königslisten stellten den Zusammenhang zu seinen Vorgängern her, aber keine Beziehung zu Ereignissen außerhalb der herrschaftlichen Sphäre oder gar Ägyptens.

Veränderung als Ausdruck von Dekadenz

Der im Kleinasien des 5. Jahrhunderts v. Chr. geborene Herodot war der Erste, der solche kulturspezifischen Informationen miteinander synchronisierte. Geschehnisse in den griechischen Stadtstaaten bezog er auf die Herrschaftsjahre ihrer großen Gegenspieler – der Perserkönige. Herodotus erstellte also eine relative Chronologie, wie es für die Antike typisch wurde. Der römische Historiker Marcus Terentius Varro (116–27 v. Chr.) berechnete die Gründung Roms, indem er sich auf die damals gängige Datierung der Zerstörung Trojas bezog. Da Varro Rom als dessen Wiedergeburt ansah und gemäß astrologischer Lehren zwischen Untergang und Reinkarnation 440 Jahre verstrichen waren, fixierte er den Nullpunkt seiner Zeitrechnung ab *urbe condita* auf jenes Jahr, das in unsere heutige Skala umgerechnet 753 v. Chr. ist.

Dennoch wurde dies nicht zum Referenzpunkt der römischen Datierung. Stattdessen orientierte man sich seit der Zeit der Republik bis in die Kaiserzeit an jenen zwei Personen, die jeweils für ein Jahr das Konsulat innehatten; deren Namen waren in eigenen Listen, den *fasti consulares*, hinterlegt. Für die alltäglichen Datumsangaben genügte die Gleichzeitigkeit eines Ereignisses mit der Amtszeit konkreter Amtsträger, ohne Bezug zur Geschichte der Stadt als Ganzem.

Den Römern fehlte insofern die Vorstellung einer geschichtlichen Entwicklung, da Veränderungen tendenziell wie in anderen Kulturen zyklisch gedeutet wurden – hier als Wechselspiel von Aufstieg und Dekadenz je



nachdem, wie es um die moralische Qualität der historischen Akteure beschaffen war.

Das Bewusstsein, in historischer Kontinuität und unter historisch entstandenen Umständen zu leben, setzt eine absolute, in Tagen und Jahren messbare Zeit voraus. Eine solche Weltzeit mit einem gemeinsamen Nullpunkt entstand in einem langen Prozess seit dem Mittelalter. »Es begab sich aber zu der Zeit, dass ein Gebot von dem Kaiser Augustus ausging, dass alle Welt geschätzt würde«: Die Weihnachtsgeschichte brachte jüdische und römische Tradition, Heilsgeschichte und irdische Ereignisse in einen Zusammenhang. Insofern ist es bezeichnend, dass ein Schüler Augustins, der christliche Historiker Orosius (385–418), als Erster systematisch Varros Berechnung aufgriff und seine eigenen Ausführungen ab *urbe condita* datierte. Diese Stadtgründung war dann wiederum der Ausgangspunkt für den Mönch Dionysios Exiguus, als er um 550 unserer Zeitrechnung die Geburt Christi auf das Jahr 754 nach der Gründung Roms datierte. Der Benediktinermönch Beda Venerabilis schließlich berechnete die Schöpfung der Welt rückwirkend auf 3952 v. Chr., womit die Eckpunkte der christlichen Zeitrechnung feststanden (der zufolge Beda von 672/673 bis 735 lebte).

Diese Zählung Anno Domini, im Jahr des Herrn Jesu, setzte sich um das Jahr 1000 im Westen allgemein durch. Waren die heidnisch-römische Geschichte und die christliche Heilsgeschichte damit aufeinander abgestimmt, so ließen sich nun auch die Zeitrechnungen anderer Völker chronologisch einordnen. Bis in das 18. Jahrhundert bildete Bedas Datierung der Schöpfung denn auch den Nullpunkt aller westlichen Chronologien. Die orthodoxe Kirche zählte ebenfalls von der Welterschöpfung her, datierte sie aber anders. Erst Zar Peter der Große stellte im Jahr 1708 nach Erschaffung der Welt die Zeitrechnung in seinem Reich auf 1700 um.

Sie messen Sekunden auf wenige Milliardstel genau: die Zäsium-Atomuhren der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig.

In Kürze

- ▶ In der Natur gibt es nur Dauer, Zeit hingegen ist ein **kulturelles Phänomen**.
- ▶ Bis in die römische Antike hinein wurden Veränderungen nicht im Rahmen linearer, sondern **zyklischer Zeitabläufe** verstanden.
- ▶ Eine lineare Ausrichtung erhielt die Zeitwahrnehmung im Mittelalter durch die **Annahme eines Nullpunkts** – Christi Geburt.
- ▶ Erst seit dem 18. Jahrhundert wird die **Zukunft** als **offen** und **gestaltbar** angesehen.



ANGEBERLIN / BIA NOWOSKI

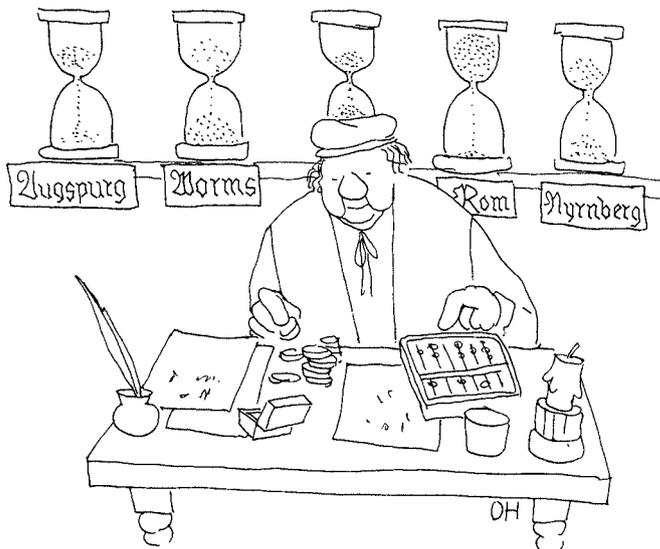
Mit den Räderwerken der Turmuhrn begann ab dem Mittelalter wahrhaftig eine neue Zeitrechnung. Von nun an war eine Stunde eine Stunde, egal wo man sich befand.

Ganz allgemein wurde im 18. Jahrhundert die Fixierung auf die Wertschöpfung als Ursprung der Zeiten aufgegeben, weil die erneuerten Naturwissenschaften ein weit höheres Alter für Erde und Kosmos nahelegten. Das war aber kein grundsätzliches Problem: Die christliche Zeitrechnung bot mit Christi Geburt einen Nullpunkt, von dem aus man in beide Richtungen einen unbegrenzten Zeitpfeil einrichten und beliebig weit zurückrechnen konnte. Das neue Zeitverständnis der Aufklärung entrückte nicht nur die Phänomene von Schöpfung und Sintflut in unhistorische Vorzeiten, es öffnete auch eine gestaltbare Zukunft. Linear war zwar schon das mittelalterliche Zeitverständnis gewesen, doch hatte es nicht nur einen eindeutigen Anfang, sondern auch ein fixes Ende gehabt: das jüngste Gericht. Was auch immer bis dahin

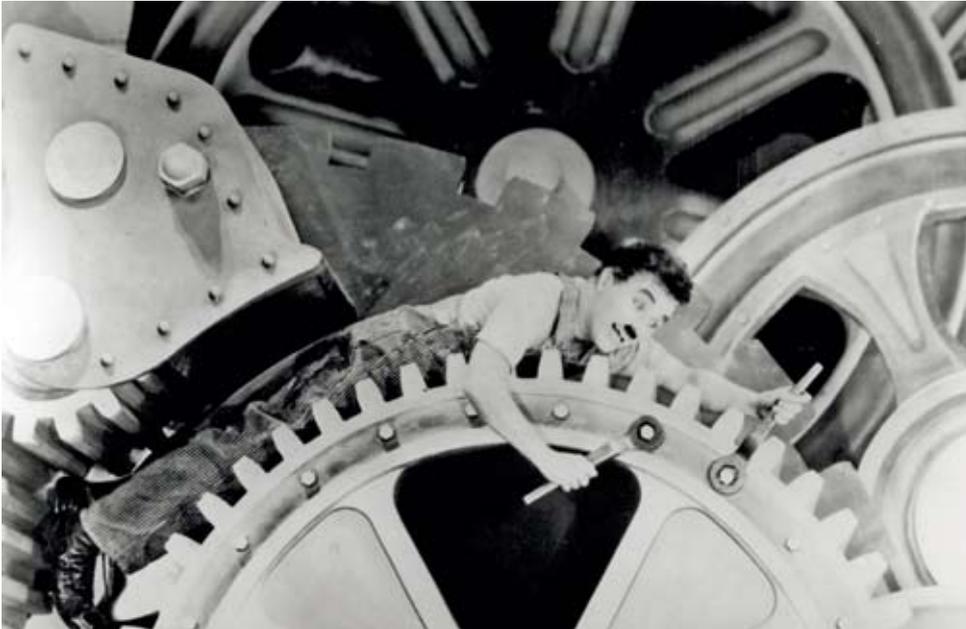
noch geschehen mochte, ließ sich zwar in einer Chronologie einordnen, würde aber an diesem bereits offenbaren Ziel nichts Grundsätzliches ändern.

Auch wenn die Menschen des Frühmittelalters in dieser Hinsicht ein ganz anderes Zeitverständnis hatten als wir heute, legten sie wichtige Grundsteine für den modernen Umgang mit der Zeit. So strukturierte die modellhafte Regel, die der heilige Benedikt von Nursia (480–547) für das Mönchsleben verfasst hatte, den Alltag der Mönche durch die Horen (Gebetsstunden), die von Kloster- und später von Kirchenglocken angekündigt wurden. Diesem zyklischen, auf Gott ausgerichteten Tagesablauf stellte der französische Mediävist Jacques Le Goff einen säkularen Rhythmus gegenüber, wie er das Leben in den Städten des Hochmittelalters geprägt habe: die mittels mechanischer Uhren in Stunden gefasste profitorientierte Zeit der Händler. Le Goff sah darin die Wurzel des modernen, ökonomischen Zeitverständnisses. Diese These ist mit guten Gründen kritisiert worden: Die Installation öffentlicher Uhren ging in der Regel nicht auf kaufmännische Initiativen zurück, sondern gilt eher als fürstliches oder städtisches Prestigeprojekt. Die Obrigkeit musste schließlich die Märkte regulieren, damit beispielsweise verderbliche Waren nur ab oder bis zu einer bestimmten Zeit verkauft wurden. Zudem profitierte die Kirche mit ihren gemeinschaftlichen Ritualen von einer exakten Zeitmessung vielleicht noch mehr als die Händler, und schließlich drängte weniger der Handel als die gewerbliche Produktion in der verstärkt arbeitsteiligen Gesellschaft auf klare zeitliche Verhältnisse.

So dürfte es viele Gründe dafür gegeben haben, dass in den Städten Mittel- und Oberitaliens seit dem frühen 14. Jahrhundert große öffentliche Uhren aufkamen; 1336 schlug die der Kirche San Gottardo in Mailand erstmals zu jeder vollen Stunde die Glocken an (um Mitternacht 24-mal). Weil das mechanische Räderwerk jede Stunde gleich zählte, löste sich die menschliche Zeit nun von der natürlichen. Zwar kannte schon die Antike eine Einteilung des Tages in zwölf Stunden, und diese wurden bereits mit technischen Mitteln gemessen (indem man etwa Wasser gleichmäßig aus einem Gefäß fließen ließ oder eine Kerze abbrannte). Verbreiteter als diese aufwändigen Verfahren war aber die Sonnenuhr. Doch die damit bestimmten Stunden zwischen Sonnenauf- und -untergang sind im Sommer länger als im Winter und variieren auch je nach geografischem Breitengrad. Die Gleichmäßigkeit der Räderuhren standardisierte dagegen die Stunde als Zeitmaß und



ANG BERLIN (AUS CHAPLINS FILM »MODERNE ZEITEN«, USA 1936)



Die mechanisierte Zeitmessung ermöglichte die Vergleichbarkeit von Arbeit. Das erlaubte, Arbeitskräfte für Fabriken (wie hier in Chaplins Film »Moderne Zeiten«) einzustellen – und es entstand das Proletariat.



Der Historiker **Thomas Maissen** forscht zur Geschichte der Frühen Neuzeit an der Universität Heidelberg. Sein Artikel basiert auf einem Vortrag zur Tagung »Geschichtliche Zeiten – Zeiten der Geschichte«, die der Autor im November 2009 in der Heidelberger Akademie der Wissenschaften gehalten hat.

schuf damit auch Vergleichbarkeit von Leistungen, die in derselben Zeiteinheit erbracht wurden – die Voraussetzung für Lohnarbeit. In der spätmittelalterlichen italienischen Stadt entsprach das einem Denken, das der Zeit über das florierende Bankenwesen mit seinen verzinnten Darlehen eine wirtschaftliche Dimension zuwies.

Zeit wird Geld

Mit dieser Ökonomisierung der Zeit begann ein Prozess, der bis heute anhält, oft zu unserem Leidwesen. Die nach Stunden und nicht nach Produktqualität bemessene Arbeit macht jede Tätigkeit vergleichbar und verhandelbar, was Lohn und Arbeitszeiten betrifft. Der britische Historiker Edward Palmer Thompson wunderte sich 1967 in einem wegweisenden Aufsatz über den Wandel während der industriellen Revolution um 1800: Vormalige Landarbeiter, die bis dahin ihre unregelmäßig anfallende Arbeit frei organisiert hatten, unterwarfen sich der stetigen und gleichmäßig intensiven Zeitordnung, die ihnen die Unternehmer auferlegten. Arbeitszeit wurde so zum Werkzeug einer gewaltigen Disziplinierung, die mit Fabrikglocke und Stechuhr den Tag in Minuten taktete und bis heute taktet. Gleichzeitig brachte diese Entwicklung auch die Freizeit hervor, in der wir uns dem Diktat der Uhr entziehen – oder aus eigenem Antrieb in neue Zeitnot bringen.

Bis zu einer globalen Vereinheitlichung der Zeitvorstellungen war es aber noch ein weiter Weg. Selbst das westliche Christentum leistete sich im konfessionellen Streit von 1582 bis in die Jahre um 1700 zwei Kalender, den alten, julianischen bei den Protestanten und den

neuen, gregorianischen für die Katholiken. Es war nicht nur die wissenschaftliche Einsicht, welche die Protestanten schließlich zum Einlenken brachte; vielmehr waren die Differenzen der Kalendertage ein offensichtliches Hindernis, wenn der wirtschaftliche und politische Austausch sich zusehends verstärkte. Bis zur großräumigen Abgleichung der zahlreichen und immer genaueren lokalen Zeitrechnungen dauerte es auch dann noch eine Weile. Aber im 19. Jahrhundert erzwangen die Eisenbahn mit ihren Fahrplänen und in ähnlicher Weise der Telegraf eine Weltzeit, wie sie 1884 an der internationalen Meridiankonferenz in Washington festgelegt wurde: als mittlere Sonnenzeit am Nullmeridian. Erst dann erfolgte auch die weltweite Übernahme des gregorianischen Kalenders als Teil des westlichen Modernisierungspakets: in Japan (1873), China (1912) und der Türkei (1926), ebenso in Russland nach der Oktoberrevolution, die ja nach gregorianischem Kalender eine Novemberrevolution war.

Hinter solche Entwicklungen kann man kaum zurück. Das christliche, aber säkularisierbare und inzwischen auch säkularisierte Zeitverständnis des Westens erfüllt zwei wichtige Aufgaben in der modernen Welt sehr gut. Es schafft gerade durch die weit gehende Abstraktion von den ursprünglichen kulturellen und religiösen Implikationen die Voraussetzungen für eine Weltzeit, in der die heutigen, hoch differenzierten Gesellschaften kommunizieren; und es beschreibt das Entstehen dieser Moderne als linearen, entwicklungs-offenen, vom Menschen gestalteten Prozess und eröffnet damit eine ebenso verstandene Zukunft. ◀

Borst, A.: Computus. Zeit und Zahl in der Geschichte Europas. Wagenbach, Berlin 1990.

Dohrn-van Rossum, G.: Die Geschichte der Stunde. Uhren und moderne Zeitordnungen. Hanser, München/Wien 1992.

Dux, G.: Die Zeit in der Geschichte. Ihre Entwicklungslogik vom Mythos zur Weltzeit. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 1992.

Elias, N.: Über die Zeit. Arbeiten zur Wissenssoziologie II. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 1984.

Koselleck, R.: Vergangene Zukunft. Zur Semantik geschichtlicher Zeiten. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 1979.

Le Goff, J.: Zeit der Kirche und Zeit des Händlers. In: Claudia Honegger (Hg.): Schrift und Materie der Geschichte: Vorschläge zur systematischen Aneignung historischer Prozesse. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 1977, S. 393–414.

Thompson, E. P.: Zeit, Arbeitsdisziplin und Industriekapitalismus. In: Ders.: Plebejische Kultur und moralische Ökonomie. Aufsätze zur englischen Sozialgeschichte des 18. und 19. Jahrhunderts. Ullstein, Frankfurt a. M. 1980, S. 35–66, S. 319–331.

GEOMETRIE

Türme aus Bauklötzen

Kann man lauter gleiche quaderförmige Bauteile ohne weitere Hilfsmittel so zusammensetzen, dass sie beliebig weit über die Tischkante hinausragen? Es geht, und zwar mit weit weniger Aufwand, als man bislang für nötig hielt.

Von Christoph Pöppe

Die Folge der Zahlen $1, 1/2, 1/3, 1/4, \dots, 1/n, \dots$ genießt bei den Mathematiklehrern eine ganz spezielle Wertschätzung. Sie trägt den schönen Namen »harmonische Folge«, weil ihre Glieder den Längen proportional sind, die man auf einer gespannten Saite abgreifen muss, um eine Obertonreihe zu erzeugen. Aber die Lehrer schätzen sie nicht aus musikalischen Gründen, sondern als abschreckendes Beispiel. Mit ihrer Hilfe kann man nämlich überzeugend demonstrieren, dass die Dinge bei unendlichen Summen sich nicht so einfach verhalten, wie die Schüler es gerne hätten.

Die Glieder der Folge streben offensichtlich gegen null: $1/n$ wird kleiner als jede beliebig kleine positive Zahl ϵ . Aber die Summe der Glieder $1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots$ strebt nicht etwa gegen einen Grenzwert, wie man das von den schulüblichen Nullfolgen gewohnt ist, sondern gegen unendlich!

Das verblüfft nicht nur die Schüler, sondern führt auch zu den merkwürdigsten Ergebnissen, wenn man es auf die technische Realität anwendet. Bau-



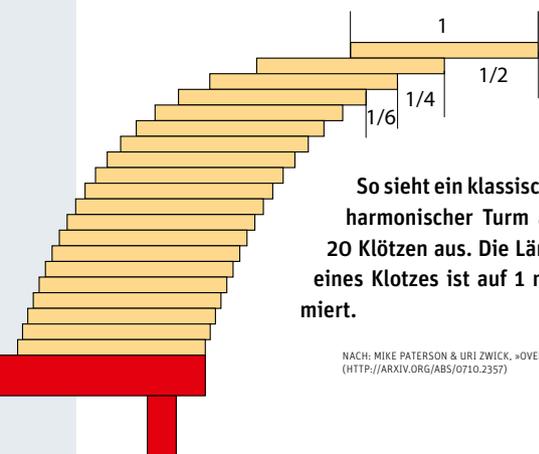
Um die Kluft zu überbrücken, schieben Max (links) und Moritz die Klötze nicht nur mit zunehmender Höhe immer weiter über die Tischkante hinaus; sie verschieben auch jeden Klotz gegenüber seinem unmittelbaren Vorgänger umso mehr, je höher er liegt (a). Selbst bei einem nicht optimal gebauten Stapel (b) kann der oberste Klotz völlig »in der Luft hängen«: Kein Teil von ihm liegt noch über der Tischplatte. Ein maximaler Überhang ist immer nur eine infinitesimale Störung von der Instabilität entfernt (c).

klötze zum Beispiel. Ohne irgendwelche Befestigungen, einfach durch Aufeinanderlegen, kann man aus lauter gleichen quaderförmigen Klötzen einen schiefen Turm bauen (schief und krumm, um genau zu sein), der beliebig weit über die Tischkante hinausragt. Wieso?

Gehen wir in Gedanken einen (nach rechts ausladenden) Turm von oben nach unten durch (Bild links). Damit der oberste Klotz nicht wegkippt, muss der zweitoberste ihn im Schwerpunkt unterstützen. Dazu muss dessen rechtes Ende bis mindestens zur Mitte des obersten Klotzes reichen. Das heißt: Der oberste Klotz darf nur mit der Hälfte seiner Länge über den zweitobersten hinausragen.

Nach demselben Argument muss der drittoberste Klotz mit (mindestens) seinem rechten Ende den Schwerpunkt des Ensembles aus erstem und zweitem Klotz stützen. Der findet sich $1/4$ der Klotzlänge vom rechten Rand des zweiten Klotzes entfernt. Die drei obersten Klötze zusammen dürfen nur noch $1/6$ Klotzlänge über den vierten hinausragen, und so weiter. Der n -te Klotz, von oben nach unten gezählt, trägt $1/(2n)$ Klotzlängen zur Überhangweite bei.

Also hängt der oberste Klotz um $1/2 + 1/4 + 1/6 + 1/8 + \dots = (1/2) (1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 \dots)$ Klotzlängen über die Tischkante hinaus, und diese Überhanglänge strebt mit zu-



So sieht ein klassischer harmonischer Turm aus 20 Klötzen aus. Die Länge eines Klotzes ist auf 1 normiert.

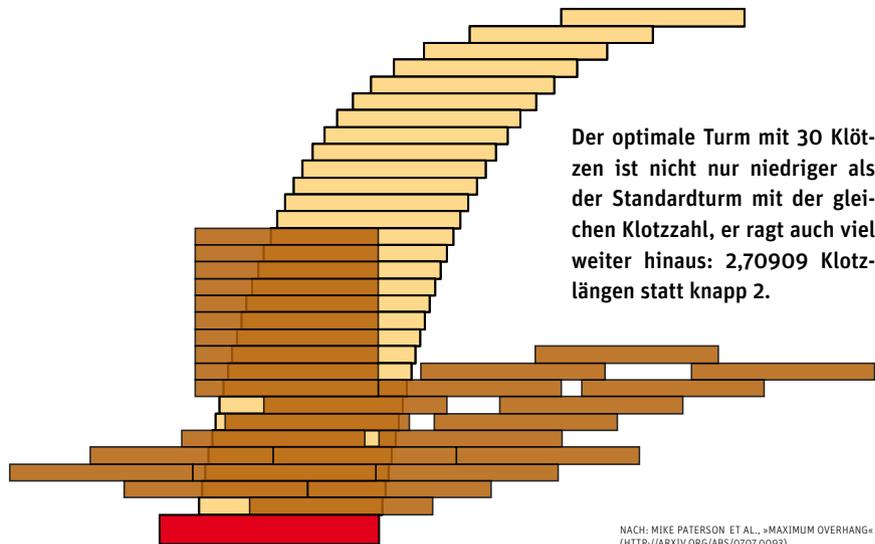
NACH: MIKE PATERSON & URI ZWICK, »OVERHANG« (HTTP://ARXIV.ORG/ABS/0710.2357)

nehmender Anzahl der Klötze gegen unendlich, wie das die harmonische Folge so an sich hat. Mit hinreichend vielen Klötzen lässt sich also jeder beliebig breite Abgrund überbrücken. Dabei hängen die meisten Klötze »in der Luft«, das heißt, ein Lot, das man von einem dieser Klötze fällt, geht am Tisch vorbei.

Warum ist diese Situation unserer alltäglichen Erfahrung so ungeläufig, dass wir zunächst dazu neigen, sie für unmöglich zu halten? Ich wage die Behauptung: Selbst wenn Ihnen damals, im Kindergartenalter, das Bauprinzip des Turms aus dem Bild links unten bekannt gewesen wäre, hätten Sie die größten Schwierigkeiten gehabt, es umzusetzen. Da man einen Turm von unten nach oben baut, sind es nicht die großen Verschiebungen $1/2$, $1/4$ und so weiter, die man als erste richtig machen muss, sondern die ganz kleinen.

Konstruktionen am Rand des Abgrunds

Zweitens sind diese Verschiebungen zwar einfach auszurechnen, aber sie entsprechen der höchst kippeligen Situation am Rand der Katastrophe: Schiebt man aus dieser Anordnung auch nur einen Klotz ein beliebig kleines Stück nach draußen, bricht der ganze Turm zusammen. Damit das nicht aus Versehen passiert, darf man nicht bis zum Äußersten gehen,



Der optimale Turm mit 30 Klötzen ist nicht nur niedriger als der Standardturm mit der gleichen Klotzzahl, er ragt auch viel weiter hinaus: 2,70909 Klotzlängen statt knapp 2.

NACH: MIKE PATERSON ET AL., »MAXIMUM OVERHANG« (HTTP://ARXIV.ORG/ABS/0707.0093)

sondern muss alle Verschiebungen ein bisschen kleiner als die theoretischen Werte wählen. Das ist mit Augenmaß nicht einfach zu bewerkstelligen. Aber: Dieses Bisschen darf seinerseits beliebig klein sein. Daher kann man auch mit einem stabilen Turm jeden beliebigen Überhang erreichen; man braucht nur ein paar mehr Klötze als im instabilen Grenzfall.

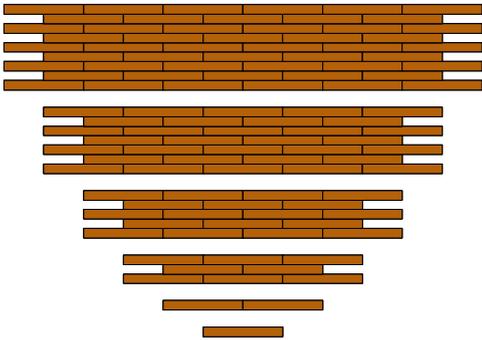
Drittens und vor allem aber ist ein Turm mit einem Überhang von deutlich mehr als zwei Klotzlängen praktisch nicht mehr zu realisieren: So viele Klötze gibt es im ganzen Kindergarten nicht, ganz abgesehen davon, dass der Turm die eigene Körperlänge (und die Deckenhöhe des Zimmers) um ein Vielfaches übersteigen würde. Während für einen Überhang von zwei Klotzlängen noch bescheidene 31 Klötze ausreichen, sind es für drei Längen schon 227 Stück. Wer noch eine

Klotzlänge weiter hinaus will, muss 1674 Klötze stapeln, womit der Turm schon höher wird als der Strebebogen einer mittelgroßen gotischen Kathedrale. Für jede weitere Verlängerung um eine Einheit muss man die 7,38-fache Anzahl an Klötzen hinlegen.

Das ist das Ärgerliche an der harmonischen Reihe. Sie strebt zwar gegen unendlich, aber quälend langsam, ungefähr so wie der natürliche Logarithmus. Auch für die Funktion $f(x) = \ln x$ muss man das x ver- e -fachen, damit $f(x)$ eins mehr wird ($e = 2,71828\dots$ ist die Basis der natürlichen Logarithmen). Deswe-

Die Fünfferraute ist nur stabil, solange man den Daumen draufhält, das heißt (zum Beispiel) eine hinreichend große punktförmige Last in der Mitte des obersten Klotzes anbringt.





NACH: PATERSON & ZWICK, »OVERHANG«
([HTTP://ARXIV.ORG/ABS/0710.2357](http://arxiv.org/abs/0710.2357))

Scheiben der Größe 1 bis 6 kann man – die kleinste zuunterst – katastrophenfrei auf dem Tisch stapeln.

gen wächst die Anzahl der Klötze als Funktion des geforderten Überhangs exponentiell an, was das theoretisch interessante Bauprinzip praktisch unbrauchbar macht.

Merkwürdigerweise stellen verschiedene Autoren in Werken der Unterhaltungsmathematik zwar die Aufgabe, einen möglichst weit überhängenden Bauklötzestapel zu konstruieren, bieten als Lösung aber nur den oben beschriebenen schiefen Turm an. Das funktioniert zwar, ist aber alles andere als optimal, vor allem wenn es darum geht, einen geforderten Überhang mit möglichst wenig Klötzen zu erreichen. Gibt es nicht geschicktere Konstruktionen als die, bei der auf jedem Klotz nur ein weiterer unmittelbar aufliegt? Könnte eine solche Konstruktion vielleicht Zahlenfolgen produzieren, deren Motivation, gegen unendlich zu streben, nicht ganz so schwach ausgeprägt ist wie bei der Logarithmusfunktion?

Diese Fragen ließen Mike Paterson und Uri Zwick keine Ruhe. Paterson, Jahrgang 1942 und einer der alten Meister der Informatik, ist berühmt für seine Arbeiten zum Algorithmen-Design und zur rechnerischen Komplexität. Er forscht und lehrt seit 38 Jahren an der University of Warwick in Coventry; offensichtlich hat seine wissenschaftlichen Tätigkeit keinen Abbruch getan. Noch in seiner Studienzeit in Cambridge erfand er gemeinsam mit John Horton Conway das Spiel »Sprouts«, was ihn in der Szene bekannt machte. Uri Zwick, Informatiker an der Universität Tel Aviv (Israel), hat gemeinsam mit Paterson schon vor 20

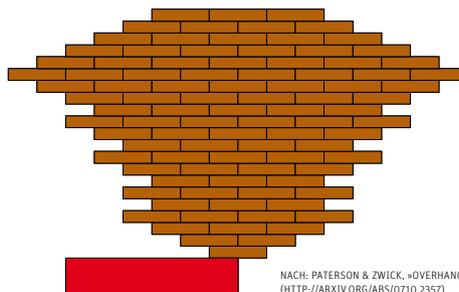
Jahren eine Gewinnstrategie für das Memoryspiel entwickelt (Spektrum der Wissenschaft 6/1992, S. 12).

Das beste Mittel, neue Überhangkonstruktionen zu finden, ist – der Baukasten. Es ist kaum vorstellbar, dass Paterson und Zwick ihre zahlreichen Konstruktionen gefunden haben, ohne mit echten Klötzen zu spielen.

Wie hindert man die Klötze eines nach rechts ausladenden Turms daran, nach rechts abzukippen? Man beschwert sie auf der linken Seite. Diese Idee haben schon die Erbauer der gotischen Strebewerke realisiert, indem sie zur Stabilisierung Fialen, reich verzierte Türmchen, auf die Stelle aufsetzten, an welcher der Strebebogen abzweigte. Der optimale Turm mit 30 Klötzen erreicht seine große Ausladung mit einem recht imposanten Gegengewicht (Bild S. 65 oben). Allgemein ist – zumindest für kleine Klotzzahlen – beim jeweils optimalen Turm der am weitesten hinausragende Klotz nicht der höchste. Ein anderer Klotz bedeckt ihn und gibt ihm so Gelegenheit, sich weit hervorzuwagen.

Optimiertes Klötzchenlegen

Nach der Probiertphase mit den echten Bauklötzen kommt natürlich das Rechnen am Computer. Wie bei den kleinen Achtecken (Spektrum der Wissenschaft 8/2010, S. 60) muss man sich zunächst auf eine allgemeine Gestalt festlegen (»welcher Klotz bedeckt welche anderen Klötze?«) und findet dann mit einem Optimierungsverfahren die genauen Positionen. Dazu stellt man zunächst die Gleichungen und Ungleichungen auf, die eine zulässige Lösung erfüllen muss. Das ist etwas komplizierter als bei dem Standardturm, bei dem auf jedem Klotz nur ein weiterer liegt. Diesmal gibt es nicht nur vertikal wirkende Kräfte, die einen Klotz in den Abgrund stürzen können, sondern auch Drehmomente.



NACH: PATERSON & ZWICK, »OVERHANG«
([HTTP://ARXIV.ORG/ABS/0710.2357](http://arxiv.org/abs/0710.2357))

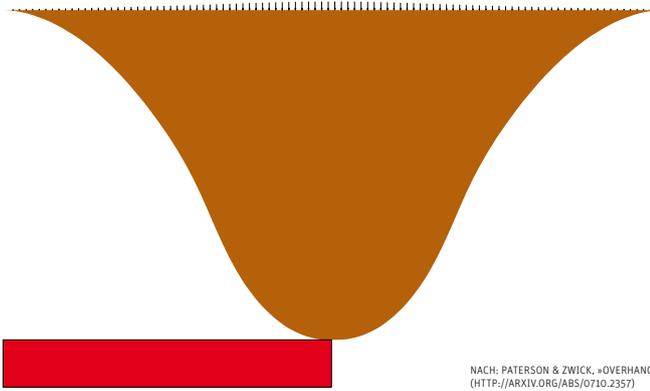
Diese Ziegelmauerwerk aus 95 Klötzen erreicht einen Überhang von 4.

Bemerkenswerterweise geht an keiner Stelle des Verfahrens die Dicke der Klötze in die Rechnung ein (ebenso wenig wie die Breite, weswegen man das ganze Problem so bequem in einer Ebene abhandeln kann). Ein und derselbe mathematische Formalismus funktioniert für Spielkarten ebenso wie für Ziegelsteine.

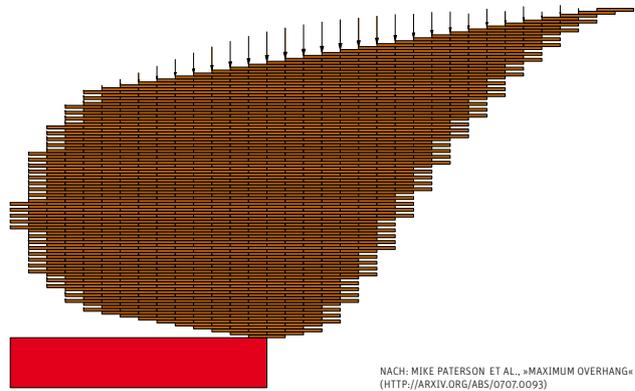
Es stellt sich heraus, dass in den Lösungen des Optimierungsproblems noch eine erhebliche Beliebigkeit steckt. Während das »Rückgrat« des Turms, bestehend aus dem äußersten Klotz, dem einzigen Klotz, auf dem dieser aufliegt, dem einzigen Klotz, auf dem der zweite aufliegt, und so weiter, durch die Forderung nach maximalem Überhang ziemlich eindeutig festgelegt wird, darf man die »Gewichtsausgleichskonstruktion«, bestehend aus allen anderen Klötzen, noch erheblich variieren, ohne dass sich an der Optimalität des Turms etwas verändert.

Paterson und Zwick befreien sich von dieser lästigen Uneindeutigkeit, indem sie das Problem verallgemeinern. Sie erlauben, dass man, statt den Turm durch aufgelegte Klötze zur Linken zu stabilisieren, auch einen oder mehrere »Daumen draufhalten« darf, das heißt, auf die linken Enden verschiedener Klötze nach unten gerichtete Kräfte wirken lassen darf, die nicht unbedingt gleich einem Klotzgewicht sein müssen. Unter diesen »belasteten Türmen« ist der optimale einfacher zu bestimmen. Mit einigen Hilfskonstruktionen findet man dann einen Turm aus echten Klötzen, der dem optimalen belasteten Turm sehr nahekommt, sowohl in Bezug auf den erreichten Überhang als auch auf das Gesamtgewicht (Klötze plus Belastungen).

Man könnte auf die Idee kommen, einen allein auf dem Tisch liegenden Klotz schön symmetrisch mit zwei Klötzen zu bedecken, diesen ebenso symmetrisch mit drei Klötzen und so weiter, so dass sich annähernd ein gleichschenkliges Dreieck mit der Spitze nach unten ergibt, das wie ein klassisches Ziegelmauerwerk angeordnet ist: Fuge genau auf Mitte des darunter- oder darüberliegenden Klötzes. Die Anordnung ist schon aus Symmetriegründen im Gleichgewicht: Gäbe es einen Grund, warum das ganze Ensemble nach rechts abkippen sollte, dann gäbe es denselben Grund für das Abkippen nach links, also gibt es einen derartigen Grund gar nicht. Aber die Drehmomente heben den zentralen Klotz in der obersten Reihe, worauf der ganze Turm zusammen-



NACH: PATERSON & ZWICK, »OVERHANG«
([HTTP://ARXIV.ORG/ABS/0710.2357](http://arxiv.org/abs/0710.2357))



NACH: MIKE PATERSON ET AL., »MAXIMUM OVERHANG«
([HTTP://ARXIV.ORG/ABS/0707.0093](http://arxiv.org/abs/0707.0093))

bricht – symmetrisch. Dagegen hilft es auch nicht, wenn man zur Stabilisierung das Dreieck nach oben zur Raute ergänzt (siehe Bild S. 65 unten).

Dabei ist die Idee mit dem Ziegelmauerwerk durchaus zielführend. Nur darf das Bauwerk nicht ganz so kühn ausladend sein wie ein Dreieck, das auf der Spitze steht. Etwas mehr Unterbau in den niedrigen Lagen über dem Tisch muss schon sein. Es stellt sich heraus: Die Unterkante des Bauwerks darf nicht so aussehen wie zwei Geraden, die sich im Nullpunkt treffen, sondern muss etwas runderlicher sein, wie eine Parabel.

Paterson und Zwick fanden ein Halbfabrikat, das sich für die Konstruktion als äußerst nützlich erweist: die Scheibe (*slab*). Eine Scheibe der Größe n besteht aus einer Reihe von n Klötzen, darauf – wieder Fuge auf Klotzmitte, wie beim Ziegelmauerwerk – $n-1$ Klötze, darauf wieder n Klötze und so weiter immer abwechselnd, bis $n-1$ lange Reihen (aus n Klötzen) beisammen sind (Bild links oben). Man stapelt auf den Tisch der Reihe nach Scheiben der Größen 1, 2, 3, ..., n , und siehe da: Der so entstehende Turm ist im Gleichgewicht, erreicht einen Überhang von $n/2$ Klotzlängen und verbraucht dafür etwas weniger als $(2/3)n^3$ Klötze – wenn er erst einmal fertiggestellt ist.

Zwischenstadien sind instabil. Wer einen solchen Turm bauen will, indem er ohne weitere Hilfsmittel einen Klotz nach dem anderen legt, muss den untersten Klotz weglassen, den ganzen Turm – unter entsprechendem Verzicht auf Reichweite – eine halbe Einheit weiter einwärts setzen und beim Legen eine bestimmte Reihenfolge einhalten.

Die so konstruierten »parabolischen Türme« sind weder besonders schön noch optimal. Einen Überhang von 4 erreicht man schon mit einem Ziegelmau-

Ein Turm, der 50 Klotzlängen über die Tischkante hinausragt (links), besteht aus 112421 Klötzen (nicht einzeln sichtbar) plus Belastungen im Gewicht von weiteren 3046 Klötzen (durch Pfeile angedeutet). Rechts ein asymmetrischer optimierter Turm mit Überhang 10 aus 921 Klötzen plus 191,88 Klotzäquivalenten Belastung.

erwerk aus 95 statt ungefähr 330 Klötzen (Bild links unten). Aber sie haben einen unschätzbaren Vorteil: Man kann mit ihnen beweisen, dass die benötigte Klotzzahl nicht stärker ansteigt als ein konstanter Faktor mal der dritten Potenz des geforderten Überhangs.

Komplexitätstheorie für Bauklötze

Andersherum ausgedrückt: Der erreichbare Überhang steigt nicht quälend langsam mit dem Logarithmus der Klotzzahl, sondern erheblich weniger quälend mit der dritten Wurzel. Für den Informatiker ist das der entscheidende Unterschied zwischen einem »schweren« Problem (Arbeitsaufwand wächst exponentiell in der Problemgröße) und einem »leichten« (Aufwand wächst polynomial, siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2010, S. 82). Auf den konstanten Faktor kommt es dabei nicht besonders an.

Nichts hindert Paterson und Zwick, an den parabolischen Türmen noch weiter heranzuoptimieren, auch in Größenordnungen, bei denen an echtes Klötzelegen nicht zu denken ist. Wer wäre bereit, für einen Überhang von 50 reichlich 100 000 Klötze zu legen (Bild oben, links)? Die Kontur des Turms ist unten, in Tischnähe, zwar parabelförmig, weitet sich jedoch oben zu einer eleganten Vasenform. Da denkt der Mathematiker unweigerlich an eine kopfstehende gaußsche Glockenkurve; aber derartige Vermutungen lassen sich bislang weder beweisen noch widerlegen.

Noch ein paar Klötze kann man einsparen, indem man die Forderung nach Symmetrie aufgibt. Dann ergeben sich

Formen, die an eine Öllampe erinnern (Bild oben, rechts).

Was aber ein echter Theoretiker ist, der gibt sich nicht mit dem – konstruktiven – Beweis zufrieden, dass die Drei im Exponenten erreichbar ist, sondern ruht nicht eher, als bis er bewiesen hat, dass es nicht besser geht. Mit drei Koautoren und erheblichem Aufwand haben Paterson und Zwick auch diesen Beweis erbracht.

Wohlgermerkt: Das war nur die Lösung eines zweidimensionalen Problems. Wenn man die Klötze nicht nur in einer vertikalen Ebene anordnet, sondern auch so legen darf, dass sie sich gegenseitig beklemmen, sind noch ganz andere Konstruktionen möglich, wie die populäre Leonardo-Brücke. Hier finden wissenschaftliche Spielkinder noch ein reiches Betätigungsfeld. <



Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Gardner, M.: Mathematical Games: Some Paradoxes and Puzzles Involving Infinite Series and the Concept of Limit. In: Scientific American 11/1964, S. 126–133.

Paterson, M., Zwick, U.: Overhang. In: The American Mathematical Monthly 116(1), S. 19–44, 2009.

Paterson, M. et al.: Maximum Overhang. In: The American Mathematical Monthly 116(9), S. 763–787, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040566.

EVOLUTION DES MENSCHEN

»Alle Stammbäume sind Schall und Rauch«

Friedemann Schrenk, einer der bekanntesten deutschen Paläoanthropologen, schildert, wie er zu seinen wichtigsten Funden kam und warum der Frühmensch schon viel früher aus Afrika ausgewandert sein dürfte als bislang angenommen.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SVEN TRÄNNER, SENCKENBERG GESELLSCHAFT FÜR NATURFORSCHUNG

Von Bernhard Epping

Der Weg zum Zimmer des Forschers im Frankfurter Naturmuseum Senckenberg führt vorbei an Panzerschränken voller Fossilien und Regalen, gespickt mit Kartons und Büchern – davon manches Stück schon angegilbt. Schrenk, in Sandalen und locker sitzendem Hemd, kennt seine Schätze. Immer wieder wird er während des Interviews Bücher oder Fossilien herbeiholen, um den Fragestellern möglichst anschaulich die Evolution des Menschen zu vermitteln. Oder besser gesagt: jene Spekulationen voller Unwägbarkeiten, die die Forschung heute dazu bestenfalls bieten kann. »Unsere Rekonstruktionen sind gelenkte Fantasie«, sagt Schrenk. Fortschritte gebe es dabei am ehesten, wenn die klassische Trennung des Fachs Paläoanthropologie in Teildisziplinen à la Anatomie, Archäologie, Biologie, Paläobiologie überwunden werde.

Ein Besuch bei einem »Dickschädel« (Selbstaussage), der den Spaß an der Arbeit zu einer seiner Maximen erklärt hat: Das größte Vergnügen hat Schrenk (Mitte, mit Reinhard Breuer, links, und Bernhard Epping) offenkundig daran, alle Hypothesen zum Verlauf der Evolution des Menschen permanent zu hinterfragen. Gerade dadurch aber bringt er diese weiter – zumindest ein kleines Stück.



ZUR PERSON

Friedemann Schrenk, 1956 in Stuttgart geboren, studierte zunächst Geologie in Darmstadt und ging nach dem Vordiplom 1981 erstmals nach Südafrika an das Paläontologische Institut der University of Johannesburg.

1983 konnten er und der US-Forscher Timothy Bromage ein eigenes Grabungsprojekt in Malawi begründen, das Hominid Corridor Research Project. 1991 fand das Team dort einen 2,5 Millionen Jahre alten Unterkiefer, der von vielen Forschern der Art *Homo rudolfensis* zugeordnet wird – und damit dem derzeit ältesten Mitglied der Gattung *Homo*.

Ein 1996 bei Malema in Malawi gefundenes fossiles Oberkieferfragment vergleichbaren Alters lässt sich hingegen dem im gleichen Zeitraum lebenden archaischeren Nussknackermenschen, *Paranthropus boisei*, zuordnen. Eine Entwicklungslinie, die nach einer weiteren Million Jahre erlosch.

1989 ging Schrenk als Kustos ans Landesmuseum Darmstadt, 1994 habilitierte er an der Universität Darmstadt. Seit dem Jahr 2000 leitet er die Sektion Paläoanthropologie am Forschungsinstitut Senckenberg in Frankfurt am Main und hält eine Professur für Paläobiologie der Wirbeltiere an der Johann Wolfgang Goethe-Universität.

Sein besonderes Anliegen ist es, die Geschichte der menschlichen Evolution auch in Afrika bekannter zu machen. So erwerben beim Projekt Hominids for Schools (www.hominidsforschools.de) hiesige Schulen einen Koffer mit Unterrichtsmaterialien, eine Schule in Afrika erhält dann einen weiteren geschenkt.

Friedemann Schrenk wuchtet einen Koffer mit den »höchstversicherten« Stücken des Instituts auf den Tisch, öffnet ihn und hebt einen Knochen heraus.

Prof. Friedemann Schrenk: Hier, das ist er.

Spektrum: Ein fossiler Unterkiefer, vorne fehlen die Schneidezähne.

Schrenk: Ja, und noch was fehlte zunächst (hebt am hintersten Backenzahn auf einer Seite ein Stück der offenkundig losen Krone heraus, siehe Fotos S. 71). Das hier haben wir erst ein Jahr später entdeckt.

Spektrum: Ah, dann ist das also der berühmte Unterkiefer UR 501. Ihre Truppe hat das Fossil 1991 in Malawi gehoben und erst ein Jahr später bei Nachgrabungen auch noch das Eckstück des Zahns gefunden. Es war offenbar wichtig bei der Artbestimmung des Fundes.

Schrenk: (*lacht*) Sehr gut, ja, Prüfung bestanden! Dann wissen Sie auch, dass wir den Unterkiefer dem Frühmenschen *Homo rudolfensis* (siehe Info III, S. 73) zuordnen konnten.

Spektrum: Mit 2,5 Millionen Jahren wohl der älteste Fund eines Menschen, eines Vertreters der Gattung *Homo*. Und wieso war dabei dieser Zahn so bedeutsam?

Schrenk: Der lieferte einen wichtigen Hinweis darauf, dass wir hier tatsächlich ein Fossil aus der Gattung *Homo* haben. Genau das belegt die Zahl der Höcker auf diesem Backenzahn, wenn es nämlich sechs oder sieben sind. Die älteren Australopithecinen haben weniger. Und ohne komplette Zahnkrone eben keine vollständige Höckerzahl. Aber, ganz ehrlich, seit Kurzem bin ich schon wieder irritiert.

Spektrum: Was gibt es?

Schrenk: Sehen Sie zum Beispiel diesen anderen Schädel hier (zeigt auf ein weiteres Schädelossil). Das ist ein *Homo erectus* aus Indonesien. Neue Messungen meiner Kollegen zeigen jetzt, dass beide Fossilien in den Vormahlzähnen, den Prämolaren, zwei Wurzeln haben.

Spektrum: Wir sind keine Zahnärzte – was bedeutet das?

Schrenk: Das hat bei der Gattung *Homo* niemand, die haben im Vormahlzahn nur eine Wurzel. Die älteren Australopithecinen haben hingegen zwei.

Spektrum: Also müssen Sie den Fossilien jetzt ganz andere Namen geben?

Schrenk: Gemach, zumindest aber stellt sich die Frage, was da los ist. Was mich daran besonders interessiert: Sollten die beiden hier am

INFO I

- **Ardipithecus ramidus**, »Bodenaffe an der Wurzel des Menschen«, erste Funde 1994 in Äthiopien. Prominenter Vertreter ist Ardi – etwa 51 Kilo schwer, 1,20 Meter groß, mit einem Gehirnvolumen von knapp 350 Kubikzentimetern. Er ging bereits aufrecht und zeigte vermutlich auch ein Sozialverhalten. Als noch ältere Protagonisten für den aufrechten Gang gelten:
- **Orrorin tugenensis**, der vor 6,2 bis 5,65 Millionen Jahren gelebt haben könnte, sowie:
- **Sahelanthropus tchadensis**, der vor 6 bis 7 Millionen Jahren lebte. Die Interpretation und Einordnung dieser Funde bleibt aber besonders umstritten.

»Ich bin höchstens als schlechter Schüler aufgefallen«



Ende sogar irgendwie zusammenhängen, hätte es Auswanderungen aus Afrika nach Asien schon viel früher gegeben. Also nicht erst mit *Homo erectus* ...

Spektrum: ... der vor 1,9 Millionen Jahren als erster Frühmensch aus Afrika ausgewandert sein soll ...

Schrenk: ... sondern schon mit *Homo rudolfensis* oder noch früher. Sie sehen hier auch, wie vorläufig unsere Theorien noch sind.

Spektrum: Dann halten wir uns erst mal an Gesichertes. Sie sind 1956 in Stuttgart geboren. Wie haben Sie überhaupt zu Ihrem Fach gefunden?

Schrenk: Ich habe schon als Vierjähriger Fossilien auf der Schwäbischen Alb gesammelt – Ammoniten. Wir haben in Oberkochen gewohnt. Was sollte ich da auch sonst tun?

Spektrum: Der Fernseher kam gerade auf.

Schrenk: Meine Eltern hatten keinen. Ich übrigens bis heute auch nicht. Mich hat schon damals beim Sammeln dieses Gefühl gefesselt, der Erste zu sein. Man schlägt mit dem Hammer etwas auf – und das hat noch keiner vor dir gesehen. Never ever, das ist einfach klasse! Dafür wiederum war die Ostalb super.

Spektrum: Waren Sie gut in der Schule?

Schrenk: Nein, ich bin höchstens als schlechter Schüler aufgefallen. Fossilien und Zeichnungen waren meine beiden Interessen. Ich habe zunächst ein halbes Jahr lang in Darmstadt Grafikdesign studiert, dann aber bald Geologie und Paläontologie.

Spektrum: Schon nach dem Vordiplom, 1981, tauchten Sie plötzlich in Südafrika auf.

Schrenk: Der Auslöser war ein einziges Buch ... Moment ... hier ist es, von Robert Ardrey (Wissenschaftsautor, 1908–1980, *die Red.*): »African Genesis«, auf Deutsch als »Adam kam aus Afrika« erschienen. Ein fantastisches Werk, da steht drin, dass der entscheidende Faktor für die Menschwerdung die Aggression war. Das sei durch Fossilien aus Makapansgat belegt.

Spektrum: Ein wichtiger Fundort in Südafrika.

Schrenk: Ja, wo man schon in den 1940er Jahren in Höhlen viele tausend fossile Knochen von Tieren gefunden hatte. Raymond Dart (südafrikanischer Anatom, 1893–1988, er beschrieb 1925 als Erster die Vormenschenart *Australopithecus africanus*, *die Red.*) sah darin Werkzeuge des *Australopithecus africanus* (siehe Info II, S. 72), der noch keine Steine, aber eben Knochen als Werkzeuge nutzte. Dart gelangte zu der Überzeugung, dass die damit nicht nur Tiere, sondern auch ihresgleichen reihenweise getötet hätten: Das ist die Theorie der Killeraffenmenschen, Audrey beschreibt das klasse. Und doch habe ich es nicht geglaubt, es passte nicht in mein eher

friedliebendes Weltbild. Ich habe mir gesagt, diese Knochen schaust du dir an. Irgendwie besorgte ich mir dann beim Deutschen Akademischen Austauschdienst ein Stipendium für das Studium der Economic Geology für Johannesburg.

Spektrum: Eher etwas für Gold- und Diamantensucher.

Schrenk: Ja. Ich bin aber vom Flughafen in Johannesburg sofort in das Paläontologische Institut der Universität gefahren. Schau mich da so um, und es kommt eine Lady auf mich zu. Das war Judy Maguire, meine spätere Diplomutter. Verblüfft fragt sie mich: »What are you doing here?« Ich sage: »I just want to see the bones.«

Frau Maguire war fast schockiert, dass da einfach so einer aus Europa ankam. Denn es war damals absolut unüblich, dass Leute in das Land der Apartheid gingen. Ich habe aber praktisch noch am selben Nachmittag einen Hinweis bekommen, dass tatsächlich etwas mit der Killertheorie nicht stimmen konnte.

Spektrum: Wie das?

Schrenk: James Kitching (südafrikanischer Paläoanthropologe, 1922–2003, *die Red.*) zeigte mir noch am gleichen Tag so ein vermeintliches Knochenwerkzeug. An einem Ende war das poliert: Das sollte der Handgriff für die Australopithecine gewesen sein. In der Sekunde schoss mir durch den Kopf – vielleicht ist das nur so glatt wegen der vielen Forscher, die das Stück alle schon in der Hand hatten? So war es auch. Phillip Tobias (südafrikanischer Paläoanthropologe, geboren 1925, *die Red.*) besorgte mir dann ein Stipendium in Südafrika, das in Deutschland brauchte ich nicht mehr.

Spektrum: Sie konnten dann die Theorie des Killeraffen systematisch widerlegen?

Schrenk: Nein, aber ich habe mitgeholfen. Mit dem Rasterelektronenmikroskop konnte ich auf den Fossilien Bissspuren von Tieren nachweisen. Diese hatten die Knochen vor Jahrmillionen in die Höhle geschleppt.

Spektrum: Also nichts vom *Australopithecus*?

Schrenk: Nein, die haben nie in den Höhlen gelebt. Ich war dann etwa eineinhalb Jahre in Südafrika, wäre auch gerne länger geblieben. Und bin dennoch zurück, habe 1985 in Darmstadt in Geologie mein Diplom gemacht.

Spektrum: Warum sind Sie zurück?

Schrenk: Ich geriet in einen Gewissenskonflikt: Südafrika war damals ein Polizeistaat. Auch ich wurde einmal verhaftet.

Spektrum: Was geschah nach dem Diplom?

Schrenk: Der Zoologe Wolfgang Maier hatte für mich eine Doktorandenstelle in der Anatomie in der Uniklinik Frankfurt. Der Klinikchef war nicht begeistert, zitierte mich in sein Büro und fragte: Was wollen Sie denn hier?

Spektrum: Kein Wunder, ein Geologe in der Medizin.

Schrenk: Jaja, aber ich wollte eben anatomische Kenntnisse erwerben. Maier zählte zu den eher raren Leuten, die in Zusammenhängen denken können. Auch Raymond Dart wurde eines meiner großen Vorbilder, vor allem wegen seiner unkonventionellen Art. Dem ging es nicht um Macht oder Allüren, sondern um Wissenschaft und Spaß.

Spektrum: Sie sind dann 1987 als Assistent mit Maier nach Tübingen ...

Schrenk: ... und nach einem Jahr schon wieder nach Darmstadt, wo ich am Landesmuseum erstmals eine Planstelle als Kustos erhielt. Ich musste jede Chance auf wirtschaftliche Sicherheit nutzen. Mancher meinte schon: Mit dem Exotenfach endest du als Taxifahrer.

Spektrum: Aber 1983 waren Sie wieder in Afrika unterwegs, in Malawi. Warum?

Schrenk: Es gab Ende der 1970er Jahre in Süd- und in Ostafrika zahlreiche Funde zu den Vor- und Frühmenschen, in der Region dazwischen nichts. Tim Bromage (US-amerikanischer Paläoanthropologe, geboren 1954, *die Red.*) und ich wollten diese Lücke schließen. Wir waren sicher, dass man dort nur suchen musste, was aber noch keiner gemacht hatte.

Spektrum: Wie haben Sie Ihre Idee realisiert?

Schrenk: Zunächst gar nicht. Tim war nicht promoviert, ich war nicht promoviert, und wo kriege ich in Deutschland dann für Forschung Geld her? Nirgends! Tim besorgte am Ende von der National Geographic Society 9000 US-Dollar Anschubfinanzierung.

Spektrum: Der Start des Hominid Corridor Research Project, das tatsächlich belegte, dass der ganze ostafrikanische Graben ein Tummelplatz für Vor- und Frühmenschen war. Und 1991 finden Sie in Malawi jenen Unterkiefer UR 501. Wie kamen Sie denn damals überhaupt dazu, ihn *Homo rudolfensis* zu nennen?

Schrenk: Moment, da muss ich Ihnen zwei Schädel holen. So, hier – das ist der KNM-ER 1470. Der wurde von der Gruppe um Richard Leakey (Jahrgang 1944, Mitglied des Leakey-Klans, hat durch Funde in Kenia das heutige Bild der Entstehung des Menschen beeinflusst, *die Red.*) 1972 in Kenia gefunden. Er ist etwa 1,8 Millionen Jahre alt. Leakey hielt das zunächst für *Homo habilis* (siehe Info III, S. 73). 1973 entdeckte seine Gruppe noch den anderen Schädel hier, genannt KNM-ER 1813.

Spektrum: Der ist kleiner.

Schrenk: Exakt. Trotzdem wurde zunächst mal alles als *Homo habilis* beschrieben, der als erster Mensch nach damaliger Auffassung Steinwerkzeuge hatte. Manche meinten, das könnte vielleicht ein Geschlechtsunterschied sein, der größere der beiden hier als Schädel



eines männlichen, der kleinere, 1813, der eines weiblichen Lebewesens. Der russische Paläontologe Valerii Alexeev gab dem KNM-ER 1470 dann erstmals den Rang einer eigenen Art, nämlich *Homo rudolfensis*.

Spektrum: Und Ihr Fund?

Schrenk: Als wir 1993 unseren Kiefer UR 501 publizierten, passte der morphologisch zu KNM-ER 1470, ist aber mit etwa 2,5 Millionen Jahren gut eine halbe Million Jahre älter. Das hat die Idee unterstützt, dass *Homo rudolfensis* wirklich etwas Eigenständiges ist. Der steht an der Basis der Gattung *Homo*.

Spektrum: Ist das die Schule Schrenk oder gängige Auffassung?

Schrenk: Vielleicht 60 Prozent meiner Kollegen teilen diese Auffassung. Das ist in unserer Branche schon viel.

Spektrum: Sie haben eingangs aber erklärt, dass neue Zahnfunde Sie bei Ihrem Unterkiefer schon wieder an der Zuordnung zur Gattung *Homo* zweifeln lassen?

Schrenk: Nach meinem Verständnis zählt der Beginn der Kultur, der Beginn von Steinwerkzeugen zu den entscheidenden Kriterien da-

Der Unterkiefer, der 1991 Friedemann Schrenks Leben veränderte: In Malawi gefunden, bekam das 2,5 Millionen Jahre alte Relikt die Bezeichnung UR 501. Ein Jahr später entdeckten der Forscher unweit der Fundstelle das entscheidende dazugehörige Teil: die ursprünglich fehlende Ecke eines Backenzahns (unteres Bild). Damit ließ sich der Fund *Homo rudolfensis* zuordnen, dem ältesten Vertreter der Gattung *Homo*.

INFO II

► **Australopithecus**, »Südafaffe«, ist eine Gattung von Hominiden, die 1925 erstmals von Raymond Dart beschrieben wurde. Ihre Vertreter lebten vor 4,2 bis vor etwa 2,0 Millionen Jahren, erreichten Körpergrößen zwischen 1,0 und 1,60 Meter und Gehirngrößen von 400 bis 550 Kubikzentimeter.

► **Paranthropus boisei**, »Nussknackermensch«, lebte vor etwa 2,3 bis 1,4 Millionen Jahren, hatte eine Körpergröße von bis zu 1,40 Meter und ein Gehirnvolumen von 475 bis 545 Kubikzentimeter. Gilt als der Hominide mit der höchsten Beißkraft und als Vertreter einer ganzen Gruppe so genannter robuster Australopithecinen mit kräftigen Gebissen als Anpassung an harte Pflanzennahrung.

für, dass ein Fund zur Gattung Mensch gehört. Und wir haben Funde von Steinwerkzeugen, die wir sowohl *Homo habilis* als auch *Homo rudolfensis* zuordnen könnten. Vielleicht haben beide den Schritt zur Werkzeugkultur gemacht. Ich bin sicher, dass diese Entwicklung mehrfach stattgefunden hat.

Und, ehrlich gesagt, in welche Schublade man das taxonomisch steckt, ist für mich zweitrangig. Es gibt Hinweise, dass auch ein *Australopithecus garhi* im heutigen Äthiopien vor 2,5 Millionen Jahren bereits Steinwerkzeug gehabt haben könnte.

Spektrum: Dann fällt aber das Kriterium Steinwerkzeuggebrauch als Merkmal für *Homo*?

Schrenk: Jetzt kommen die Taxonomen. Ich sage Ihnen was: Artnamen und Stammbäume – alles Schall und Rauch. Es gibt schon so viele Weltbilder in der Paläoanthropologie, wie es Paläoanthropologen gibt. Der eine legt Fund eins und Fund zwei in zwei Schubladen, jede mit eigenem Artnamen. Der nächste packt beide in einer Schublade, also als eine Art zusammen. Sie dürfen einfach nicht glauben, dass die verschiedenen Schubladensysteme die Wahrheit sind. Ich hab einmal die zeitliche Abfolge einiger wichtiger Fossilien auf ein Blatt gemalt und Kollegen gebeten, dazu einen Stammbaum zu zeichnen. Jeder hat einen anderen gemalt, eben den seinen.

Spektrum: Und keiner ist richtig?

Schrenk: Nein, wir Paläontologen haben kein Richtig und Falsch. Dafür ist unser Wissen viel zu lückenhaft. Wir verfügen ja nur über Knochen und Zähne. Die meiste Information für eine biologische Artbeschreibung haben wir nicht. Nichts über das Aussehen, nur ganz indirekt etwas über Lebensweise, Sozialverhalten, nichts zur Kommunikation. Und ein Fossil kommt vielleicht auf 100, auf 1000 Gene-

rationen. Im besten Fall gibt es mit jedem neuen Fund eine neue Hypothese, eine neue Rekonstruktion, die etwas wahrscheinlicher ist als die alte. Das ist, als wollten Sie mit zwei Knochen die Geschichte des Römischen Reichs rekonstruieren.

Spektrum: Wie lebte der *Homo rudolfensis* vor 2,5 Millionen Jahren?

Schrenk: Er bewegte sich durchgehend auf zwei Beinen und lebte in Gruppen in der Nähe von Gewässern in der Savanne, immer mit Zugang zu Bäumen, auf die er sich zurückziehen konnte.

Spektrum: Und die Nahrung?

Schrenk: Was zu kriegen war – Knollen, Termiten, andere Insekten, Schildkröten, Muscheln, Krabben. Bei Frischfleisch ist die Frage, ob sie es schon verarbeiten konnten. Vielleicht gelang es ihm, mit Steinwerkzeugen Tiere zu häuten. Entscheidend war, dass bereits eine Tradierung von Wissen erfolgte.

Spektrum: Konnte der *Homo rudolfensis* denn sein Wissen sprachlich vermitteln?

Schrenk: Nein, so sprachlich ging das sicherlich noch nicht. Es gibt erst vor zwei Millionen Jahren Anzeichen für Sprachzentren im Gehirn. Ich gehe aber davon aus, dass es bei diesen Frühmenschen bereits Kooperation gab, Ansätze für Sozialleben, was es irgendwie erlaubt hat, Erfahrungen weiterzugeben.

Spektrum: Apropos Sozialleben. Seit Kurzem meint eine Gruppe um Ihren Kollegen Tim White (US-Paläoanthropologe, geboren 1950, *die Red.*), dass Sozialleben schon viel früher als bislang angenommen eine wichtige Größe war. Nach deren Daten ging schon ein *Ardipithecus ramidus* (siehe Info I, S. 70) vor 4,4 Millionen Jahren auf zwei Beinen, und die Männchen hatten bereits die Reißzähne weitgehend eingebüßt. Das sei ein Hinweis darauf, dass Männchen und Weibchen in Paarbindung lebten.

Schrenk: Das halte ich für denkbar. Große Eckzähne sind vor allem für Drohgebärden gegenüber anderen Männchen da, um Weibchen zu monopolisieren. Wenn die Beißer weg sind, geht das nicht mehr – ein Hinweis, dass sie vielleicht auch nicht mehr nötig waren, weil es bereits Paarbindungen gab.

Spektrum: Ist *Ardipithecus* unser frühester Vorfahr, der bereits aufrecht ging?

Schrenk: Nein. Und diese Frage stellt sich auch gar nicht. Der aufrechte Gang ist vielleicht zigital entstanden. Vor zehn Millionen Jahren war ganz Afrika in der Mitte mit tropischem Regenwald bedeckt. Dann gab es eine globale Klimaabkühlung, der Urwald zog sich zurück. Und an der neu wachsenden Grenze von Urwald zur Savanne, da entsteht der aufrechte Gang – an vielen Stellen. Wir haben min-



INFO III

► **Homo habilis**, »befähigter Mensch«, den Louis Leakey, Phillip Tobias und John Napier 1964 anhand von Schädeln in Kenia beschrieben. »Befähigt«, da sie ihm Werkzeuggebrauch zuschrieben. Das Alter der Funde liegt zwischen 1,44 und 1,8 Millionen Jahren, Er war vielleicht 1,50 Meter groß mit einem Gehirnvolumen von etwa 650 Kubikzentimetern.

► **Homo rudolfensis**, »Mensch vom Rudolfsee« (die alte Bezeichnung für den Turkana-See in Kenia). Das Alter der Fossilien liegt zwischen 1,8 und 2,5 Millionen Jahren. Die Körpergröße betrug etwa 1,50 Meter, das Gehirnvolumen 750 Kubikzentimeter.



Bernhard Epping ist promovierter Biologe und freier Journalist in Tübingen. Die Fragen stellte er und Reinhard Breuer, Chefredakteur von »Spektrum der Wissenschaft«.

Ardrey, R.: African Genesis, 1961 (deutsch: »Adam kam aus Afrika«, Molden, Wien 1967). Auszüge aus Ardreys Buch finden sich etwa unter:

www.users.muohio.edu/erlichrd/vms_site/afric.htm.

Hardt, T. et al.: Safari zum Urmenschen. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 2009.

Schrenk, F.: Die Frühzeit des Menschen: Der Weg zum Homo sapiens. C.H.Beck, München 2008.

Weitere Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040557.

destens drei frühe Vertreter mit aufrechtem Gang – *Ardipithecus*, aber auch *Orrorin* und den *Sahelanthropus* (siehe Info I, S. 70).

Spektrum: Auch die Gattung *Homo* bekommt seit Kurzem immer mehr Zuwachs. Seit 2005 rätselt die Fachwelt über den *Homo floresiensis* mit einem Minigehirn. Dabei wurde das Gehirn in der Evolution des Menschen eigentlich stetig größer.

Schrenk: Der Flores-Mensch ist etwas ganz Exotisches, ja. Es gibt zumindest ein anderes Beispiel für Gehirnverkleinerung – das sind die Mallorca-Gemsen. Diese haben dafür aber fünf Millionen Jahre gebraucht. Ich sehe hier einen weiteren Beleg dafür, dass die Expansionen aus Afrika heraus viel früher begonnen haben, als wir bislang annehmen. *Homo floresiensis* muss nach meiner Ansicht auf Vorfahren zurückgehen, die lange vor *Homo erectus* Afrika verlassen haben, vor weit mehr als zwei Millionen Jahren. Allein schon damit genügend Zeit blieb, in der sich das Gehirn überhaupt so stark verkleinern konnte.

Spektrum: Seit Längerem mischen die Genetiker in Ihrem Fachgebiet kräftig mit. Die Gruppe um Svante Pääbo in Leipzig ordnet jetzt Knochenreste aus einer so genannten Denisova-Höhle in Sibirien anhand von DNA-Sequenzen einem weiteren Frühmenschen zu, der noch vor 30 000 Jahren dort gelebt haben könnte. Macht vier Menschenarten, die bis vor wenigen Jahrzehnten den Globus bevölkerten.

Schrenk: Und es werden noch mehr. Es gibt in Chinas Museen hundertprozentig noch Dinge, die man als eigene Art sehen kann, die bloß noch keinen Namen haben.

Spektrum: Die gleiche Gruppe aus Leipzig erklärt jetzt obendrein, *Homo sapiens* und Neandertaler hätten sogar fruchtbare Nachkommen gezeugt.

Schrenk: Ich will und kann derzeit nicht beurteilen, wie zuverlässig diese genetischen Analysen sind.

Spektrum: Das Techtelmechtel könnte offenbar vor 80 000 bis 50 000 Jahren im Nahen Osten stattgefunden haben.

Schrenk: Da bin ich skeptisch. So spät? Einen Genfluss zwischen den Vorfahren der beiden hat es vermutlich vor 200 000 Jahren gegeben, danach, glaube ich, eher nicht.

Spektrum: Zurück zur Unversität. Wie sehen Sie die Zukunft Ihres Fachs?

Schrenk: Die ist für ein kleines Fach gar nicht so schlecht. Einerseits gibt es in Deutschland zwar keinen einzigen Lehrstuhl nur für Paläoanthropologie. Andererseits brauchen wir aber nicht unbedingt mehr Leute mit diesem Titel, sondern Köpfe aus vielen Richtungen, die transdisziplinär denken können. Ganz ehrlich, ich will weg von der klassischen Paläoanthro-

pologie mit ihren Fachdisziplinen: Archäologie, Paläobotanik, Anatomie, Geologie, Biologie und so fort. Schubladen bringen nichts. Tim Bromage und ich versuchen gerade, ein neues Fach zu kreieren: Human Paleobiomics.

Spektrum: Omics sind schwer en vogue.

Schrenk: Aber die Silbe steht eben für eine Systemwissenschaft. Wir wollen ein Paläobiom beschreiben, den gesamten Lebensraum der Frühmenschen, und alle Daten zusammenführen. Wir haben übrigens schon eine neue Webseite dazu: www.humanpaleobiomics.org.

Spektrum: Wie lange im Jahr sind Sie eigentlich für Grabungen unterwegs?

Schrenk: Etwa fünf Monate. Wir sind derzeit in Uganda, Katar, im Jemen, Saudi-Arabien und dem Iran zugange. Wir versuchen, systematisch neue Fundstellen zu erschließen.

Spektrum: Wem gehören die Funde?

Schrenk: Die bleiben Eigentum des Herkunftslandes, das ist heute überall so geregelt. Ich verrate Ihnen aber, wie Sie besonders rasch und effizient an eine Grabungslizenz kommen: durch *capacity building*.

Spektrum: Was bitte?

Schrenk: Seitdem wir in Afrika aktiv sind, bilden wir dort auch Studenten und Doktoranden aus. Mittlerweile sitzen manche meiner Schüler in den Ländern an zentralen Stellen – und ich habe es dadurch mit Anträgen einfacher. Wer in Afrika forscht, muss auch für die Leute dort was tun. Das ist eine Verpflichtung für alle.

Spektrum: Zugleich ist gerade Afrika Schauplatz für blutige Gemetzel von *Homo sapiens* an seinesgleichen. Halten Sie an Ihrer Vorstellung vom nichtaggressiven Menschen fest?

Schrenk: Ich bin weiterhin überzeugt davon, dass die Frühmenschen soziale und kooperative Wesen waren. Dass sie überhaupt überlebt haben, zunächst völlig ohne Waffen, war zunächst nur durch den Schutz in der sozialen Gruppe möglich. Dass dann verschiedene Gruppen Krieg miteinander führen ... jaja, ich weiß schon.

Spektrum: Von der Evolution haben wir uns heute weit gehend abgekoppelt.

Schrenk: Oh ja, ein Segen, denken Sie an die Medizin. Zugleich sind wir ohne Zweifel die gefährlichsten Beutegreifer auf dem Globus. Was wir dabei aber viel zu oft vergessen: Wir bleiben trotzdem abhängig von der Umwelt. Wenn wir die Ökosysteme weiter so zerstören, dann sind auch wir bald am Ende.

Spektrum: Aber die Umwelt zu beherrschen war schon seit den ersten Steinwerkzeugen in uns angelegt. Geben Sie uns da eine Chance umzulernen?

Schrenk: Ja, denn wir sind durchaus intelligente Wesen. ◀

Schutz vor künftigen Ölkatastrophen

Tankerhavarien werden seltener, dafür steigt das Umweltrisiko durch undichte Pipelines und Bohrlöcher. Forscher und Behörden müssen sich schleunigst auf diesen Wandel einstellen.

Von Arne Jernelöv

Der Brand der Ölplattform Deepwater Horizon hat eine gigantische Umweltkatastrophe im Golf von Mexiko ausgelöst – aber vielleicht steht noch Schlimmeres bevor. Das Risiko künftiger Unfälle wächst, seit die Erdöl-länder immer tiefere und schwerer zugängliche Quellen anbohren. Die Technik zur Schadensbekämpfung verbessert sich nicht rasch genug, und Lehren werden nicht gezogen – als hätte es im Golf von Mexiko nicht schon früher ähnliche Unfälle gegeben.

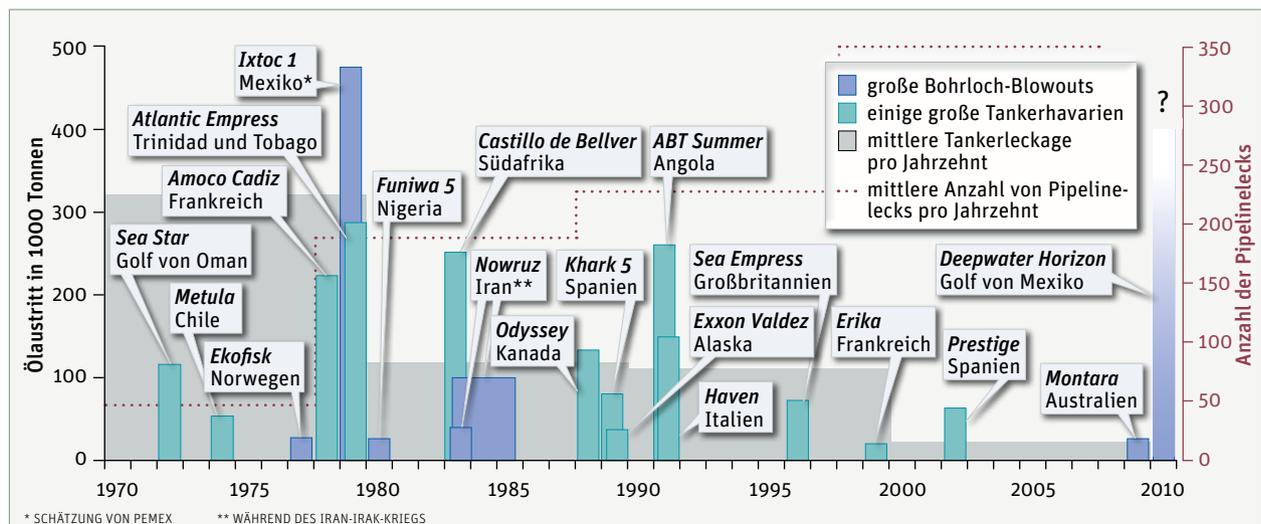
In den letzten Jahrzehnten hat sich die Belastung der Meere durch erbohrtes Rohöl drastisch verlagert (siehe Grafik). In den 1980er und 1990er Jahren erregten Tankerunfälle wie die Havarie der Exxon Valdez das größte Auf-

sehen. Doch das meiste Öl wurde absichtlich abgelassen, etwa um Treibstoffrückstände loszuwerden oder die Tanks mit Meerwasser auszuwaschen. Dabei wurden zwar jedes Mal nur eine bis zehn Tonnen Öl frei, aber bei einer Tankerflotte von 6000 bis 7000 Schiffen machte das den größten Teil der 475 000 Tonnen aus, die damals jährlich aus Schiffen ins Meer flossen – so die GESAMP (*Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection*), eine Expertengruppe der UNO. Das unbeabsichtigte Freisetzen von mehr als sieben Tonnen pro Fall belief sich damals – gemäß der International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF) – auf »nur« 115 000 Tonnen jährlich.

Doch selbst ein relativ kleiner Ölfleck hat mitunter große Wirkung. Im Jahr 1976 reichten schon fünf Tonnen, die ein Tanker in die

ENTWICKLUNGSTRENDS DER ÖLPEST

Tankerlecks nehmen im Mittel ab, Pipelines platzen häufiger. Blowouts treten sporadisch auf und lassen sich nur schwer lokalisieren.



Ostsee spülte, völlig aus, damit inmitten stürmischer See eine trügerisch glatte Wasserfläche entstand, die 60 000 Enten anlockte und tötete. Ungefähr genauso viele Vögel kamen durch die 37 000 Tonnen der Exxon Valdez um. Zum Vergleich: Bei Deepwater Horizon hat man bisher kaum 1200 Vogelopfer gezählt. Während auf natürlichem Weg jährlich rund 140 000 Tonnen Öl in den Golf von Mexiko sickern, hat Deepwater Horizon bisher in kurzer Zeit geschätzte 250 000 bis 400 000 Tonnen freigesetzt. Für die Wirkung macht es offensichtlich einen gewaltigen Unterschied, wenn das Öl plötzlich an einer Stelle austritt.

Bewegliche Ziele

Heute ist Tankspülen in den meisten Hoheitsgewässern verboten. Ölverluste auf hoher See haben von jährlich 314 000 Tonnen in den 1970er Jahren auf 21 000 Tonnen nach 2000 abgenommen, weil doppelwandige Rümpfe und unterteilte Tanks Pflicht sind und weil der Schiffsverkehr besser kontrolliert wird. Das Global Positioning System hilft enorm: Sogar betrunkene oder unerfahrene Kapitäne wissen nun, wo sie sind. Als im April 2010 ein chinesisches Schiff vom Kurs abkam und im Great Barrier Reef vor Australien auf Grund lief, war das ein seltener und überraschender Vorfall.

Dafür treten andere Ursachen in den Vordergrund. Viele Pipelines in Russland und anderen Staaten der früheren Sowjetunion sowie in Westafrika sind alt und schlecht gewartet, und manchmal werden Lecks nicht repariert, weil das mehr kosten würde, als das verlorene Öl einbrächte. In Russland leckte eine Pipeline nahe der Stadt Ussinsk ein halbes Jahr lang; dabei sammelten sich mehr als 100 000 Tonnen Öl hinter einem Damm, der 1994 brach; der Ölsee ergoss sich über die Tundra und in den Fluss Pechora. In Nigeria und am Amazonas sind Pipelines oft Ziele von Militäraktionen. Die Anzahl der Lecks aus unterseeischen Pipelines ist von 47 pro Jahr für die Zeitspanne 1968 bis 1977 in den folgenden Jahrzehnten auf 188, 228 und 350 gestiegen.

Eruptionen – so genannte Blowouts – aus Bohrlöchern zu Lande oder in seichtem Wasser werden in der Regel rasch gebändigt und setzen nicht viel Öl frei, aber Tiefsee-Blowouts sind problematischer. Die Ölmenge lässt sich nur schwer abschätzen, und die veröffentlichten Zahlen stammen meist von den Betreibern selbst. GESAMP zufolge haben Erkundungs- und Förderplattformen in den 1990er Jahren die Meere schätzungsweise mit 20 000 Tonnen jährlich belastet.

Die Konzerne dringen in immer tiefere, von Eis und Sturmwellen bedeckte Gewässer



US COAST GUARD

vor sowie in Gebiete, wo das Öl tief unter Sediment- und Felsschichten ruht. In Brasilien wurden jüngst mehrere Mega-Ölfelder entdeckt; darüber liegen mehr als zwei Kilometer Wasser – bei Deepwater Horizon sind es 1,5 – und bis zu fünf Kilometer Sedimente. Die brasilianische Ölfirma Petrobras möchte die Felder ausbeuten, sobald die technischen Probleme gelöst sind. Russische Gas- und Ölkonzerne wie Gazprom und Rosneft erkunden schwer zugängliche Gebiete in der Arktis, Sachalin im Pazifik und Shtockman in der Barentssee. Die Erschließung all dieser Felder verspricht riesige Gewinne, ist aber auch besonders riskant.

Anders als bei lecken Tankern oder Pipelines vergeht zwischen schweren Blowouts in einem einzelnen Land viel Zeit. Da diese Katastrophen lokal und sporadisch auftreten, ist es schwierig, Kenntnisse auszutauschen oder Forschungsprogramme aufrechtzuerhalten. Sogar NOAA, die National Oceanic and Atmospheric Administration der USA, scheint Ixtoc 1 vergessen zu haben – den größten Unterwasser-Blowout vor Deepwater Horizon, bei dem 1979 eine Erkundungsbohrung von Mexikos staatlicher Ölfirma Pemex außer Kontrolle geriet. Ich leitete eine UNO-Expertengruppe des Umweltprogramms UNEP und der Welternährungsorganisation FAO, die auf Wunsch der mexikanischen Regierung diese Ölkatastrophe und ihre Folgen untersuchen sollte. Der Vorfall lehrte, dass ein Blowout am Meeresgrund eine Mischung von Öl, Gas, Wasser und Sand enthält, wovon nur ein Teil die Oberfläche erreicht, und dass Flugzeuge oder Satelliten das Ölvolumen und seine Entwicklung nur schlecht verfolgen können. Diese grundlegende Information musste anscheinend eine Generation später erst wiederentdeckt werden.

Am 20. April 2010 geriet die Bohrplattform Deepwater Horizon nach einer Erdgasexplosion in Brand. Aus dem Bohrloch strömte eine noch unbekannt Menge Erdöl in den Golf von Mexiko.

Ixtoc 1 im Jahr 1979, der größte Unterwasser-Blowout vor Deepwater Horizon, ist bereits fast vergessen



FOTOLIA, PHOTOSTOCK

Auch ein kleines Ölleck kann Vögel töten.

Es gibt weitere Informationsbarrieren. Die beste Datensammlung über Blowouts besitzt SINTEF, eine unabhängige Organisation in Trondheim (Norwegen), die 573 Ereignisse seit 1955 katalogisiert hat. Diese bislang nur Projektteilnehmern vorbehaltenen Daten sollten auch anderen Forschern zugänglich gemacht werden. UN-Berichte müssten von der Nation, die sie in Auftrag gegeben hat, zur Veröffentlichung freigegeben werden; unser Ixtoc-Bericht, in dem wir Pemex kritisierten, wurde nie vollständig publiziert. Dringend nötig sind systematischer Informationsaustausch sowie ein internationaler Freedom-of-Information-Act, damit die Daten allen Interessierten zur Verfügung stehen. UNEP könnte das Mandat erhalten, das zu organisieren.

Die Bohrtechnik hat in den letzten Jahrzehnten rapide Fortschritte gemacht, nicht aber die Methode, ein geplatzt Bohrloch zu stopfen und das ausgeströmte Öl einzufangen. Noch immer werden dieselben schwimmenden Ölsperren, Detergenzien und ölsammelnden Chemikalien verwendet wie bei Ixtoc. Das Einzige, was sich geändert hat, ist die Terminologie: Deepwater Horizon bekam einen Zylinderpropfen (*top hat plug*) aufgesetzt, Ixtoc einen »Sombbrero«.

Was fehlt, ist die langfristige Finanzierung einschlägiger Forschung. In Schweden förderten die Küstenwache und das Petroleuminstitut in den 1970er Jahren gemeinsam eine jahrzehntelange Studie am schwedischen Umweltforschungsinstitut IVL. Dieses seltene und frühe Beispiel kann heute als Vorbild dienen. Der US Oil Spill Liability Trust Fund, der von den Ölfirmen vorsorglich Abgaben für den Schadensersatz in Katastrophenfällen einsammelt, sollte die Forschung in den USA unterstützen. Der Ölkonzern British Petrol (BP) hat 500 Millionen Dollar für die Untersuchung der Wirkung von Öl und Detergenzien im Golf von Mexiko versprochen. Das ist eine riesige Summe, doch sie soll anscheinend vor allem der Erforschung bereits erforschter Gebiete dienen, statt sich auf künftig wichtige Themen zu konzentrieren – wie Tiefsee-Blowouts oder die Bewegung des aus natürlichen Quellen ins Meer sickernden Öls und seine Wirkung auf Korallen und marines Leben.

Ölkonzerne schlagen, wie andere Wirtschaftsunternehmen auch, manchmal eine Abkürzung ein, um billiger, leichter und schneller ans Ziel zu gelangen – insbesondere, wenn sie wenig Gefahr laufen, entdeckt oder bestraft zu werden. Unter den Ländern mit bedeutenden Ölvorkommen haben die USA und Norwegen derzeit die strengsten Vorschriften; aber sie sind nicht streng genug. Alle Tiefseebohrprojekte müssten beispielsweise eine zwei-

te Bohrung vorsehen, die bei einem Blowout binnen weniger Tage als Entlastungsquelle dienen kann. Außerdem sind behördliche Überwachung und strenge Strafen erforderlich.

Das wird oft durch die Beziehung zwischen der Ölindustrie und ihren Überwachern erschwert. US-Präsident Barack Obama hat die Nähe zwischen dem Minerals Management Service – der für die Gas- und Ölvorkommen der USA zuständigen Bundesbehörde – und den Ölfirmen kritisiert und gefordert, das müsse sich ändern. In anderen Ländern, wo Ölkonzerne erheblich zu den Staatseinkünften beitragen und manchmal mächtiger sind als Ministerien, existieren noch viel gemütlichere Beziehungen.

Enge Beziehungen

Zum Beispiel schränkte die mexikanische Firma Pemex ihre Haftung für die Ixtoc-Katastrophe ein, indem sie sich auf hoheitliche Immunität gegenüber US-Klagen berief. Russische Öl- und Gasfirmen wie Gazprom agieren im In- und Ausland als verlängerter Arm der Regierung. In Brasilien hatte Petrobras bis vor zehn Jahren eine legale Monopolstellung im Ölgeschäft und erhält noch immer spezielle Erschließungsrechte. Angesichts dieser Macht ist es wichtig, dass unabhängige Aufpasser – etwa nichtstaatliche Umweltverbände – ein Auge auf das Treiben haben. Großer Bedarf besteht an handlungsfähigen Regierungsbehörden sowie an einem international verbindlichen Verhaltenskodex für Ölkonzerne.

Die langfristigen Folgen der Deepwater-Horizon-Katastrophe sind nicht absehbar. Garnelen, Tintenfische und einige Fischarten wurden durch die Ixtoc-Ölpest schwer getroffen, doch sie erholten sich rasch – zum Teil, weil in den unmittelbar folgenden Jahren viel weniger gefischt wurde. Das könnte auch diesmal geschehen. Man muss aber bedenken, dass die mexikanische Küste nur enge Zuflüsse zu den hinter Sandstränden liegenden Lagunen bietet, wodurch das Ökosystem einigermaßen geschützt wurde. Die Feuchtbiootope des US-Bundesstaats Louisiana liegen exponierter. Da im Ixtoc-Fall keine Detergenzien unter Wasser eingesetzt wurden, bleibt die Auswirkung von Öl und Detergenzien auf Tiefseekorallen und Riffspezies ungewiss.

Der einzige Vorteil dramatischer Ölkatastrophen ist, dass sie öffentlich und politisch Aufsehen erregen. Vermutlich werden die USA, Kanada und Europa ihre Bohrungen strenger regulieren und überwachen, gefolgt von Australien – das seine Blowout-Katastrophe 2009 erlebte – und Neuseeland. Jetzt gilt es vor allem, dafür zu sorgen, dass der Rest der Welt sich anschließt. <



Arne Jernelöv ist Umweltwissenschaftler am Institute for Futures Studies in Stockholm.

© Nature Publishing Group
www.nature.com/nbt
 Nature 466, S. 183–184,
 8. Juli 2010.

Jernelöv, A., Lindén, O.: Ixtoc I: A Case Study of the World's Largest Oil Spill. In: *Ambio* 10(6), S. 299–306, 1981.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040558.

Die Spur der Elfenbein- schmuggler

Obwohl der Handel mit Elfenbein seit 20 Jahren verboten ist, töten Wilderer in Afrika derzeit mehr Elefanten denn je. Mit DNA-Analysen der Stoßzähne kommt man den kriminellen Kartellen auf die Spur.

Von Samuel K. Wasser,
Bill Clark und Cathy Laurie

In Kürze

- ▶ Nach der **internationalen Ächtung des Elfenbeinhandels im Jahr 1989** wurden zunächst kaum noch Elefanten gewildert, doch inzwischen ist die Nachfrage wieder enorm gestiegen, und die Tiere werden dezimiert wie nie zuvor.
- ▶ Anhand der DNA im Elefantenkot können Forscher **exakte Karten der Populationen für ganz Afrika** anlegen.
- ▶ Durch Abgleich mit solchen Karten verrät die DNA von beschlagnahmtem Elfenbein, woher es ursprünglich stammt. Dabei zeigt sich, dass **kriminelle Netzwerke** bestimmte Elefantengruppen fast vollständig ausrotten.

Als einer von uns (Wasser) im Jahr 1983 ein Wäldchen namens Maudwe am Rand des Selous-Wildreservats in Tansania erkundete, stieß er auf zwei beieinanderliegende Elefantenschädel. Der große stammte von einem Weibchen, der andere von einem Jungtier; seine Backenzähne waren nur ein Viertel so groß wie die des Weibchens und ohne Abnutzungsspuren. Die Wilderer hatten zuerst das Junge erschossen, um die trauernde Mutter anzulocken, erklärte ein Wildhüter, und sie wegen ihrer gewaltigen Stoßzähne zu töten. Auf diese Weise werden in Afrika die engen Familienbande der Elefanten tausendfach ausgenutzt.

Das Selous-Reservat ist das größte Naturschutzgebiet Afrikas. Dennoch wurden dort zwischen 1979 und 1989 unter den Augen der Öffentlichkeit rund 70 000 Elefanten abgeschlachtet – und in ganz Afrika mindestens zehnmal so viele. Im Jahr 1989 ergriff der neu berufene oberste Wildtierschützer von Tansania endlich die Initiative. Die »Operation Uhai«, an der Wildhüter, Polizisten und Militär mitwirkten, machte dem hemmungslosen Wildern in Tansania rasch ein Ende.

Bald darauf erreichte Tansania zusammen mit sechs anderen Ländern, dass die Vereinten Nationen den Afrikanischen Elefanten als unmittelfar bedrohte Art in das Washingtoner Artenschutzabkommen CITES (*Convention on International Trade in Endangered Species*

of Wild Fauna and Flora) aufnahmen. Damit wurde der internationale Handel mit Elefanten und ihren Produkten praktisch ganz verboten. Die öffentliche Meinung wandte sich nun so stark gegen das Geschäft mit Elfenbein, dass die Nachfrage weltweit fast völlig einbrach und die Wilderei schlagartig zum Erliegen kam. Westliche Nationen unterstützten diese Entwicklung, indem sie in ganz Afrika Maßnahmen gegen das Wildern mit hohen Geldsummen förderten. Alles in allem war dies der wohl wirksamste Erlass eines internationalen Wildtierschutzgesetzes in der Geschichte, und entscheidend für seinen Erfolg war öffentlicher Druck.

Doch die Ruhe währte nur kurz. Einige afrikanische Staaten widersetzten sich von Anfang an einem generellen Verbot und plädierten hartnäckig für seine Aufhebung. Die Finanzhilfe aus dem Westen versickerte, und den armen afrikanischen Nationen blieb zwar viel Ausrüstung gegen die Wilderei, aber kein Geld, um sie einzusetzen. Zudem wurde Elfenbein unter den Angehörigen der neuen Mittelschicht in fernöstlichen Industrieländern wie China und Japan ein wichtiges Statussymbol. Vor allem diese Nachfrage, aber auch die in den USA und anderen wohlhabenden Ländern, trieb den Großhandelspreis für hochwertiges Elfenbein von 200 Dollar pro Kilogramm im Jahr 2004 auf 850 Dollar im Jahr 2007; bis 2009 hat er sich noch einmal verdoppelt. Als die Behörden im März 2008 in Südchina 790 Kilogramm Elfenbein sicherstellten, schätzten sie den Einzelhandelspreis auf 6500 Dollar pro Kilogramm.

Dieser Elefant wurde im Oktober 2008 innerhalb des Zakouma-Nationalparks im Tschad getötet, als Wilderer mit automatischen Waffen auf eine weidende Herde schossen. Er gehört zu den rund 38 000 Opfern, die der illegale Elfenbeinhandel derzeit pro Jahr fordert.



GETTY IMAGES / JEFF HUTCHENS

WIE VIELE ELEFANTEN WERDEN GETÖTET?

Die zügellose Wilderei zwischen 1979 und 1989 dezimierte die afrikanischen Elefanten von 1,3 Millionen auf weniger als 600 000 Tiere – ein Verlust von 7,4 Prozent pro Jahr. Im Jahr 2006 florierte der illegale Elfenbeinhandel erneut in ungeahntem Ausmaß. Zwischen August 2005 und August 2006 beschlagnahmten die Behörden mehr als 25 Tonnen Elfenbein. Angesichts hoher Dunkelziffern schätzen wir, dass damals insgesamt mehr als 250 Tonnen Elfenbein geschmuggelt wurden. Geht man von ungefähr 6,6 Kilogramm Elfenbein pro Elefant aus, so werden jährlich 38 000 Elefanten getötet – acht Prozent sämtlicher Elefanten Afrikas.

Unter dem Druck der afrikanischen Länder, die ihr Elfenbein verkaufen, und der fernöstlichen, die es importieren wollten, genehmigte CITES schließlich ausnahmsweise zwei legale Verkaufsaktionen. Das Elfenbein durfte nur von natürlich verendeten oder krankheits halber getöteten Elefanten stammen. Jedes Land musste die Teilnahme an der Aktion eigens beantragen und Erfolge gegen den eigenen Schwarzhandel nachweisen. Außerdem sollte kontrolliert werden, ob die legalen Verkäufe das Wildern anheizten; allerdings reichten die erhobenen Daten dafür nicht wirklich aus.

2006 war die Wilderei eher noch schlimmer geworden als vor dem Handelsverbot; in jenem Jahr wurden 25 000 bis 29 000 Kilogramm Elfenbein aus Afrika beschlagnahmt. Mittlerweile war das organisierte Verbrechen in das profitable Geschäft eingestiegen; denn das Risiko, erwischt zu werden, blieb gering, und die Liberalisierung des Welthandels machte das Verschieben großer Mengen von Schmuggelware zum Kinderspiel.

Auf Grund der 2006 beschlagnahmten Mengen schätzen wir, dass jährlich mehr als acht Prozent der afrikanischen Elefantenpopulation ausgelöscht werden (siehe nebenstehenden Kasten). Diese Mortalitätsrate übersteigt die – unter optimalen Bedingungen – sechsprozentige Fortpflanzungsrate; sie liegt so gar

höher als die jährliche Sterblichkeit durch Wilderei von 7,4 Prozent, die zum Handelsverbot geführt hatte.

Um das Abschlichten zu stoppen, müssen die Exekutivorgane dort eingreifen, wo die Elefanten gewildert werden. Doch bis vor Kurzem ließ sich die Schmuggelware nicht zum Ursprung zurückverfolgen. Eine illegale Ladung konnte in einem Land gewildert, in einem anderen verarbeitet und von einem dritten exportiert worden sein.

Erst wenn man weiß, wo Elefanten getötet werden, kann man ein Land, das Wilderern freie Hand lässt, unter Druck setzen. Außerdem gibt die geografische Herkunft oft Aufschluss darüber, wie die Wilderer vorgehen. Wenn die Lieferung größtenteils aus einem einzigen Gebiet stammt, können wir daraus schließen, dass die Wilderer eine bestimmte Elefantenpopulation dezimieren. In diesem Fall sollten die Strafverfolger nach einem gut organisierten Wildererring suchen. Hat das Elfenbein hingegen viele Herkunftsorte, versorgen sich die Händler vermutlich hier und da über ein Netzwerk kleiner Dealer.

Um die Quelle einer Warenladung herauszufinden, verwenden wir DNA-Analysen. Unsere Methode gleicht dem genetischen Fingerabdruck, mit dem man vor Gericht durch Blut- und Gewebespuren den Täter identifizieren kann. In unserem Fall ist das Beweis-

DER GENETISCHE FINGERABDRUCK

Gestohlenes Elfenbein lässt sich mittels DNA-Analyse zu einer bestimmten Elefantenpopulation zurückverfolgen. Bei dieser Methode analysiert man charakteristische DNA-Abschnitte, so genannte Mikrosatelliten.

MIKROSATELLITEN

Diese DNA-Abschnitte bestehen aus kurzen Sequenzen von Nukleotiden – Buchstaben des genetischen Kodes –, die sich mehrfach wiederholen.

TYPISCHE WIEDERHOLUNGEN

Da Mikrosatelliten anscheinend im Erbgut keine Funktion haben, kann die Anzahl der Wiederholungen variieren, ohne dem Organismus zu schaden. Deshalb sammeln sich Mutationen schnell an, und Elefanten aus benachbarten Populationen haben oft unterschiedlich lange Mikrosatelliten. Daran kann man die eine Population von der anderen unterscheiden.

DIE SPUR DES ELFENBEINS

Indem Forscher die Länge verschiedener Mikrosatelliten von Tieren bekannter Herkunft untersuchen, erstellen sie eine Referenzkarte von DNA-Fingerabdrücken aus ganz Afrika. Wenn sie nun den genetischen Fingerabdruck eines geschmuggelten Stoßzahns mit dieser Karte abgleichen, können sie den ungefähren Herkunftsort herausfinden.

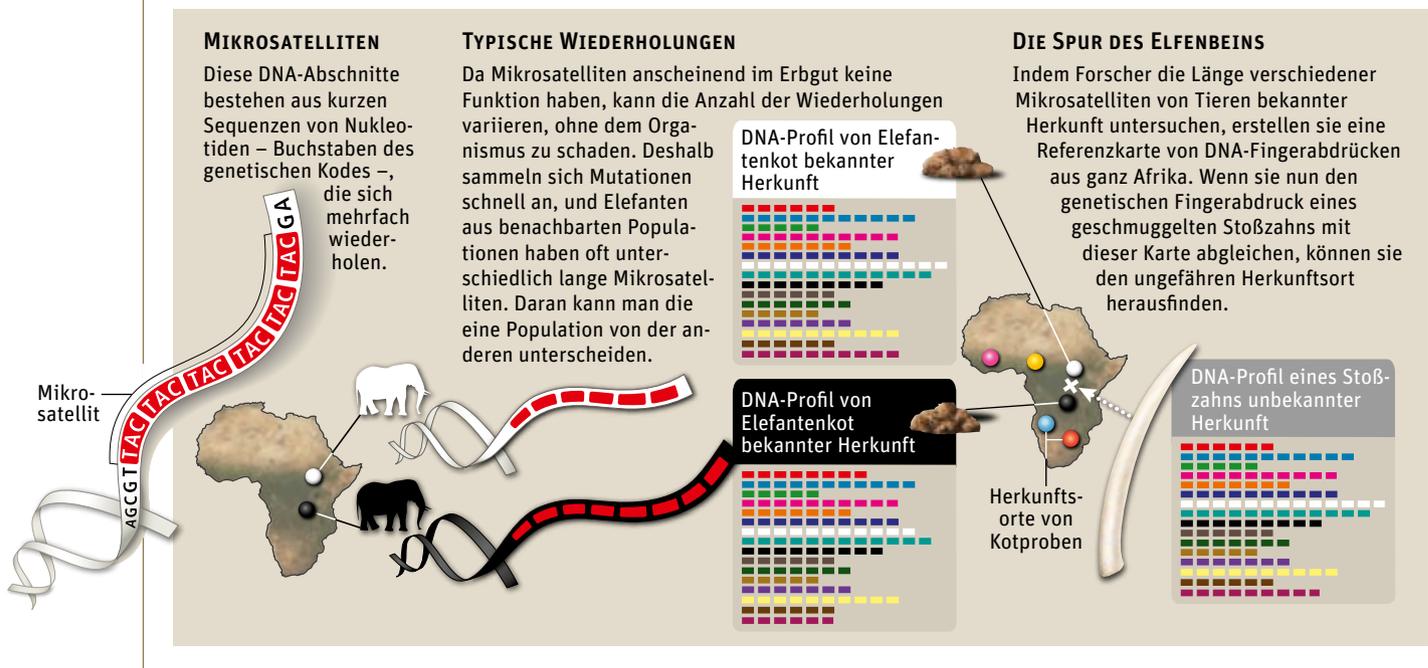


ILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN; LANDKARTEN: NASA, VISIBLE EARTH

material Elfenbein, das wir mit Elefantenpopulationen in Afrika abzugleichen versuchen.

Auf diese Weise untersuchten wir das Material aus drei Razzien, die 2006 stattgefunden hatten. Damals waren fast elf Tonnen geschmuggeltes Elfenbein konfisziert worden – mehr als ein Drittel der in jenem Rekordjahr überhaupt beschlagnahmten Menge. Wenige Populationen halten so viel Wilderei aus. Falls dieses Elfenbein aus einem relativ begrenzten Gebiet stammt, ist das ein starkes Indiz, dass eines der weltweit größten Elfenbeinsyndikate dahintersteckt.

Verdächtige Container

MONTAG, 3. JULI 2006, HAFEN VON KAOHSIUNG (TAIWAN). Die elektronische Routinekontrolle der Schiffsdokumente macht die Zollbeamten auf zwei verdächtige Container aufmerksam; beide kommen aus Tansania und sind unterwegs zu den Philippinen, haben aber auf ihrer Reise Kaohsiung schon einmal passiert. Anscheinend pendeln die Container ohne klares Ziel zwischen verschiedenen Häfen im Fernen Osten hin und her. Die Zöllner überprüfen nun die Ladungslisten; demnach enthalten die Container Sisalfasern. Doch der Export von Sisal aus Afrika in die Philippinen heißt Eulen nach Athen tragen, denn auf den Philippinen wächst die Faserpflanze in rauen Mengen. Die Beamten brechen einen Container auf und entdecken hinter 60 Sisalballen 744 Elefantenstoßzähne. Der andere Container enthält noch einmal 350 Stoßzähne. Der gesamte Fund umfasst 5,2 Tonnen illegales Elfenbein – geschätzter Großhandelswert 4,6 Millionen Dollar, Endwert im Straßenverkauf mehr als 21 Millionen Dollar.

SAMSTAG, 8. JULI 2006, SAI YING PUN (HONGKONG). Fünf Tage nach dem Fund in Taiwan meldet ein Einwohner Hongkongs grässlichen Gestank aus einer Nachbarwohnung. Polizei und Feuerwehr entdecken sieben Leute, die 2,6 Tonnen Elfenbein zerschneiden und verpacken. Die Behörden beschlagnahmen 390 Stoßzähne sowie 121 zerschnittene Stücke. Einiges weist auf ostafrikanische Herkunft hin.

MONTAG, 28. AUGUST 2006, HAFEN VON OSAKA (JAPAN). Zöllner entdecken 608 Elfenbeinstücke, die zusammen 260 ganze Stoßzähne ergeben. Mit 2,8 Tonnen ist dies die größte Menge, die in Japan je beschlagnahmt wurde. Viele Stoßzähne sind in der Swahili-Sprache beschriftet (siehe Bild S. 85), was auf ostafrikanischen Ursprung schließen lässt. Zur Ladung gehören 17 928 geschnittene Elfenbeinzylinder, die offensichtlich für den Verkauf als Namensstempel gedacht waren. In Japan und China lässt man seinen Namen in ein Ende solcher Zylinder schneiden und stempelt da-



mit an Stelle der Unterschrift Schecks, Dokumente und Briefe. Diese so genannten Hankos wurden früher aus Jade und anderen Materialien hergestellt, heutzutage massenweise aus Elfenbein. Zunächst melden die Japaner die Beschlagnahme nicht der CITES, die Japan den einmaligen Kauf von Elfenbein aus Afrika genehmigen müsste. Erst als die Zeitung »Asahi Shimbun« am 7. Oktober 2006 davon berichtet, bestätigen die japanischen Behörden den Empfang der Ware.

Sobald wir von den Beschlagnahmen hörten, forderten wir Elfenbeinproben an, um am Center for Conservation Biology der University of Washington DNA-Analysen durchzuführen.

Offene Elfenbeinmärkte wie dieser in Kinshasa (Demokratische Republik Kongo) finden wachsenden Zuspruch. Doch die größte Nachfrage entsteht in den Industrieländern des Fernen Ostens, wo Namensstempel – so genannte Hankos (unten) – die persönliche Unterschrift ersetzen.

Wir können den genetischen Fingerabdruck eines Stoßzahns mit Elefanten-DNA aus ganz Afrika vergleichen

ren. Die Ergebnisse wollten wir den Geberländern, Interpol und der Lusaka Agreement Task Force – einer Organisation afrikanischer Länder zur Bekämpfung der Wilderei – zur Verfügung stellen. Hongkong und Taiwan schickten uns bereitwillig Proben; die japanischen Behörden haben trotz mehrfacher Aufforderung bis heute nichts geliefert.

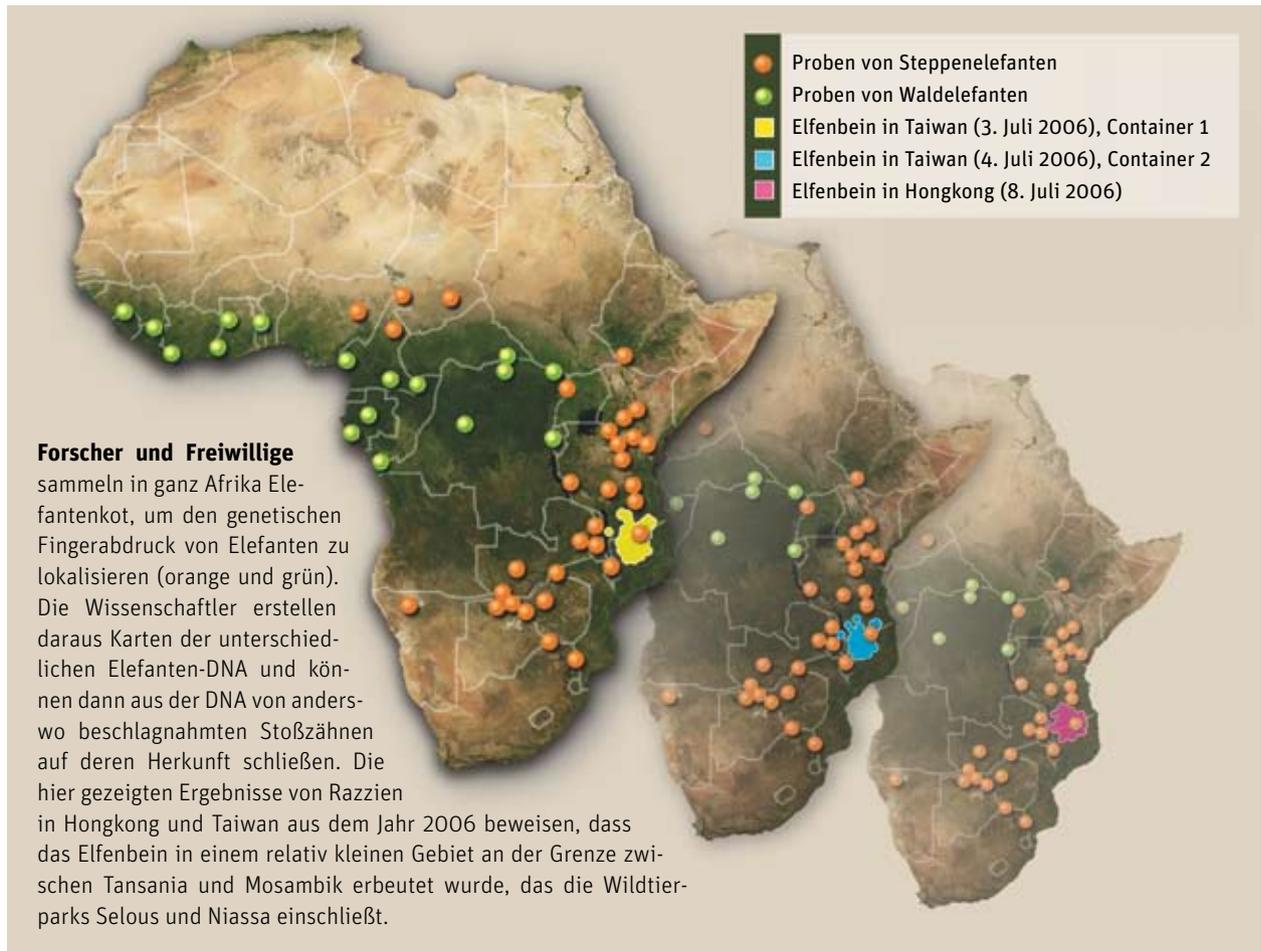
Afrikakarte der Elefanten-DNA

Wir extrahieren die DNA aus dem Elfenbein mit einer in der Gerichtsmedizin bei Zähnen üblichen Pulverisierungstechnik. Wir platzieren ein erdnussgroßes Elfenbeinstück zusammen mit einem Magneten in ein Kunststoffröhrchen, das mit rostfreien Stahlstöpseln verschlossen wird. Dann stecken wir die Probe in eine Gefriermühle mit flüssigem Stickstoff bei minus 240 Grad Celsius. Dort schleudert ein rasch oszillierendes Magnetfeld das Elfenbein gegen die Stöpsel und zermahlt es zu feinem Pulver. Dabei bleibt die DNA wegen der Tiefkühlung unversehrt. Mit heute gängigen Methoden isolieren wir die DNA aus dem Puder

und erstellen einen genetischen Fingerabdruck (siehe Kasten S. 80). Er beruht auf dem individuell charakteristischen Profil so genannter Mikrosatelliten. Diese DNA-Segmente bestehen aus zwei bis vier Nukleotiden, die sich zehn- bis hundertfach wiederholen. Anders als funktionale Gene kodieren die Mikrosatelliten nicht für Proteine. Deshalb kann die Anzahl von Wiederholungen in den Mikrosatelliten beliebig variieren, ohne die Gesundheit oder Fortpflanzungsfähigkeit des Organismus zu beeinträchtigen. Veränderungen in der Anzahl der Wiederholungen treten somit häufig auf und bleiben bestehen – und mit der Zeit unterscheiden sich die Mikrosatelliten geografisch getrennt lebender Populationen.

Wir können nun den genetischen Fingerabdruck eines Stoßzahns mit einer Karte der Elefanten-DNA aus ganz Afrika vergleichen. Vor zehn Jahren haben wir begonnen, eine solche Karte zu erstellen, welche die Variation der Mikrosatelliten-DNA wiedergibt. Dieses Projekt war freilich viel aufwändiger als gedacht.

DEN WILDERERN AUF DER SPUR



Forscher und Freiwillige

sammeln in ganz Afrika Elefantenkot, um den genetischen Fingerabdruck von Elefanten zu lokalisieren (orange und grün). Die Wissenschaftler erstellen daraus Karten der unterschiedlichen Elefanten-DNA und können dann aus der DNA von anderswo beschlagnahmten Stoßzähnen auf deren Herkunft schließen. Die hier gezeigten Ergebnisse von Razzien in Hongkong und Taiwan aus dem Jahr 2006 beweisen, dass das Elfenbein in einem relativ kleinen Gebiet an der Grenze zwischen Tansania und Mosambik erbeutet wurde, das die Wildtierparks Selous und Niassa einschließt.

NASA, VISIBLE EARTH

Afrika ist ein riesiger Kontinent, und die Genauigkeit der Elfenbeinuordnung hängt direkt von der Vollständigkeit unserer DNA-Karte ab. Die Referenz-DNA gewannen wir aus dem Kot der Elefantenpopulationen, denn jedes Gramm Elefantkot enthält die DNA von Millionen Schleimhautzellen aus dem Darm. Wir brauchten die Hilfe vieler Wissenschaftler und Wildhüter, um genügend Kot für eine halbwegs komplette Referenzkarte von ganz Afrika zu erstellen, aber das reichte nicht aus.

Um die lückenhaften Daten zu einem Gesamtbild zusammenzufügen, entwickelten wir eine statistische Methode namens SCAT (*smoothed continuous assignment technique*). Die SCAT-Software extrapoliert die an separaten Orten gesammelten Daten zu einer zusammenhängenden geografischen Verteilung der genetischen Fingerabdrücke. Das Verfahren beruht auf der Tatsache, dass eng benachbarte Populationen genetisch ähnlicher sind als weiter getrennt lebende. Wir überprüften die SCAT-Methode, indem wir damit die Herkunft von Kotproben bestimmten, die von schon bekannten Plätzen stammten.

Wir wandten unsere Methode zuerst auf einen Fall an, der Umfang und Komplexität des modernen Elfenbeinhandels illustriert. Im Februar 2002 durchsuchten die Behörden in Malawi zusammen mit Kollegen aus Sambia und der Lusaka Agreement Task Force einen Familienbetrieb, der angeblich nur legal von der Regierung Malawis erworbenes Elfenbein verarbeitete. Doch die Fabrik besaß viel mehr davon, als in ihren Papieren stand, und nur wenige Proben trugen den vorgeschriebenen Regierungsstempel. Viele Reststücke enthielten Löcher, aus denen kurze Zylinder ausgeschnitten worden waren – offenbar für Japan bestimmte Hanko-Stempel. Japaner bevorzugen zylindrische Stempel, Chinesen ziehen quadratische vor.

Analyse der Schmuggelware

Die sichergestellten Geschäftspapiere dokumentierten 19 Lieferungen im Lauf von neun Jahren, alle mit demselben Schiff, der gleichen Tarnbezeichnung – entweder Speckstein oder Schnittholz – und identischem Herkunftsort. Fast alle hatten dasselbe Ziel. Eine dieser Sendungen umfasste 6,5 Tonnen Elfenbein, getarnt als Speckstein, die in einem Versteck auf die Auslieferung warteten.

Im Juni 2002 erfuhren die Behörden auf einmal, dass das fehlende Elfenbein per Lastwagen nach Beira (Mosambik) geschafft, auf ein Schiff nach Durban (Südafrika) verladen und dort auf ein anderes Schiff Richtung Singapur transferiert worden war. Die Behörden

am Zielort wurden vier Stunden vor Eintreffen der Ladung informiert und konfiszierten den Container. Er enthielt 532 schwere Stoßzähne mit einem mittleren Gewicht von zwölf Kilogramm sowie 42 000 Hanko-Siegel. Die Durchmesser der zylindrischen Stempel passten zu den Bohrlöchern in den Elfenbeinresten aus dem Malawi-Fund. Mehrere Stoßzähne waren mit »Yokohama« markiert, der Hafenstadt nahe Tokio.

Die in Malawi sichergestellten Versandscheine listeten das Gewicht der 18 anderen illegalen Ladungen nicht auf. Wenn wir annehmen, dass sie alle der in Singapur beschlagnahmten Ladung gleichen, belaufen sie sich auf insgesamt fast 110 Tonnen Elfenbein oder ungefähr 17 000 gewilderte Elefanten.

Die ungeheure Menge der beschlagnahmten Schmuggelware war ein drastisches Indiz für das Wachstum des illegalen Elfenbeinhandels und den Einfluss des organisierten Verbrechens. Bewegungen solchen Umfangs erfordern viel Erfahrung mit internationalem Waren- und Finanzwesen sowie eine aufwändige

Literaturhinweise

Ammann, K. (Fotos), Peterson, D. (Text): *Elephant Reflections*. University of California Press, Berkeley 2009.

Neme, L. A.: *Animal Investigators: How the World's First Wildlife Forensics Lab Is Solving Crimes and Saving Endangered Species*. Scribner, New York 2009.

Wasser, S. K. et al.: *Combating the Illegal Trade in African Elephant Ivory with DNA Forensics*. In: *Conservation Biology* 22(4), S. 1065–1071, 2008.

Wasser, S. K. et al.: *Elephants, Ivory, and Trade*. In: *Science* 327, S. 1331–1332, 2010.

NICHT NUR ELEFANTEN



Weltweit blüht der Schwarzhandel mit vielen Tierarten und den daraus gewonnenen Produkten, deren Gesamtwert auf einige zehn Milliarden US-Dollar pro Jahr geschätzt wird; die bestehenden Kontrollorgane sind davon rettungslos überfordert. Liberalisierung des Welthandels und neue Technik fördern den Schmuggel: Neuerdings wird Elfenbein zweifelhafter Herkunft im Internet angeboten. Auch der beträchtliche legale Handel mit seltenen Wildtieren – jedes Jahr werden mehr als 100 Millionen Tiere mit Genehmigung der Artenschutzorganisation CITES gekauft und verkauft – bietet einen idealen Kanal für Schwarzhandel, hinter dem meist organisiertes Verbrechen steckt. Allein in den letzten Jahren haben die Behörden gewaltige Mengen beschlagnahmt: 55 000 Reptilienhäute in Indien, 19 000 Haifischflossen in Ecuador, 23 Tonnen Schuppentiere in Asien sowie in Indien 3000 Wollschals von mindestens 12 000 Tibetantilopen und 2000 Indische Sternschildkröten (Bild).

Infrastruktur im Fernen Osten, die tonnenweise Elfenbein zu verarbeiten vermag, Zehntausende von Hankos pro Jahr herstellt und sie über ein Netzwerk für Marketing, Vertrieb und Einzelhandel an den Käufer bringt. Die damit verdienten Unsummen müssen gewaschen, das heißt illegal durch seriöse Geschäftskanäle geschleust werden, um damit am anderen Ende der Welt neue Schiffsladungen bezahlen zu

können. All das erfordert umfangreiche Bestechung. Manchmal tauschen Wilderer große Teile ihrer Beute gegen Waffen und Munition, die korrupte Beamte brauchen, um an der Macht zu bleiben.

Der Profit ist groß, das Risiko klein. Die großen Schieber werden selten angeklagt, denn die Behörden betrachten Verstöße gegen den Artenschutz oft als Kavaliersdelikt. Nach dem Zugriff in Singapur wurde niemand verhaftet – auch nicht die Zöllner, die mit ihrer Unterschrift das Elfenbein als Speckstein abgesegnet hatten. In mehreren Ländern zahlt, wer erwischt wird, weniger als die Umsatzsteuer.

Um den Verdacht zu erhärten, dass das in Singapur konfiszierte Elfenbein in Malawi verarbeitet worden war, mussten DNA-Analysen die gemeinsame Herkunft der Proben beweisen. Wie sich ergab, stammten sowohl die in Singapur beschlagnahmten Stoßzähne und Namensstempel wie auch die in Malawi konfiszierten Elfenbeinstücke von einer in Sambia heimischen Elefantenpopulation. Das erklärt das mysteriöse Fehlen von kleinen oder mittelgroßen Stoßzähnen in Singapur: Sie waren wahrscheinlich schon in Malawi zu Hankos verarbeitet worden. Zugleich stieg der Wert der Sendung für den japanischen Markt, denn Japaner bevorzugten traditionell große Stoßzähne. Offenbar brachten diese Wilderer Tiere jeden Alters um. Man braucht sehr viele junge Elefanten, um Elfenbein für 42 000 Namensstempel zu gewinnen.

GIBT ES ZU VIELE ELEFANTEN?

Nach dem Verbot des Elfenbeinhandels kam das Gerücht auf, seither nähmen in Afrika die Elefanten überhand. Tatsächlich forderten einige Staaten im Süden des Kontinents, wegen hoher Populationsdichten in den Schutzgebieten das Keulen zu legalisieren. Hinzu kamen eskalierende Konflikte zwischen Mensch und Elefant. Doch das Problem ist viel komplizierter.

In den meisten Ländern Afrikas dezimieren Wilderer die Elefanten weiterhin drastisch. Zäune, welche im südlichen Afrika die meisten Schutzzonen mit hoher Elefantendichte umgeben, schränken die Bewegungsfreiheit der Tiere stark ein. Statt über legales Keulen zu debattieren, sollte man besser die Zäune niederreißen und länderübergreifende Megaparks schaffen. Oft grenzen die eingezäunten Populationen an dünn besiedelte Länder, die den Elefanten viel Raum böten. In den Megaparks könnten sich verdichtete Populationen ungehindert ausbreiten und würden das Ökosystem nicht lokal überlasten.

Der Konflikt zwischen Menschen und Elefanten entsteht meist dann, wenn die Tiere in Farmen außerhalb ihres Schutzgebiets eindringen. Als Hauptursache gilt der Verlust des Lebensraums, aber auch die Wirkung der Wilderei auf die Sozialstruktur spielt eine große Rolle. Immer wieder werden ältere Weibchen als Erste erschossen, denn sie leben in Gruppen und sind daher für Wilderer viel leichter aufzuspüren als die allein lebenden Männchen. Nach einer Untersuchung der Schädel gewilderter Elefanten aus dem Jahr 1989 stammen 80 Prozent von Weibchen mit einem Durchschnittsalter von 32 Jahren. Diese alten Weibchen, die so genannten Matriarchen, spielen eine zentrale Rolle: Sie führen das Rudel durchs Gelände, gewährleisten Wettbewerbsfähigkeit und sozialen Zusammenhalt. Wenn Elefanten ihre Führerinnen verlieren und von Wilderern bedroht werden, machen sie sich auf die Wanderschaft. Tatsächlich löste das Abschlachten während der Bürgerkriege in Mosambik, Angola und anderswo den Exodus riesiger Herden aus. Die führungslosen Elefanten verlassen ihre Schutzgebiete, stoßen auf nahrhafte Anbauflächen, halten die armen Bauern, die sie verteidigen, für Wilderer und kämpfen um ihr Leben.

Schnelle Ausrottung

Im Jahr der Beschlagnahmung bat Sambia CITES um die Erlaubnis, sein gehortetes Elfenbein in einer einmaligen Aktion in den Fernen Osten zu verkaufen. CITES verweigerte das Ansuchen – unter anderem wegen des Verdachts, ein Teil des in Singapur entdeckten Elfenbeins stamme aus Sambia. Unsere Ergebnisse bestätigten den Verdacht.

Wie unsere Analysen erstmals zeigten, dezimieren die Wilderer gezielt eine bestimmte Population, um die aktuelle Nachfrage rasch zu befriedigen. Das widerspricht der gängigen Meinung, die Schmuggler würden die großen Lieferungen dezentral aus da und dort in Afrika vorhandenen Elfenbeinlagern zusammenstellen. Die Strafverfolgung kann sich nun auf die durch unsere Methoden identifizierten Brennpunkte konzentrieren.

Unsere Untersuchung der Funde vom Sommer 2006 in Taiwan und Hongkong zeigt, wie sehr die gegenwärtige Schlächtereie dem Gemetzel in den 1980er Jahren gleicht. Unseren DNA-Analysen zufolge kamen die Stoßzähne aus einem Gebiet um das Selous-Ökosystem in Tansania, das sich bis in das Niassa-Reservat



CORBIS/EPA/JOHAN HIRISA



JAPAN WILDLIFE CONSERVATION SOCIETY

Wenige Wochen nach den Razzien in Hongkong und Taiwan konfiszierten die Behörden in Osaka (Japan) 608 Stück unbearbeiteten Elfenbeins mit 2,8 Tonnen Gesamtgewicht. Da die Japaner keine Proben für die DNA-Analyse lieferten, lässt sich der Herkunftsort nicht exakt bestimmen. Die Beschriftung vieler Stoßzähne in Swahili (unten) weist auf Tansania hin, denn Swahili wird vor allem in Tansania und Kenia gesprochen.



im Norden Mosambiks erstreckt (siehe Kasten S. 82). Anscheinend ist Tansania erneut eine Brutstätte der Wilderei geworden. Dieses Land beherbergt den Serengeti-Nationalpark, den Gombe-Fluss, wo Jane Goodall ihre legendäre Schimpansenforschung betrieb, den Kilimandscharo sowie die weltberühmten Eastern Arc Mountains am Rand des Selous-Nationalparks mit mehr endemischen Arten pro Quadratkilometer als irgendwo sonst auf der Welt. 2006 beantragte Tansania bei CITES den Verkauf seiner Elfenbeinvorräte, zog den Antrag jedoch auf internationalen Druck wieder zurück.

Eine üble Gewohnheit

Offen bleibt, ob auch das in Osaka beschlagnahmte Elfenbein aus Tansania stammt. Während unser Labor die Proben aus Taiwan und Hongkong analysierte, schlossen die japanischen Behörden ihren Fall ab – immerhin den größten Elfenbeinschmuggel in der Geschichte Japans. 2007 sprach ein japanisches Gericht einen einzelnen Mann des versuchten Schmuggels aller 2,8 Tonnen für schuldig. Er erhielt eine Bewährungsstrafe und musste weniger als ein Prozent des vom Zoll geschätzten Endwerts bezahlen. Dann verbrannten die japanischen Behörden die Ware und machten eine DNA-Analyse unmöglich. Anfang 2007 erhielt Japan von CITES die Genehmigung, im nächsten Jahr Elfenbein aus einem legalen Verkauf zu erwerben.

Selbst wenn solche Verkäufe sorgfältig kontrolliert werden, bleiben sie problematisch.

Die bloße Existenz legaler Elfenbeinmärkte, besonders im Fernen Osten, beeinflusst die öffentliche Wahrnehmung und legitimiert die Elfenbeinmode. Legale Märkte absorbieren wahrscheinlich einen großen Teil der geschmuggelten Ware und bieten eine einfache Möglichkeit, den Rest reinzuwaschen. Nur so können hunderttausende Schnitzereien in den Einzelhandel gelangen.

Statt die afrikanischen Naturschutzbehörden glaubhaft zu unterstützen, legalisieren die Industrieländer geschmuggeltes Elfenbein. Afrikas Entwicklungsländer werden dadurch kriminellen Organisationen ausgeliefert, deren Macht auf der Nachfrage in reichen Ländern beruht. DNA-Analysen allein können das Abschlichten nicht beenden. Das Töten geht weiter: Am 9. März 2009 konfiszierten die vietnamesischen Behörden eine Schiffsladung von 6,2 Tonnen Elfenbein, das aus Tansania geschmuggelt worden war. Das ist die zweitgrößte Beschlagnahmung seit dem Handelsverbot.

Nach unserer Schätzung wurden allein im Jahr 2006 mehr als 38 000 afrikanische Elefanten wegen ihres Elfenbeins getötet. Allen Indizien zufolge wird seither nicht weniger gewildert; aus einigen Ländern wird sogar von einer Zunahme berichtet. Wenn der illegale Elfenbeinhandel nicht bald unter Kontrolle gebracht wird, geht Afrika ein Großteil seiner frei lebenden Elefanten für immer verloren. Das ist ein allzu hoher Preis für eine Ware, die vor allem die Eitelkeit befriedigt. ◀



Samuel K. Wasser (links) ist Biologieprofessor und Direktor des Center for Conservation Biology an der University of Washington. Er schuf und organisierte das Projekt, die Herkunft geschmuggelten Elfenbeins durch DNA-Analyse aufzuspüren. **Bill Clark** ist Gesetzeshüter bei der Israel Nature and Parks Authority; er leitet die Interpol Working Group on Wildlife Crime und die kriminalistische Arbeit im Rahmen des Projekts. **Cathy Laurie** forscht an der University of Washington über statistische Genetik; sie analysierte das in Taiwan und Hongkong beschlagnahmte Elfenbein. Zwei weitere Forscher leisteten wichtige Beiträge. Celia Mailand führte am Center for Conservation Biology sämtliche DNA-Laboranalysen durch. Matthew Stephens, Professor für Humangenetik und Statistik an der University of Chicago, entwickelte für das Projekt alle statistischen Methoden und die Software.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040560.

Wasserstoff – Treibstoff der Zukunft?

Fast schien es, als hätten Biokraftstoffe und Batterien ihre stärkste Konkurrenz – die lange als Hoffnungsträger gehandelten Brennstoffzellen – aus dem Markt der alternativen Antriebstechnologien gedrängt. Doch nun kündigt sich ein Comeback an.

Von Jeff Tollefson

»Das erste Auto, das ein in diesen Tagen geborenes Kind einmal fahren wird, könnte vollkommen schadstofffrei mit Wasserstoff angetrieben werden«, erklärte der damalige US-Präsident Georg W. Bush, als er 2003 eine mit 1,2 Milliarden Dollar geförderte Brennstoffzelleninitiative ankündigte. Ihr Ziel: marktreife Fahrzeuge bis zum Jahr 2020.

Eine ansprechende Idee. Diese Technik versprach mehr Unabhängigkeit von fremdem Öl, und aus dem Auspuff käme Wasser statt diverser Schadstoffe, insbesondere keine Treibhausgase. Das Vorhaben passierte problemlos den amerikanischen Kongress; das Energieministerium und andere Forschungseinrichtungen gingen an die Arbeit. Dann aber zogen Biokraftstoffe und batteriebetriebene Fahrzeuge alle Aufmerksamkeit auf sich, da beide Techniken versprachen, den Kohlendioxid ausstoß im Transportwesen schneller und billiger zu reduzieren.

Das Ende der Brennstoffzellentechnik schien besiegelt, als Steven Chu 2009 sein Amt als Energieminister antrat. Er brandmarkte vier ungelöste Probleme der Wasserstofftechnik. Die Autobauer suchten erstens immer noch nach einer Brennstoffzelle, die robust, haltbar und obendrein billig war, zweitens nach einer Möglichkeit, genug Wasser-

stoff für Langstrecken zu speichern. Man benötige drittens eine neue Infrastruktur für den Vertrieb von Wasserstoff. Und selbst wenn alle diese Hindernisse überwunden seien, mangle es an einer Technologie, Wasserstoff aus weitgehend CO₂-neutralen Quellen zu erzeugen statt wie bisher aus Erdgas. Im Mai 2009, vier Monate nach seiner Vereidigung, kündigte Chu an, die Forschungsgelder für Brennstoffzellenfahrzeuge im ersten Budget seines Ministeriums zu kürzen. Investitionen in Biokraftstoffe und Batterien seien lohnender. Auch manch ein Umweltschützer war erleichtert. Bushs Initiative werteten sie als Versuch, den Status quo einer erdölbasierten Mobilität durch ein Ablenkungsmanöver zu bewahren – durch die Fokussierung auf eine unerreichbare Alternative.

Doch die Kürzungen mobilisierten die Befürworter der Wasserstofftechnologie, und in den nächsten Monaten zeigte sich, dass die Debatte noch lange nicht vorbei war. Dank effektiver Lobbyarbeit erlitt der Energieminister im Kongress eine Niederlage, und die Fördermittel standen wieder zur Verfügung.

Am 9. September 2009 unterzeichneten neun wichtige Autohersteller – Daimler, Ford, General Motors, Honda, Hyundai, Kia, Renault, Nissan und Toyota – in Stuttgart eine gemeinsame Erklärung, bis 2015 Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Markt bringen zu wollen. Auf eine Initiative von Daimler hin

versprochen zudem Shell und das schwedische Unternehmen Vattenfall am Tag darauf, die notwendige neue Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland aufzubauen.

Die gedrosselte Knallgasreaktion

Nicht jeder begrüßt den neuerlichen Ansporn und findet so harsche Worte. »Das ergibt keinen Sinn«, meint beispielsweise Don Hillebrand, der Leiter des Center for Transportation Research am Argonne National Laboratory in Illinois. Doch die Verfechter der Brennstoffzellentechnologie strotzen nun vor Zuversicht. »Diese gemeinsame Absichtserklärung unterstreicht den Willen der Industrie, Fortschritte zu machen«, freut sich Klaus Bonhoff, der die Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NOW) leitet. Die Bundesregierung hatte diese Einrichtung 2008 ins Leben gerufen, um das

deutsche Wasserstoffprogramm weltweit an die Spitze zu bringen.

Wenn man die von Steven Chu aufgelisteten vier wichtigsten Herausforderungen genauer unter die Lupe nimmt, zeigt sich, dass tatsächlich beide Seiten gute Argumente haben: Einige der Schwierigkeiten sind schon beinahe gelöst, bei anderen steht die Forschung noch am Anfang.

Im Prinzip ist eine Brennstoffzelle einfach eine Vorrichtung, in der eine gedrosselte Knallgasreaktion stattfindet: Sauerstoff aus der Luft reagiert mit Wasserstoff aus einem Tank, jedoch ohne starke Hitzeentwicklung. Dabei gibt Letzterer ein Elektron ab, diffundiert durch eine Membran zum Sauerstoff und bildet mit ihm Wasser. Die Elektronen fließen gleichzeitig durch einen äußeren Stromkreis von der Wasserstoff- zur Sauerstoffseite – und treiben über einen Elektromotor Räder an.



BEIDE FOTOS: AIR PRODUCTS AND CHEMICALS, INC.

Kraftstoff, wann und wo immer er gebraucht wird – für die Vermarktung des Brennstoffzellenantriebs ist die fehlende Infrastruktur ein Problem (Fotos: ein GM Equinox an einer Wasserstofftanksäule auf Long Island).



»Es wird ganz bestimmt ein Auto sein, das sich viele Menschen leisten können«

Craig Scott, Toyota

Die Realität ist leider deutlich verzwickter. Um die chemische Reaktion kontrollieren und daraus Strom gewinnen zu können, ist eine komplizierte Anordnung aus Leitungen, Membranen, Katalysatoren und anderen Bauteilen notwendig. Und genau darin liegt die große Herausforderung: Wie verpackt man all dies zu einem leichten, billigen und robusten Gerät, das lange und verlässlich seinen Dienst verrichtet, darüber hinaus aber auch noch genügend Leistung bereitstellt, um ein Auto gemäß den Anforderungen des heutigen Verkehrs zu beschleunigen und obendrein alle jetzt schon in Fahrzeugen vorhandenen elektrischen Verbraucher zu versorgen, als da sind Beleuchtung, Sicherheitssysteme wie ABS, Klimaanlage, Radio und all die sonstigen Annehmlichkeiten, die ein Kunde heute von seinem Auto kennt?

Vor zehn Jahren schien dieses Ziel noch in weiter Ferne. Die Entwickler wagten es nicht einmal, ihre Versuchsfahrzeuge allzu kaltem Wetter auszusetzen, und verluden sie in geheizte Transporter. Sie fürchteten, in den Zellen verbliebener Wasserdampf könne gefrieren und die Eiskristalle würden dem empfindlichen Innenleben schaden.

Doch im Lauf der Zeit gab es bemerkenswerte Fortschritte. »Niemand rief: Hier ist der herausragende Durchbruch!«, kommentiert Byron McCormick, der bis Januar 2009 das Brennstoffzellenprogramm von General Motors leitete. »In Wirklichkeit war es eine Unmenge kleiner Schrittschritte.«

Das Problem mit dem kalten Wetter etwa lösten die Ingenieure von GM, indem sie das Abluftsystem der Zellen noch ein bis zwei Minuten nach dem Abschalten des Motors weiterlaufen ließen; die Resthitze verdrängte das Wasser aus dem System. Auch Toyota hat offenbar einen Weg gefunden: Sein Versuchsfahrzeug, eine Geländelimousine vom Typ Highlander, könne noch bei minus 37 Grad Celsius starten.

Teure Katalysatormaterialien, notwendig, um Wasserstoff in Elektronen und Protonen zu spalten, trieben die Preise in die Höhe. Inzwischen kommen Brennstoffzellen von General Motors mit ungefähr 80 Gramm Platin aus. Derzeit kostet das Edelmetall um die 40 Euro pro Gramm (Stand 15. Juli 2010), schlägt also bei den Gesamtkosten pro Zelle mit 3200 Euro zu Buche. Aber das Unternehmen verspricht, dank immer dünnerer Katalysatorschichten in der nächsten Brennstoffzellengeneration nur noch 30 Gramm Platin zu benötigen. Eine Strukturierung des Katalysators auf der Nanometerskala soll seine Oberfläche derart vergrößern, dass der Materialbedarf im Lauf des nächsten Jahrzehnts auf zehn

Gramm Platin sinkt – ein wichtiger Schritt hin zur Wettbewerbsfähigkeit.

Das amerikanische Energieministerium schätzt inzwischen, dass die Kosten für die Erzeugung von einem Kilowatt Strom durch Brennstoffzellen von 2002 bis 2008 um fast 75 Prozent gefallen sind. Das sollte sich in den Marktpreisen niederschlagen. Doch darüber reden die Firmen noch nicht gerne, höchstens darüber, dass sie Mitte dieses Jahrzehnts Fahrzeuge auf den Markt bringen werden, die sich gegen ihre Konkurrenten – mit Verbrennungsmotor, Hybrid- oder Batterieantrieb – behaupten können. »Ich mache das schon seit zehn Jahren, und die Zahlen überraschen sogar mich«, versichert Craig Scott, ein Manager der Toyota-Abteilung für neue Technologien in Torrance (Kalifornien). »Es wird ganz bestimmt ein Auto sein, das sich viele Menschen leisten können.«

Mitte vergangenen Jahres stiegen Ingenieure des Unternehmens gemeinsam mit Regierungsbeamten in zwei Brennstoffzellen-Highlander und legten damit 533 Kilometer auf öffentlichen Straßen zurück – mit nur einer Tankfüllung. Berechnungen zufolge hätten sie sogar 693 Kilometer weit kommen können, das wäre in etwa gleichauf mit der Reichweite eines Benziners.

Das einfachere Verfahren setzt sich durch

Vor zehn Jahren noch stand man ziemlich entmutigt vor der Frage der Wasserstoffspeicherung. Als Gas lässt er sich zwar relativ einfach in einem Drucktank speichern, doch der hätte entweder inakzeptabel groß oder ungewöhnlich stabil sein müssen – mit mehreren hundert Bar ließe sich Wasserstoff auf ein akzeptables Volumen verdichten. Eine Alternative ist flüssiger Wasserstoff, der eine viel höhere Dichte besitzt, doch den Raumgewinn erkaufte man sich mit der erforderlichen Kryotechnik und Tankisolation, denn das Gas wird erst bei minus 253 Grad Celsius flüssig. Auch dies hätte das Gewicht des Fahrzeugs vergrößert, seinen Aufbau komplizierter gemacht und den Preis nach oben schnellen lassen.

Letztlich machte die Druckspeicherung das Rennen, weil es das einfachere Verfahren ist. Die meisten Unternehmen verwenden kohlenstofffaserverstärkte Tanks, die einem Innendruck von 680 Bar standhalten und trotzdem vergleichsweise leicht sind. Um die Reichweite noch weiter zu erhöhen, statten die meisten Autobauer ihre Fahrzeuge außerdem mit einer Rekuperationsbremse aus, wie sie bei Hybridautos und Batteriefahrzeugen zum Einsatz kommt, um beim Bremsen elektrische Energie zurückzugewinnen.

Weil Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge Elektromotoren haben, nutzen sie vielfach die gleichen Technologien. Der einzige große Unterschied liegt im Energiespeicher: Brennstoffzelle beziehungsweise Batterie. Scott glaubt, dass Elektroautos mit Lithiumionenbatterien kaum über eine Reichweite von 150 bis 250 Kilometer pro Ladung hinauskommen werden. Dies genüge zwar für den Stadtverkehr, nicht aber für weite Strecken über Land. Deshalb könnte die Batterie zwar durchaus ihre Nischen finden, die größere Reichweite sichere langfristig aber dem Brennstoffzellenantrieb einen höheren Marktanteil.

Wie weit ein Fahrzeug auch kommen mag, irgendwann muss es wieder betankt werden. Geeignete Zapfsäulen lassen sich in bestehenden Anlagen nachrüsten, das ist vereinzelt schon geschehen. Auf den ersten Blick sehen sie kaum anders aus als konventionelle Systeme. Doch das Gas muss unter Hochdruck in die Tanks gefüllt werden. Da reicht es nicht, eine Zapfpistole in den Einfüllstutzen einzuhängen und der Schwerkraft den Rest zu überlassen. Kräftige Pumpen sind vonnöten, zudem eine gut abgedichtete Verbindung. Das alles gibt es bereits, und es hat sich in Praxistests als einfach und sicher erwiesen. Wenn Tanks aber bis zum Höchstdruck gefüllt werden sollen, müssen alle Komponenten perfekt arbeiten – noch schwankt die Leistung der Pumpen zu sehr.

Eine sehr wichtige Frage für die Autobauer ist, wie schnell das Wasserstofftankstellennetz aufgebaut wird. Und hier liegt das Henne-

und-Ei-Problem dieser Technologie: Ohne eine entsprechend dichte Infrastruktur scheuen die meisten Autofahrer vor dem Kauf eines Autos mit Brennstoffzelle zurück, andererseits fließt erst dann Kapital in den Aufbau eines solchen Netzes, wenn sich die Investition lohnt, wenn also bereits eine ausreichend große Fahrzeugflotte unterwegs ist.

In den USA gibt es derzeit nur einige Dutzend Wasserstofftankstellen (siehe Foto auf S. 87), und es scheint kaum koordinierte Anstrengungen zu geben, um daran etwas zu ändern. Und bis vor Kurzem sah es überall in der Welt ganz ähnlich aus.

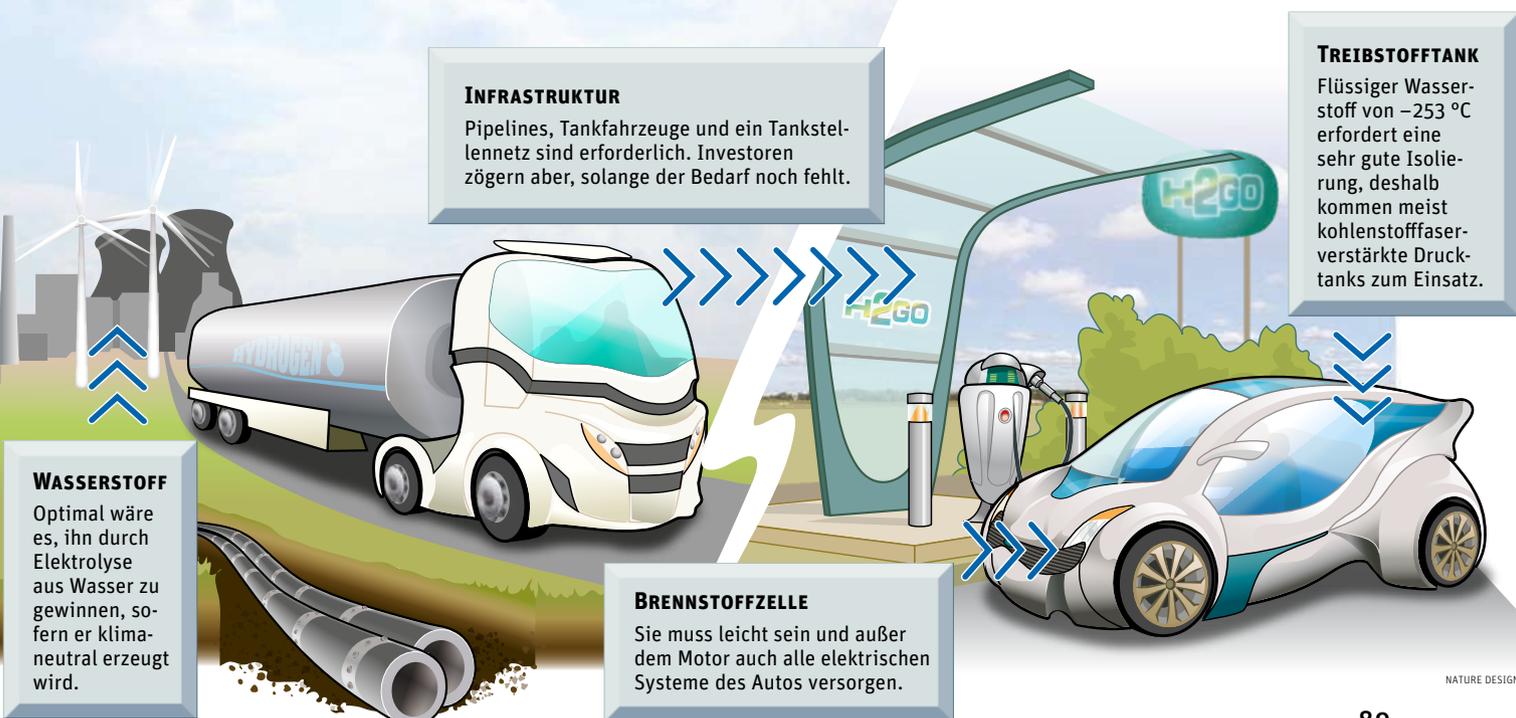
Perspektiven für die Infrastruktur

Das ist auch der Grund, warum Verfechter der erwähnten Übereinkunft in Deutschland eine so große Bedeutung beimessen. Die Automobilbauer haben die Fahrzeuge versprochen, und NOW will innerhalb weniger Jahre ein Netz von einigen hundert Tankstellen aufbauen, bis zu 1000 sollen es Ende des Jahrzehnts sein. Dies dürfte immerhin genügen, um Ballungszentren und Autobahnen mit dem neuen Sprit zu versorgen. NOW-Leiter Bonhoff zufolge liegen die Kosten für das Vorhaben im Bereich dessen, was Tankstellenbetreiber im gleichen Zeitraum für Wartung und Erneuerung der Benzin- und Dieselinfrastuktur ausgeben müssen.

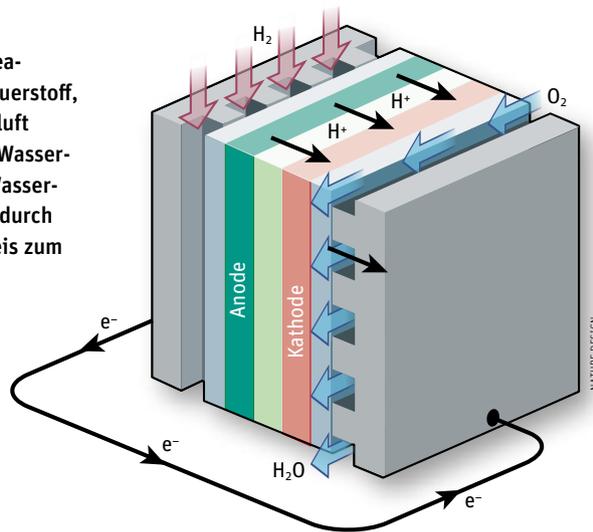
Charlie Freese, seit 2009 Leiter des Brennstoffzellenprogramms bei General Motors, vertritt die Ansicht, dass auch in größeren

Die Zukunft der Brennstoffzellenfahrzeuge hängt von Fortschritten in vier Bereichen ab: der Erzeugung und der Verteilung von Wasserstoff, dem Tanksystem im Fahrzeug und dem Kernelement des gesamten Konzepts – der Brennstoffzelle.

DIE HERAUSFORDERUNG WASSERSTOFF



In der Brennstoffzelle reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff, der aus der Umgebungsluft stammt, kontrolliert zu Wasserdampf. Dabei gibt der Wasserstoff Elektronen ab, die durch einen äußeren Stromkreis zum Elektromotor fließen.



Ländern, wie den Vereinigten Staaten, die Anwendungen in vergleichbaren Grenzen gehalten werden könnten. In einem frühen Einführungsstadium könnte das Los-Angeles-Becken mit 50 Tankstellen zu Gesamtkosten von ungefähr 200 Millionen US-Dollar versorgt werden. Mit etwa 11 000 Tankstellen wären die USA bis in abgelegene Gebiete versorgt. »Das würde ungefähr genauso viel kosten wie die Alaska-Gas-Pipeline.« Er spielt damit auf Planungen für ein 30 Milliarden Euro teures Projekt an, Erdgas aus dem Norden Alaskas zu den nordamerikanischen Märkten zu leiten.

Ausgangspunkt all dieser Entwicklung war und ist die Klimaproblematik (wobei auch das von manchen prophezeite baldige Ende billigen Erdöls eine Rolle spielt). Fragt sich nur, wie klimafreundlich man den Wasserstoff gewinnt. Im Augenblick ist Erdgas, das zu 90 Prozent aus Methan besteht, die billigste Quelle. Doch bei der als Reformierung bezeichneten Aufbereitung mit heißem Wasserdampf bildet sich im Zuge einer chemischen Reaktion Kohlendioxid; zudem entsteht es bei der Wasserdampferzeugung. Der Gesamtausstoß an klimaschädlichen Gasen ist bei einem Brennstoffzellenfahrzeug deshalb nicht per se geringer als bei einem konventionellen Benzinfahrzeug. Ohne weitere Maßnahmen wird lediglich der Ort der Emissionen verlagert.

Teurer ist die Elektrolyse, bei der Wasser durch elektrischen Strom in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird. Vattenfall sieht darin seine Chance. Das Unternehmen baut in Hamburg ein Windkraftwerk, das Stromüberschuss für die Wasserstoffproduktion nutzt. Auf diese Weise lösen die Ingenieure das Problem schwankender Windstärken; das Brenngas speichert in Hochzeiten die elektrische Energie, die den Bedarf der Stromverbraucher übersteigt. Die anfallende Gas-

menge soll genügen, eine Flotte von 20 Bussen zu versorgen.

Die Kosten dafür sind allerdings immer noch zu hoch, räumt Oliver Weinmann ein, der Leiter Innovationsmanagement bei Vattenfall Deutschland. Der Kilogrammpreis wird in Hamburg drei bis vier Euro betragen. Wasserstoff aus Erdgas kostet aber nur zwei Euro. Doch da Europa die Verwendung von erneuerbaren Energien im Lauf des nächsten Jahrzehnts ausbauen möchte, warnt Charlie Freese: »Es stellt sich nicht die Frage, ob wir uns die Wasserstoffinfrastruktur leisten können, sondern ob wir es uns leisten können, darauf zu verzichten.«

Nicht jeder lässt sich von solchen Argumenten überzeugen. Selbst wenn es die Automobilbauer schaffen, bis 2015 ihre Brennstoffzellenfahrzeuge auf den Markt zu bringen, wird es Jahre dauern, einen Kundenstamm aufzubauen, die Produktionszahlen zu erhöhen und die Fertigungskosten zu senken. Nur wenige Unternehmen werden bis 2020 oder gar 2025 in diesem Sektor Profite erwirtschaften. Deshalb fahren die Hersteller mehrgleisig und treiben gemeinsam mit Energieversorgungsunternehmen auch Biotreibstoffe und batterieelektrische Fahrzeuge voran. Allerdings erfordern auch die jeweils ihr eigenes Verteilungssystem, und all diese Infrastrukturen gleichzeitig aufzubauen, dürfte illusorisch sein.

Ford hat das Brennstoffzellenfahrzeug deshalb als langfristiges Ziel definiert, beschränkt sich derzeit auf die Forschung und verzichtet auf konkrete Produktpläne. Und BMW treibt momentan Autos mit konventionellen Verbrennungsmotoren voran, die sowohl mit Wasserstoff als auch mit Benzin betrieben werden können.

Manche Befürworter der Wasserstofftechnologie malen für die Zukunft ein vielfältiges Szenario, bei dem Elektrofahrzeuge mit Batterien die Kurzstrecken in Ballungsräumen bewältigen, solche mit Wasserstoffantrieb die Langstrecken. John Heywood, Direktor des Sloan Automotive Lab am MIT in Cambridge, glaubt ohnehin, dass die ersten Fahrzeuge Prototypen sein werden, mit denen die Leistung in der Praxis und nicht zuletzt die Reaktion der Kunden getestet werden kann. Toyota verfolgte diesen Ansatz 1997 mit seinem Hybridfahrzeug Prius. Es könnte drei oder mehr Jahrzehnte dauern, um weltweit das Automobil auf elektrisch angetriebene Räder zu stellen, so glaubt Heywood, und das sei der Zeitrahmen, in dem Autobauer derzeit denken. »Sie werden in Batterien und Brennstoffzellen investieren, bis klar ist, welche Technik der anderen überlegen ist. Heute aber kennt auf diese Frage noch niemand die Antwort.«



Jeff Tollefson arbeitet als Reporter für »Nature« in Washington D. C.

© Nature Publishing Group
www.nature.com/nbt
 Aktualisierte und erweiterte Fassung eines Artikels aus: Nature 464, S. 1262–1264, 29. April 2010.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040561.

Abschied vom eigenen Tank

Gegen begrenzte Reichweiten und lange Ladezeiten setzen Ingenieure auf ausgetüftelte Wechselkonzepte und betankbare chemische Batterien.

Von Bernd Müller

Wer schon mal ein Elektroauto fahren durfte, schwärmt vom geräuschlosen Dahingleiten und vom enormen Drehmoment schon beim Anfahren. Dennoch steht die Elektromobilität noch in den Startlöchern, denn viele Autofahrer fürchten auf längeren Strecken mit leerer Batterie liegen zu bleiben. Tatsächlich kommen aktuelle Elektroautos, wie sie etwa im E-Mobility-Pilotversuch durch Berlin kreuzen, mit einer Ladung nur etwa 135 Kilometer weit.

Das wäre zwar genug für mehr als 80 Prozent der deutschen Autofahrer, die pro Tag weniger als 55 Kilometer zurücklegen. Doch die psychologische Barriere bleibt: Laut einer Studie von Aral fordern die potenziellen Kunden eine Reichweite von mindestens 300 Kilometern. Überdies wären sie allenfalls bereit, maximal 2000 Euro mehr für die umweltfreundliche Technik zu investieren. Auch davon sind Elektroautos noch weit entfernt – der Batteriepack kostet derzeit rund 15000 Euro zusätzlich. Das liegt am vergleichsweise geringen Energieinhalt: In 100 Kilogramm einer Lithiumionenbatterie steckt die Energie von fünf Litern Benzin, allerdings ist der Wirkungsgrad eines Elektromotors erheblich höher.

Revolutionäre Sprünge sind nicht zu erwarten. Die Lithiumionentechnik bleibt das Maß der Dinge, wird zwar verbessert, dürfte aber auch langfristig nicht die Reichweite und das geringe Gewicht eines herkömmlichen Benzintanks bieten. Lautet die Devise also: Wenn die Batterie zu wenig Kapazität hat, muss sie eben öfter geladen werden? Zigtausende öffentliche Stromzapfsäulen wären dazu nötig. Hinzu kämen Steckdosen in privaten Garagen, sofern vorhanden: Etwa 40 Prozent

der Fahrzeughalter haben an ihrem Stellplatz keinen Zugang zum Stromnetz.

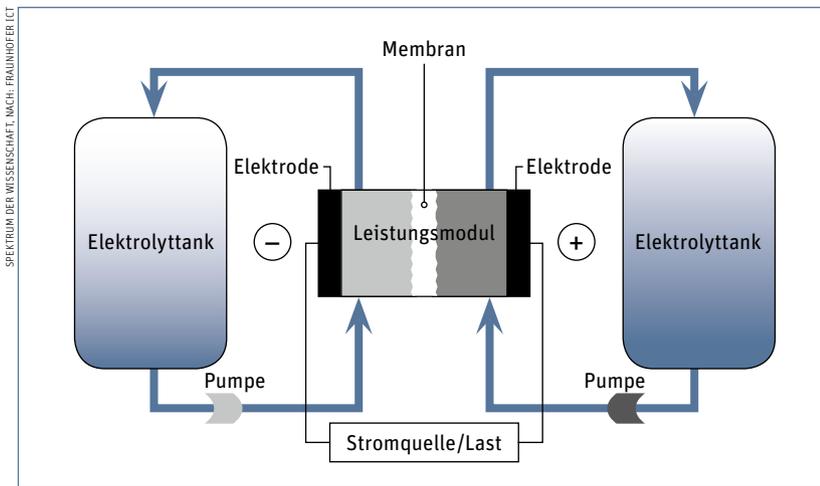
Vor allem aber beträgt die Ladezeit bis zu acht Stunden. Wird der Vorgang beschleunigt, verliert man Kapazität, da mit dem dann höheren Ladestrom leider auch Alterungsprozesse verstärkt werden. Eine Urlaubsfahrt von Flensburg an den Bodensee würde so mit einem Elektroauto wahrscheinlich zu einer mehrtägigen Geduldsprobe. Wie soll dann das Ziel der Bundesregierung erfüllt werden, die bis 2020 eine Million Elektroautos – das wäre jedes 50. Fahrzeug – auf Deutschlands Straßen sehen möchte?

Batterie, wechse dich!

Ein interessantes Konzept ist »Better Place«, erdnen von der kalifornischen Firma gleichen Namens. Es sieht zum einen ein dichtes Netz aus öffentlichen und privaten Ladesta-

Strom aus der Zapfsäule ist ein Teil des Better-Place-Konzepts, ein anderer das Auswechseln einer gemieteten Batterie an einer vollautomatischen Station.





Das Redoxflow-System ist eine modular aufgebaute, chemisch wieder aufladbare Batterie.

tionen in Ballungsräumen vor, wobei auf 2,5 Fahrzeuge eine solche Station kommen soll. Das Herzstück des Konzepts aber sind Wechselstationen, die leere Batterien in nur zwei Minuten gegen volle tauschen – vollautomatisch, denn so ein Akkupack wiegt etwa zwei Zentner. Die leeren Batterien kommen zum Aufladen in ein Lager.

Das Better-Place-Konzept erfordert vom Kunden freilich ein Umdenken. Insbesondere statusbewusste Autofahrer könnten sich daran stören, dass ein Teil ihres Fahrzeugs »nur« gemietet ist. Doch das hat auch Vorteile: Gibt die Batterie ihren Geist auf, muss sich das Unternehmen darum kümmern und nicht der Kunde. Der bezahlt lediglich eine Pauschale pro gefahrenem Kilometer, im Preis sind die Gebühren für Batterietausch und Abnutzung schon eingerechnet.

Das Elektroauto als mobiler Stromspeicher

Das Ganze wird derzeit in Pilotprojekten in Israel und Dänemark getestet, und auch in Tokio gibt es neuerdings eine Wechselstation für Taxis. Dänemark ist deshalb so interessant, weil Better Place zudem Teil eines intelligenten Stromnetzes (Smart Grid) sein soll und das Land 20 Prozent des Stroms aus Windkraft gewinnt. Smart Grids sollen eines der dringendsten Probleme regenerativer Energieerzeugung lösen: dass elektrische Energie oft dann nachgefragt wird, wenn keine Sonne scheint oder der Wind nicht weht, und die entsprechenden Anlagen zu anderen Zeiten mehr Strom erzeugen, als die Versorgungsnetze gerade abnehmen können. Das Better-Place-Konzept sieht vor, dass die Leihbatterien Strom zwischenspeichern, also bei Bedarf wieder ins Netz speisen, während die Fahrzeuge an der Steckdose hängen. Vor allem die Wechselstationen könnten größere Energiemengen puffern und so die Attraktivität

grünen Stroms steigern. Ein Kontrollzentrum zapft die mobilen Speicher gezielt an und erstellt die Abrechnung, denn natürlich hat ein Kunde Anrecht auf eine Vergütung, wenn sein Auto gerade als Netzspeicher gedient hat.

Technologisch ist das Verfahren einsatzreif, doch bis die Infrastruktur flächendeckend aufgebaut ist, dürften noch etliche Jahre vergehen. Das eröffnet Chancen für eine konkurrierende Technologie, die so genannte Redoxflow-Batterie. Sie besteht aus einem Stapel Keramikzellen, durch die zwei Elektrolyte fließen. Chemische Redoxvorgänge setzen Ionen in Bewegung, und durch eine Membran fließt elektrischer Strom. Das erinnert an das Prinzip der Brennstoffzelle, doch bei der Redoxflow-Batterie wird nichts verbraucht, es kommt lediglich zu einem Ausgleich der Konzentration von Ladungsträgern in den zwei Flüssigkeiten. Der Prozess lässt sich umkehren, indem man eine Spannung an den Stapel anlegt. Der Nachteil: Auch das dauert etliche Stunden. Der Vorteil: Weil es sich um Flüssigkeiten handelt, lassen sich Autos wie bisher minutenschnell mit neuer Elektrolytlösung betanken, wobei allerdings zwei Tanks befüllt werden müssen.

Der Besitzer eines Elektroautos mit Redoxflow-Batterie hätte also die Wahl – er könnte sie wie jede andere Batterie an einer Steckdose aufladen oder an einer Tankstelle frische Elektrolyte tanken. Die Flüssigkeiten würden dort regeneriert und stünden wieder zur Verfügung; der chemische Vorgang ist in beiden Fällen gleich. Wie bei Better Place wäre eine solche Elektrolyttankstelle ein geeigneter Energiepuffer in einem intelligenten Stromnetz. Und genau dafür wird die Technologie auch entwickelt. So bauen drei Fraunhofer-Institute derzeit Anlagen mit Leistungen bis zu einigen Megawatt, die, in kleineren Hallen untergebracht, Sonnen- und Windstrom speichern, um zum Beispiel kleinere Betriebe ökologisch korrekt mit Strom zu versorgen.

Fürs Auto ist das allerdings noch nicht einsatzreif. Dafür müsste die Energiedichte der Elektrolyte ein Mehrfaches als derzeit betragen, denn allein schon um es mit der Reichweite einer Lithiumionenbatterie aufnehmen zu können, wäre ein 1000-Liter-Tank nötig. Neue Mixturen dürften dieses Problem lösen, doch Jens Tübke vom Fraunhofer-Institut für Chemische Technologien in Pfaffenhofen rechnet erst in fünf bis zehn Jahren mit der Einsatzreife im Straßenverkehr. Die Politik sieht offenbar Potenzial: Baden-Württemberg fördert die Redoxflow-Forschung in den nächsten zwei Jahren mit 1,5 Millionen Euro. <

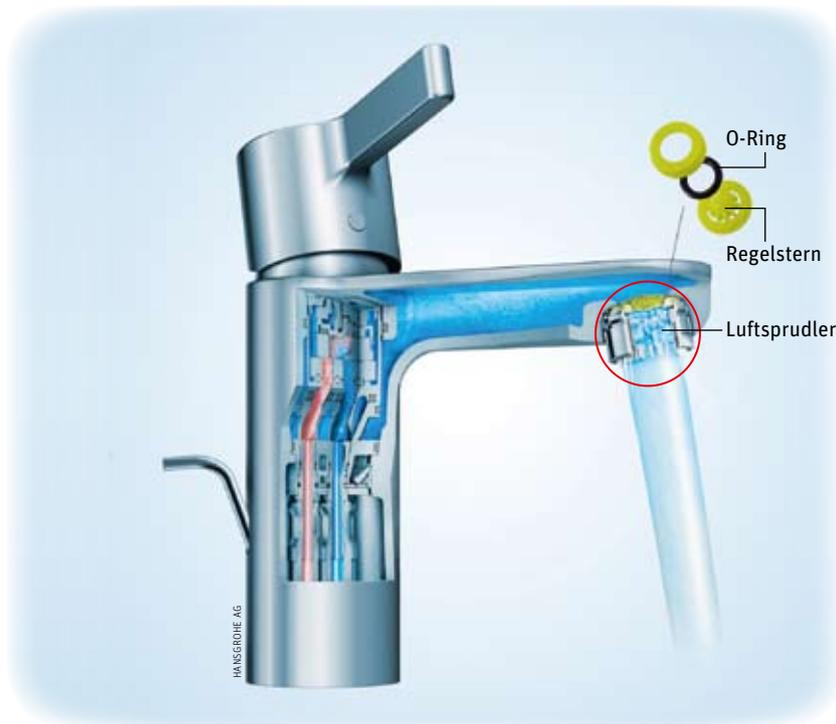


Bernd Müller ist Wissenschaftsjournalist in Esslingen.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1040560.

Helfen manche Armaturen wirklich beim Wassersparen?

Die Wissenschaftsjournalistin Katja Bammel ist der Frage nachgegangen.



Haben auch Sie eine Frage zur Wissenschaft im Alltag?

Dann schreiben Sie an:

redaktion@spektrum.com

Damit nicht unnötig viel Wasser aus dem Hahn strömt, begrenzen Regelstern und O-Ring den Durchfluss, während Luftbeimischung durch den Luftsprudler dennoch den Eindruck von Fülle vermittelt.

Viel trinken, lautete die Devise in der sommerlichen Hitzewelle, und der Verbrauch zog merklich an. Dennoch war trotz allen Schwitzens ein bewusster, sparsamer Umgang mit Trinkwasser angebracht: um die kostbare Ressource zu schonen, aber auch, um den eigenen Geldbeutel zu entlasten. Denn gut zwei Euro pro Kubikmeter kostet Trinkwasser in Deutschland; wird es zum Waschen verwendet, fällt etwa der gleiche Betrag für das Abwasser an. Das Thema wird seit einigen Jahren intensiv verfolgt. Wasser sparende Techniken bei Waschmaschinen, Geschirrspülern und Toilettenspülungen sowie angepasstes Verhalten wie Duschen statt Baden haben daher den täglichen Bedarf in deutschen Haushalten seit 1990 um 16 Prozent auf rund 130 Liter pro Person reduziert, davon entfallen rund 50 Liter auf die Körperhygiene.

Gerade dort gibt es noch Sparpotenzial, da so mancher Liter ungenutzt in den Abguss strömt. Denn um auch obere Stockwerke ausreichend zu beliefern, speisen Wasserwerke das Nass mit einem Druck von bis zu zehn Bar in die Leitungen ein. Aus einer Standardbadezimmerarmatur fließen aber schon bei drei Bar gut 15 Liter pro Minute, obwohl zum Händewaschen sechs und zum Duschen neun Liter pro Minute genügen würden.

Zwar lässt sich der Durchfluss mit Wasserhähnen oder Einhebelmischern begrenzen, doch diese eher grobe Regulierung erfordert viel Disziplin. Integrierte Mengenregler – Stichwort: Wasser sparende Armaturen – reagieren hingegen eigenständig. Eine ty-

pische Ausführung besteht aus einem O-Ring, der um einen mehrzackigen Regelstern liegt. Liegt kein Wasserdruck an, hat der Ring seine ursprüngliche Gestalt, zwischen ihm und den Zacken des Sterns bleiben Zwischenräume offen. Wird der Hahn jedoch geöffnet, verformt der wachsende Fließdruck den elastischen O-Ring und presst ihn immer stärker gegen die Sternwandung. Dadurch wird der freie Weg verengt.

Die Durchflussleistung ist bei dieser Art der Regulierung durch das Profil des Sterns und die Elastizität des O-Rings vorgegeben. Mengenregler in Waschbeckenarmaturen sind meist für eine konstante Abgabe von sechs Litern pro Minute ausgelegt. Befürchtungen, vor allem beim Duschen ginge der Spaß verloren, begegnen die Hersteller durch eine Beimischung von Luft. Luftsprudler, auch Strahlregler genannt, basieren auf Beobachtungen von Giovanni Battista Venturi und Daniel Bernoulli im 18. Jahrhundert: Strömt ein inkompressibles Fluid – unter Normalbedingungen zählt Wasser dazu – in ein sich verengendes Rohr, erhöht sich seine Geschwindigkeit, während aus Gründen der Energieerhaltung der Druck abfällt. Letzteres sorgt dafür, dass durch seitliche Schlitze Luft angesaugt und mit dem Wasser verwirbelt wird, was den Strahl voluminöser und weicher macht.

Katja Bammel ist Wissenschaftsjournalistin und lebt im italienischen Cagliari auf Sardinien.

Der Koloss von Bletchley Park

»Colossus« war ein absolutes Meisterwerk der Technik, für den Erfolg der Briten im Zweiten Weltkrieg von überragender Bedeutung, geheimnisumwittert und dramatisch – aber kein Computer im heutigen Sinn.

Neben den Deutschen (Konrad Zuse, der in diesem Sommer 100 Jahre alt geworden wäre, mit der Z3 von 1941) und den Amerikanern (J. Presper Eckert und John W. Mauchly mit dem ENIAC von 1942) beanspruchen auch die Briten für sich den Ruhm, den ersten Computer der Welt gebaut zu haben. Nun – ohne Zweifel war »Colossus« (1943/44) eine der ersten Rechenmaschinen der Welt. Zehn Exemplare wurden gebaut, das elfte blieb unvollendet – der Untergang des Deutschen Reichs machte die Maschine überflüssig.

In »Colossus: The Secrets of Bletchley Park's Codebreaking Computers« beschreiben der Herausgeber Jack Copeland und weitere 30 Autoren die kryptografische Arbeit der Experten, welche die britische Regierung während des Zweiten Weltkriegs in Bletchley Park bei London versammelt hat-

te. Schon seit 1939 hatten die Briten verschlüsselte Nachrichten der deutschen Wehrmacht gesammelt. Für ihre – letztlich kriegsentscheidende – Dekodierung wurden verschiedene elektronische Rechner gebaut: die »Bombe« von Alan Turing (1939), die »Heath-Robinson« (1943) und eben »Colossus«, in der Tat ein kolossales Gerät, das eine für die damalige Zeit sehr große Anzahl von Komponenten enthielt.

Über die Maschine war jahrzehntelang nichts bekannt. Bau und Struktur wurden auch nach dem Krieg geheim gehalten. Erst 1975 wurden einige Fotografien von Colossus veröffentlicht, und 1983 bekam der Hauptentwickler, Tommy Flowers, endlich die Erlaubnis, über die Hardware der Maschine zu reden.

Die Kryptografen in Bletchley Park waren rund um die Uhr damit beschäftigt, die ver-

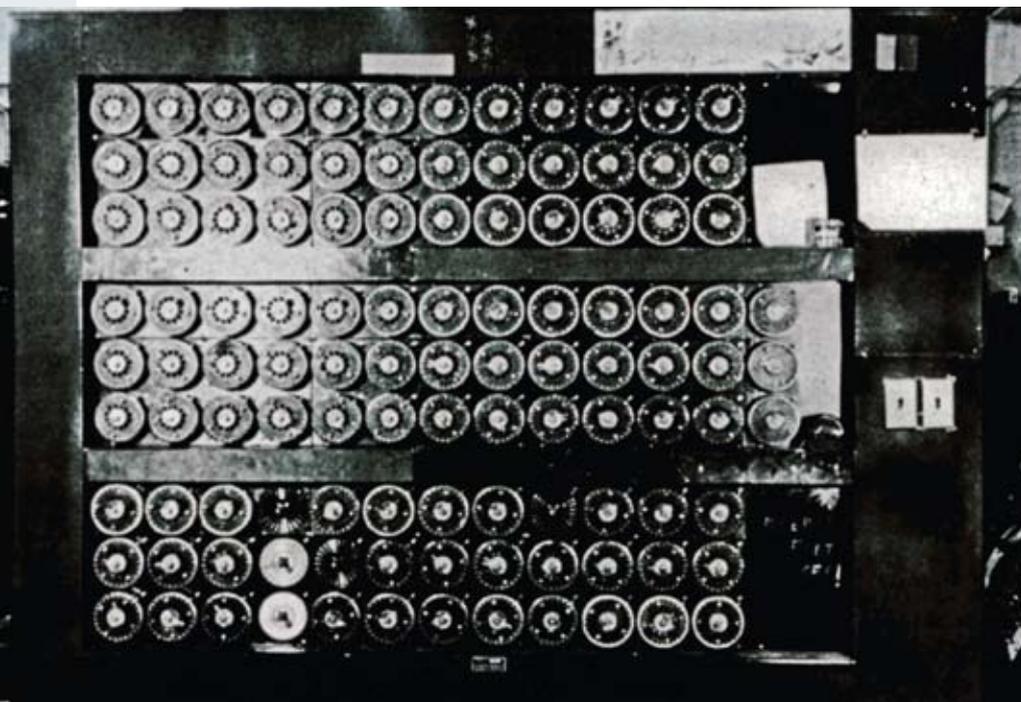
schiedenen Verschlüsselungsmaschinen der Luftwaffe, des Heers und der Marine zu verstehen und ihre Codes zu entziffern (Spektrum der Wissenschaft 6/1999, S. 26). Während Turing sich auf die Enigma und deren Varianten konzentrierte, leitete Flowers das Team, das die Nachrichten der Lorenz SZ40 letztendlich lesbar machte. Im Unterschied zu Enigma-Maschinen, die Nachrichten verschlüsselten, aber nicht direkt übertragen konnten, arbeiteten die Lorenz-Maschinen vollautomatisch: Der Operator tippte die Nachricht auf eine Tastatur, die Botschaft wurde mit Hilfe von zwölf rotierenden Rädern verschlüsselt, per Funk übermittelt und am anderen Ende automatisch entschlüsselt und im Klartext wiedergegeben. Die Verschlüsselung bestand im Grunde darin, jedes Bit des in eine Bitfolge umgewandelten Klartexts durch die Operation XOR (ausschließliches Oder) mit dem zugehörigen Bit einer pseudozufälligen Bitfolge zu verknüpfen. Beim Empfänger wurde dieselbe pseudozufällige Sequenz mit dem Chiffretext verknüpft, wodurch der Klartext wiederhergestellt wurde, da zwei XOR-Operationen mit demselben Schlüssel sich aufheben.

Da die Briten relativ früh die innere Struktur der Lorenz SZ40 aufgedeckt hatten, mussten sie für die Entschlüsselung eines konkreten Texts lediglich alle möglichen Anfangskombinationen der zwölf Kodierungsräder testen. Eine von ihnen erzeugte dieselbe pseudozufällige Bitfolge wie der Sender und damit den Schlüssel. Die deutschen Entwickler waren davon ausgegangen, dass ein solcher »brute force«-Ansatz Jahre manueller Arbeit kosten würde. Sie hatten aber nicht mit dem Einsatz von blitzschnellen elektronischen Maschinen gerechnet. Die verschiedenen Kapitel des Buchs behandeln alle Stufen dieses Verfahrens: von der kryptografischen Grundlage bis hin zu der Struktur der Rechenmaschinen und ihrem konkreten Einsatz.

Im Unterschied zu dieser eher akademischen Abhandlung ist Paul Gannons Werk »Colossus – Bletchley Park's Greatest Secret« ein spannender Krimi. Der Text folgt der Chronologie des Kriegs aus der Sicht der Bletchley-Park-Kryptologen. Man erfährt viel über die Persönlichkeiten, die Träume und Niederlagen der manchmal introvertierten Wissenschaftler. Verglichen mit der Fabriketage von Zuse im – immerhin bombardierten – Berlin-Kreuzberg oder der Abgeschiedenheit und Sicherheit von Philadelphia, wo der ENIAC gebaut wurde, ging es in Bletchley Park filmreif zu. Die Hauptakteure beim »Colossus« sind extravagante



Das ist die »Bombe«, das sagenumwobene Gerät, mit dem vor allem der geniale Mathematiker Alan Turing den geheimen Bletchley Park in eine kodebrechende Fabrik verwandelte. Die damit entschlüsselten Nachrichten halfen insbesondere im Krieg gegen deutsche U-Boote.



Wissenschaftler, die nächtelang über Geheimcodes brüten, Elektroniker, die viel Zeit mit Schach verschwenden, und Geheimagenten, die auf der Suche nach Verschlüsselungsmaschinen allerorts unterwegs sind. Kein Wunder, dass über Bletchley Park und seine exzentrischen Bewohner bereits Filme gedreht worden sind («Enigma», 2001). Aber so schnell wie das Entschlüsselungszentrum auf die Beine gestellt wurde, so schnell verschwanden alle Experten, als der Krieg zu Ende war. Sie gingen an die Universitäten und bauten die britische Computerindustrie auf.

War nun Colossus der erste elektronische Computer der Welt, wie Jack Copeland behauptet? Man kann diese Frage kaum bejahen. Colossus war schnell, elektronisch, sicherlich eine Meisterleistung. Aber er konnte nur eine spezielle Aufgabe lösen, nämlich Anfangskonfigurationen der Räder der Lorenz-Maschinen testen. Die verschlüsselte Botschaft wurde in einem Lochstreifen gespeichert und dieser zu einer Schleife zusammengeklebt. Colossus las diese Botschaft immer wieder, indem er die Schleife durchlaufen ließ, und kombinierte sie per

XOR mit einer neuen, synchron erzeugten Pseudozufallsfolge. Wenn er die richtige Anfangskonfiguration – und damit Pseudozufallsfolge – gefunden hatte, ergab sich der Klartext. Wenn es fast die richtige Kombination war, dann waren die Häufigkeiten der so erzeugten Zeichen nicht ganz gleichverteilt, sondern den statistischen Eigenschaften eines Klartextes schon etwas näher. Mit Hilfe dieses Merkmals konnten die Operateure, durch eine Kombination von elektronischem Rechnen und manueller Arbeit, die Position der zwölf Räder der Lorenz-Maschine nach und nach erraten. Man konnte auch zur Beschleunigung der Entschlüsselung mehrere Colossus-Maschinen parallel an demselben kodierten Text arbeiten lassen.

Colossus war nicht in der Lage, arithmetische Operationen nach Vorgabe eines beliebigen Programms auszuführen. Die Maschine war nicht universell. Nur wegen der enthaltenen Elektronik, der ausgefeilten logischen Schaltkreise und der enormen Geschwindigkeit zählen wir sie heute zu den Urahnen des Computers.

Die zwei vorliegenden Bücher sind nach meiner Auffassung die besten Quellen über

diese wichtige Entwicklung am Anfang der Computertechnik. Bloß die Artikel von Tommy Flowers in »Annals of the History of Computing« müsste man noch zur Hilfe nehmen, um die Struktur der Maschine komplett zu verstehen.

Beide Bücher machen obendrein deutlich, wie ein Land durch anspruchsvolle Literatur sein kulturelles Erbe retten kann. In diesen Büchern lebt Colossus fort!

Raúl Rojas

Der Rezensent ist Professor für künstliche Intelligenz an der Freien Universität Berlin.

B. Jack Copeland et al.

Colossus

The Secrets of Bletchley Park's
Codebreaking Computers

Oxford University Press, Oxford 2010.
480 Seiten, € 11,99

Paul Gannon

Colossus

Bletchley Park's Greatest Secret

Atlantic Books, London 2007.
592 Seiten, € 12,99

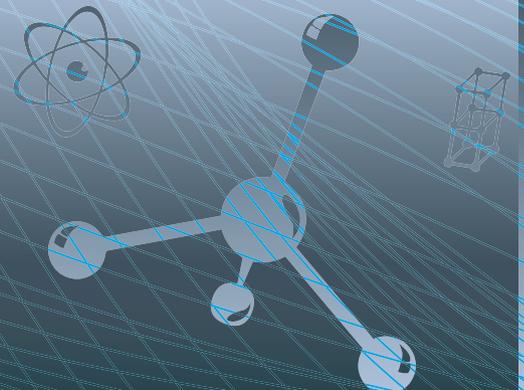
Anzeige

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft

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

- alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Bonusartikel aus den Magazinen des Verlags – und das Archiv mit allen Bonusartikeln
- ausgewählte Ausgaben anderer Zeitschriftentitel aus dem Programm der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH als kostenlose Downloads
- ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält
- das **spektrumdirekt**-Premiumabo sowie das »Produkt des Monats« – jeweils zum exklusiven Vorteilspreis
- unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus



PALÄONTOLOGIE

Der kochende Affe

Was macht den Menschen zum Menschen? Das Lagerfeuer, behauptet Richard Wrangham.

Rohkostler sind ziemlich arm dran, behauptet der amerikanische Primatenforscher und Paläoanthropologe Richard Wrangham. Schimpansen beispielsweise ernähren sich in erster Linie von Blättern und Waldfrüchten. Der Nährstoffgehalt dieser Nahrung ist allerdings gering, und sie ist dermaßen zäh und schwer verdaulich, dass die Schimpansen jeden Tag allein sechs Stunden damit beschäftigt sind, sie zu zerkaue. Weitere drei bis vier Stunden müssen sie für Verdauungspausen und -nickerchen aufwenden. Bonobos, Gorillas und Orang-Utans machen es nicht wesentlich anders.

Ganz ähnlich würde es dem Menschen ergehen, wenn er den typischen Rohkostspeiseplan der Menschenaffen einhielte; und wenn er sich fast ausschließlich von rohem Fleisch ernähren würde, müsste er sogar fast rund um die Uhr darauf herumkaue. Tatsächlich erledigt ein Mensch Vergleichlichen mit einem Menschenaffen das Kauen in einem Fünftel bis Zehntel der Zeit. Zu verdanken habe das der *Homo sapiens* seinem Vorfahren *Homo erectus*, der vor 1,9 oder 1,8 Millionen Jahren auf den Plan getreten ist. Der habe nämlich, so Wrangham, damals das Feuer gezähmt und das Kochen erfunden. Diese Erfindung habe weit reichende Auswirkungen auf die Evolution des *Homo sapiens* gehabt, indem sie zum einen viel Zeit ersparte, zum anderen eine beträchtliche Steigerung der Kalorienzufuhr ermöglichte. Der Mensch – sagt Wrangham – ist nichts anderes als ein kochender Affe.

Das Kochen von Nahrungsmitteln bewirkt, dass dem Körper eine größere Energiemenge zugeführt und ein geringerer Anteil unverdaut ausgeschieden wird. Durch das Erhitzen kommt es nämlich zu einer Art Vorverdauung. Das hat wiederum zur Folge, dass die eigentliche Verdauung, bei der sonst ungeheuer viel Energie verbraucht wird, erheblich erleichtert und beschleunigt wird. Laut Wrangham erklärt sich so auch, warum Menschen so leicht Fett ansetzen und die Hunde und Katzen, die industriell gegartes Futter vorgesetzt bekommen, es ihnen gleichtun.

Das Kochen lässt außerdem Gifte zerfallen, tötet Krankheitserreger ab, hat eine konservierende Wirkung und macht etliche

Nahrungsmittel überhaupt erst genießbar. Wrangham vermutet, dass der *Homo erectus* als erster Hominide in andere Klimazonen vordringen konnte, weil er sich von Anfang an diese Vorteile des Gekochten zu Nutze machte. Aber das ist bei Weitem noch nicht alles. Erst dadurch, dass die externe Vorverdauung Kapazitäten im Verdauungssystem entbehrlich machte und dieses daraufhin schrumpfte – kleiner Mund, schwache Kiefermuskeln, winzige Mahlzähne, extrem kurzer Dickdarm –, konnte der Mensch sich ein so gigantisches und extravagantes Organ wie das Gehirn leisten, das immerhin 20 Prozent der gesamten Energie des Körpers für sich in Anspruch nimmt.

Es ist nicht eine einzige menschliche Gesellschaft bekannt, in der nicht regelmäßig

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

gekocht worden wäre. Selbst die als Rohfleischesser verschrienen Inuit haben in Wahrheit jeden Abend eine warme Mahlzeit zu sich genommen. Doch seit wann es die Praxis des Kochens und der kontrollierten Feuerverwendung gibt, ist nach wie vor nicht geklärt. Verkohlte Holzstücke, Feuersteine und Samen, auf die man im nördlichen Israel gestoßen ist und die als die frühesten eindeutigen Belege für die Beherrschung des Feuers gelten, sind etwa 790 000 Jahre alt und damit immer noch eine Million Jahre zu jung für Wranghams Theorie. In verschiedenen Teilen Afrikas hat man verrußte Steinwerkzeuge, verbrannte Lehmbröckchen, angekohlte Tierknochen und verfärbte Erdflecken mit einem Alter von bis zu 1,5 Millionen Jahre entdeckt – was auch auf einen gewöhnlichen Buschbrand zurückgehen könnte. Doch Wrangham sieht solche Funde unbeirrt als Indizien für seine Theorie.

An der Anatomie des *Homo erectus* lässt sich ablesen, dass er ein schlechter Kletterer gewesen sein muss und daher, so Wrangham, nicht mehr auf Bäumen, sondern auf dem Boden schlief. Das ist jedoch für Primaten derart riskant, dass nur ausgewach-

sene männliche Gorillas es wagen. Also müsse schon der *Homo erectus* im Stande gewesen sein, sich nachts mit Feuer die Raubtiere vom Leib zu halten. Außerdem habe er sein Fell entbehren und zum nackten Affen werden können, weil er sich nachts am Feuer wärmen konnte. Das Feuer machen selbst sei nicht übermäßig schwierig gewesen: Beim Umgang mit Steinwerkzeugen fliegen genügend Funken, und etwas trockenes Gras oder Zunderschwamm zum Anzünden ist in der Steppe stets zur Hand.

Im Gegensatz zu den anderen Primaten hat der Mensch einen äußerst empfindlichen Magen, und gegen etliche Giftstoffe in ungekochter Nahrung ist er schlecht gewappnet. Und sobald er rohes Fleisch vertilgt, läuft er Gefahr, sich eine bakterielle Infektion zuzuziehen. Wrangham sieht hierin eine weitere Bestätigung seiner Grundannahmen. Ein anderes Indiz kommt hinzu: Menschen empfinden den Geruch und den Geschmack von Gegrilltem, Gebratenem oder Geröstetem als besonders angenehm. Möglicherweise hat die Evolution den Menschen auch mit der Fähigkeit ausgestattet, energiereiche Nahrung an ihrem Geruch und Geschmack zu erkennen.

Skeptiker wenden gegen Wrangham ein, dass der *Homo erectus* nicht clever genug gewesen wäre, um Feuer erzeugen und das Kochen erfinden zu können. Ganz anders sieht es der Frankfurter Paläoanthropologe Friedemann Schrenk: »Vor allem die Tatsache, dass das Gehirn sehr viel Energie benötigt, wird schon lange diskutiert, und während Leber, Nieren und so weiter nicht reduziert werden können, geht das beim Darm, der auch viel Energie verbraucht. Wenn Wrangham Recht hat, dann beginnt das Kochen nicht erst mit *Homo erectus*, sondern schon früher und ist eine der *driving forces* in der Evolution der Menschen.«

Offensichtlich überdehnt Wrangham seine Theorie, wenn er auch die Entstehung der geschlechtlichen Arbeitsteilung, der Ehe, des Patriarchats und des Privateigentums mit der Innovation des Kochens in Zusammenhang bringt. Angeblich wurden die kochenden Frauen zu Beginn der Zivilisation immer wieder von ausgehungerten Männern überfallen, die sich über die dampfenden Fleischtopfe hermachen wollten. Schließlich sei es zu einem einfachen Tauschgeschäft gekommen: Die Frauen gingen mit Männern langfristige Beziehungen ein und ließen sich von ihnen beschützen, und als Gegenleistung servierten sie ihnen regelmäßig ein warmes Essen. Diese wilden Spekulationen tun aber Wranghams

Theorie selbst, die völlig schlüssig ist und verblüffend viel erklärt, keinen Abbruch. Wrangham schreibt schnörkellos und präzise, und er kommt ohne jeden Fachjargon aus. Ein großer Essay.

Frank Ufen

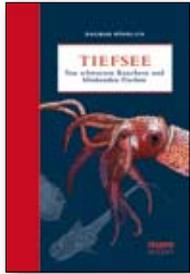
Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.

Richard Wrangham

Feuer fangen

Wie uns das Kochen zum Menschen machte – eine neue Theorie der menschlichen Evolution

Aus dem Englischen von Udo Rennert.
DVA, München 2009.
304 Seiten, € 22,95



MEERESBIOLOGIE

Von Schwarzen Rauchern und Vampirtintenfischen

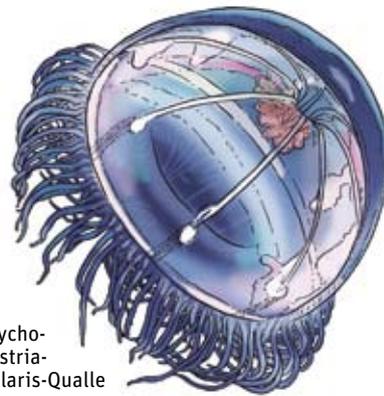
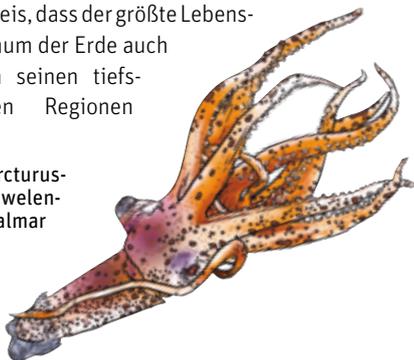
Dagmar Röhrlich nimmt ihre Leser mit auf eine sprunghafte Expedition in die lichtlose Tiefe des Ozeans.

»Der Lebensraum der Tiefsee ist etwa elfmal größer als der an Land. Mehr als 90 Prozent liegen unterhalb von 200 Metern, also jenseits des Einflussbereichs der Sonne. Dieses Riesenreich ist überall besiedelt ...«

Noch vor rund 150 Jahren wusste die Wissenschaft nichts von alledem: Es galt die Lehrmeinung, dass in den tiefsten Meeresregionen nichts Lebendiges mehr existieren könne. Dagmar Röhrlich, Geologin und Wissenschaftsjournalistin, wagt im ersten Band der neuen Reihe »mare Wissen« den Abstieg in die Tiefsee und ihre spannende Entdeckungsgeschichte.

Das Buch beginnt mit dem bislang ungebrochenen Rekord der »Trieste«, eines U-Boots, das 1960 im pazifischen Marianengraben eine Tiefe von 10910 Metern erreichte. Nie zuvor und danach ist ein lebender Mensch so tief getaucht wie die Insassen der »Trieste«, der Schweizer Forscher Jacques Piccard (1922–2008) und sein amerikanischer Kopilot Don Walsh. Während Röhrlich die beiden in ihrer primitiv anmutenden Stahlkugel nach unten sinken lässt, gibt sie einen Rückblick auf bis dato wichtige Stationen der Tiefseeforschung. Als Piccard und Walsh auf dem Meeresgrund einen Plattfisch entdecken, ist dies der letzte Beweis, dass der größte Lebensraum der Erde auch in seinen tiefsten Regionen

Arcturus-Juwelen-Kalmar

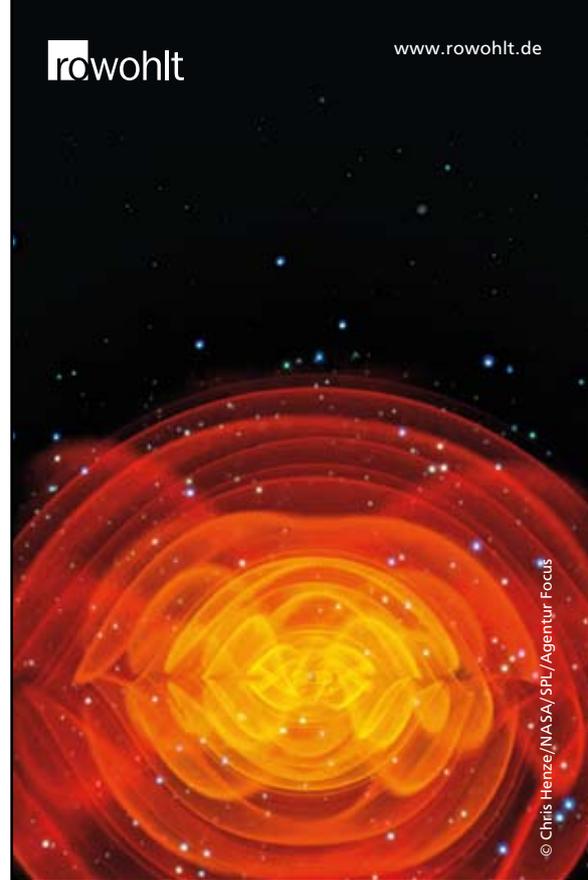


Ptycho-gastria-polaris-Qualle

belebt ist. Bereits die berühmte »Challenger«-Expedition unter der Leitung von Charles Wyville Thomson und John Murray war dem Leben in der Tiefe auf der Spur.

In den Jahren von 1872 bis 1876 legten die britischen Wissenschaftler mit Kartierungen, Tiefenmessungen und Beprobungen in allen Weltmeeren den Grundstein der modernen Tiefseeforschung und suchten Beweise für Darwins damals umstrittene Evolutionstheorie. Diese Geschichte ist der rote Faden von Röhrlichs »Tiefsee«.

Die Autorin berichtet in insgesamt zwölf Kapiteln von den dreieinhalb Jahren auf See, in denen die Forscher unter härtesten Bedingungen Daten sammelten. Anhand von hinterlassenen Briefen, Tagebüchern und Logbucheinträgen rekonstruiert Röhrlich wissenschaftliche Sternstunden der Entdecker und Anekdoten aus dem Alltag der Matrosen. Sie berichtet von dramatischen Schicksalen und einem zermürend monotonen Leben auf See. Dass die Forschung von jedem Einzelnen an Bord getragen wurde und einfache Matrosen oft ihr Leben »wegen ein paar Steinen auf dem Meeresgrund« ließen, ist nicht immer in der

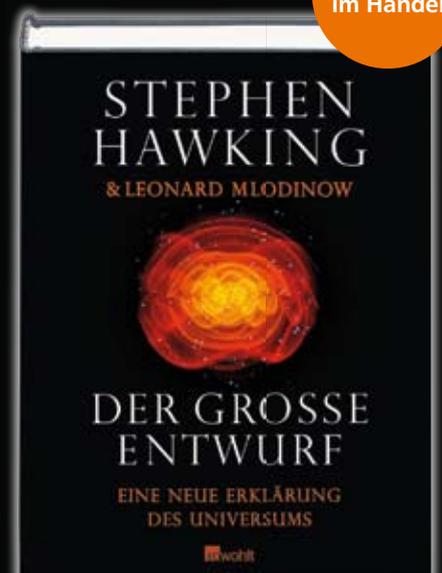


© Chris Henze/NASA/SPL/Agentur Focus

Der neue Stephen Hawking!

Eine aufregend neue und provokative Theorie über Ursprung und Entwicklung des Universums.

ab 7. Sept.
im Handel



192 Seiten. Gebunden. Großformat 19 x 25 cm
€ 24,95 (D) / € 25,70 (A) / sFr. 37,90 (UVP)

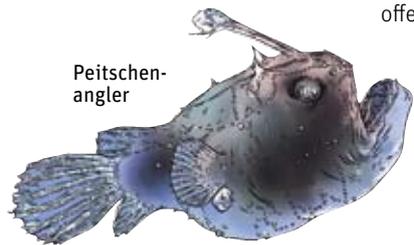
Geschichte der Naturwissenschaften verzeichnet, bei Röhrlich schon.

In immer neuen Szenen von Bord der »Challenger« und vom Meeresgrund stellt die Autorin große Zusammenhänge her – etwa zwischen den soeben mittels Schleppnetz (Dredsche) vom Meeresgrund heraufbeförderten Seelilien und der Evolutionstheorie. Wo sich ein Brückenschlag anbietet, plaudert sie von Manganknollen, Seebergen, Mittelozeanischen Rücken und Vampirtintenfischen und ergänzt den damaligen Blick der Forscher durch heutige Erkenntnisse, die diese sicher brennend interessiert hätten. Röhrlich erklärt Meeresströmungen und schlägt Haken zu Meilensteinen der Wissenschaftsgeschichte, vom Mythos des versunkenen Kontinentes Lemuria bis zur Entdeckung der Plattentektonik.

Nach und nach lernt der Leser so die Tiefsee kennen als eine Welt, die geologische Geheimnisse unseres Planeten offenbart. Im biologischen Sinn ist sie ein Lebensraum des Hungers und der Extreme. Ihre Bewohner sind mit den abenteuerlichsten Eigenschaften ausgestattet, um von den wenigen in die Tiefe gelangenden Nährstoffen ein Quäntchen für das eigene Überleben zu ergattern.

Nicht nur die bekannten Anglerfische bringen mit ihren Lockorganen Licht in die

Peitschenangler



Finsternis. In dem von unserer Sonne am weitesten entfernten Lebensraum produzieren 90 Prozent der Lebewesen ihr eigenes Licht. Ihnen widmet Röhrlich ein eigenes Kapitel. Die fremdartigen Ökosysteme, die sich im Umkreis hydrothermalen Quellen auf dem Meeresboden entwickelt haben, beruhen auf Stoffkreisläufen, die völlig von geologischen Prozessen in der Erdkruste angetrieben werden. Dazu gehören die »Schwarzen Raucher« (Spektrum der Wissenschaft, Spezial 2/2007 »Raumschiff Erde«, S. 32) und die erst vor zehn Jahren im Atlantik entdeckten kalkweißen Schloten der »verlorenen Stadt«. Ihre Erforschung widerlegte das bis dahin anerkannte Dogma, dass alle Lebensprozesse direkt oder indirekt von der Sonne abhängig seien.

Die Tiefsee kann so manchen verschlingen. Dagmar Röhrlich springt so plötzlich zwischen Jahreszahlen und weiteren reportageartig eingeflochtenen Erzählsträngen hin und her, dass einem schwindlig werden kann. Irgendwann taucht sie wieder auf und wirft dem schwimmenden Leser den roten Faden erneut zu. Je stärker die Struktur der Geschichte hervortritt, desto mehr kommt die erzählerische Stärke der Autorin zum Tragen, und sie vermittelt auf unterhaltsame Weise viel Wissenswertes. Da die Quellen im Text nicht deutlich werden, ist allerdings nicht immer klar, was überliefert und was künstlerische Freiheit ist. Wie die Kapitelüberschriften bescheiden andeuten, erhebt Röhrlich auch nicht den Anspruch auf einen wissenschaftlichen Überblick, sondern legt den Schwerpunkt auf die Ba-

lance zwischen Unterhaltungswert und Information. Besonders gelungen ist der Übergang zur Neuzeit: Röhrlich reißt ausgewählte Umweltprobleme an wie die Überfischung des Granatbarsches oder den Plastikmüll im Meer, ohne sich darin zu erschöpfen.

Die dekorativen Illustrationen von Jan Feindt sind stilistisch konsequent. Sie erinnern an bebilderte Abenteuerromane vergangener Jahrhunderte, vielleicht sogar an die Werke von Jules Verne – und daran, dass die Erforschung der Tiefsee auch heute noch ein Abenteuer bleibt. Dem fachlich interessierten Leser wären stellenweise vielleicht Detailzeichnungen, die etwa die verschiedenen Schlangensterntypen kenntlich machen, oder Ausschnitte der im Text beschriebenen Karten oder Unterwasserlandschaften lieber gewesen. Unerklärte Zeichnungen der am Bord der »Challenger« verwendeten Laboratorien lassen nur erkennen, dass das wohl eine komplizierte Angelegenheit war.

Der zweite Band von Dagmar Röhrlich in der Reihe »mare Wissen« erscheint im Oktober und trägt den Titel »Urmeer – die Entstehung des Lebens«.

Antje Kahlheber

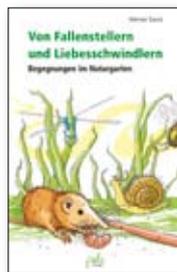
Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

Dagmar Röhrlich
Illustrationen von Jan Feindt
Tiefsee
Von Schwarzen Rauchern
und blinkenden Fischen
marebuch, Hamburg 2010.
318 Seiten, € 26,-

BIOLOGIE

Vom Liebesleben der Schnecken

Werner David lehrt uns, was die Tierchen im Naturgarten treiben.



Das Beobachten von Pflanzen und Tieren ist völlig aus der Mode gekommen. Man befriedigt sein Interesse an der Natur vorrangig über Fernsehen und Internet. Der klassische Obst- und Gemüsegarten für den Selbstversorger ist weitgehend verschwunden und fällt daher als Beobachtung Gelegenheit aus. Entsprechend dürftig ist der allgemeine Kenntnisstand. Selbst Biologielehrer pflegen bei der Frage »Wel-

cher Käfer ist das?« in große Verlegenheit zu geraten.

Aber neuerdings kommt der »Naturgarten« in Mode und damit der Wunsch zu wissen, was für Tiere einem im eigenen Garten begegnen; aber was tun? Vor einem Bestimmungsbuch scheut der Hobbygärtner zurück, weil er mit dessen Herangehensweise nicht vertraut genug ist. Da kommt das vorliegende Buch gerade recht. Der

kindgerechten Zeichnung auf dem Titel zum Trotz handelt es sich nicht um ein Kinderbuch, sondern um Lesestoff für die ganze Familie. Werner David, der nach mancherlei beruflichen Irrwegen wieder zu seiner Jugendliebe »für alles, was da krecht und fleucht« zurückgefunden hat, verpackt die gut begründeten biologischen Fakten in einer lockeren populärwissenschaftlichen Darstellung, mit Humor und einem Augenzwinkern. Wo das Faktenwissen nicht in den laufenden Text passen will, versucht er es mittels Fußnoten doch noch an den Mann zu bringen. Das ist aller Ehren wert; aber das viele Blättern nach den Fußnoten ist fast so mühsam wie die Hauptquelle des Autors direkt zu Rate zu ziehen: die Wikipedia.

Einladend und Neugier weckend sind schon die Kapitelüberschriften wie »Ritter

der Finsternis – die Assel«, »Held der Unterwelt – der Maulwurf«, »Sumoringer der Lüfte – die Hummel« und »Radschlagen im Dienste Amors – die Libelle«. In insgesamt 20 Porträts erfährt der Leser, auch der biologisch gebildete, viel Neues über bekannte und weniger bekannte Tiere und Pflanzen, auch in ihrem biologischem Zusammenspiel.

Dass die – zwittrigen – Schnirkelschnecken einander bei der Paarung einen Kalkstachel, den »Liebespfeil«, ins Fleisch treiben, hat sich allmählich herumgesprochen. Aber der Autor klärt uns darüber hinaus auf, dass der Akt bis zu 24 Stunden dauert, und weiß auch die neuesten Erklärungen für die Sache mit dem Liebespfeil zu referieren: Bei dem – artentsprechend in Zeitlupe ablaufenden – Gewaltakt kommt es nicht auf den Kalk an, sondern auf den mitübertragenen Schleim und die darin enthaltenen Hormone, mit denen der männliche Partner seinen Spermien einen Vorteil verschafft. Das ist Sicheinschleimen im Wortsinn!

Der Naturgarten erhält plötzlich ein besonderes Gesicht. Man schaut genauer hin und entdeckt die Vielfalt und Schönheit der Welt im Kleinen. Die Freude am eigenen Garten wird größer, wenn man mehr darüber weiß. Und der eine und andere wird, angeregt durch das Buch, seinen Garten verändern, einen Teich anlegen, ein Buch zur Hand nehmen, mit dem er seine Artenkenntnis vermehren kann, und hoffentlich für mehr Akzeptanz für die beschriebenen Mitbewohner in unseren Gärten sorgen.

Dosiert auf kapitelweises Lesen verkräftet man das mitunter schulisch Behelrende so heiter, wie es gedacht ist. Über einige kleinere Sprachungenauigkeiten kann man leicht hinwegsehen: »Vor allem ausgehungerte Larven ... vertilgen ... Kleinlibellenarten«, wo doch allenfalls Kleinlibellen die hungrige Larve satt machen. Das Wort »minimal« kann man nicht steigern, und Ausrufe wie »wow« passen nicht zum Sprachgebrauch der – im Durchschnitt etwas älteren – Zielgruppe.

Hier erwartet einen in der Tat »ein Lesevergnügen der besonderen Art« (Rückseite des Buchs). Es ist eine Liebeserklärung an die uns meist verborgen bleibende »kleine« Welt und natürlich ein Plädoyer für mehr natürliche Gestaltung im Garten. Schaffen wir uns bereits vor der eigenen Haustür ein Refugium der Natur. Dies kommt nicht nur den darin lebenden Arten zugute, sondern auch uns selbst. Lernen wir wieder, was wir seit Kinderzeiten so sträflich vernachlässigt haben: Beobachten. In diesem Sinn sei dem Buch eine gute Aufnahme bei den Natur- und Gartenfreunden, bei Groß und Klein, bei Jung und Alt zu wünschen.

Wolfgang Zessin

Der Rezensent ist promovierter Zoologe und stellvertretender Direktor des Zoos Schwerin. Er beschrieb zahlreiche neue Arten, insbesondere bei den Wespen, Heuschrecken und Libellen.

Held der Unterwelt: der Maulwurf. Er ist stets hungrig, winteraktiv und hortet Engerlinge sowie Regenwürmer. Der Autor empfiehlt daher, ihn doch eher »Wurmwüterich« zu nennen.



Werner David

Von Fallenstellern und Liebesschwindlern
Begegnungen im Naturgarten

Pala, Darmstadt 2010. 174 Seiten, € 14,-

Anzeige

www.fischerverlage.de

Vom Autor
des Nr.1 Bestsellers
»Die Krankheitserfinder«

Wir sind nicht die Marionetten unserer Gene!

Gene bestimmen unser Leben weit weniger, als wir glauben und als uns nur zu gerne suggeriert wird. Das Mathe-Gen, das Glücks-Gen, das biologisch vorbestimmte Übergewicht, zappelige Kinder: alles Mythen. Wir selbst haben den größten Einfluss auf unser Leben und unsere Gesundheit. Der Bestsellerautor und Biologe Jörg Blech zeigt, wie wunderbar wandelbar unsere Gene sind und wie sehr wir selbst unser Leben und unsere Erbanlagen steuern können.

288 Seiten, gebunden, € (D) 18,95

Ein Buch von S. FISCHER



JÖRG BLECH

**GENE
SIND KEIN
SCHICKSAL**

Wie wir unsere Erbanlagen und unser Leben steuern können S. FISCHER

Mehr, als das Magazin zu bieten hat: Auf www.spektrum.de finden Sie Artikel, Sonderhefte und das gesamte Archiv. Und sind nur einen Klick von den Angeboten entfernt, die wir Ihnen hier auf dieser Seite vorstellen.

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Erzwungene Auszeiten«

Patienten mit Narkolepsie schlafen tagsüber immer wieder unvermittelt ein. Der Grund: Ihr Immunsystem zerstört bestimmte Neurone im Gehirn, die den Schlaf-wach-Rhythmus steuern

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Sterne und Weltraum** und **Gehirn&Geist** kostenlos online lesen

»Rendezvous mit Lutetia«

Spannung im Europäischen Weltraumkontrollzentrum ESOC in Darmstadt: Arbeiten alle Sensoren der Raumsonde Rosetta, wenn sie am Asteroiden Lutetia vorbeizieht? Klappert die Übertragung der Daten? **Sterne und Weltraum** zeigt die ersten Bilder des rund 100 Kilometer großen Gesteinsbrockens

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

www.astronomie-heute.de/artikel/1040039

»Auf dem Prüfstand«

Wer sich in psychotherapeutische Behandlung begibt, steht vor einer Schwierigkeit: Kaum jemand kann Auskunft über schädliche Effekte und Nebenwirkungen geben. Doch rund jedem zehnten Patienten geht es nach einer Psychotherapie schlechter als davor. Vier Therapeuten klären über die Risiken auf

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/1039582

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.com
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Planeten unter fremden Sonnen

Die Suche nach extrasolaren Planeten nimmt weiter Fahrt auf. Oft sind die Funde ungewöhnlich: WASP-12b lässt sich von seinem Zentralstern verschlingen, zwei Exemplare umkreisen ihren Mutterstern Ypsilon Andromedae, und das Weltraumteleskop Kepler entdeckte einen Exoplaneten, der gerade einmal die Dichte von Kork aufweist

www.spektrumdirekt.de/exoplaneten

Tödliches Wechselfieber

Jahr für Jahr erkranken über 300 Millionen Menschen an Malaria; mehr als eine Million sterben an der Infektion. Neben Rückschlägen im Kampf gegen die tödliche Tropenkrankheit sind auch Erfolge zu verzeichnen

www.spektrumdirekt.de/malaria

WissensLogs

Die Wissenschaftsblogs

Denkanstöße, die die Welt veränderten

Seit es Wissenschaft gibt, tragen Forscher ihre Ideen und Entdeckungen sowie die auf ihnen aufbauenden Weltbilder in Büchern zusammen. Sie bringen unser Verständnis vom Universum und unserer Position darin oft weiter voran, als es die einzelne Einsicht könnte. Unter dem Titel »Denkanstöße« haben unsere Blogger einige dieser Bücher für Sie wieder gelesen und kommentiert

www.wissenslogs.de

Spektrum in den sozialen Netzwerken



www.spektrum.de/studivz



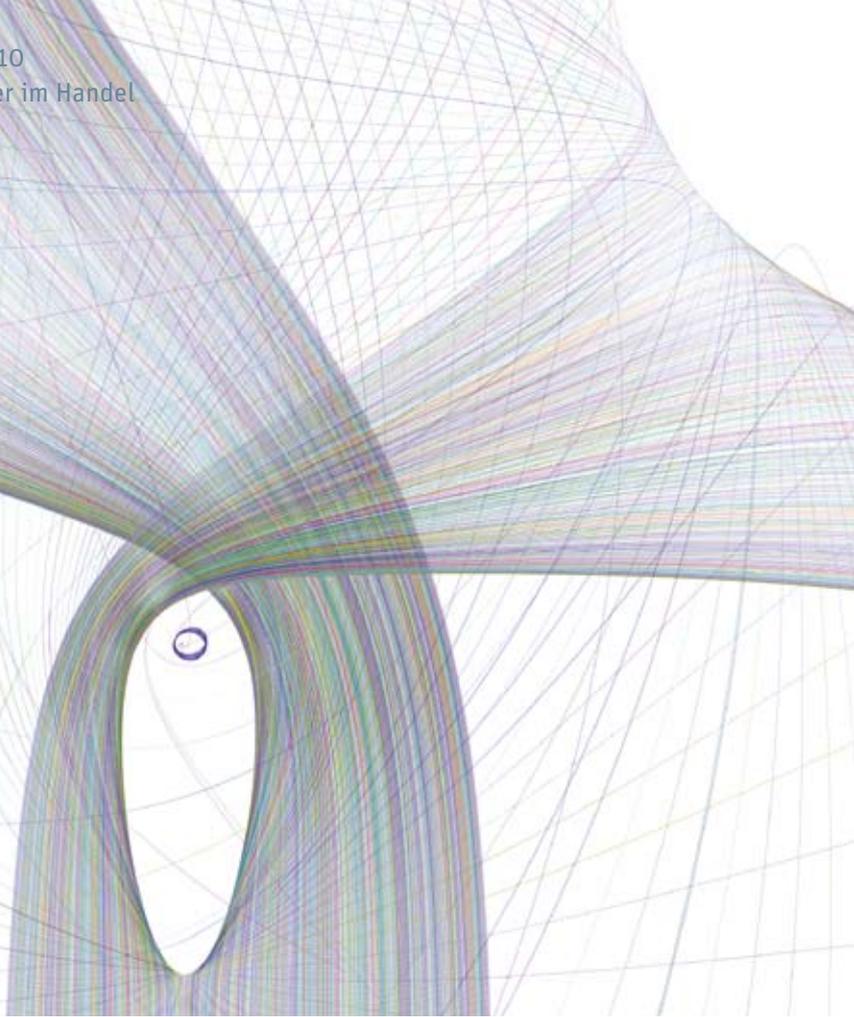
www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/twitter

Ist Zeit eine Illusion?

Die Suche nach einer einheitlichen Theorie der Naturkräfte zwingt Physiker dazu, ihr Konzept der Zeit zu überdenken



KEITH PETERS

WEITERE THEMEN IM OKTOBER

Das Forscherhirn kleiner Kinder

Schon Babys verstehen sich auf Statistik. Vierjährige erfassen ungewöhnliche Zusammenhänge schneller als Erwachsene

Unerkanntes Mineral

Ein neu entdecktes Mineral hoher Dichte zeigt den Erdmantel in anderem Licht und erlaubt faszinierende Rückschlüsse auf die Erdgeschichte

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter



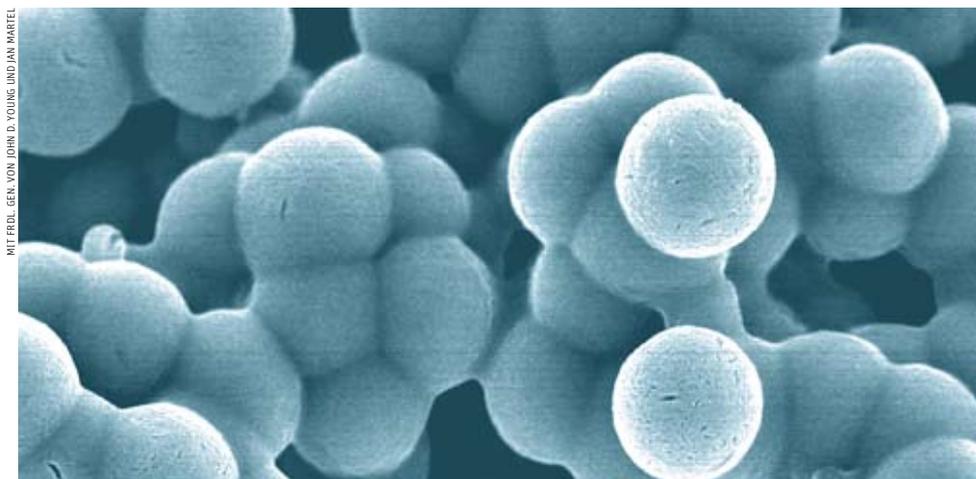
RON MILLER

Ein Mond, der ein Planet sein könnte

Titan, der größte Satellit des Saturns, hat es nicht verdient, nur als Mond bezeichnet zu werden. Seine Landschaften wirken auf Erdbewohner ziemlich vertraut

Aufstieg und Fall der Nanobakterien

Auch wenn sie entgegen früherer Ansicht keine Lebensformen sind, spielen Nanobakterien für unsere Gesundheit dennoch eine wichtige Rolle



MIT FROL GEN. VON IDRIH D. YOUNG UND JAN MARTEL