

Spektrum

DER WISSENSCHAFT



OKTOBER 2013

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

10/13

MEDIZIN

Antioxidanzien
in der Kritik

EVOLUTION

Die verzweigten Wurzeln des
menschlichen Stammbaums

ROBOTIK

Feinfühlige Assistenten
der Zukunft

Einstein im Quantentest

Mit Atomen vermesssen
Forscher die Raumzeit

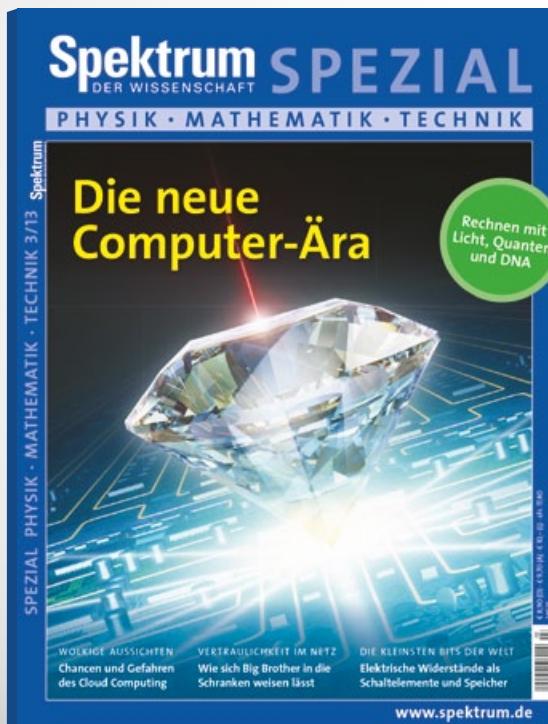
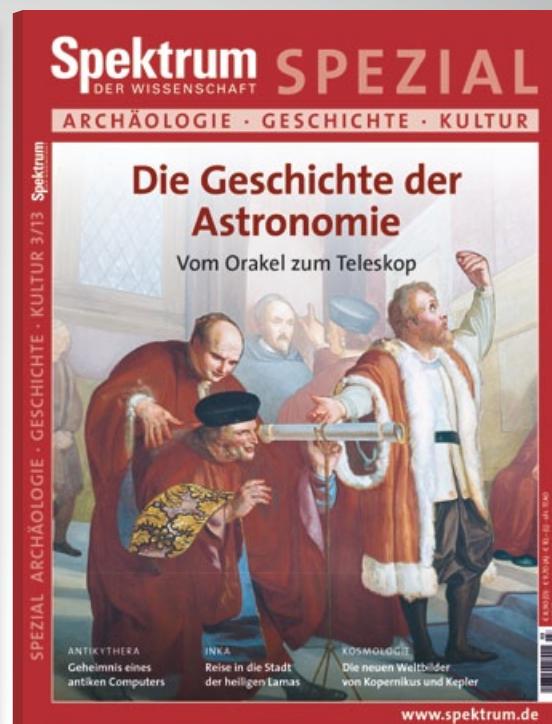
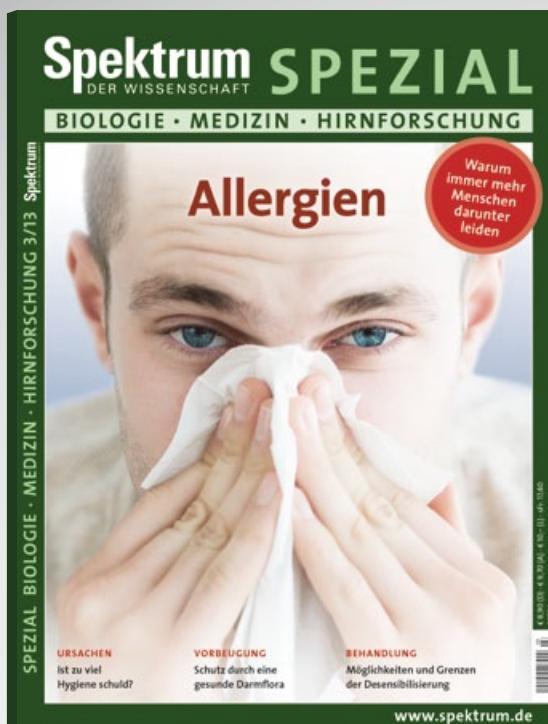
NEUE SERIE

Große Fragen
der Physik

TEIL 1
Relativitäts-
theorie

DAS GANZE SPEKTRUM:

UNSERE SPEZIALREIHEN



Alle Heftreihen auch im Handel erhältlich!

JETZT IM
ABO
BESTELLEN
UND 15 %
SPAREN

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Noch vor Erscheinen im Handel erhalten Sie die Hefte frei Haus und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/spezialabo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com

Oder QR-Kode
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Biologische und biomedizinische Fragen werden heute an nur wenigen etablierten Modellorganismen erforscht. Ein großes Manko, wie die Biologin **Jessica Bolker**, Professorin an der University of New Hampshire in Durham, ab S. 40 erklärt.



Doris Kurella ist Altamerikanistin und Kuratorin der aktuellen Inka-Ausstellung im Linden-Museum Stuttgart. Den Wissensstand über die »Ordnungsmacht der Anden« fasst sie ab S. 66 zusammen.



Von 1992 bis 2012 leitete **Gerd Hirzinger** das DLR-Institut für Robotik und Mechatronik in Oberpfaffenhofen. Ab S. 84 lesen Sie seinen Überblick über die neuesten Entwicklungen auf diesem Gebiet.

Gravitation in atomaren Dimensionen

Für die Entwicklung von Atomfallen mittels Laserkühlung erhielten sie 1997 gemeinsam den Nobelpreis. Heute streiten sich der Amerikaner Steven Chu und der Franzose Claude Cohen-Tannoudji. Sie sind uneins über die korrekte Interpretation eines mehr als zehn Jahre alten Experiments mit fallenden Atomen.

Die beiden prominenten Forscher sind dabei nur zwei von zahlreichen Wissenschaftlern, die sich mit einem der größten Rätsel der Physik beschäftigen: Wie verhalten sich Relativitätstheorie und Quantenmechanik zueinander, und lassen sie sich gar in einer noch umfassenderen Theorie vereinen? Konkret entzündet sich der Disput am so genannten einsteinschen Äquivalenzprinzip. Albert Einstein hatte eine rein experimentelle Erfahrung zu einem zentralen Baustein seiner allgemeinen Relativitätstheorie erhoben, welche die Gravitation als geometrische Eigenschaft von Raum und Zeit auffasst. Das Äquivalenzprinzip besagt, dass träge und schwere Masse ununterscheidbar sind. Anders formuliert: Wenn Materie sich einer Beschleunigung widersetzt, tut sie das auf Grund der gleichen Eigenschaft, die auch für ihre Schwerkraft verantwortlich ist.

Doch ist dieses Prinzip, dessen erste Formulierung bereits auf Galileo Galilei zurückgeht, wirklich universell? Gilt es auch in den winzigen Maßstäben der Quantenmechanik? Um dies zu überprüfen, untersuchen Physiker die Wirkung der Gravitation auf einzelne Atome. Konkret benutzen sie Zäsiumatome, die sie durch Laserpulse in verschiedene energetische Zustände versetzen und deren so genannte Comptonfrequenz sie als Uhrentakt interpretieren. Das bedeutet neben enormen experimentellen auch begriffliche Schwierigkeiten – die sogar Nobelpreisträger gegeneinander aufbringen. Unser Autor Domenico Giulini von der Universität Hannover erklärt die Tragweite solcher Versuche an den Grenzen des Machbaren. Sie finden den Artikel des theoretischen Physikers ab S. 56.

Eine gute Lektüre wünscht Ihr

Carsten Könneker

IHRE MEINUNG IST UNS WICHTIG!

Liebe Leserin, lieber Leser,

wie gefällt Ihnen die aktuelle Ausgabe von **Spektrum der Wissenschaft**? Teilen Sie uns Ihre Kritik mit, denn nur mit Ihrer Hilfe können wir unser Magazin weiter entwickeln und nach Ihren Wünschen gestalten. Dazu haben wir unter www.spektrum.de/umfrage1013 einen Fragebogen erstellt. Wir würden uns freuen, wenn Sie diesen bis zum 18.10.2013 ausfüllen. Dabei können Sie auch etwas gewinnen: Unter allen Teilnehmern verlosen wir zehn attraktive Preise.

Vielen Dank für Ihre Mitwirkung!

3 Editorial**8 Leserbriefe/Impressum****12 Spektrogramm**

Mitgefühl auf Kommando • Was Quecksilber flüssig macht • Knochenwerkzeuge von Neandertalern • Flusstäler auf dem Mars • Sicherungsleine für Spinnen • Eiszeitzyklen im Norden

15 Bild des Monats

Grenzen des Wachstums

26**40****66****16 Forschung aktuell****Eine Uhr aus Scherben**

Die nigerianische Nok-Kultur begann viel früher als bislang angenommen

Schlaue Chimärenmäuse

Pflanzt man Mäusen menschliche Hirnzellen ein, sind die Tiere ihren Artgenossen intellektuell überlegen

Magnetische Wirbel auf der Festplatte

Skyrmionen könnten sich zur effektiven Datenspeicherung nutzen lassen

SPRINGERS EINWÜRFE**Kostbare Kacke**

Die »Ekeltherapie« hilft gegen hartnäckige Darmleiden

BIOLOGIE & MEDIZIN**► 26 Entzauberte Antioxidanzien**

Melinda Wenner-Moyer

Anders als bisher gedacht, ist oxidativer Stress nicht immer ungesund. Das bedeutet aber auch: Substanzen, die ihm entgegenwirken, können manchmal schaden!

► 32 Wildwuchs im Stammbaum des Menschen

Katherine Harmon

Die Anfänge der Homininen waren verworren – und ihr Stammbaum gleicht eher einem Busch. Sogar der aufrechte Gang scheint mehrmals unabhängig entstanden zu sein.

40 Jenseits von Ratten und Fliegen

Jessica Bolker

Weil Forscher immer nur dieselben Tiermodelle einsetzen, entgehen ihnen wesentliche Zusammenhänge.

PHYSIK & ASTRONOMIE**44 Ein Leben für die Turbulenz**

Eberhard Bodenschatz, Michael Eckert

Anfang des 20. Jahrhunderts schuf der Göttinger Strömungsforscher Ludwig Prandtl die Grundlagen einer umfassenden Theorie verwirbelter Gase und Flüssigkeiten.

SCHLICHTING!**54 Schlabbern mit Stil**

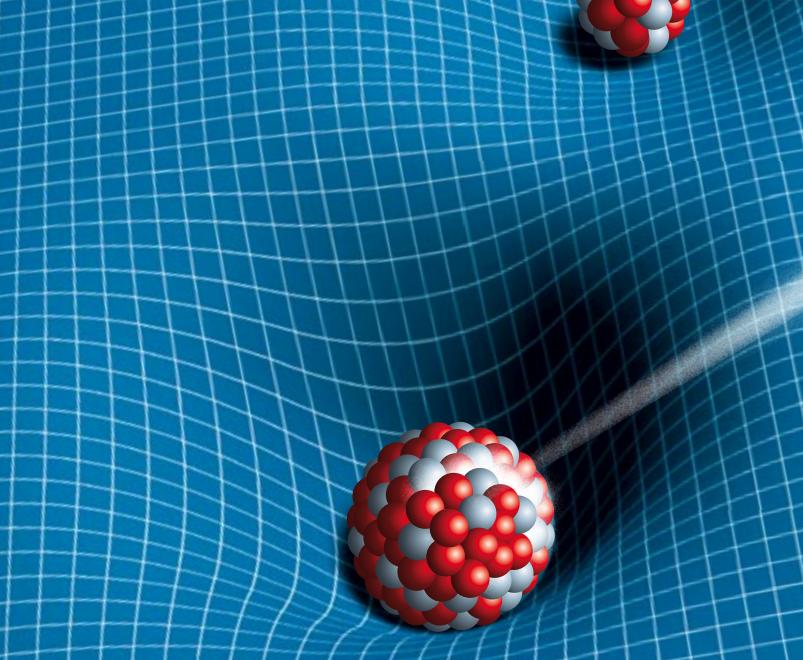
H. Joachim Schlichting

Katzen und Hunde können Flüssigkeiten nicht einfach einsaugen. Sie behelfen sich mit physikalischen Tricks.

MENSCH & KULTUR**► 66 Ordnungsmacht der Anden**

Doris Kurella

Um ihre kargen Ressourcen optimal zu nutzen, errichteten die Inka einen straff durchorganisierten Staat.



74



84



96 Rezensionen

Thomas Wynn et al.: Denken wie ein Neanderthal • Lawrence M. Krauss: Ein Universum aus Nichts • Matthias Glaubrecht: Am Ende des Archipels • Joachim Radkau et al.: Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft • Michael Mary: Ab auf die Couch! u. a.

► TITELTHEMA

SERIE »GROSSE FRAGEN DER PHYSIK« (I)

56 Einstein im Quantentest

Domenico Giulini

Mit ausgefeilten quantenphysikalischen Tests überprüfen Physiker einen Grundpfeiler der allgemeinen Relativitätstheorie, das einsteinsche Äquivalenzprinzip. Der Streit darüber, wie sich ihre Ergebnisse interpretieren lassen, berührt fundamentale Fragen. Eine davon lautet: Wie funktioniert Gravitation auf atomarer Ebene?

ERDE & UMWELT

74 Monsun in Westafrika

Jean-Philippe Lafore, Françoise Guichard, Romain Roehrig

Jeden Sommer entstehen in Westafrika großräumige Windsysteme, die der Bevölkerung lebenswichtigen Regen bringen – doch manchmal bleibt der rettende Niederschlag aus. Mit dynamischen Modellen lässt er sich jetzt besser vorhersagen.

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

80 Das ist ja interessant!

Roald Hoffmann

Wissbegierde ist die zentrale Triebkraft für Entdeckungen. Nobelpreisträger Roald Hoffmann geht der Frage nach, wann wir eigentlich neugierig werden.

TECHNIK & COMPUTER

► 84 Die Helfer der Zukunft

Gerd Hirzinger

Roboter arbeiten nicht nur im Weltraum und in der Autofertigung. Sie machen sich unter anderem auch in der minimalinvasiven Chirurgie nützlich, bei der Luftrettung und beim Autofahren. Und immer mehr Anwendungsbereiche zeichnen sich ab.

105 Wissenschaft im Rückblick

Vom »Telepan« zum Astronautentelefon

106 Vorschau

Titelmotiv: Schwerkraftgitter: iStockphoto / Karl Dolenc [M]; Atomkerne: fotolia / Peter Hermes Furian [M]; Composing: Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.





Verändert die Welt. Nicht den Alltag.

Der Audi A3 Sportback e-tron: elektrische und TFSI®-Power für bis zu 940 km Reichweite.

Unverwechselbar Audi A3 und doch eine eigene Designsprache: vom eigenen Grill bis zur Verbindung von sportlicher Eleganz mit einem Plug-in-Hybridantrieb. Dieser kombiniert die Effizienz des neuesten 1.4 TFSI mit der Durchzugsstärke des elektrischen Motors (75 kW) für die beeindruckende Gesamtleistung von 150 kW (204 PS und 350 Nm) bei einem kombinierten Verbrauch von nur 1,5 l/100 km und einer rein elektrischen Reichweite von bis zu 50 km. www.audi.de/e-tron

Auf Deutschlands Straßen ab 2014.



Der Audi A3 Sportback e-tron wird noch nicht zum Kauf angeboten. Er besitzt derzeit noch keine Gesamtbetriebserlaubnis und unterliegt daher nicht der Richtlinie 1999/94/EG. Folgende vorläufige Werte liegen vor:
Kraftstoffverbrauch Audi A3 Sportback e-tron in l/100 km: kombiniert 1,5; CO₂-Emissionen in g/km: kombiniert 35.
Energieeffizienzklasse A+

Der falsche Weg

In naher Zukunft könnten insekten-große fliegende Maschinen der Menschheit wichtige Dienste leisten, glauben drei Experten für die Entwicklung intelligenter Robotik (»Künstliche Bienen«, Juli 2013, S. 88).

Martin Behr, Mörlenbach: Der Artikel zeugt von einer kaum noch zu überbietenden Technikgläubigkeit – die antiken Griechen nannten das Hybris – und gleichzeitig einem völligen Unverständnis für ökologische Zusammenhänge. Für ökologische Probleme wie das Bienensterben gibt es keine technischen Lösungen! Immerhin erwähnen die Autoren, dass Bienen in der Lage

Liebe Leserin, lieber Leser,

die Preise des Abonnements erhöhen sich ab Oktober pro Heft einschließlich Versand auf € 7,42 (Ausland € 8,12), für Schüler und Studenten auf € 5,83 (Ausland € 6,53). Der Einzelverkaufspreis wird ab der Oktober-Ausgabe € 8,20 betragen. Wir bitten um Ihr Verständnis.

Die Verlagsleitung

sind, Feinden im Flug auszuweichen. Was geschieht aber, nachdem ihre Roboterbiene im Schnabel eines Bienenfressers oder eines Wespenbussards gelandet ist? Vielleicht haben die Autoren von der Existenz dieser Arten auch keine Ahnung oder sind schon so im Wahn ihrer Massenproduktion gefangen, dass sie das für belanglos halten. Ich jedenfalls möchte mir nicht vorstellen, wie die Vögel ein paar Tage nach ihrer ersten Roboterbienenmahlzeit aussehen werden. Immerhin ist bekannt, dass jegliches Meereslebewesen, das Nahrung aufnimmt, vom Einzeller über Fische und Vögel bis zu Säugern, Kunststoffteile, die im Meer schwimmen, mit Nahrung verwechselt und frisst, was nicht selten den Tod zur Folge hat. Die beiden oben genannten Vogelarten stehen übrigens unter gesetzlichem Schutz.

Statt an einem technischen Ersatz für Bienen zu forschen, sollten die Autoren ihre IT-Fähigkeiten besser in den Dienst der Biologie stellen und die Umwelteinflüsse, die in Gegenden herrschen, in denen die Bienen massenhaft sterben, mit statistischen Methoden untersuchen. Vielleicht kämen sie ja,

wie europäische Wissenschaftler, zu dem Ergebnis, dass der Einsatz von Neonicotinoide genannten Insektiziden in der Landwirtschaft die Ursache des Bienensterbens ist. Immerhin hat die EU-Kommission inzwischen reagiert und Neonicotinoide in Europa ab dem 1.12.2013 für zwei Jahre verboten. Es wird sich zeigen, ob das Bienensterben nachlässt.

Ein Zitat, das Albert Einstein zugeschrieben wird, drängt sich mir beim Lesen dieses Artikels auf: »Zwei Dinge sind unendlich, das Universum und die menschliche Dummheit. Beim ersten bin ich mir noch nicht ganz sicher.«

Christian Amling, Quedlinburg: Spätestens seit dem vorigen Jahrhundert wissen wir, dass praktisch jede neue Technologie zuvorderst das Interesse des Militärs und der Geheimdienste weckt. Gerade Roboterinsekten dürften das Herz jedes Agenten oder Militärstrategen vor Freude hüpfen lassen. Mir kam die schöne Geschichte von künstlich bestäubten amerikanischen Mandelbaumplantagen und die emsige Suche nach Verschütteten etwas zu blauäugig daher.

Spektrum DER WISSENSCHAFT

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

Redakteur: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Träger (Sonderhefte)

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

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzemann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

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

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

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistentin: Erika Eschweil

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift:

Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesen Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Christine Kemmet, Claudia Krysztofiak, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / Fr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30 E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungsabrechnung. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70).

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBiO) und von Mensa e.V. erhalten Sdw zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Nicole Klemmer, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1373

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 34 vom 01.01.2013.

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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

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




Ein 2005 gegossenes Stück Fahrbahn aus biegsamem Beton auf einer Brücke im Südosten Michigans schließt sich nahtlos an den Asphalt links und rechts an.

Geklauter Idee

Bei der Menschwerdung spielte möglicherweise die Fähigkeit, besonders weit zu werfen, eine entscheidende Rolle, meint Michael Springer (»Unsere sportlichen Urahnen«, Springers Einwürfe, August 2013, S. 20).

Frank Wohlgemuth, Tornesch: Herr Springer erwähnt in seinem Einwurf die vermeintliche Entdeckung der Werferfähigkeiten des Menschen durch ein Team um den amerikanischen Evolutionsbiologen Neil T. Roach (*Nature* 498, S. 483, 2013). Meiner Meinung nach hat dieser die Idee aber geklaut.

Eduard Kirschmann hat sein Buch »Das Zeitalter der Werfer: eine neue Sicht des Menschen. Das Schimpansen-Werfer-Aasfresser-Krieger-Modell der menschlichen Evolution« 1999 im Selbstverlag veröffentlicht (www.werfer.de), 2001 nach Kontakten mit der amerikanischen Paläoanthropologenszene auf den Wunsch des amerikanischen Anatomieprofessors Richard W. Young ins Englische übersetzen lassen, fand jedoch keinen Verlag. Das ist vom verlegerischen Standpunkt aus für mich verständlich, weil das Buch zu vielen Längen hat; außerdem präsentierte es zu sehr eine Außenseiterposition für jemanden ohne Grundlagen für eine fundierte eigene Meinung. Der Text ging aber in der Anthropologenszene

herum und wurde auch einige Male zitiert. Insofern finde ich es äußerst verwunderlich, dass Roach und sein Team noch nichts davon gehört haben wollen. Ich habe auch keine Erwähnung in ihren Quellen gefunden.

Keine Dehnungsfugen?

Der Materialwissenschaftler Victor C. Li sieht in dem mit Kunststofffasern angereicherten flexiblen Baustoff neue Einsatzmöglichkeiten (»Biegsamer Beton«, August 2013, S. 84).

Michael Gansera, Dresden: Der Artikel zeigt umfassend und sehr gut verständlich die Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsfähigkeit von Beton auf. Victor Lis »biegsamer Beton« bietet offenbar in mehrfacher Hinsicht deutliche Verbesserungen. Stutzig wurde ich, als es um Dehnungsfugen ging. Offenbar sind in den USA – oder zumindest in Lis Wirkungskreis – Dehnungsfugenprofile (»dilatation profiles«) unbekannt. Dehnungsfugenprofile sind in Deutschland Stand der Technik, und ihr Einbau ist bei Ausschreibungen standardmäßig vorgeschrieben, sei es beim Übergang von Fahrbahnen zu Brücken oder Parkhäusern, in Industriehallen oder öffentlichen Gebäuden. Dehnungsfugenprofile in Kombination mit »biegsamem Beton« wären auf beiden Seiten des Atlantiks sicher ein Fortschritt, der deh-

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



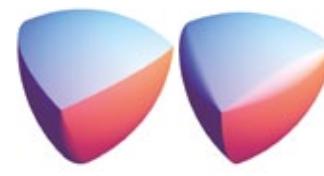
www.spektrum.de/twitter

nungsbedingte Fahrbahnrisse oder ungedichte Parkhäuser bald der Vergangenheit angehören ließe.

Erratum

»Räumliche Gleichdicke«,
August 2013, S. 70

Die computerberechneten Bilder der meisnerschen Gleichdicke (S. 72 unten) stammen nicht von Bernd Kawohl, sondern von seinem Koautor Christof Weber.



CHRISTOF WEBER, FACHHOCHSCHULE NORDWESTSCHWEIZ

BRIEFE AN DIE REDAKTION

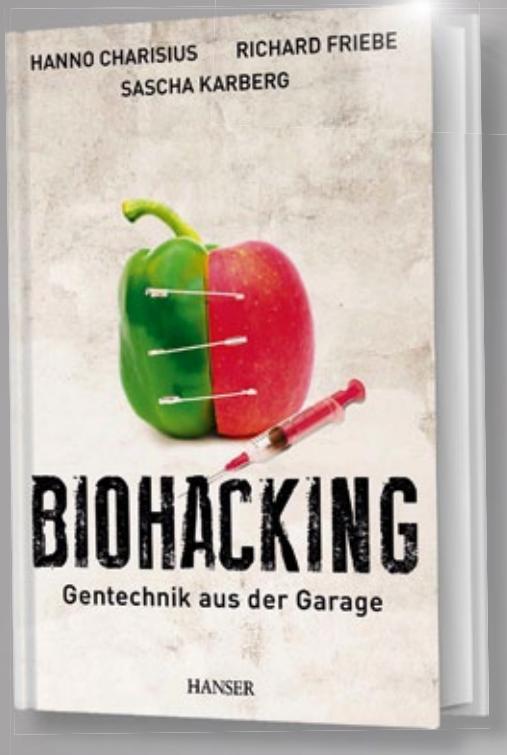
... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

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

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

WISSENSCHAFTLER UND NOBELPREISTRÄGER IN IHREM BRIEFKASTEN.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT-Abo mit exklusiven Extras



1. Buch »Biohacking«

Die Garagen-Genforscher: Drei Wissenschaftsjournalisten versuchen sich als Amateurgenetiker und durchleuchten Chancen und Risiken der Do-it-yourself-Biologie. Ein origineller und überraschender Lesespaß. 288 Seiten.

WÄHLEN
SIE IHR
GESCHENK.



2. Spektrum Artbook

Das fadengeheftete Din-A4-Spektrum-Artbook bietet Ihnen viel Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



3. Jahrgangs-CD-ROM SdW 2012«

Hier finden Sie alle Spektrum-der-Wissenschaft-Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Des Weiteren finden Sie das Spektrum.de-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. Spektrum.de und das Suchregister laufen nur unter Windows.

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/abo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com



Oder QR-Code per Smartphone scannen und Angebot sichern!



Verpassen Sie keine Ausgabe des großen Wissensmagazins.

ABOPLUS+ – EXKLUSIVE VORTEILE FÜR ABONNENTEN!

+ ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft**
fast 10 % günstiger und portofrei ins Haus
Sie können jederzeit wieder kündigen

+ WUNSCH-GESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten

+ EXKLUSIVE ABOPLUS+-VORTEILE:

2 IN 1:

Sie erhalten nicht nur die Print-, sondern auch die digitale Ausgabe

KOSTENLOSER ARCHIVZUGANG

auf das komplette Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** ab 2004 mit über 9000 Artikeln

VERGÜNSTIGUNGEN:

Rabatte bei zahlreichen Museen, wissenschaftlichen Institutionen und Filmtheatern sowie unseren Sonderheften

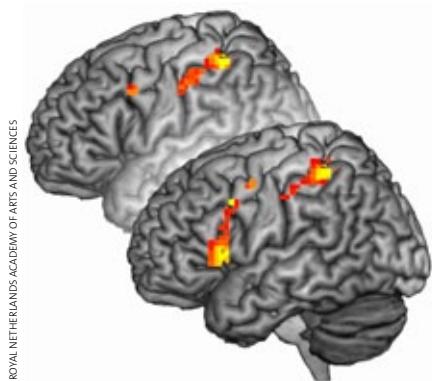
EXTRAS:

ausgewählte Hefte zum kostenlosen Download

**MEHR UNTER:
WWW.SPEKTRUM.DE/ABOPLUS**

Mitgefühl auf Kommando

Psychopathen fallen durch ein besonders schwach ausgeprägtes Einfühlungsvermögen auf. Diese mangelnde Empathie erleichtert es ihnen unter anderem, Gewalt gegen andere anzuwenden. Wissenschaftler um Christian Keysers von der niederländischen Universität Groningen haben nun Hinweise darauf gefunden, dass den Betroffenen nicht generell die



ROYAL NETHERLANDS ACADEMY OF ARTS AND SCIENCES

Fähigkeit abgeht, sich in andere hineinzuversetzen. Werden sie zum Mitgefühl aufgefordert, scheinen sie es auch empfinden zu können.

Die Forscher untersuchten 18 infizierte Kriminelle mit diagnostizierter Psychopathie mittels funktioneller Magnetresonanztomografie – ein Verfahren, das Aktivitätsmuster im Gehirn sichtbar macht. Die Ergebnisse verglichen sie mit denen von 26 gesunden Personen. Alle Teilnehmer bekamen kurze Filme zu sehen. Darin war jeweils die Hand eines Darstellers zu

erkennen, die von einer anderen Hand gestreichelt, geschlagen, weggestoßen oder lediglich berührt wurde. Manchmal präsentierten die Versuchsleiter diese Filme ohne Anweisung, in anderen Fällen forderten sie die Teilnehmer dazu auf, mit den Darstellern mitzufühlen. Im ersten Fall waren Hirnaktivitäten, die eine Empathiereaktion anzeigen, bei den Psychopathen nur schwach ausgeprägt. Mit Anweisung dagegen fielen diese Aktivitätsmuster deutlich stärker aus.

Dass Psychopathen ihr Mitgefühl offenbar ein- und ausschalten können, erklärt womöglich, warum sie oft sehr geschickt im gesellschaftlichen Umgang und beim Manipulieren anderer sind. Es sei denkbar, dass sie diese Fähigkeit bewusst bemühen, sobald es ihren Zwecken dient, schreiben die Forscher.

Brain 136, S. 2550–2562, 2013

Betrachten Psychopathen Filme, in denen andere leiden, sind Empathie anzeigenende Hirnaktivitäten bei ihnen nur schwach ausgeprägt (hinten). Werden sie jedoch aufgefordert, mitzufühlen, feuern die Neurone in den entsprechenden Hirnregionen stärker (vorn).

Spektrum DER WISSENSCHAFT



Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Jeden Donnerstag neu! 52-mal im Jahr mehr als 40 Seiten News, Kommentare, Analysen und Bilder aus der Forschung

www.spektrum.de/diewoche

PHYSIK

Was Quecksilber flüssig macht

Im Gegensatz zu anderen Metallen liegt Quecksilber bei Zimmertemperatur flüssig vor, besitzt also einen extrem niedrigen Schmelzpunkt. Ein internationales Forscherteam, dem der Physiker Michael Wermitt von der Universität Heidelberg angehört, hat nun eine Erklärung dafür gefunden. Mit Hilfe von Computersimulationen zeigten die Forscher: Der niedrige Schmelzpunkt beruht auf der besonderen Elektronenstruktur von Quecksilber, die sich nur mit der speziellen Relativitätstheorie erklären lässt.

Diese Theorie beschreibt die Eigenschaften von sehr schnell bewegter Materie – hier die Elektronen. Sie nehmen im Quecksilberatom eine besondere Konfiguration ein bezüglich ihrer Verteilung innerhalb der Atomshalen. So besteht beim Quecksilber

eine große Energiedifferenz zwischen den Elektronenbändern, weshalb Elektronen nur schwer das energetisch höchste, mit Elektronen voll besetzte Band (»Valenzband«) verlassen und ins unbesetzte Leitungsband wechseln können. Infolgedessen ist die Metallbindung außergewöhnlich schwach, was Quecksilber schon bei relativ niedrigen Temperaturen schmelzen lässt. Obendrein bewirken relativistische Effekte, insbesondere die Massenzunahme bei sehr hohen Geschwindigkeiten, dass die Elektronen in der äußersten Schale näher an den Kern heranrücken. Das erhöht die Energiedifferenz von Valenz- und Leitungsband noch weiter. Ohne diese relativistischen Effekte wäre der Schmelzpunkt von festem Quecksilber um 105 Grad Celsius höher.

Angew Chem 125, S. 7731–7734, 2013

Fertigten Neandertaler Spezialwerkzeuge aus Knochen?

In zwei Ausgrabungsstätten im Südwesten Frankreichs haben Forscher mehrere Knochengeräte gefunden, die vermutlich vom Neandertaler stammen. Die Werkzeuge ähneln Falzbeinen und könnten ein wichtiges Indiz dafür sein, dass der Frühmensch schon vor der Besiedlung Europas durch den *Homo sapiens* hoch entwickelte Arbeitsmittel benutzte. Sie bestehen aus Hirsch- oder Rentierrippen und besitzen ein abgerundetes Ende. Damit schabten und polierten die Neandertaler wahrscheinlich Tierhäute, um sie glänzender und wasserabweisender zu machen. Noch heute benutzen Handwerker ähnliche Schleifwerkzeuge zur Lederbearbeitung, so genannte Lissoirs.

Entdeckt wurden die Artefakte von einem Forscherteam um Shannon McPherron vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Sie entfachen erneut die Diskussion darüber, ob Neandertaler von sich aus über ähnliche kulturelle Fähigkeiten verfügten wie moderne Menschen. Bisherigen Erkenntnissen zufolge wanderte *Homo sapiens* vor zirka 40 000 Jahren nach Europa ein, wo er auf den Neandertaler traf. Die jetzt gefundenen Geräte sind aber bis zu 50 000 Jahre alt. Das bedeutet entweder, dass *Homo sapiens* nichts mit ihrer Herstellung zu tun

hatte, oder, dass er deutlich früher in Europa auftauchte als bisher angenommen. Die Forscher spekulieren sogar, der moderne Mensch habe diese speziellen Geräte vom Neandertaler übernommen. *PNAS 10.1073/pnas.1302730110, 2013*



MITTELL. GEN. DER ABR. PERONY UND PECH-DE-LUXÉ - PROJEKT

Das am vollständigsten erhaltene Schleifwerkzeug aus dem Südwesten Frankreichs, hier aus vier Perspektiven dargestellt.

Niederschlag schuf Flusstäler auf dem Mars

Der Mars war früher feuchter und wärmer – darauf deuten jedenfalls seine Landschaften hin. Vielerorts gibt es lange Täler, die wohl flüssiges Wasser ausgewaschen hat. Woher es stammte, ist umstritten. Es könnte sich um Schmelzwasser aus tauendem Bodeneis gehandelt haben oder um starken Niederschlag. Amerikanische und französische Forscher halten nun Wolken für die wahrscheinlichste Wasserquelle. Diese hätten sich an



NASA/JPL / ARIZONA STATE UNIVERSITY

Bergen aufgestaut, bis schließlich Schnee oder Regen fiel.

Die Geowissenschaftlerin Kathleen Scanlon von der Brown University (Rhode Island, USA) und ihr Team simulierten Zirkulationsmuster in der Marsatmosphäre vor rund 3,7 Milliarden Jahren, als der Planet vermutlich noch eine dichte Gashülle besaß. Sodann prüften die Forscher, ob ausgewählte Flusstäler mit den atmosphärischen Strömungen und somit den Niederschlägen jener Zeit zu erklären sind. Tatsächlich fanden sie Belege hierfür: Die Täler sind in Richtung der

vorherrschenden Westwinde ausgeprägter als an den windabgewandten Osthängen. Das spricht dafür, dass die Feuchtigkeit in diesen Winden beim Aufstieg an Westhängen kondensierte, als Niederschlag zu Boden fiel und dann bergab floss.

Welche Form die Niederschläge hatten, ist unklar. Die Geowissenschaftler halten Schneefall für am wahrscheinlichsten, weil die Temperaturen auf dem jungen Mars laut den Modellen eher niedrig waren, selbst bei erheblich dichterer Atmosphäre als heute. Damit die tiefen Flusstäler entstehen konnten, muss der Schnee zeitweise getaut sein. In kurzen Warmphasen könnte es sturzbachartige Fluten gegeben haben, die der Landschaft ihr heutiges Gesicht aufprägten.

Geophys Res Let 10.1002/grl.50687, 2013

Warrego Valles ist eine Ansammlung verzweigter Flusstäler auf der Südhalbkugel des Mars. Ihre Strukturen deuten darauf hin, dass sie von abfließenden Niederschlägen ausgewaschen wurden.

Spinnfaden stabilisiert Flug und Landung

Springspinnen erhaschen ihre Beute mit einem gezielten Satz. Sie nutzen ihre Sprungfähigkeit aber auch zum schnellen Fortbewegen, denn mit einem einzigen Hüpfer können sie das 25-Fache ihrer Körperlänge zurücklegen. Dabei verankern sie sich mit einem Seidenfaden am Boden. Diese »Sicherheitsleine« stabilisiert den Spinnenkörper im Flug, haben jetzt Forscher um Kai-Jung Chi von der National Chung Hsing University in Taiwan gezeigt.

Die Wissenschaftler sammelten 27 Springspinnen der auch in Deutschland vorkommenden Spezies *Hasarius adansoni*. Im Labor filmten sie die Tiere mit einer Hochgeschwindigkeitskamera beim Sprung von einer höheren auf eine niedrigere Plattform. Dabei stellten sie fest, dass fünf Spinnen keinen Seidenfaden bildeten, sich aber hinsichtlich Größe, Körpergewicht und Absprungtempo nicht von den anderen Tieren unterschieden. An diesen Exemplaren untersuchte das

Team, wie sich das Fehlen des Spinnfadens auf den Sprung auswirkt.

In den Filmaufnahmen ist deutlich zu sehen, Welch große Bedeutung die seidene Leine hat. Während die Tiere ohne Spinnfaden kurz nach dem Absprung fast hintenüberkippen, können sich jene mit Faden in der Luft stabilisieren. Noch deutlicher wird der Effekt beim Landen: Die Spinnen ohne Sicherheitsleine plumpsten oft mit dem Hinterteil auf den Boden und kamen erst nach einer Schlitterpartie oder mehreren Überschlägen zum Halten. Außerdem benötigten sie fünfmal so viel Zeit, um sich wieder vollständig aufzurappeln. Ihre Artgenossinnen mit Seidenfaden dagegen setzten elegant auf allen Achten auf und waren bereits nach zehn Millisekunden wieder startbereit.

J R Soc Interface 10, 20130572, 2013



KLIMAFORSCHUNG

Eiszeitzyklus entschlüsselt

Auf der Nordhalbkugel folgen die Eiszeiten einem rund 100 000-jährigen Zyklus. Japanische Forscher führen ihn auf die Elastizität der Erdkruste zurück. Das Einsinken des nordamerikanischen Kontinentalbodens unter dem Gewicht der Eismassen führt später zu deren beschleunigtem Abtauen und bringt so die beobachtete Periode hervor.

Bisherige Klimamodelle begründen den Zyklus mit einer schwankenden Intensität der sommerlichen Sonneninstrahlung, hervorgerufen durch Variationen der Erdumlaufbahn sowie das Taumeln der Erdachse. Diese Phänomene können ihn aber nicht vollständig erklären. Kopfzerbrechen bereitete den Forschern vor allem, dass sich die Eismassen über lange Zeiträume aufbauen, aber vergleichsweise rasch wieder abschmelzen. Eher sollte

sich ein Wachstum der Eisschilde selbst verstärken, da deren helle Oberfläche mehr Sonnenstrahlung reflektiert als Land- oder offene Wasserflächen, woraus eine fortschreitende Abkühlung resultiert. Was den Prozess der Eisausdehnung letztlich zum Erliegen bringt und sogar umkehrt, war bislang unklar.

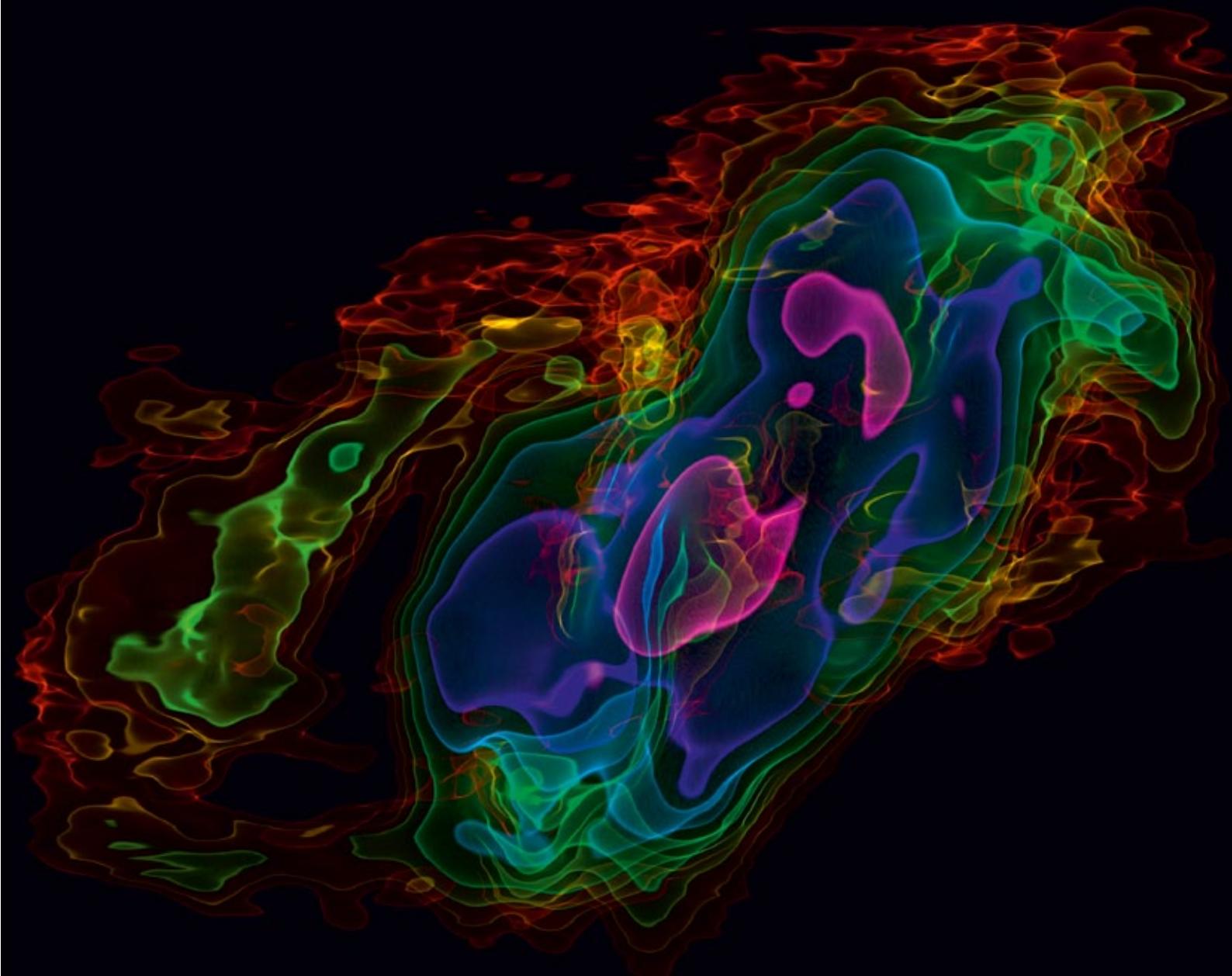
Der Klimaforscher Ayako Abe-Ouchi und seine Kollegen von der Universität Tokio halten Rückkopplungseffekte dafür verantwortlich. Ihre These: Wenn die Eisschilde nach Süden vordringen und an Mächtigkeit zunehmen, drückt ihr gewaltiges Gewicht die Erdkruste in den darunterliegenden, plastisch-verformbaren Mantel. Schmilzt das Eis wieder ab, kommt es zu einer Ausgleichsbewegung – die Erdkruste federt gewissermaßen in ihre Ausgangslage zurück. Dieser Prozess erfolgt jedoch

deutlich verzögert. Während der Eisschild also langsam taut, verliert seine Oberseite an Höhe und gelangt in tiefere und wärmere Bereiche. Das Abschmelzen beschleunigt sich dadurch.

Der Mechanismus kann erklären, wie sich eine fortschreitende Vereisung in ihr Gegenteil verkehrt. Demnach erreichten die nordamerikanischen Gletscher ihre größte Ausdehnung und Dicke, wenn die sommerliche Sonneneinstrahlung in hohen Breiten an ein Minimum kam. In dieser Situation genügte schon eine geringe Temperaturzunahme an den südlichen Rändern der Eisschilde, um über die beschriebene Rückkopplung binnen weniger tausend Jahren zum kompletten Abschmelzen des Eises zu führen.

Nature 500, S. 190–194, 2013

GRENZEN DES WACHSTUMS



Das explosionsartige Entstehen neuer Sterne in einer Galaxie hat ihren Preis: Begleitende starke Sternwinde blasen das Rohmaterial für weitere Sonnen ins All hinaus und begrenzen so das galaktische Wachstum. Das erklärt, warum sehr massereiche Galaxien im Universum selten sind.

Während sich ionisierte Winde leicht nachweisen lassen, gelang das bei molekularen Gasströmen bislang nicht. Nun aber machten Daten des ALMA-Teleskops in Chile diese erstmals sichtbar: Die Aufnahme der Sculptor-Galaxie (NGC 253) im südlichen Sternhimmel zeigt die Verteilung

von molekularem Kohlenmonoxid, aus dessen Vorkommen man auf die Anwesenheit von Wasserstoff schließen kann, dem Rohstoff der Sternentstehung. Die willkürlich gewählten Farben geben die Intensität der empfangenen Strahlung an, von Rottönen für stark bis Blau und Violett für schwach. Das Rot in den Randbereichen der Galaxie zeigt, dass NGC 253 derzeit sehr viel Gas verliert. Bleibt es bei der gegenwärtigen Verlustrate, so enthält die Galaxie in 60 Millionen Jahren keinen Baustoff für neue Sterne mehr.

Nature 499, S. 450–453, 2013

Eine Uhr aus Scherben

Anhand von Stilvergleichen der Gefäßkeramik und Radiokohlenstoffdatierungen entwickelten Frankfurter Archäologen eine Chronologie der nigerianischen Nok-Kultur. Offenbar begann diese 1000 Jahre früher als bislang angenommen.

VON GABRIELE FRANKE

Keramik, die bei über 700 Grad Celsius gebrannt wurde, kann Jahrtausende überdauern. Scherben von Gefäßkeramik bilden deshalb bei archäologischen Ausgrabungen meist das häufigste Fundgut. Das gilt auch für die Stätten der Nok-Kultur im westafrikanischen Nigeria. Doch lange wurden sie kaum beachtet, denn im Fokus der Forschung – leider auch des internationalen Kunstmärkte – standen die beeindruckenden Terrakottaskulpturen, die Nok-Künstler für den Götter- und Totenkult geschaffen hatten. Der Brite Bernard Fagg, der diese Kultur 1943 anhand ihrer Kunstwerke definierte, bestimmte ihre Dauer auf 500 v. Chr. bis 200 n. Chr. Ihr Anfang wurde nun um ganze 1000 Jahre zurückverlegt – anhand von Pflanzenresten und Gefäßscherben.

Wo immer in der prähistorischen Welt Menschen das Brennen von Tongefäßern entwickelten, begannen sie auch bald die gestalterischen Möglichkeiten des Materials zu entdecken. Vor dem Brennen lässt es sich in verschiedene Formen bringen, durch Ritzen und Stechen dekorieren, bemalen und polieren. So wie es heute Moden gibt, orientierten sich auch die Töpfer der Vergangenheit an kulturellen Vorbildern. Sie folgten Gestaltungsregeln, die sich im Lauf der Zeit veränderten. Keramikgefäße spiegeln also stets ein Wechselspiel aus Tradition und Innovation wider. Das versetzt Archäologen in die Lage, anhand von Gefäßformen und Verzierungsstilen nicht nur zwischen Angehörigen verschiedener Kulturen zu unterscheiden, sondern zudem zeitliche Abfolgen zu erkennen. Gemeinsam mit der stratigrafischen Methode,

der zufolge Siedlungsschichten und die darin enthaltenen Scherben meist umso älter sind, je tiefer sie liegen, bilden so genannte Keramikchronologien nach wie vor eine wichtige Grundlage der Datierung. Ergänzt werden sie durch moderne naturwissenschaftliche Methoden, die absolute Altersangaben liefern, statt nur Relationen wie »dieses Muster ist älter als jenes«.

Mühsames Tonpuzzle

Diese aufzustellen ist eine langwierige Puzzlearbeit. Aus einzelnen Scherben oder mühsam rekonstruierten Gefäßen gilt es, Stil- und Formmerkmale sowie deren zeitliche Abfolge zu ermitteln. Problematisch wird ein solches Unterfangen, wenn die Fundsituation nicht eindeutig ist. Fagg standen bei seiner Entdeckung vor allem Terrakotten zur Verfügung – und die waren nicht an prähistorischen Stätten gefunden worden, sondern im Rahmen des Zinnabbaus in angeschwemmten, also verlagerten Schichten. Ein Geologe ermittelte, dass jene mit den meisten Funden in einer Feuchtphase im 1. Jahrtausend v. Chr. entstanden sein musste. Angesichts der offenkundig weit entwickelten Figuralenkunst setzte Fagg die genannte untere Grenze um 500 v. Chr. als Kulturbeginn fest. Radiokohlenstoffmessungen bestätigten 1957 diese grobe Datierung.

Nach heutigem Wissen verbreitete sich die vor allem durch ihre Kunstform definierte Nok-Kultur im Zentrum Nigerias auf etwa 100 000 Quadratkilometer, das entspricht knapp der Fläche von Bayern und Baden-Württemberg zusammen. In einem Langzeitprojekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft haben sich ihr Archäologen der

Frankfurter Goethe-Universität gewidmet. Es ist ein Wettkampf gegen die Zeit, da Nok-Fundstellen seit gut 30 Jahren durch Raubgräber auf der Suche nach den wertvollen Skulpturen zerstört werden. Einer der Arbeitsschwerpunkte ist es, Anfang und Dauer dieser frühen afrikanischen Bauernkultur genauer zu ermitteln – mit besseren Methoden und anhand ungestörter Fundstellen. Zum ersten Mal spielt Gefäßkeramik dabei eine Rolle. Gemeinsam mit naturwissenschaftlichen Datierungsmethoden soll sie den chronologischen Rahmen liefern.

Scherben gelangten auf vielfache Weise in den Boden. Sei es, dass unbrauchbar gewordene Gefäße als Abfall hinter einer Hütte entsorgt wurden, bis sie durch Wind und Regen im Lauf der Jahrtausende von Erde bedeckt wurden. Sei es, dass komplette Behälter, vielleicht mit Nahrung gefüllt, Verstorbenen mit ins Grab gegeben wurden. Fast 90 000 Bruchstücke mit einem Gesamtgewicht von 1,4 Tonnen kamen seit 2005 zu Tage. Etwa 15 000 davon erlauben eine zeitliche Einordnung, da sie entweder Verzierungen tragen oder zum Rand oder Boden eines Gefäßes gehören und so dessen Rekonstruktion ermöglichen. Alle Scherben werden in

Nach wie vor geben die Terrakotten der Nok-Kultur Rätsel auf. Ohne Vorbilder formten und brannten die Bewohner eines Landstrichs in Zentralnigeria vor mehreren Jahrtausenden Skulpturen mit ausdrucksvollen, ovalen bis dreieckigen Augen, in denen kleine Löcher die Pupillen andeuten. Schmuck und Frisuren verliehen den standardisierten Porträts Individualität.

einer Datenbank erfasst und ausgewertet. Treten bestimmte Muster oder Formen an gleich alten Fundstellen auf, während sie an anderen Plätzen, die jünger oder älter sind, fehlen, dann gelten sie für einen bestimmten Zeitraum als typisch. Aneinander gereiht bilden sie eine zeitliche Abfolge sich ändernder Keramikstile (siehe Grafik S. 18/19).

Im europäischen Raum ist diese Methode seit Langem etabliert. Bestehen-

de Keramikchronologien bereits datierter Kulturen erlauben es, Querbezüge zu anderen Kulturen oder Räumen herzustellen, beispielsweise durch importierte Gefäße. In Afrika ist die prähistorische Forschung in dieser Hinsicht noch jung. Kulturen wie Nok erscheinen oft singulär, ohne zeitlichen Bezug zu anderen. Hier kommt nun die Radiokohlenstoffmethode zum Zug, die vor allem durch verkohltes Pflanzenma-

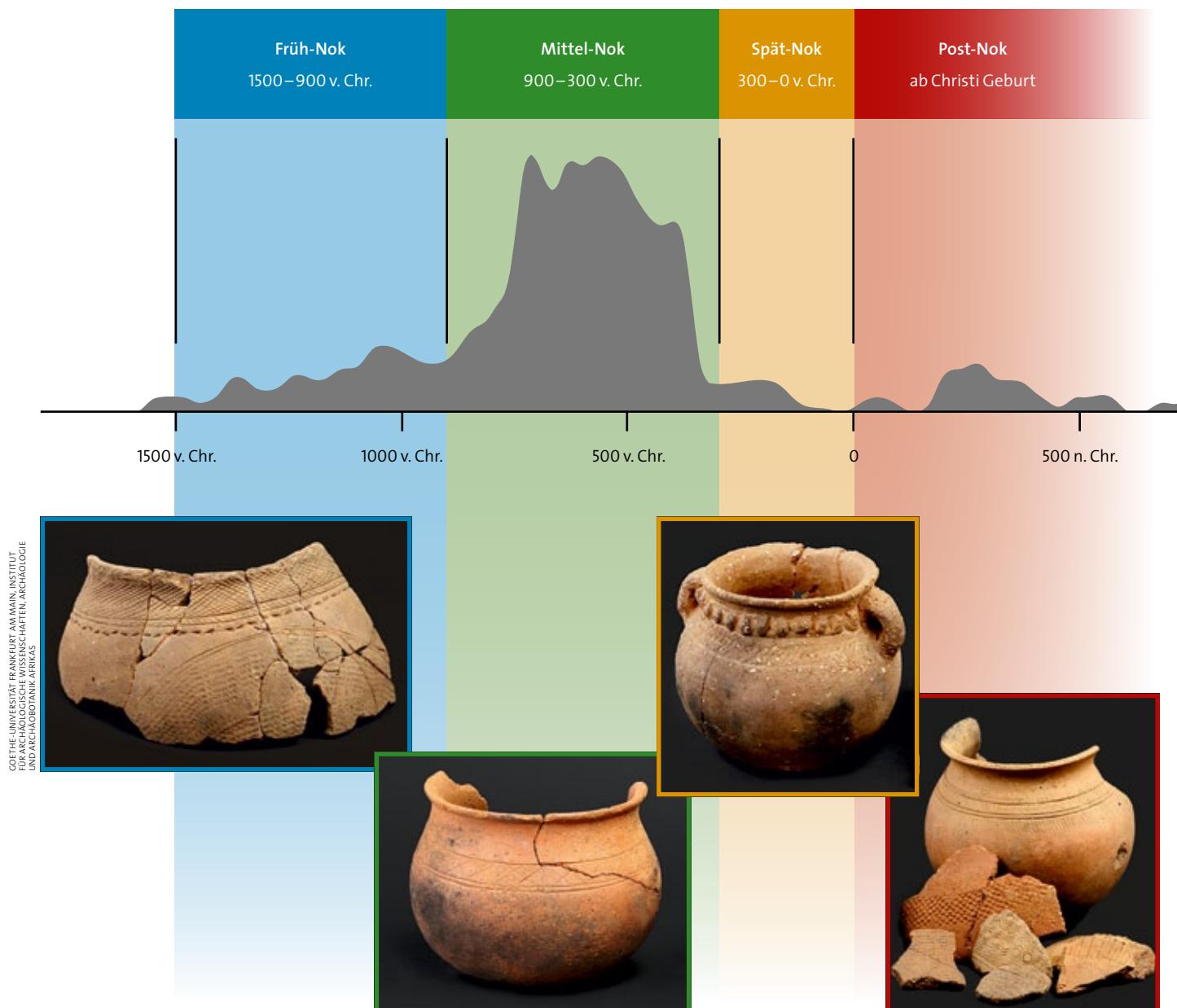
terial aus den Ausgrabungsstellen eine absolute Altersschätzung ermöglicht. Über 100 solcher datierter Proben von mehr als 50 Plätzen liegen inzwischen vor. Sie umfassen einen Zeitraum, der von der Zeitenwende bis etwa 1500 v. Chr. zurückreicht.

Dass sie bislang als weit jünger erachtet wurde, hat einen einfachen Grund: ihre Definition über die charakteristischen, so perfekt wirkenden Skulpturen. Die tauchen jedoch nach den neuen Radiokohlenstoffdaten frühestens in Fundstellen aus der Zeit um 900 v. Chr. auf – ohne jede Art vorangegangener Kunst. Was dort zudem an Fragmenten von Töpfen und Schalen zum Vorschein kommt, gleicht aber den Scherben älterer Siedlungsplätze so stark, dass eine kulturelle Kontinuität wahrscheinlich ist. Zwar war die Gefäßkeramik des »Früh-Nok« – so die Bezeichnung in der von uns erstellten Chronologie – flächendeckender verzerrt. Doch ihre Muster wurden bereits ausschließlich geritzt oder gestochen, wobei meist gerade oder gewellte Linien oder Kreuzschraffuren entstanden. Zudem setzten die Töpfer dieser Anfangsphase schon mehrzinkige Kämme bei der Dekoration ein, wie Eindrücke im Ton beweisen. Alles in allem lässt sich damit die Kulturdefinition um die Gefäßmerkmale erweitern und damit die Chronologie verlängern.

Allerorts Terrakotten

Ab 900 v. Chr. wuchs die Zahl der Niederlassungen offenbar rapide, was auf ein starkes Bevölkerungswachstum schließen lässt, wobei allerdings der Charakter der Fundplätze – Siedlung, kultischer Bereich, Werkstätte oder anderes – nur schwer zu bestimmen ist. Terrakotten kommen an jeder Fundstelle zu Tage. Im Lauf dieses »Mittel-Nok« tauchen erste Hinweise auf Eisenverarbeitung auf, die damit zu den frühesten in Afrika südlich der Sahara zählt. Die Ritz- und Stichtechniken bleiben dieselben, doch die Muster werden nun durch horizontale Ritzlinien zu Bändern gefasst. Dafür wächst der Variantenreichtum der Linien, die auch mal im Zickzack oder Bogen verlaufen kön-





nen. Wie bei den Terrakotten galten im Mittel-Nok offenbar sehr streng beachtete Vorgaben.

Es gibt einen auffälligen Mangel an Fundstellen, die zwischen 300 v. Chr. und der Zeitenwende datieren. Entsprechend wenig ist über die Gefäße des »Spät-Nok« bekannt. Die spärlichen verzierten Stücke lassen erkennen, dass die Bandform weiter in Gebrauch war, doch erscheint sie weit weniger einheitlich – auch außerhalb eines Bands wurde geritzt und gestochen. Neu hinzukamen beispielsweise Miniaturgefäß, manchmal außen und innen verziert, und neue Topfformen.

Mit der Zeitenwende brach im Nok-Land eine neue Phase an, die wir als »Post-Nok« bezeichnen. Die Eisenverarbeitung gewann offenbar an Bedeutung, an den Siedlungsplätzen kommen deutlich mehr Metallobjekte und Schlacken ans Licht. Terrakotten fehlen jedoch ganz im Fundgut. An die Stelle der typischen Ritz- und Stichverzierungen der Gefäße trat zudem eine bis heute in der Region gebräuchliche Rolltechnik: Holzstäbchen mit eingeschnittenen Mustern wurden über den noch feuchten Ton gerollt, ein halbes Jahrtausend später auch Fruchtstägel und anderes mehr. Die typische Nok-

Keramik, die für 1500 Jahre Bestand hatte, war verschwunden.

Alles deutet also darauf hin, dass auch die Nok-Kultur um die Zeitenwende aufhörte zu existieren. Warum dies so war, ob etwa neue Gruppen in das Gebiet einwanderten oder ob eine Krise die Geisteswelt der Menschen so veränderte, dass Terrakotten aus dem Götter- oder Totenkult verschwanden, können wir noch nicht beantworten. Gewiss ist, dass diese auf Grund neuester Forschung etwa 1500 Jahre dauernde Kultur um 900 v. Chr. eine afrikanische Kunst hervorbrachte, die damals nur im Niltal und in den Städ-

Anhand von 15 000 Scherben entwickelten deutsche Archäologen eine Stil- und Formchronologie der in der Nok-Region verwendeten Gefäße. 100 Proben von organischem Material erlaubten darüber hinaus Radiokohlenstoffdatierungen (graue Kurve: überlagerte C-14-Kurven). Das überraschende Ergebnis: Die Anfänge dieser Kultur reichen ein Jahrtausend weiter zurück als bislang angenommen.

1000 n. Chr. 1500 n. Chr.

NEUROBIOLOGIE

Frankensteins schlauer Mäuse

Bekommen Mäuse menschliche Hirnzellen eingepflanzt, sind die dadurch entstehenden Mischwesen ihren Artgenossen intellektuell überlegen.

VON TIM HAARMANN

Im menschlichen Gehirn kommen – verglichen mit dem der meisten Tiere – besonders viele und große so genannte Astrozyten vor, die zudem eine deutlich komplexere äußere Gestalt besitzen. Neurobiologen hatten früher angenommen, dass diese sternförmigen Zellen nur als Stützgerüst und Verbindungsmaterial für die Neurone dienen. Doch in den letzten Jahren hat sich die Sichtweise gewandelt: Laut neueren Studien sind die Sternzellen aktiv am Stoff- und Flüssigkeitstransport im Gehirn beteiligt und beeinflussen sogar die Signalübertragung zwischen den Nervenzellen. Möglicherweise stellen Astrozyten damit einen Schlüsselfaktor für die überragende Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns dar.

Ein Team um die Neurologin Xiaoning Han von der University of Rochester (USA) hat mit diesen Zellen nun ein bemerkenswertes Experiment durchgeführt. Die Forscher fanden heraus, dass Mäuse, denen sie menschliche Sternzellen implantiert hatten, Versuchsaufgaben schneller lernten und ein besseres Gedächtnis aufwiesen. Zudem haben sie den biochemischen Mechanismus aufgeklärt, der die Nager zu – für Mäuseverhältnisse – kleinen Genies macht: Die Astrozyten helfen den Nervenzellen dabei, einen bestimmten Rezeptor in ihre Kontaktstellen (Synapsen) einzubauen, der dort die Signalübertragung verbessert und damit die Lernfähigkeit des Mäusehirns steigert (*Cell Stem Cell* 12, S. 324, 2013).

Für ihr Experiment griffen die Forscher auf abgetriebene menschliche Fötten zurück und entnahmen ihnen die Vorläufer der Sternzellen. Diese spritzten sie dann in die Gehirne neu geborener Mäuse, denen die Fähigkeit zum Abstoßen fremden Gewebes fehl-

te. Die Zellen entwickelten sich dort prächtig: Sie breiteten sich aus und infiltrierten Hippocampus, Mandelkern, Zwischenhirn und weite Teile des Großhirns – Gehirnregionen, die für Dinge wie Lernen und Emotionen verantwortlich sind. Hier wuchsen die Zellen zum Erstaunen der Forscher zu gleicher Größe und Komplexität heran wie beim Menschen. Nicht nur das: Die fremden Sternzellen integrierten sich sogar in das kontinuierliche Netzwerk, das die körpereigenen Astrozyten der Nager ausbilden, was anhand von Gewebeproben und elektrophysiologischen Experimenten zu erkennen war.

Maus mit Elefantengedächtnis

Xiaoning Han und ihre Kollegen unterzogen die Maus-Mensch-Chimären nun einer Reihe von Tests, um herauszufinden, wie sich die menschlichen Hirnzellen auf die Denkleistung der Versuchstiere auswirkten. Tatsächlich zeigte sich, dass die behandelten Nager ihren unveränderten Artgenossen in diesem Punkt deutlich überlegen waren. Spielten die Forscher den Tieren etwa einen Ton vor und versetzten ihnen danach einen kurzen elektrischen Schlag, erinnerten sich die Mischwesen außergewöhnlich lange daran: Noch 24 Stunden später zeigten sie große Furcht vor dem Ton, während ihre normalen Verwandten den unangenehmen Zusammenhang bereits wieder vergessen hatten.

Setzten die Forscher das Experiment über mehrere Tage hinweg fort, wurden die Chimären immer ängstlicher; ein Lerneffekt, der bei der Kontrollgruppe nicht vorkam. Die »Supermäuse« konnten sich auch den Ort von Objekten in ihrem Käfig besser merken und fanden in einem Orientierungsversuch schnel-

ten der antiken Mittelmeervölker ihresgleichen hatte.

Die Keramikexpertin Gabriele Franke M.A. ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Archäologie und Archäobotanik Afrikas des Instituts für archäologische Wissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt am Main.

Literaturtipp

Breunig, P. (Hg.): »Nok – ein Ursprung afrikanischer Skulptur«, Katalog zur Ausstellung in der Liebighaus Skulpturensammlung in Frankfurt am Main. Africa Magna Verlag, Frankfurt am Main 2013



Mit dem so genannten Barnes-Labyrinth-Test untersuchten die Forscher die räumliche Orientierungsfähigkeit der Mäuse. Die manipulierten Tiere fanden – durch die Löcher in der Scheibe – deutlich schneller den Weg in die Freiheit.

ler den Weg in die Freiheit (siehe Bild). Alle Tests scheinen also darauf hinzudeuten, dass die menschlichen Astrozyten die Nager schlauer machen.

Um herauszufinden, woran das liegt, nahm Xiaoning Han Gewebeschnitte der Mäusegehirne in Kultur. Sie stimmulierte sie mit kleinen Stromimpulsen und maß, wie schnell sie die Signale weiterleiteten.

Es zeigte sich, dass die elektrische Spannung in nachgeschalteten Nervenzellen bei den Mischwesen deutlich schneller schwankte als bei ihren nicht manipulierten Artgenossen. Offensichtlich, so vermuten die Forscher, werden die Neurone der Mäuse durch die Nähe zu den menschlichen Sternzellen leichter erregbar. Der Effekt war sogar von Dauer: Noch eine Stunde nach dem Experiment übertrugen die Nervenzellen der Chimären elektrische Signale besser als jene der Kontrolltiere. Offenbar hatte sich die so genannte Langzeitpotenzierung gesteigert, ein grundlegender zellulärer Mechanismus beim Lernen.

Wie schaffen es die Astrozyten, die Denkleistung der Mäuse so fundamental zu erhöhen? Das Forscherteam hat hier einen bestimmten Signalstoff unter Verdacht: den Tumornekrosefaktor α (TNF- α). Frühere Studien hatten bereits gezeigt, dass Sternzellen dieses Protein abgeben, worauf benachbarte Nervenzellen verstärkt die so genannten AMPA-Rezeptoren, die auf den Neurotransmitter Glutamat reagieren, in ihre Membran einbauen. Tatsächlich fanden Han und ihre Kollegen im Nervengewebe der Chimären deutlich erhöhte Konzentrationen von TNF- α . Immunhistologische Tests wiesen zudem in den aufgerüsteten Mäusehirnen besonders große Mengen der GluR1-Untereinheit des AMPA-Rezeptors nach.

Abschaltbares Gehirndoping

Laut den Wissenschaftlern läuft demnach folgende Kette von Veränderungen ab: Die menschlichen Sternzellen schütten reichlich TNF- α aus, was das Enzym Proteinkinase C aktiviert. Dieses überträgt Phosphatgruppen auf die

AMPA-Untereinheit GluR1, was den Einbau des Rezeptors in die Synapsenmembran erleichtert. In der Folge kann die Kontaktstelle elektrische Signale zwischen den Neuronen besser weiterleiten. Dieses »Gehirndoping« konnten die Forscher sogar gezielt wieder ausschalten: Wenn sie den Tieren eine Substanz namens Thalidomid verabreichten, das die Herstellung von TNF- α blockiert, blieben die Mäuse so dumm wie zuvor.

Das Team um Xiaoning Han ist davon überzeugt davon, mit seinen Experimenten einen wesentlichen Mechanismus aufgedeckt zu haben, welcher der überragenden Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns zu Grunde liegt. Ihre Chimären seien zudem besonders gut dafür geeignet, die Funktion der Sternzellen in lebenden Organismen zu untersuchen – und damit möglicherweise auch Erkrankungen des Nervensystems besser zu verstehen.

Tim Haarmann ist freier Wissenschaftsjournalist in Bremen.

brandeins

Wirtschaftsmagazin

Wir
müssen
reden.

Schwerpunkt

Verhandeln



Jetzt scannen, lesen und Probeabo bestellen.
Oder direkt unter www.brandeins.de



SPINTRONIK

Magnetische Knoten auf der Festplatte

Erstmals konnten Forscher gezielt so genannte Skyrmionen »schreiben« und »löschen«. Mit solchen magnetischen Wirbeln lassen sich zumindest im Prinzip Informationen viel dichter speichern als auf gängigen Festplatten.

VON CHRISTIAN HANNEKEN UND NIKLAS ROMMING

Das Ende der Computerfestplatten ist abzusehen, denn künftigen Anforderungen an hohe Speicherkapazitäten sind sie wohl schon bald nicht mehr gewachsen. Auf handelsüblichen Exemplaren werden jeweils viele Atome, deren magnetische Momente parallel zueinander ausgerichtet sind, zu einem Datenbit zusammengefasst. Ein solches Atombündel ähnelt einem winzigen Stabmagneten, der sich in genau zwei Richtungen orientieren und auf diese Weise Nullen und Einsen darstellen kann. Damit auf derselben Fläche mehr Daten unterkommen, verkleinerte man die magnetischen Bits im Lauf der Zeit immer weiter. Ab einer gewissen Größe geht das aber nicht mehr.

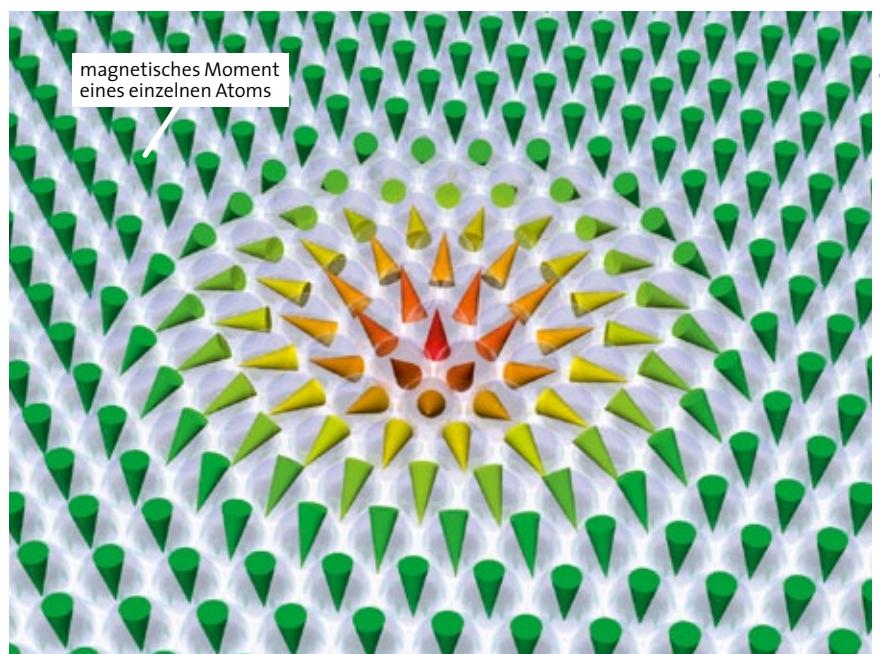
Diese schematische Darstellung eines Skyrmions zeigt die magnetischen Momente (in Kegelform, Färbung abhängig von der jeweiligen Ausrichtung) einzelner Atome auf der Oberfläche eines Festkörpers. Grüne Kegel entsprechen dem ferromagnetischen Zustand, in dem die magnetischen Momente parallel ausgerichtet sind. Die wirbelförmige Struktur der gelben und roten Elemente ist dagegen charakteristisch für Skyrmionen.

Dann führen die Wechselwirkungen zwischen benachbarten Bits und thermische Fluktuationen dazu, dass einzelne Bits ungewollt umschalten.

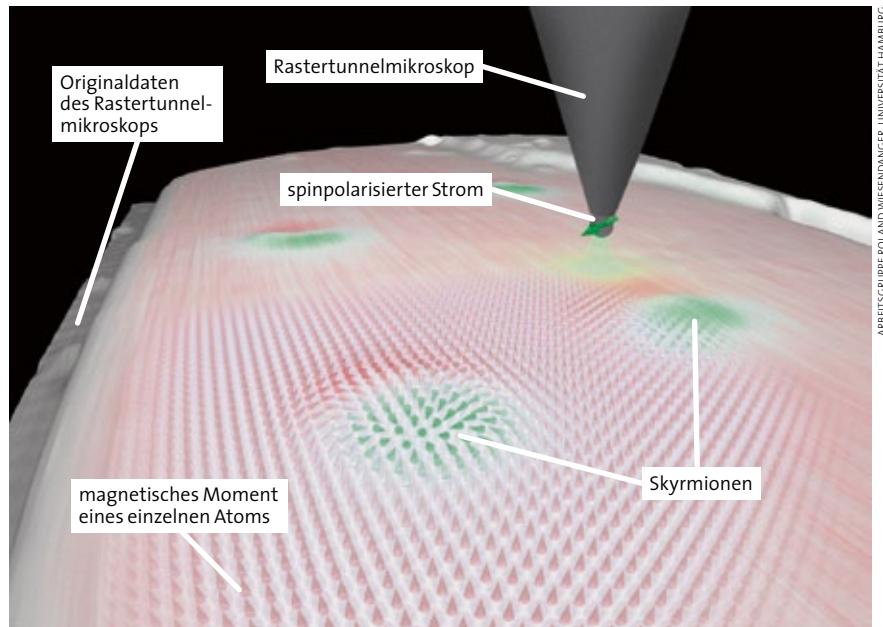
Doch es gibt eine Alternative. Bislang werden die magnetischen Momente, genauer die Spins der Teilchen, entweder parallel oder antiparallel zueinander angeordnet, also kollinear, wie Experten sagen. Doch es sind auch nichtkollineare Spin-Strukturen denkbar; in ihnen haben benachbarte Spins weit mehr Möglichkeiten, sich anzuordnen. Dabei nehmen sie durch verschiedene, miteinander konkurrierende Wechselwirkungen aufeinander Einfluss. Eine davon ist die so genannte Austauschwechselwirkung – ein Effekt,

der von der Quantennatur der magnetischen Momente herröhrt und zum Beispiel in ferromagnetischen Materialien benachbarte Spins parallel ausrichtet. Ein weiterer Effekt, die Dzyaloshinskii-Moriya-Wechselwirkung, bringt Spins dazu, sich vorzugsweise verkippt zueinander zu orientieren. Beide Wechselwirkungen zusammen können unter bestimmten Bedingungen eine ganz spezielle nichtkollineare Struktur von Spins hervorbringen: ein Skyrmiion (siehe Darstellung unten).

Die Idee der Skyrmionen ist nicht neu. Der britische Theoretiker Tony Skyrme, nach dem sie benannt sind, hatte vor mehr als 50 Jahren den Gedanken entwickelt, dass in quanten-



ARBEITSGRUPPE ROLAND WIESENDANGER, UNIVERSITÄT HAMBURG



ARBEITSGRUPPE ROLAND WIESENDANGER, UNIVERSITÄT HAMBURG

physikalischen Feldern bestimmte Phänomene auftreten können, die sich mathematisch wie Teilchen beschreiben lassen und dabei Wirbeln ähneln, die in ihrer Bewegung eingefroren sind. 1989 sagten Forscher dann voraus, dass solche Quasiteilchen auch in magnetischen Systemen vorkommen können, wo sie von den wechselwirkenden Spins benachbarter Partikel hervorgebracht werden. Ihren Teilchencharakter gewinnen sie, weil die Spinrichtungen gewissermaßen »verknotted« sind und sich nur unter Energieaufwand wieder entknoten lassen. Im Jahr 2009, gelang es an der Technischen Universität München erstmals, solche Wirbel, lokalisiert an den Gitterpunkten eines gedachten regelmäßigen Gitters, experimentell in einem Festkörper nachzuweisen.

Zu den Voraussetzungen für die Entstehung von Skyrmionen in einem Kristall zählt, dass in diesem eine bestimmte Form der Raumsymmetrie gebrochen sein muss; in den bis dahin untersuchten Kristallen war dies durch deren chirale Struktur sichergestellt, die eine Unterscheidung zwischen linkshändig und rechtshändigen Systemen möglich macht. Eine entsprechende Symmetriebrechung liegt aber auch an der Oberfläche eines Festkörpers vor. 2011 gelang es unserer Arbeitsgruppe um Roland Wiesendanger von der Universität Hamburg, ein quadratisches Skyrmionengitter in einem nur eine Atomlage dicken Eisenfilm auf einem Iridiumkristall nachzuweisen. Das Ergebnis ließ auf mehr hoffen: Das Materialsystem konnten wir in einem einfachen

Mit der magnetischen Spitze eines Rastertunnelmikroskops können Skyrmionen (grüne Bereiche) präzise vermessen, aber auch manipuliert werden. Schickt man einen spinpolarisierten Strom durch die Spitze des Mikroskops, lässt dessen magnetisches Moment die Quasiteilchen entstehen oder verschwinden. Im Hintergrund der illustrierenden Darstellung sind die mit dem Mikroskop gewonnenen Daten zu sehen (grau).

Verfahren herstellen, außerdem waren die Skyrmionen kleiner als in früheren Studien. Weil sie zudem in einem dünnen Film auftraten – und nicht etwa im Inneren eines Kristalls –, bieten sie die Voraussetzung, sich durch vertikale Ströme leicht manipulieren zu lassen.

Vier Datenbits – der erste Schritt zur Festplatte der Zukunft?

Doch dies war nur der erste Schritt. In der Folgezeit konzentrierte sich unsere Gruppe auf die gezielte Erzeugung und Vernichtung von Skyrmionen, also auf das »Schreiben« und »Löschen« von Datenbits. Damit hatten wir jetzt Erfolg: Es gelang uns, in einem ebenfalls extrem dünnen Film aus Palladium und Eisen auf einem Iridiumsubstrat vier Skyrmionen kontrolliert hin- und herzuschalten, sie also immer wieder zu erzeugen und zu vernichten (*Science* 341, S. 636, 2013). Jedes Skyrmion setzte sich dabei aus rund 300 Atomen zusammen und besaß einen Durchmesser von fünf bis sechs Nanometer (milliardstel Meter).

Durch Selbstorganisation hatten sich auf dem Substrat zuerst Eisen- und auf diesen Palladiuminseln gebildet; letztlich war die Palladium-Eisen-Schicht gerade einmal zwei Atomlagen dick. Bei Temperaturen um minus 269 Grad Celsius nahm dieses System drei verschiedene Phasen an. Zunächst bildete sich in den Palladium-Eisen-Inseln eine spiralartige Spinstruktur aus. Schalteten wir ein äußeres magnetisches Feld ein, teilten sich die Spiralen, verkleinerten sich und begannen, ein regelmäßiges Gitter aus Skyrmionen zu bilden. Erhöhten wir das Magnetfeld weiter, verschwanden die Skyrmionen nach und nach, bis nur noch einzelne zurückblieben, die an Defekten in den Palladiuminseln verharnten. Bei noch höherer Feldstärke richteten sich schließlich alle magnetischen Momente in der Palladium-Eisen-Lage in Richtung des Magnetfelds aus – das System war ferromagnetisch geworden.

An diesem letzten Phasenübergang, der Grenze zwischen der Skyrmionengitterphase und Ferromagnetismus,

Kostbare Kacke

Ekeltherapie hilft gegen hartnäckige Darmleiden.

In letzter Zeit befassen sich auffallend viele Fachartikel mit dem regen Leben in unserem Darm. Die dort angesiedelten Mikroben sind zwar winzig, aber so zahlreich, dass sie ein bis zwei Kilogramm zum Körpergewicht beitragen. In aller Regel handelt es sich um gutartige Symbionten, die sich beim Verdauen der Speisen nützlich machen und das allgemeine Wohlbefinden fördern – wozu auch ein guter Stuhlgang gehört. Doch mitunter schleichen sich in unsere inneren Feuchtgebiete bösartige Parasiten ein, etwa das Bakterium *Clostridium difficile*. Es verursacht Durchfall und Fieber, ist oft resistent gegen Antibiotika und kann sogar zum Tod führen.

Angesichts eines besonders bedrohlichen Falls wagte der Mediziner Max Nieuwdorp am Amsterdamer Universitätskrankenhaus 2006 eine so genannte Fäkaltransplantation: Nach einer gründlichen Darmspülung verabreichte er der Patientin über eine bis in den Zwölffingerdarm geschobene Nasensonde den mit Salzlösung verflüssigten Spenderkot ihres Sohns. Binnen Tagen gesundete die Frau völlig (*Science* 341, S. 954, 2013).

Falls Sie einen Spiegel zur Hand haben, sollten Sie an diesem Punkt der Lektüre Ihren Gesichtsausdruck kontrollieren: Fast sicher werden Sie an sich die hochgezogene Oberlippe beobachten, eine typische Ekelreaktion. Umgangssprachlich wird die medizinische Übertragung der Darmflora darum auch Ekeltherapie genannt.

Dabei kann das Verfahren auf eine ehrwürdige Tradition zurückblicken. Der chinesische Arzt Ge Hong beschrieb es schon im 4. Jahrhundert, sein deutscher Fachkollege Christian Franz Paullini (1643–1712) zählte in seinem 1697 erschienenen Lehrbuch »Heilsame Dreck-Apotheke« verschiedene Beispiele für die Heilwirkung menschlicher Exkreme auf. Und schließlich publizierte der US-Mediziner Ben Eiseman von der University of Colorado in Denver im Jahr 1958 in der Zeitschrift »Surgery« jeden Artikel über vier erfolgreiche Fäkaltransplantationen, der Nieuwdorp ein halbes Jahrhundert später den Mut zu seinem gelungenen Therapieversuch machte.

Inzwischen wird die Methode von manchen Medizinern routinemäßig praktiziert und ist Gegenstand mehrerer kontrollierter Studien. Viele Ärzte bleiben allerdings skeptisch und warnen vor Euphorie. Beispielsweise muss der Spenderkot zuvor gründlich auf mögliche Krankheitserreger untersucht werden, doch in der Grauzone der Alternativmedizin werden über das Internet bereits dubiose Anleitungen zur Fremdkotaufnahme verbreitet.

Möglicherweise verspricht die medizinische Manipulation der Darmflora auch ein Mittel gegen krankhaftes Übergewicht. Ein interdisziplinäres Team von Ernährungswissenschaftlern, Biologen und Medizinern um die französische Genetikerin Emmanuelle Le Chatelier hat einen Zusammenhang zwischen Fettleibigkeit und geringerer Artenvielfalt der Darmmikroben nachgewiesen (*Nature* 500, S. 541, 2013). Verarmt das Biotop in unserem Unterleib aus irgendeinem Grund genetisch, so steigt das Risiko, an Adipositas zu erkranken. Umgekehrt lässt sich die mikrobielle Artenvielfalt durch schlank machende Diät erhöhen, wie ein Team um die Biologin Aurélie Cotillard zeigen konnte (*Nature* 500, S. 585, 2013).

Vielleicht wird man Fettleibigen daher eines Tages raten, Fremdkot aufzunehmen, um ihre magere Darmflora zu bereichern. Das könnte am Ende das schlechte Image der Fäzes aufpolieren. Schon 1964 gab Hans Magnus Enzensberger in seinem Gedicht »Die Scheisse« zu bedenken: »Hat sie uns nicht erleichtert? / Von weicher Beschaffenheit / und eigentlich gewaltlos / ist sie von allen Werken des Menschen / vermutlich das friedlichste. / Was hat sie uns nur getan?«



Michael Springer

bietet sich die Chance, einzelne Skyrmionen zu schreiben und zu löschen. Das Rastertunnelmikroskop, mit dem wir auch unsere Beobachtungen durchgeführt hatten, nutzten wir nun, um einen »magnetischen« Strom in die einzelnen Skyrmionen zu injizieren (Illustration S. 23). Dieser war so präpariert, dass bei einem Teil der fließenden Elektronen der Spin in dieselbe Richtung zeigte. So gelang es uns, Skyrmionen in ferromagnetische Bereiche zu verwandeln und umgekehrt, zumindest mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit.

Dabei fanden wir heraus, dass die Umschaltwahrscheinlichkeit entscheidend von der Energie der aus dem Mikroskop austretenden Elektronen abhängt. Auch die Richtung des Prozesses, ob ein Skyrmion also geschrieben oder gelöscht wird, konnten wir beeinflussen: Wir mussten dazu lediglich die Stromrichtung umkehren. Im Detail ist der zu Grunde liegende Mechanismus zwar noch unklar, aber wir vermuten, dass der Spin-Transfer-Torque – das Drehmoment, das der magnetische Strom auf die magnetischen Momente in der Probe ausübt – eine wichtige Rolle spielt.

Zumindest im Prinzip lassen sich Skyrmionen also zum Speichern von Daten benutzen. Unsere Versuche gelangen bislang allerdings nur im Ultra-hochvakuum, bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt und in einem starken äußeren Magnetfeld. Darauf versuchen wir nun, das Experiment so zu verändern, dass es auch unter alltäglicheren Bedingungen noch funktioniert. Der Aufwand könnte sich lohnen, denn Skyrmionen sind viel kleiner als konventionelle magnetische Bits. Mit Hilfe der magnetischen Knoten werden sich die Nullen und Einsen auf künftigen Festplatten möglicherweise noch einmal um das Zehn- bis Hundertfache dichter packen lassen als mit herkömmlicher Technologie – selbst wenn diese bis an ihr physikalisches Maximum ausgereizt wird.

Christian Hanneken und Niklas Romming

promovieren im Fach Physik in der Arbeitsgruppe um Roland Wiesendanger am Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg.

Besser aussehen. Das können Sie tun.

FOCUS GESUNDHEIT

Oktober | November 2013

GESUNDHEIT

Schönheits-OPs: Technik, Kosten, Risiken
Falten weg mit Botox, Filler, Laser & Co. / Was kann moderne Kosmetik bewirken?
Weisse, gerade Zähne / **Jungbrunnen für Hände & Füße** / **Körperschmuck**

Schön bleiben
Wie Entspannung, Sport und Ernährung Sie gut aussehen lassen. Plus: **SEX-Booklet**

Ärzteliste 150
Top-Experten für ästhetische Chirurgie, Botox & Filler. **Checkliste für den Eingriff**

Volle Pracht
So wird Ihr Haar gesund und kräftig

Schön sein
Was uns **für einander attraktiv** macht und wie Aussehen und Ausstrahlung in Einklang kommen



Bin ich schön (genug)?

Die Formeln der Attraktivität: Warum Männer stark und Frauen jung sein möchten und warum Schönheit auch eine Frage der Ausstrahlung ist. **Im Interview:** Der legendäre brasilianische Chirurg Ivo Pitanguy über sein Leben mit den Schönen.

Alles über ästhetische Eingriffe:

Was die Chirurgie leisten kann. Welche Risiken und Nebenwirkungen auftreten. Was die Kassen bezahlen. Die Vor- und Nachteile von Botox® und Fillern. Wie Stammzellen die männliche Glatze verhindern sollen. **Dazu:** Schöne Zähne und wie Laser Tattoos entfernen.

Cremen für die ewige Jugend:

Wie Kosmetik wirkt und was die Inhaltsstoffe gegen Falten, Flecken und Cellulite ausrichten. Die richtige Pflege für Gesicht, Hände, Füße und Haare. Wie Ernährung die Haut jung hält. **Plus Ärzteliste:** 150 Top-Experten für Schönheitsbehandlungen mit Adressen.

In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.

JETZT AM KIOSK.

FOCUS-GESUNDHEIT
gibt es auch unter:
Tel. 0180 6 480 1006*
Fax 0180 6 480 1001*
www.focus-gesundheit.de

*0,20 €/Anruf aus dem dt. Festnetz.
Mobil max. 0,60 €/Anruf.

NEU: AUCH ALS
E-PAPER





Studien zeigen, dass Antioxidanzien das Leben oft nicht verlängern, sondern es vielmehr verkürzen.

Entzauberte Antioxidanzien

Oxidativer Stress fördert Alterungsprozesse in Zellen und Geweben, Vitamine wirken ihm entgegen und halten so die Alterung auf – diese These klingt einleuchtend und wurde lange kaum hinterfragt. Nun gerät sie ins Wanken.

Von Melinda Wenner Moyer

Vor sieben Jahren geriet das Leben von David Gems völlig aus den Fugen. Schuld daran waren ein paar Würmer, die gegen jede Erwartung weiterlebten, obwohl sie eigentlich sterben sollen. Gems, stellvertretender Direktor am Institute of Healthy Aging des University College London, führt regelmäßig Experimente mit Fadenwürmern durch. Die Tiere gehören zur Spezies *Caenorhabditis elegans*, an der viele Forscher Alterungsprozesse untersuchen. Gems prüfte die Hypothese, dass Lebewesen vor allem deshalb altern, weil ihre Zellen oxidationsbedingte Schäden anhäufen. Eine Oxidation liegt dann vor, wenn reaktionsfreudige Atome oder Moleküle, etwa freie Radikale, anderen Molekülen Elektronen entziehen. Gems nahm an, ungezügelte Oxidationsprozesse würden im Lauf der Zeit immer mehr Lipide, Proteine, DNA-Abschnitte und andre Zellbestandteile schädigen, was die Funktionen der Gewebe, Organe und schließlich des ganzen Körpers zunehmend in Mitleidenschaft ziehe.

Der Forscher veränderte das Genom von Fadenwürmern so, dass die Tiere bestimmte Moleküle nicht mehr herstellen konnten – nämlich Enzyme, die als natürliche Antioxidanzien wirken, indem sie freie Radikale inaktivieren. In Abwesenheit dieser Enzyme steigt die Konzentration freier Radikale stark an, was einen deutlich erhöhten oxidativen Stress mit sich bringt. Die so manipulierten Fadenwürmer hätten deshalb früher sterben müssen. Das trat jedoch nicht ein: Sie lebten genauso lang wie normale Würmer. Gems war verblüfft. »Ich sagte mir, das kann einfach nicht stimmen«, erinnert er sich, »allem Anschein nach war bei dem Experiment etwas schiefgegangen.« Er bat einen Kollegen, die Ergebnisse zu prüfen

und das Experiment zu wiederholen. Heraus kam das Gleiche: Die genetisch modifizierten Würmer starben nicht früher als ihre normalen Artgenossen – trotz stärker ausgeprägter, oxidationsbedingter Zell- und Gewebeschäden.

Inzwischen liegen ähnliche Ergebnisse auch von anderen Forschergruppen und Versuchstierarten vor. Arlan Richardson, Direktor am Barshop Institute for Longevity and Aging Studies der University of Texas in San Antonio, erzeugte 18 verschiedene Mäusestämme, von denen einige vermehrt antioxidative Enzyme produzierten, andere hingegen vermindert. Wären oxidative Schäden wirklich eine wichtige Ursache des Alterns, dann müssten Mäuse mit mehr antioxidativen Enzymen länger leben als solche, denen es daran mangelt. »Doch als ich die Überlebenskurven der verschiedenen Stämme miteinander verglich, fand ich nicht den geringsten Unterschied«, erzählt Richardson.

Ebenfalls an der University of Texas arbeitet die Physiologin Rochelle Buffenstein. Sie versucht seit elf Jahren herauszufinden, warum das langlebigste Nagetier, der Nacktmull, bis zu 30 Jahre alt wird und damit ungefähr achtmal so lange lebt wie eine etwa gleich große Maus. Buffensteins Experimente ergaben, dass Nacktmulle über weniger natürliche Antioxidanzien verfügen als Mäuse und schon früh in ihrem Leben mehr oxidative Schäden im Gewebe anhäufen als andere Nagetiere. Trotzdem erreichen sie ihr vergleichsweise sehr hohes Alter und werden fast nie krank.

Wer die These vertritt, Altern beruhe auf oxidativen Zell- und Gewebeschäden, für den grenzen solche Berichte an Häresie. Doch sie häufen sich. In den zurückliegenden zehn Jahren haben Forscher zahlreiche Experimente durchgeführt, um zu beweisen, dass oxidativer Stress den Alterungsprozess vorantreibt. Zu ihrer Überraschung beobachteten viele das Gegenteil. Es scheint so, dass reaktionsfreudige Atome und Moleküle in bestimmten Mengen und unter bestimmten Umständen keineswegs gefährlich sind, sondern vielmehr gesundheitsfördernd, indem sie körpereigene Schutzmechanismen in Gang setzen. Falls das zutrifft, müssen nicht nur Strategien gegen das Altern neu durchdacht werden. Es stellt sich dann auch die Frage, ob es sinnvoll ist, antioxidativ wirkende Vitamine in hohen Dosen als Nahrungsergänzungsmittel einzunehmen. Altern ist augenscheinlich ein komplizierterer Vorgang, als Forscher bisher annahmen. Die Vorstellung davon, was er auf molekularer Ebene bedeutet, muss offenbar grundsätzlich revidiert werden.

Die These, dem Altern liege eine Ansammlung oxidationsbedingter Schäden zu Grunde, geht zurück auf den amerikanischen Biogerontologen Denham Harman. Es wird erzählt, seine Frau habe ihn 1945 auf einen Artikel in der Frauenzeitschrift »Ladie's Home Journal« hingewiesen. Dieser handelte über mögliche Ursachen des Alterns. Harman las den Beitrag und war fasziniert. Der damals 29-Jährige arbeitete als Chemiker in der Entwicklungsabteilung des Mineralölkonzerns Shell und hatte zunächst nicht viel Zeit, über das Thema nachzudenken. Doch später studierte er Medizin, schloss eine Arztausbildung ab und nahm eine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der University of California, Berkeley, an. Dort begann er sich ernsthaft mit Alternsforschung zu beschäftigen. Eines Morgens im Büro hatte er eine Eingebung, »geradezu aus heiterem Himmel«, wie er sich 2003 in einem Interview erinnerte: Freie Radikale seien es, die Alterungsprozesse vorantrieben.

Strahlenkrankheit und Alter

Obwohl noch niemand zuvor diesen Gedanken geäußert hatte, schien er Harman plausibel. Zum einen wusste er, dass ionisierende Strahlung aus Röntgenröhren oder Atombomben freie Radikale im menschlichen Körper erzeugt. Damaligen Studien zufolge verminderte das Zuführen von Antioxidanzien über die Nahrung die krank machende Wirkung der Strahlen. Daraus schlossen viele Forscher – zutreffend, wie sich später herausstellte –, reaktionsfreudige Spezies würden die Strahlenschäden im Körper mit verursachen. Zudem war bekannt, dass freie Radikale als Nebenprodukte der Atmung und des Stoffwechsels anfallen und sich mit der Zeit im Körper anhäufen. Da sowohl die Konzentration freier Radikale als auch Zellschäden mit dem Alter zunehmen, vermutete Harman, Ersteres würde Letzteres verursachen und sei damit der Grund für das Altern. Antioxidanzien, so seine Schlussfolgerung, sollten den Prozess verlangsamen können.

Harman begann, seine Hypothese zu prüfen. In einem seiner ersten Experimente verabreichte er Mäusen Antioxidanzien, woraufhin diese länger lebten. In hoher Dosierung wirkten die Substanzen allerdings schädlich. Schon bald führten auch andere Forscher entsprechende Versuche durch. 1969 entdeckten Wissenschaftler an der Duke University in Durham (USA) das erste antioxidativ wirkende Enzym, das im menschlichen Körper hergestellt wird, die Superoxid-Dismutase. Die Wissenschaftler spekulierten, das Enzym habe sich in der Evolution durchgesetzt, da es den schädlichen Effekten freier Radikale entgegenwirke. Die meisten Biologen fanden das einleuchtend. »Für uns Alternsforscher ist diese These mittlerweile selbstverständlich«, sagt Gems, »man findet sie in jedem Lehrbuch, und praktisch jeder einschlägige Fachartikel verweist direkt oder indirekt auf sie.«

AUF EINEN BLICK

EINES BESSEREN BELEHRT

1 Jahrzehntelang gingen Forscher davon aus, dass **reaktionsfreudige Atome und Moleküle** – etwa freie Radikale – Alterungsprozesse vorantreiben, indem sie Zellen schädigen und damit die Funktionen von Geweben und Organen beeinträchtigen.

2 Laut neuen Experimenten an Mäusen und Fadenwürmern scheint jedoch ein **erhöhter Spiegel an bestimmten freien Radikalen** das Leben zu verlängern. Offenbar aktivieren diese reaktionsfreudigen Spezies zelluläre Reparatursysteme.

3 Demnach könnte die **Zufuhr von Vitaminen oder anderen Nahrungsergänzungsmitteln** womöglich mehr schaden als nützen – zumindest bei gesunden Menschen.

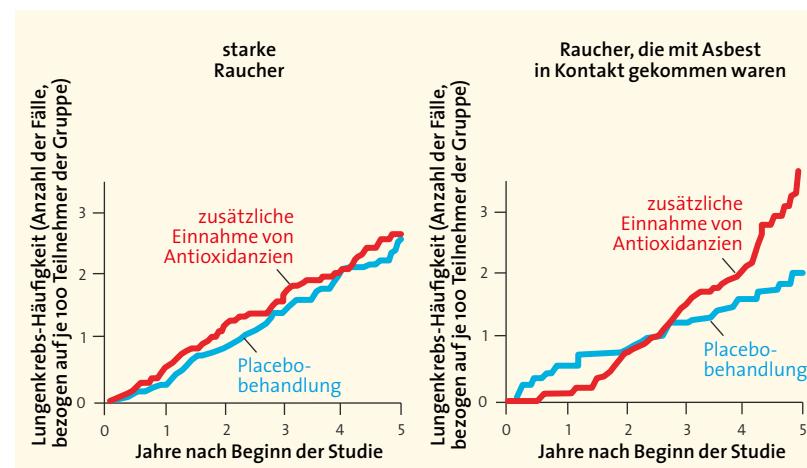
Schädliche Vitamine

Epidemiologische Untersuchungen zeigen, dass Menschen, die viel Obst und Gemüse essen, länger leben und seltener an Krebs erkranken als Menschen, die weit gehend auf pflanzliche Kost verzichten. Da Obst und Gemüse oft reich an Vitaminen und anderen Antioxidanzien sind, schien die Annahme plausibel, dass die zusätzliche Einnahme von Antioxidanzien die Gesundheit

fördern müsse. Doch die Ergebnisse der qualitativ besten einschlägigen Studien bestätigen diese Vermutung nicht. Im Gegenteil: Die wissenschaftlichen Daten zeigen, dass Menschen, die bestimmte Nahrungsergänzungsmittel einnehmen, sogar häufiger schwer erkranken – etwa an Lungenkrebs oder Herzkrankheiten.

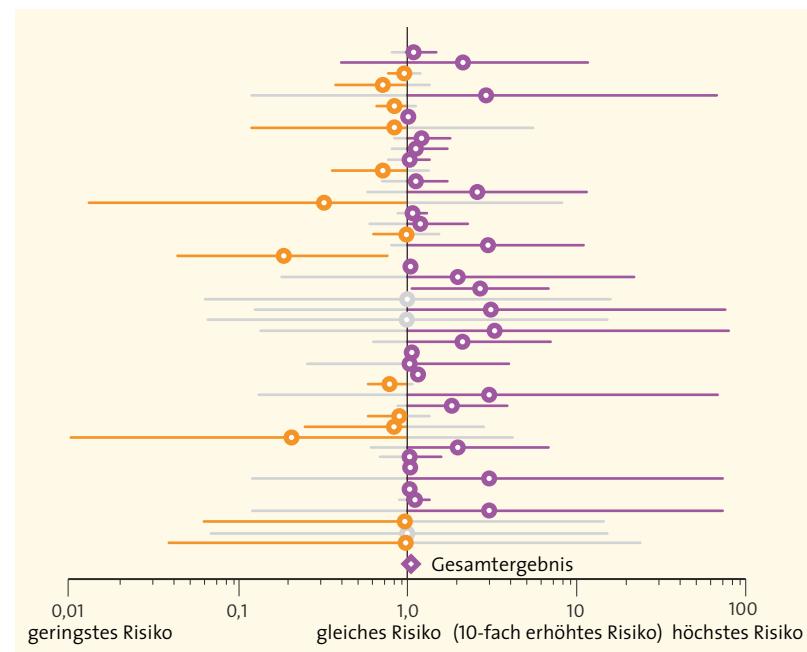
Frühe Hinweise auf den Schaden durch Antioxidanzien

Eine Studie aus dem Jahr 1996, an der etwa 18 000 Männer und Frauen teilnahmen, lieferte ein unerwartetes Ergebnis. Unter den Teilnehmern, die regelmäßig Betacarotin und Vitamin A1 einnahmen, traten 28 Prozent mehr Fälle von Lungenkrebs und 17 Prozent mehr Todesfälle auf als in der Kontrollgruppe. Dieser Befund zeichnete sich bereits 18 Monate nach Beginn der Studie ab, besonders bei starken Rauchern. Die deutlichste Erhöhung des Lungenkrebsrisikos war bei Rauchern zu verzeichnen, die Antioxidanzien einnahmen und mit Asbest in Kontakt gekommen waren, einer bekanntlich stark krebserregenden Substanz.



Die zusätzliche Einnahme bestimmter Vitamine könnte das Leben verkürzen

Im Jahr 2007 analysierten Forscher 68 der wissenschaftlich sorgfältigsten Studien zur Vitamineinnahme. Die Auswertung der 47 verlässlichsten Untersuchungen ergab, dass das Risiko eines frühen Todes bei den Teilnehmern, die ergänzend Vitamine eingenommen hatten, um fünf Prozent erhöht war. Weitere Analysen zeigten, dass besonders Betacarotin, Vitamin A und Vitamin E das Sterberisiko vergrößert hatten.

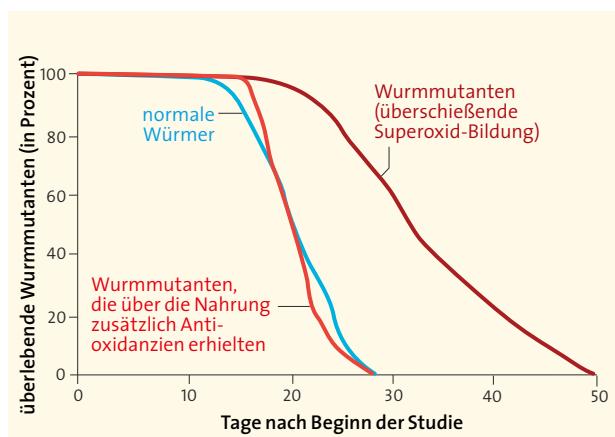


Verschiedene Forschergruppen untersuchten den Zusammenhang zwischen der ergänzenden Zufuhr von (antioxidativen) Vitaminen und dem Risiko eines frühen Todes. Jeder waagrechte Strich steht für eine Studie. Der Punkt markiert den jeweils ermittelten Wert dafür, wie die Vitaminzufuhr mit dem Sterberisiko assoziiert ist. Ein Wert von 1 (grau) bedeutet,

es gab keinen erkennbaren Zusammenhang zwischen diesen beiden. Werte kleiner 1 (orange) bedeuten, dass es bei den Vitaminkonsumenten seltener zu frühen Todesfällen kam. Werte größer 1 (lila) entsprechen einer erhöhten Anzahl früher Todesfälle unter den Vitaminkonsumenten. Die Länge der Striche ist ein Maß für die Unsicherheit.

Studien an Wurmmutanten

Einige Arten von freien Radikalen fördern möglicherweise die Gesundheit, statt wie bisher geglaubt Alterungsprozesse voranzutreiben, indem sie oxidativen Stress verursachen. Einer Hypothese zufolge, die unter anderem auf den kanadischen Biologen Siegfried Hekimi zurückgeht, stimulieren bestimmte freie Radikale die zellulären Reparaturmechanismen eines Organismus – zumindest wenn ihre Konzentration einen gewissen Wert nicht überschreitet. 2010 untersuchten Hekimi und seine Mitarbeiter, wie lange Wurmmutanten überleben, die überdurchschnittlich viele Superoxide bilden, reaktionsfreudige chemische Verbindungen. Zur Überraschung der Forscher lebten diese Tiere länger als normale Würmer. Wurden die Mutanten mit antioxidantienangereicherter Nahrung gefüttert, büßten sie den Zugewinn an Lebenszeit wieder ein.



NACH YANG, W., HEKIMI, S.: MIT OVEREXPRESSION OF SUPEROXIDE SIGNAL TRIGGERS INCREASED LONGEVITY IN CAENORHABDUS ELEGANS IN FLIES BIOLOGY & ECOLOGY 2010, HC, 26

Manche Wissenschaftler hatten allerdings Mühe, Harmans Befunde zu reproduzieren. Schon in den 1970er Jahren konstatierten einige, es gebe keine belastbaren Beweise dafür, dass sich die Zufuhr von Antioxidanzien tatsächlich auf die Lebensdauer auswirkt. Allerdings wurden die Experimente damals auch oft unter schlecht kontrollierten Bedingungen durchgeführt, so Richardson. Manchmal sei beispielsweise nicht klar gewesen, ob die Versuchstiere die Nahrungs zusätze überhaupt richtig aufnehmen konnten.

Fortschritte in der Gentechnik erlaubten den Forschern ab den 1990er Jahren, die Effekte von Antioxidanzien präziser zu untersuchen. Mittels genetischer Manipulation veränderten sie die Fähigkeit der Versuchstiere, antioxidativ wirkende Enzyme zu bilden. Bei Versuchen an so modifizierten Mäusen beobachtete Richardson immer wieder, dass die Konzentration der im Körper zirkulierenden freien Radikale – und somit das Ausmaß oxidativer Schäden – keinen Einfluss auf die Lebensdauer hatte.

Kürzer leben dank Vitamin C

Zu ähnlichen Ergebnissen ist vor drei Jahren der Biologe Siegfried Hekimi von der McGill University in Montreal (Kanada) gekommen. Er veränderte das Genom von Fadenwürmern so, dass die Tiere überdurchschnittlich viele Superoxide bildeten – reaktionsfreudige chemische Verbindungen. Seine Erwartung: Die modifizierten Würmer würden früher sterben als gewöhnlich. »Ich hoffte, wir könnten mit Hilfe dieser Tiere endlich beweisen, dass oxidativer Stress der Grund für das Altern ist«, sagt Hekimi. Doch völlig unerwartet beobachtete er, dass die durchschnittliche Lebensdauer der manipulierten Fadenwürmer um 32 Prozent höher lag als bei normalen Artgenossen. Noch verblüffender: Wenn er den genetisch modifizierten Tieren das Antioxidans Vitamin C verabreichte, büßten sie ihren Zugewinn an Lebenszeit wieder ein. Hekimi vermutet, dass die Superoxide nicht zerstörerisch wirken, sondern ein Schutzsignal vermitteln – sie rufen die

gesteigerte Expression von Genen hervor, deren Produkte dazu beitragen, Zellschäden zu reparieren.

In einem Folgeexperiment setzte Hekimi normale Fadenwürmer geringen Konzentrationen eines Unkrautbekämpfungsmittels aus, das bei Tieren und Pflanzen den Spiegel freier Radikale in die Höhe treibt. Das Ergebnis scheint dem gesunden Menschenverstand zu widersprechen: Die mit dem Giftstoff konfrontierten Würmer lebten um durchschnittlich 58 Prozent länger als unbehandelte Tiere. Abermals minderten Antioxidanzien den lebensverlängernden Effekt des Pflanzengifts. Im zurückliegenden Jahr schließlich zeigten er und seine Kollegen, dass das Abschalten aller fünf Gene, die für Superoxid-Dismutase-Enzyme kodieren, keinen Effekt auf die Lebensdauer der Würmer hat.

Ist also die Rolle von freien Radikalen bislang völlig falsch eingeschätzt worden? Für Simon Melov, Biochemiker am Buck Institute for Research on Aging in Novato (Kalifornien), ist die Sachlage komplizierter. Reaktionsfreudige Atome und Moleküle seien wahrscheinlich unter bestimmten Bedingungen nützlich und unter anderen schädlich. Oxidative Schäden in größerem Ausmaß erhöhten unbestreitbar das Risiko für Krebs und Organschäden. Zudem dürften sie einige chronische Erkrankungen, etwa des Herzens, mit verursachen. Forscher der University of Washington in Seattle haben des Weiteren gezeigt, dass Mäuse länger leben, wenn sie infolge genetischer Manipulationen überdurchschnittlich viel Katalase bilden – ein antioxidativ wirkendes Enzym. Oxidativer Stress trägt laut Melov unter bestimmten Umständen zu Alterungsprozessen bei, ist aber nicht die alleinige Ursache dafür. Demzufolge ließe sich diesen Prozessen auch nicht mit einem einzigen Behandlungsverfahren entgegenwirken.

Wenn sich reaktionsfreudige Spezies mit steigendem Alter anhäufen, das Älterwerden jedoch nicht verursachen, welche Effekte bewirken sie dann? Darüber können die Forscher im Wesentlichen nur spekulieren. »Sie sind ein Teil der Körperabwehr«, vermutet Hekimi. Freie Radikale könnten

etwa als Reaktion auf Zellschäden produziert werden, um körpereigene Reparaturmechanismen in Gang zu setzen. In diesem Fall wäre ihre Anhäufung eine Folge von altersbedingten Zellschäden – nicht deren Ursache. In zu hoher Konzentration, so Hekimi, könnten die reaktionsfreudigen Spezies jedoch ihrerseits zerstörerisch wirken.

Möglich ist auch, dass sie den Körper auf einem konstanten Stresspegel halten, den er laufend kompensieren muss – wodurch er besser in der Lage sein könnte, akuten Stress zu bewältigen. Im Jahr 2002 behandelten Wissenschaftler der University of Colorado in Boulder (USA) Fadenwürmer kurzzeitig mit Wärme oder mit Chemikalien, welche die Bildung freier Radikale im Körper der Tiere ankurbelten. Wie die Forscher feststellten, ertüchtigt diese vorübergehende Stresseinwirkung die Würmer darin, nachfolgende größere Belastungen zu überstehen. Zudem stieg die mittlere Lebensdauer der Tiere um 20 Prozent. Allerdings untersuchten die Forscher nicht, ob die Behandlungen das Ausmaß oxidativer Schäden erhöhten.

Weitere Hinweise lieferten Forscher der University of California (San Francisco) und der Pohang University of Science and Technology in Südkorea im Jahr 2010. Sie beobachteten, dass bestimmte freie Radikale das *HIF-1*-Gen aktivieren. Es schaltet seinerseits weitere Gene ein, die an der Reparatur von Zellschäden beteiligt sind, darunter eines, das DNA-Defekte beseitigen hilft.

Wenn Stress gesund hält

Freie Radikale könnten auch die Ursache dafür sein, dass körperliche Bewegung die Gesundheit fördert. Lange Zeit hieß es, Sport sei gut für uns, obwohl er einen erhöhten oxidativen Stress mit sich bringt. Doch anscheinend müssen wir das Wort »obwohl« durch »weil« ersetzen. Vor vier Jahren veröffentlichten Forscher um Michael Ristow, Professor für Ernährungswissenschaften an der Friedrich-Schiller-Universität Jena, eine Studie, in der sie die physiologischen Profile zweier Gruppen von Sportlern verglichen: solche, die Antioxidantien einnahmen, und solche, die das nicht taten. Konsistent mit den Beobachtungen, die Richardsons Arbeitsgruppe an Mäusen gemacht hatte, stellte Ristow fest, dass die Sportler, die keine Vitamine einnahmen, gesünder waren. Sie wiesen unter anderem weniger Anzeichen dafür auf, dass sie später einmal Typ-2-Diabetes entwickeln könnten.

In eine ähnliche Richtung deuten Arbeiten der Mikrobiologin Beth Levine von der University of Texas in Dallas (USA). Die Forscherin fand heraus, dass körperliches Training den biologischen Prozess der Autophagie fördert. Er dient Zellen dazu, Bruchstücke von Proteinen und anderen Zellbestandteilen wiederzuverwerten (siehe SdW 12/2008, S. 58). Dabei werden die Altmoleküle mit Hilfe freier Radikale zerlegt. Allerdings sind die Zusammenhänge kompliziert: Levines Untersuchungen zeigen, dass mit steigender Autophagie-Intensität die Gesamtkonzentration an freien Radikalen sinkt. Dies deutet darauf hin, dass freie Radikale sehr verschiedene Effekte ausüben können, je nach ihrer Sorte, Kon-

zentration und dem Zellkompartiment, in dem sie vorliegen, sowie abhängig von der Situation.

Wenn stark oxidierende Spezies nicht immer schädlich sind, dann sind ihre Gegenspieler, die Antioxidantien, wohl auch nicht immer nützlich. Im Jahr 2007 veröffentlichte das »Journal of the American Medical Association« eine Übersichtsarbeit über 68 klinische Studien. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die Zufuhr von Antioxidantien als Nahrungsergänzung nicht das Sterberisiko vermindert. Schlossen die Autoren nur besonders verlässliche Studien in ihre Analyse ein – etwa strenge Blindtests, bei denen die Teilnehmer per Zufall in Gruppen eingeteilt wurden –, kam sogar heraus, dass bestimmte Antioxidantien das Sterberisiko erhöhen, mitunter um bis zu 16 Prozent.

Mehrere medizinische Fachgesellschaften, unter anderem die American Heart Association und die American Diabetes Association, empfehlen daher, auf die ergänzende Zufuhr von Antioxidantien zu verzichten – es sei denn, sie geschieht zur Behandlung eines diagnostizierten Vitaminmangels. Auch in Deutschland sehen viele Experten die zusätzliche Einnahme von Vitaminen und Antioxidantien kritisch. Das Bundesinstitut für Risikobewertung versucht, die Verbraucher mit einheitlichen Höchstmengen vor Überdosierungen zu schützen.

Altern ist offensichtlich ein weitaus komplexeres Phänomen, als Harman es sich vor fast 60 Jahren vorstellte. Gerns etwa vertritt die Auffassung, die vorliegenden Daten sprächen für eine neue These, wonach Altern auf der Überaktivität bestimmter Wachstums- und Vermehrungsprozesse beruht. Doch gleichgültig, welche Idee sich am Ende durchsetzt – das unaufhörliche Infragestellen scheinbar sicherer Tatsachen beschert uns nun zwar ungewohnte, dafür aber wohl realistischere Vorstellungen von den Mechanismen des Alterns. ↗

DIE AUTORIN



Melinda Wenner Moyer arbeitet als Wissenschaftsautorin und unterrichtet an der Graduiertenschule für Journalismus der City University of New York.

QUELLEN

Gems, D., Guardia, Y.: Alternative Perspectives on Aging in *Caenorhabditis elegans*: Reactive Oxygen Species or Hyperfunction? In: *Antioxidants & Redox Signaling* 19, S. 321–329, 2013

National Institutes of Health: Biology of Aging: Research Today for a Healthier Tomorrow. www.nia.nih.gov/health/publication/biology-aging, 2011

Pérez, V.I. et al.: Is the Oxidative Stress Theory of Ageing Dead? In: *Biochimica et Biophysica Acta* 1790, S. 1005–1014, 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1205319

Wildwuchs im Stammbaum des Menschen



Die *Ardipithecus-ramidus*-Frau, von der diese Knochen und Zähne stammen, lebte vor 4,4 Millionen Jahren in lichtem Wald. »Ardi« kletterte gut, ging aber auch zwischendurch auf dem Boden – und zwar aufrecht.

Paläoanthropologen müssen umdenken: Die Menschenaffen, von denen wir abstammen, ähnelten nicht Schimpansen. Diese sind zwar unsere nächsten lebenden Verwandten, aber unsere gemeinsamen Vorfahren sahen nach neueren Fossilfunden anders aus.

Von Katherine Harmon



Von fern hätte man sie wohl für ein menschliches Wesen gehalten: »Lucy«, die aufrecht gehende Australopithecinein. 3,2 Millionen Jahre lang hatten Teile ihres Skeletts fossil überdauert, 1974 kamen die Knochen in Äthiopien in der Afar-Region zum Vorschein. Lucy war nur ungefähr einen Meter groß, hatte lange Arme und einen kleinen Kopf, und sie schritt wohl nicht besonders anmutig einher. Doch ihre Art, *Australopithecus afarensis*, könnte zu der Evolutionslinie der Homininen gehört haben, die zum Menschen führte. Dann würden diese Vormenschen zu den ältesten bisher bekannten unserer Vorfahren mit aufrechtem Gang zählen.

Vor 40 Jahren sicherte allein der zweibeinige Gang der Spezies einen Platz im menschlichen Stammbaum. Für spätere Evolutionsphasen hatten Paläoanthropologen bald darauf erkannt, dass mehrere Entwicklungslinien, also verschiedene Arten von Vor- und Frühmenschen, nebeneinander existierten (siehe SdW 3/2000, S. 46). Doch die Anfänge stellten sie sich zunächst eher übersichtlich vor, ohne Seitenlinien mit ähnlichen Anpassungen. Nach der allgemeinen Auffassung stammten wir von schimpansenähnlichen Menschenaffen ab, die sich an langen Armen durch die Bäume schwangen und die Fingerknöchel aufsetzten, wenn sie auf dem Boden vierfüßig liefen. Von dort aus hätte sich dann in lediglich einer bestimmten Linie – der unserer Vorfahren – die Anatomie nach und nach umgestaltet und immer mehr an den aufrechten Gang adaptiert. In dieses Schema sortierten die Forscher früher alles ein, was sie an entsprechenden fossilen Zeugnissen fanden. Besonders Lucy schien gut hinzupassen. Aber auch manche sehr viel ältere, schwerer zu deutende Fossilien versuchte man dort einzuliedern.

Doch dieses gewohnte Bild stimmt nun nicht mehr. Vor allem zwei neuere bedeutende Funde aus Äthiopien erzäh-

AUF EINEN BLICK

WER WAREN UNSERE VORFAHREN?

1 Bisher dachten Forscher, menschentypische Eigenschaften seien exklusiv in einer einzigen Evolutionslinie aufgetreten. Aus Schimpansen ähnelnden Menschenaffen seien mit der Zeit Vormenschen geworden, die immer besser aufrecht gingen – und aus denen entstanden schließlich die ersten Vertreter der Gattung *Homo*.

2 Doch die frühen Homininen ähnelten nicht so sehr Schimpansen wie dafür weniger spezialisierten Menschenaffen. Nicht nur der Mensch hat seit der Trennung eine deutliche Evolution durchgemacht, auch die mit uns nächstverwandten Affen haben sich entschieden weiterentwickelt.

3 Je mehr Fossilien aus der Frühzeit der Menschwerdung auftauchen, umso deutlicher wird, dass der Stammbaum der Homininen einem verzweigten Busch gleicht. Offenbar entwickelten sich manche Merkmale, auch aufrechtes Gehen, unabhängig voneinander in mehreren Linien.

4 Paläoanthropologen müssen stets erwägen, dass ein Fossil, auch wenn es noch so passend erscheint, nicht zwangsläufig zu unserer eigenen Abstammungslinie gehören muss, sondern von einem Seitenzweig herrühren könnte.

len überraschend anderes. Wie die Anthropologen daraus erkennen, lief die Evolution bei den frühen Vormenschen, den ersten Homininen, offenbar aufgefächelter und komplizierter ab als bisher geglaubt. Es handelt sich zum einen um ein 4,4 Millionen Jahre altes Skelett, zum anderen um 3,4 Millionen Jahre alte Überreste von einem Fuß. Der aufrechte Gang, das vermeintliche Markenzeichen des Menschen, scheint mehrfach entstanden zu sein, noch dazu in verschiedenen Spielarten – also auch bei Primaten, von denen wir nicht abstammen. Von wo in diesem Gewirr die Linie der Menschenvorfahren herröhrt, ist vorerst unklar.

»Mit jedem neuen Fossil wird deutlicher, wie sehr unser Stammbaum eigentlich ein Busch ist«, erläutert die Evolutionsforscherin und Anthropologin Carol V. Ward von der University of Missouri in Columbia. Sie untersucht den Bewegungsapparat von ausgestorbenen Menschenaffen und frühen Homininen. Die Funde besagen, dass der letzte gemeinsame Vorfahr von Mensch und Schimpansen ziemlich anders ausgesehen haben muss als bisher angenommen. Demnach wurden auch die Schimpansen (zu denen neben dem Gemeinen Schimpanse auch der Bonobo oder Zwergschimpanse zählt) erst in den letzten Jahrmillionen zu dem, was sie heute sind. Da erst erwarben sie viele ihrer heutigen hochgradigen Anpassungen an das Baumleben.

Skelett schreibt Wissenschaft um

Am meisten hat »Ardi« das vertraute Weltbild erschüttert – ein für sein Alter bemerkenswert vollständiges Skelett einer vermutlich weiblichen Vertreterin der Spezies *Ardipithecus ramidus* (Bild S. 32/33) Forscher entdeckten es bereits in den 1990er Jahren in der Afar-Region bei Aramis. Allerdings waren die 4,4 Millionen Jahre alten Knochenfossilien dermaßen fragil, dass schon die Konservierung und Bergung äußerst aufwändig wurden und die Bearbeitung jahrelang dauerte. Im Jahr 2009 endlich präsentierte ein großes Wissenschaftlerteam die umfangreichen Ergebnisse in einer Artikelstrecke im Wissenschaftsmagazin »Science«.

Die Entdeckung der ersten Skeletteile und die weitere Fundsuche erfolgten unter dem Paläoanthropologen Tim D. White von der University of California in Berkeley. Der Forscher bezeichnet die Art *Ar. ramidus* – von der Überreste von mindestens drei Dutzend Individuen vorliegen – als ein unerwartetes Mosaik aus Merkmalen sowohl von einstigen Menschenaffen als auch schon von Homininen späterer Phasen. Ardi selbst maß etwa 1,20 Meter. Sie und ihre Artgenossen, auch die männlichen, besaßen deutlich kleinere Eckzähne als Schimpansen, was auf ein friedlicheres und kooperativeres, nicht derart von Aggressivität und männlicher Dominanz beherrschtes Gruppenleben hindeuten könnte, möglicherweise sogar auf eine Tendenz zur Paarbindung. Die Hände konnte Ardi weit nach außen abwinkeln. Anscheinend setzte sie im Vierfüßergang am Boden nicht die Knöchel auf wie Schimpansen, sondern die Handflächen. Auch waren ihre Arme etwas kürzer. Sie hatte allerdings auch ziemlich lange, gebogene Finger – ein Zeichen, dass sie gut kletterte. Nur ver-

Nur 3,4 Millionen Jahre alt sind diese fossilen Knochen (unten) vom vorderen rechten Fuß eines mutmaßlichen Vormenschen, der anscheinend auf dem Boden auf den Hinterbeinen gehen konnte, sich aber auch viel in Bäumen aufgehalten haben dürfte; rechts die gleichen Partien eines heutigen Menschen.

LANDOV / PLAIN DEALER / USA TODAY



Demnach dürfte ein aufrechter Gang in mehreren Evolutionslinien eigenständig entstanden sein. Denn zur selben Zeit im selben Gebiet lebte »Lucy«, die auf fast schon moderne Weise einherschritt. Ihre Art, *Australopithecus afarensis*, könnte zu unseren Vorfahren gehören.



mochte sie sich wohl nicht so elegant und mühelos wie ein Schimpanse durch das Geäst zu hängeln, sondern kletterte eher daran entlang.

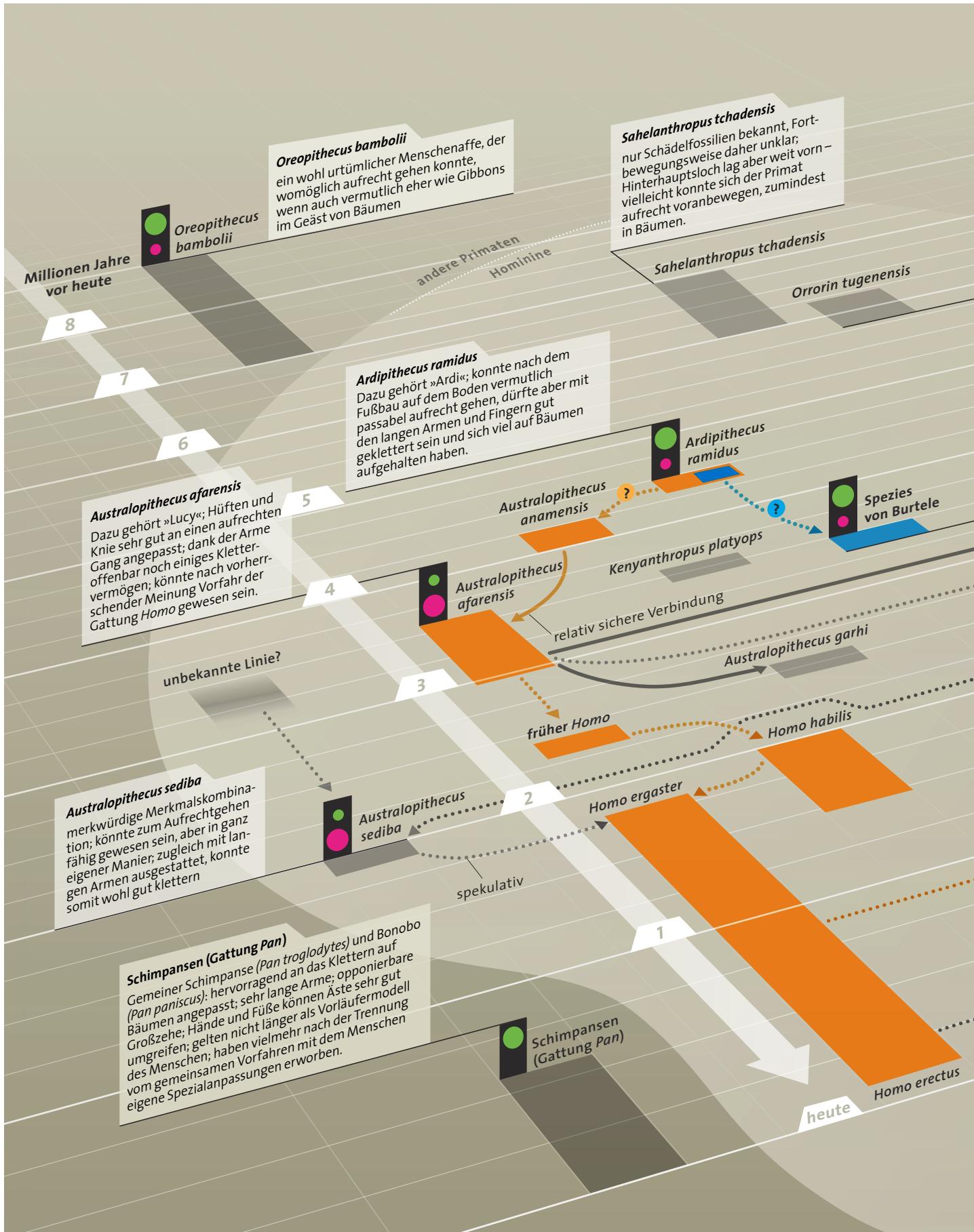
Beine und Füße wirken gleichfalls wie eine Mixtur aus Alt und Neu. Die Füße waren recht flach gebaut mit abstehender großer Zehe, eigneten sich also zum Klettern und Greifen auf Ästen. Zugleich aber war der Fuß in sich ziemlich steif, und die kleineren Zehen ließen sich weit nach oben biegen, was ein Aufrechtgehen begünstigte.

Die Beckenknochen Ardis waren stark zerdrückt und zerbrostelt. An den Überresten meint der Primatologe und Paläoanthropologe William Jungers von der Stony Brook University in Long Island (New York) – Experte für den Bewegungsapparat von Hominiden – immerhin ein paar Besonderheiten zu erkennen, die zum aufrechten Gang des Menschen gehören und auch bei aufrecht gehenden Homininen vorkommen. Anderes daran erinnert aber noch an einen kletternden Primaten, der an der Hinterseite der Beine kräftige Muskeln benötigte. Die Forscher, die Ardis Becken vermaßen, schließen aus anatomischen Details, dass die Primatin beim aufrechten Gehen nicht mehr nach rechts und links schwankte und sogar mäßig schnell rennen konnte.

Das Hinterhauptsloch, wo das Rückenmark austritt, saß ziemlich weit unterhalb des Schädels – auch das nach Ansicht vieler Forscher ein Anzeichen für aufrechtes Stehen und möglicherweise auch Gehen. Einige Anthropologen halten dagegen, genauso gut könnte *Ardipithecus ramidus* sich nur zwischendurch auf die Hinterbeine gestellt haben, etwa wenn beide Hände etwas hielten.

Die Befunde an Ardi zwingen die Experten, ihre Definition des Begriffs Hominin zu überdenken. Bisher verstanden sie darunter Primaten, die sich vorwiegend auf zwei Beinen fortbewegen. Doch wie Ardi zeigt, schließt ein aufrechter Gang gutes Klettervermögen nicht aus. In gewissem Grad gilt das sogar noch für heutige Menschen, wie Jungers hervorhebt. Manche Naturvölker sind sehr geschickt darin, von Bäumen Nahrung zu ernten. Selbst Lucy, die später lebte und schon viel besser ans aufrechte Gehen angepasst war als Ardi, besaß noch ziemlich lange Arme. Anzunehmen ist, dass selbst sie sich gelegentlich auf Bäume begab. Kürzlich erwies eine Untersuchung an einem jungen, im Jahr 2000 in Dikika in Äthiopien gefundenen Artgenossen, dass *Australopithecus afarensis* im Schulterbau noch stark an Menschenaffen erinnert. Vielleicht vereinten die frühen Homininen gewissermaßen das Bestmögliche beider Welten.

White und seine Kollegen ordneten *Ar. ramidus* als einen möglichen Vorfahren von *Au. afarensis* ein – somit unter Umständen als einen Urahn des *Homo sapiens*. Dem stimmen viele Fachleute nicht zu, schon wegen des geringen zeitlichen Abstands zwischen den Gattungen *Ardipithecus* und *Australopithecus*. Laut dem Paläoanthropologen David Begun von der University of Toronto könnte Ardi eine frühe Vertreterin von Homininen gewesen sein, die ihre eigenen Wege gingen (siehe auch Beguns Artikel: »Das Zeitalter der Menschenaffen«, SdW 12/2003, S. 58). Nur 200 000 Jahre nach Ardi lebte schon die Spezies *Au. anamensis* mit ihrem viel ausgeprägteren aufrechten Gang, die als Vorläuferin von *Au. afarensis* gilt. Ausgeschlossen wäre eine dermaßen kurze



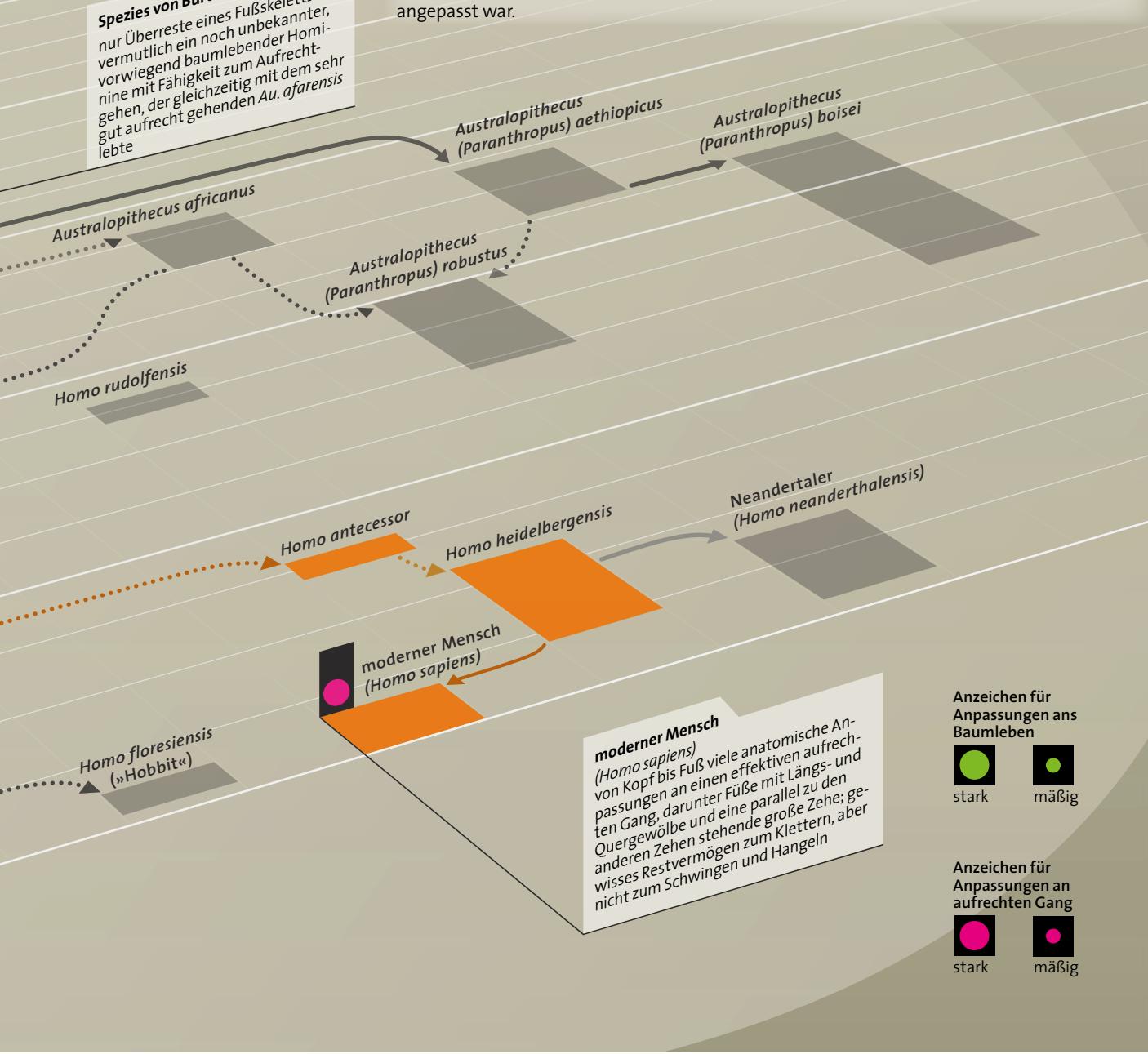
Stammbaum-Puzzle

Orrorin tugenensis
nur wenige Fundstücke; konnte vielleicht auch aufrecht gehen, aber vor allem sicherlich noch gut in Bäumen klettern

Spezies von Burtele
nur Überreste eines Fußskeletts – vermutlich ein noch unbekannter, vorwiegend baumlebender Hominine mit Fähigkeit zum Aufrechten Gehen, der gleichzeitig mit dem sehr gut aufrecht gehenden *Au. afarensis* lebte

Die verbreitete Ansicht, dass der Mensch mit seinem aufrechten Gang aus einem schimpansenähnlichen Menschenaffen hervorging, trifft nicht zu. Im Vergleich zu den frühen Homininen sind Schimpansen dafür zu sehr spezialisiert – wenn auch unsere nächsten heutigen Verwandten. Sie müssen viele ihrer Anpassungen erst später erworben haben. Außerdem bieten die frühen Homininen ein so mannigfältiges Erscheinungsbild, dass die Abstammung der Vorfäder der Menschengattung *Homo* vorerst unklar ist. Ein aufrechter Gang mit seinen charakteristischen anatomischen Begleiterscheinungen dürfte sogar mehrmals – also in verschiedenen Linien – entstanden sein und wäre somit kein alleiniges Merkmal der Menschenvorfahren.

Orange dargestellt ist die vermutete Herkunft des modernen Menschen. Durchgezogene Linien: fast sichere Abstammung; gepunktet: mehr oder weniger unsicher. Die beiden Arten, deren neue Funde im Text vorgestellt werden, sind blau hervorgehoben. Die grünen und roten Ampeln zeigen, wie ausgeprägt eine Art ans Baumleben (grün) und an den aufrechten Gang (rot) angepasst war.



Übergangsphase zwar nicht. Begun und andere Forscher halten getrennte Evolutionslinien jedoch für wahrscheinlicher und verweisen *Ar. ramidus* somit auf einen Seitenast.

Es sei nicht einmal ganz sicher, ob der Mensch tatsächlich direkt von Lucy's Art abstammt, betont der äthiopische Paläoanthropologe Yohannes Haile-Selassie, der an den Entdeckungen und Studien zu Ardi maßgeblich beteiligt war und in den USA unter anderem am Cleveland Museum of Natural History (Ohio) arbeitet. Die Forscher kennen einfach noch zu wenig Fossilien für die Zwischenzeit bis zum Erscheinen der Gattung *Homo*. Wohin in unserem Stammbaum *Ardipithecus ramidus* nun gehören mag – der Skelettfund eröffnet eine ganz neue Sicht auf dessen Wurzeln. Denn selbst wenn die Art doch in der Linie stand, die zum Menschen führte, hätte der letzte gemeinsame Vorfahr mit den Schimpansen diesen vermutlich nicht sonderlich geähnelt. Und andernfalls, wenn Ardi eine Seitenlinie der frühen Homininen repräsentiert oder vielleicht sogar »nur« ein Menschenaffe war, würde dies bedeuten, dass der aufrechte Gang kein Alleinstellungsmerkmal unserer Abstammungslinie ist.

Was acht kleine Knochen erzählen

Auf völlig unerwartete Weise rütteln jetzt am gewohnten Bild von der Evolution des aufrechten Gehens zudem ein paar wesentlich jüngere Knochen vom rechten Fuß eines Homininen, der zeitgleich mit Lucy's Art lebte (siehe Bild S. 35). Die zwar wenigen, aber sehr aufschlussreichen Fossilien von einem Mittelfuß und den Zehen entdeckte ein Team um Haile-Selassie im Jahr 2009 in der Afar-Region bei Burtele, nur knapp 50 Kilometer entfernt vom Fundort Lucy's.

Die acht Fußknöchelchen lassen es nicht zu, die betreffende – vielleicht neue – Art zu identifizieren. Doch die Forscher glauben, dass ihnen solch ein Primat bisher noch nicht untergekommen ist. Es muss eine Spezies gewesen sein, die sich teils auf Bäumen aufhielt, teils aufrecht lief. Was den Fund so spektakülär macht: Dieser Fuß mit seiner seitlich gerichteten großen Zehe, die Jungers als entschieden hominin bezeichnet, gleicht viel mehr Ardis Füßen als denen von Lucy's Artgenossen (bei Lucy fehlt das Fußskelett). Eben sein archaisches Aussehen aber – und ein entsprechend wohl eher schwerfälliges zweibeiniges Gehen – kommt für die Experten für jene Zeit unerwartet, denn *Ar. ramidus* lebte eine Million Jahre früher. Die Burtele-Fossilien sind »nur« 3,4 Millionen Jahre alt. Lucy's Art, *Au. afarensis*, existierte im selben Gebiet von vor etwa 3,6 bis vor 2,9 Millionen Jahren.

Beim aufrechten Gehen dürfte der Burtele-Primat ähnlich wie Ardi die Fußaußenkante aufgesetzt haben. Seine große Zehe trug nicht zum Vortrieb bei – wie es bei uns der Fall ist und auch schon bei der Spezies *Au. afarensis* auftrat, die im Prinzip »moderne« Füße besaß. Auf Bäumen konnte der Burtele-Fuß dank seiner großen Greifzehe Äste umfassen. Solange die hinteren Fußknochen noch nicht gefunden sind, lässt sich allerdings nicht sagen, wie weit die große Zehe abspreizbar war und wie gut diese Art sich mit den Füßen auf Ästen festhalten konnte, kommentiert der Anthropologe Jeremy

DeSilva von der Boston University (Massachusetts). Ganz abgesehen davon sind mehr Skelettelemente nötig, um wirklich zu erkennen, wie Haltung und Gang dieses Homininen ausgesehen haben mögen.

Vieleicht war der Burtele-Primat ja ein Nachfahr von *Ar. ramidus* und gehörte zu einer später ausgestorbenen Linie. »Ich stelle mir vor, wie Lucy in eine Baumkrone hinaufschaut und solch eine Kreatur betrachtet«, sinniert Bruce Latimer von der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio), der bei beiden neuen Fossilfunden die Fußanatomie untersucht hat. Und Ward erklärt: »Das gibt uns einen erweiterten, realistischeren Blick auf unsere Herkunft. Die Verwandten unserer eigenen Evolutionslinie lassen erkennen, welche möglichen Wege unsere Urahnen nicht verfolgt haben.«

Die neuen Entdeckungen zeigen, dass die Evolution der Homininen nicht eingleisig verlief – und zwar von Anfang an. Nicht erst der moderne Mensch, der *Homo sapiens*, hatte während der meisten Zeit Cousins: Die letzten Neandertaler verschwanden vor 28 000 Jahren, der kleine *Homo floresiensis* in Indonesien, »Hobbit« genannt, lebte noch vor nur 17 000 Jahren. Und auch nicht erst die Australopithecinen verzweigten sich vielfach und entwickelten recht unterschiedliche Arten. Sogar schon ihre Vorfahren und deren Verwandte bildeten offenbar mit ihren verschiedenen Linien ein Geäst, dessen Struktur die Forscher rätseln lässt. Dass neben Lucy, die gut auf zwei Beinen dahinschritt, ein Primat auf viel archaischeren Füßen umherstreifte, hatten sie nicht erwartet. Daraufhin werden sie nun die Fossilschätze, auch ältere, neu begutachten. Vielleicht haben sie einen Fund manchmal vorschnell einem vorherrschenden Homininen der betreffenden Zeit zugeordnet.

Eigentlich hätten die Paläontologen schon längst auch für die Frühzeit der Homininen einige Vielfalt annehmen können. Denn vom Miozän, der erdgeschichtlichen Phase von vor 23 bis vor 5 Millionen Jahren, kennen sie rund 100 Arten Großer Menschenaffen, darunter nicht wenige von Eurasien. Dass eine derartige Diversität schlagartig aufhörte, hält etwa die Anthropologin Carol Ward für unplausibel. Ohnehin repräsentieren entdeckte Fossilien immer nur einen winzigen Bruchteil des Gewesenen. Zur Herkunft der heutigen Menschenaffen Afrikas gibt es kaum Funde. Das alles macht es schwierig, den letzten gemeinsamen Vorfahren von Menschen und Schimpansen sowie unsere Ahnen unter den fossilen Homininen zu identifizieren.

Wahrscheinlich wird beides nicht so bald geklärt werden können. Denn gleiche oder ähnliche Merkmale bei zwei verschiedenen Arten, zumal im Grunde ziemlich ähnlichen wie in diesen Fällen, können Anthropologen leicht in die Irre führen. Sie bedeuten nicht zwangsläufig eine Abstammungsverwandtschaft – nicht einmal dann, wenn die beiden Primaten zu verschiedenen Zeiten lebten. Diese Schwierigkeiten erörterten die Anthropologen Terry Harrison von der New York University und Bernard Wood von der George Washington University in Washington, D.C., vor zwei Jahren in einem Übersichtsartikel zur Evolution der Homininen. Ähnliche



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema
»Der Ursprung des Menschen« finden Sie unter
www.spektrum.de/hominiden



Merkmale können sich eben auch in verwandten Evolutionslinien zeigen – wie offenbar im Fall des aufrechten Gehens.

Eklatant ist hier das Beispiel von *Oreopithecus bambolii*, einem Menschenaffen, der vor neun bis vor sieben Millionen Jahren in Italien lebte. Seine Eckzähne waren recht klein, sein Gesicht kurz, das Hinterhauptsloch lag relativ weit vorn, und sein Becken war kurz und breit – sämtlich Merkmale, die man auch Homininen zuschreibt. Trotzdem halten Primatologen ihn für einen Affen völlig anderer Zugehörigkeit. Er erregte Aufmerksamkeit, weil er früheren Studien zufolge viel auf den Hinterbeinen lief, seiner Anatomie nach aber wohl kaum auf dem Boden, sondern auf Ästen. Nach neueren Analysen könnte dieses Tier zur Fortbewegung meist wohl doch alle vier Gliedmaßen benutzt haben. Wie auch immer – sicherlich war dies kein früher Hominine, sondern ein eher urtümlicher Großer Menschenaffe.

Unsere unbekannten äffischen Ahnen

DeSilva bekennt, er habe sich früher nicht vorstellen können, dass bei den Homininen ein aufrechter Gang mehrfach unabhängig voneinander entstanden sein könnte. Doch der Burtele-Fuß habe ihn eines Besseren belehrt. »So ein Fußskelett hatte niemand sonst. Das kann nur bedeuten, dass es tatsächlich mehrere unterschiedliche Methoden gab, wie man auf zwei Beinen einherging.«

Es ist nicht lange her, da hatte DeSilva ebenfalls bestritten, dass die neue südafrikanische Art *Australopithecus sediba* auf eine ganz eigene Weise aufrecht gegangen sein sollte, wie andere Forscher annahmen. Diese Spezies wurde erst kürzlich entdeckt, lebte vor nur knapp zwei Millionen Jahren und vereinte moderne und alte Merkmale in bisher nicht gekannter Manier (siehe SDW 9/2012, S. 22). Auch die Anatomie von Ferse, Fußgelenk, Mittelfuß und Knie erscheint merkwürdig. DeSilva glaubte aber, das Gangbild dieser Art sei nur eine Variante dessen von anderen frühen Homininen gewesen. Jetzt sagt er: »Bei den Primaten kommen viele Erscheinungsformen des Kletterns vor, auch viele des Vierfüßergangs. Warum sollte es also nicht mehrere Versionen von Zweibeinigkeit gegeben haben? Die Evolution ist so raffiniert. Für ein gleiches Problem findet sie jedes Mal eine eigene Lösung.«

An den Gedanken, dass unsere Vorfahren beim aufrechten Gang keine Sonderstellung innehatten, müssen viele sich erst gewöhnen – ebenso daran, dass unser letzter gemeinsamer Vorfahr mit den Schimpansen diesen heutigen Menschenaffenarten wahrscheinlich wenig ähnelte. Denn die Schimpansen (einschließlich der Bonobos) haben sich seit

der Trennung stark auf eigene Weise weiterentwickelt und in vielem recht speziell angepasst. Nach Latimer könnte jener Vorfahr eher frühen Homininen wie Ardi geähnelt haben. So mögen seine Finger im Vergleich zu Schimpansen kürzer gewesen sein, ähnlich wie die von *Ar. ramidus* und *Au. afarensis*. Und vermutlich besaß der Vorfahr sogar ein kleineres Gehirn als Schimpansen – denn das gilt laut Jungers wohl für manche der frühen Homininen.

Wie DeSilva hervorhebt, muss man sich unter dem gemeinsamen Vorfahren eine Population vorstellen, nicht ein einzelnes Individuum. Ob man Fossilien aus der Gruppe der eigentlichen Ahnen gefunden hat oder aber Vertreter von einer Vetternpopulation, könnten letztlich nur DNA-Analysen zeigen, die noch utopisch sind. Nach bisherigen Erbgutvergleichen von Menschenaffen und Mensch müsste der gesuchte Vorfahr vor mindestens sechs und höchstens zehn Millionen Jahren gelebt haben. Forscher arbeiten daran, das Zeitfenster über genauer bestimmte Mutationsraten weiter einzuengen. Dann könnten sie passende geologische Schichten gezielter als heute schon nach Fossilien durchsuchen. Vielleicht gelingt es irgendwann sogar, Fossilbefunde und genetische Erkenntnisse so weit zusammenzubringen, dass deutlich wird, welche Veränderungen im Genom unsere Abstammungslinie anfangs von der unserer nächsten Menschenaffenvettern unterschied.

Bis dahin werden sich die Wissenschaftler weiterhin mit akribischen Studien an Fossilien abmühen – sowie mit der Suche nach neuen Funden. Manchmal zeugt bei einem Knochen eine winzige Abweichung in einem Detail von einer veränderten Funktionsweise. Da verwundert es nicht, dass die Experten so oft verschiedener Meinung sind, wenn sie versuchen, das vorhandene Material zu einem Stammbaum – oder wohl eher Stammbusch – des Menschen zu ordnen. Auf Überraschungen sind sie mittlerweile jederzeit gefasst. ≈

DIE AUTORIN



Katherine Harmon ist Mitarbeiterin der Redaktion von »Scientific American«. Die amerikanische Wissenschaftsautorin Sharon Begley steuerte Material zu diesem Artikel bei.

QUELLEN

Haile-Selassie, Y. et al.: A New Hominin Foot from Ethiopia Shows Multiple Pliocene Bipedal Adaptations. In: Nature 483, S. 565–569, 2012

White, T. D. et al.: *Ardipithecus ramidus* and the Paleobiology of Early Hominids. In: Science 326, S. 64 und S. 75–86, 2009

Wood, B., Harrison, T.: The Evolutionary Context of the First Hominins. In: Nature 470, S. 347–352, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1250320

Jenseits von Ratten und Fliegen

Biologen experimentieren großteils an nur einer Hand voll Modellorganismen. Dieser Ansatz ist zu eng, warnt unsere Autorin. Denn viele wesentliche Zusammenhänge, die nicht zuletzt für die Biomedizin eine Rolle spielen, geraten dabei aus dem Blick.

Von Jessica Bolker

Die meisten experimentell arbeitenden Biologen forschen nur an ein paar wenigen Tier- oder Pflanzenarten: Dazu gehören die Labormaus, der winzige Fadenwurm *Caenorhabditis elegans*, die Taufliege *Drosophila melanogaster* oder die Acker-Schmalwand, *Arabidopsis thaliana*. Dahinter steht die Annahme, Modellorganismen würden allgemein gültige Einsichten bringen. So fließt denn auch ein Großteil der Forschungsgelder Studien an jener Hand voll Spezies zu, welche die National Institutes of Health (NIH) der USA im Internet auflisten (www.nih.gov/science/models). Die Website soll dem nationalen und internationalen Austausch insbesondere über biomedizinische Projekte an den dort angeführten Arten dienen.

Wer für eine Untersuchung an einem Standard-Modellorganismus finanzielle Förderung beantragt, muss die Wahl seines Studienobjekts nicht groß rechtfertigen. Wer sich hingegen für einen weniger üblichen Organismus entscheidet,

der aber dem Forschungsgegenstand bestens gerecht wird, muss dies ausführlich begründen. Ablehnungen sind in dem Fall nicht selten. Tatsächlich wird dem Antragsteller dann oft empfohlen, lieber einen der Standardorganismen zu verwenden, unter der Prämisse, für jede lohnende Fragestellung dürfte ein etabliertes Modell vorhanden sein.

Ohne Frage haben sich die konzentrierten Forschungen an einigen wenigen Modellorganismen gelohnt – sowohl für das Grundlagenwissen wie für den medizinischen Fortschritt. Auch basieren viele wissenschaftliche Laufbahnen auf Studien an *Drosophila*, Hausmaus oder Fadenwurm, und zahlreiche Forschungsgruppen wurden allein für Untersuchungen an einem dieser Organismen eingerichtet. Überdies existieren längst wissenschaftliche Fachzeitschriften speziell für Arbeiten an einem dieser Organismen.

Nur – sich auf ein paar wenige Arten und Zuchten zu beschränken bedeutet, sich mit den Antworten zu begnügen, die sie liefern können. Die Modelle erlauben zwar tiefe Einblicke in Details. Wie beim Blick durch ein starkes Vergrößerungsglas ist die Kehrseite aber eine sehr eingeschränkte Übersicht über das Ganze. Die Tiermodelle der Entwicklungsbiologie beispielsweise, wie die Taufliege, kamen den Forschern deswegen so gut zupass, weil hier die von der Fliege ausgeprägten äußeren Merkmale (der Phänotyp) die genetischen Bedingungen (den Genotyp) ziemlich direkt spiegeln. Denn Umwelteinflüsse wirken sich bei diesem Tier in der Regel höchstens ganz schwach aus. Doch gerade für manche jüngeren Forschungsrichtungen eignen sich jene Modelle deswegen schlecht. Das betrifft zum Beispiel die ökologische Entwicklungsbiologie, die äußere Einflüsse auf den sich entwickelnden Organismus betrachtet (englisch eco-devo genannt, nach ecology und development).

AUF EINEN BLICK

WARUM WIR MEHR TIERMODELLE BRAUCHEN

- 1** Das Detailwissen von Medizin und Biologie beruht überwiegend auf Grundlagenforschung an **wenigen Tierarten**. Die **Übertragung auf den Menschen** misslingt allerdings oft.
- 2** Die meistverwendeten Tiermodelle verschleieren den Blick auf unter Umständen wesentliche Vorgänge bei anderen Organismen. **Krankheiten des Menschen** lassen sich mit ihnen oft nur unbefriedigend verstehen.
- 3** Die Forschergemeinde darf nicht länger stur auf den gewohnten Versuchstieren beharren. Manchmal liefern erst andere Arten mit **besonderen Anpassungen** entscheidende Einsichten in einen **physiologischen Mechanismus** oder Krankheitsprozess.

Die Folgen solcher Beschränkungen sind schwer wiegend. So mögen die Unterschiede etwa zwischen Maus und Mensch teilweise erklären, wieso die Unsummen, die in die biomedizinische Grundlagenforschung geflossen sind, letztlich doch nur enttäuschend wenige klinische Fortschritte gebracht haben. Denn ein zu enger Blickwinkel setzt einem Grundverständnis Grenzen, was unter Umständen direkt dazu führt, dass klinische Studien fehlschlagen. Ein Beispiel: An einem Mausmodell für multiple Sklerose hatten Forscher erprobt, dem dabei ablaufenden Immunangriff des eigenen Körpers auf die Nervenhüllen zu begegnen, indem sie eine spezifische Immuntoleranz für betroffene körpereigene Moleküle provozierten – bei den Nagern mit einem Erfolg. Bei einigen der ersten getesteten menschlichen Patienten aber rief die Methode unvorhergesehene, teils sogar missliebige Reaktionen hervor. Im Nachhinein erschien das durchaus erklärbare: Statt schon im Tierversuch auf genetische und immuno-

logische Vielfalt zu setzen, hatte man einen Inzuchtstamm verwendet. Der großen individuellen Bandbreite im Verhalten der Zellen von Patienten wurde das keineswegs gerecht.

Es wird darum Zeit, mit den gebräuchlichen Modellen kritischer umzugehen. Es gilt, Hintergrundannahmen zu hinterfragen, etwa die verbreitete Vorstellung, dass ein Nagetiermodell eine menschliche Krankheit tatsächlich wiedergibt. Wird eine Studie konzipiert, ist hinsichtlich Wahl und Einsatz eines gebräuchlichen Versuchstiers höchste Umsicht geboten. Neben den Stärken des Modells sind ebenso seine Schwächen zu beachten. Und nicht zuletzt wäre zu wünschen, dass Geldgeber und Veröffentlichungsorgane dazu übergehen, Arbeiten an anderen als den üblichen Organismen mehr wertzuschätzen als bisher.

Aber wie kam es überhaupt dazu, dass eine so kleine Anzahl Arten heute im Zentrum eines Großteils der Forschungen steht? Im Grunde steckte kein besonderer Plan dahinter,

Die Fokussierung auf wenige Tiermodelle verstellt Forschern den Blick auf die größeren Zusammenhänge.



vielmehr beruhte die Auswahl meist schlicht auf praktischen Gesichtspunkten. Die Taufliege *Drosophila* wurde bereits im frühen 20. Jahrhundert zu einem beliebten Objekt der Genetik höherer Lebewesen. Sie lässt sich leicht züchten, und die Generationenfolge beträgt im Mittel nur rund zehn Tage. Günstig für genetische Studien sind außerdem die lediglich vier Paar Chromosomen, zumal sie in den Speicheldrüsen als Riesenchromosomen auftreten. Andere in der Wissenschaft beliebte Organismen waren gut zugänglich, ihre Eigenschaften vertraut und handhabbar – so im Fall domestizierter Arten wie der Bäckerhefe, der Labormaus oder des Haushuhns. Den Afrikanischen Krallenfrosch *Xenopus laevis*, ein zentrales Modell für Entwicklungsstudien, hielten Labors schon für Schwangerschaftstests. Zunehmend beherrschten jene eigentlich beliebigen Arten mit der Zeit die Forschungsszene. Inzwischen kommt es sogar vor, dass Wissenschaftler eine Fragestellung nicht weiterverfolgen, weil sie unter den vertrauten Modellen keines finden, das sich dafür eignet.

Die Forschung über Umwelteinflüsse benötigt andere Tierarten

Die heutige Entwicklungsbiologie beispielsweise befasst sich vorwiegend mit kleinen Organismen mit kurzer Generationsdauer – typischerweise etwa mit *D. melanogaster* (der Kleinen Tau- oder Essigfliege, die rund zwei Millimeter groß wird) oder dem Fadenwurm *C. elegans*, der einen Millimeter misst. Das derzeitige Verständnis von Entwicklungsprinzipien basiert großteils auf Studien an solchen Arten. Nur hat ein evolutionärer Selektionsdruck auf eine rasche individuelle Entwicklung ausgeprägte Begleiterscheinungen: Anscheinend wird dann die genetische Kontrolle gewichtiger – und die Kraft äußerer Einflüsse schwächer. Das heißt, die Plastizität oder Flexibilität geht zurück. Jene Modellorganismen reagieren im Vergleich zu mit ihnen verwandten Arten während ihrer individuellen Entwicklung weniger deutlich auf Einwirkungen von außen, gleich ob günstig oder ungünstig. Zwangsläufig lassen sich gerade an diesen Spezies Umwelteinflüsse auf Entwicklungsprozesse schlecht erforschen – nicht selten mit der Folge, dass solche Fragestellungen wenig Interesse erfahren und in den Hintergrund geraten.

Unter einem zu engen Blickfeld leiden, wie schon ange deutet, zuweilen auch biomedizinische Forschungen. So werden neue mögliche Therapien der Parkinsonkrankheit gern zunächst im Rattenmodell erprobt. Das Augenmerk gilt dabei den charakteristischen Bewegungseinschränkungen. Weitere typische Symptome von Parkinsonpatienten zeigt das Tiermodell allerdings nicht eindeutig, darunter kognitive Einbußen. Es wäre jedoch bedenklich, wenn die Forschung sie außer Acht ließe. Gleichermaßen gilt für andere neurodegenerative Erkrankungen, ob nun die Alzheimerdemenz oder die amyotrophe Lateralsklerose. Als Tiermodelle werden in dem Zusammenhang oft stark in gezüchtete Nagetierstämme eingesetzt, somit im Erbgut einheitliche Tiere, die man zudem oft noch gezielt an einer oder wenigen Stellen genetisch verändert hat. Sie können die vielfältigen individuellen Krankheitsbilder

und die Breite der Symptome gar nicht vollständig wiedergeben. Inzwischen bemängeln das sogar beteiligte Forscher und warnen davor, die Tiermodelle überzubewerten.

Andererseits denken Experimentatoren mitunter nicht an mögliche Umwelteinflüsse auf ihre Versuchstiere, die sie deswegen auch nicht prüfen. So kann schon die Art und Weise, die Tiere für eine Manipulation einzufangen oder festzuhalten, durchaus unterschiedliche körperliche und psychische Reaktionen hervorrufen. Ein anderes, drastisches Beispiel ist ein Mäusestamm, bei dem das Enzym neuronale Stickoxid-Synthase fehlt. Die Männchen fallen durch besonders hohe Aggressivität gegen Artgenossen auf, ihr hervorstechendstes Verhaltensmerkmal. Allerdings merkten die Forscher das erst, als sie solche Mäuse zu Gruppen zusammensetzten. Vorher hatte man sie wie meist üblich einzeln gehalten. Doch obwohl Wissenschaftler zunehmend erkennen, wie wichtig Umweltfaktoren für Studienergebnisse sein können, hinterfragen bisher nur wenige von ihnen sie gezielt.

Wer also für sein Forschungsmodell oder untersuchtes System einen zu engen Rahmen vorgibt und dadurch entscheidende Faktoren möglicherweise ausklammert, darf nicht erwarten, ein vollständiges Bild des Krankheits- oder Entwicklungsprozesses vor sich zu haben und darin die ganze Variationsbreite sowie sämtliche möglichen Einflüsse und Mechanismen vorzufinden. Umweltwirkungen sollte man an Arten erforschen, die dafür sensibel sind. Für die Wahl eines Modells müssen die für die Studie benötigten Eigenschaften ausschlaggebend sein. Notfalls wird man ein anderes suchen, wenn weiterführende Fragen andere Eigenschaften verlangen.

Bei der Entscheidung darf nicht Gewohnheit im Vordergrund stehen und schon gar nicht Bequemlichkeit. Vielmehr muss in die Planungen einer wissenschaftlichen Studie von vornherein mit einfließen, inwieweit sich ein gegebenes Modell überhaupt für die Fragestellung eignet. Stets sollte man dabei mit bedenken, ob irgendwelche Umwelt- und anderen Außenfaktoren beeinflussen könnten, wie gut das Modell funktioniert. Bei Fragen der Humanbiologie soll das Tiermodell dem zu untersuchenden Aspekt möglichst weit gehend gerecht werden. Für eine Studie zur genetischen Vielfalt eignet sich oft ein anderes Modell als für eine Untersuchung





Die Alabama-Küstenmaus hilft durch Samenverbreitung, die Vegetation von Dünen zu erhalten. Sie ist heute allerdings wegen zunehmender Zerstörung ihres speziellen Lebensraums bedroht. Ihr Stoffwechsel – sie braucht nie zu trinken – interessiert Physiologen.

zum Immunsystem, und wieder ein anderes, um spezielle Krankheitssymptome zu erforschen.

Unter Umständen lassen sich größere Diskrepanzen zwischen einem Tiermodell und dem Menschen nicht vermeiden, was die Aussagekraft der Daten entsprechend einschränkt. Dann muss man überlegen, wann und in welcher Weise die weiteren Untersuchungen mit Menschen stattfinden sollten. Nicht bei allen biomedizinischen Studien ist es wichtig, dass ein Defekt oder Symptom beim Tier auf dem gleichen Weg entsteht wie bei einem menschlichen Patienten. Ein Beispiel hierfür sind orthopädische Verletzungen. Doch auf vielen Gebieten sind die Umstände oft entscheidend. Das gilt etwa für die Epidemiologie, die sich mit der Ausbreitung von Krankheiten und den Randbedingungen dafür befasst.

Sich darüber klar zu werden, dass die Standardmodelle ihre Grenzen haben, heißt jedoch nicht, dass man sie zukünftig völlig verwerfen muss. Vielmehr bedeutet es ganz im Gegenteil, ihre Beschränkungen bewusst in die Studien mit hineinzunehmen. Die Rolle eines Gens ließe sich dann etwa an genetisch unterschiedlichen Mäusestämmen erforschen. Jedoch kann eine einzelne Art niemals als Universalmodell für eine Thematik herhalten, selbst wenn die Zuchtlinie noch so sehr dafür manipuliert wurde.

Jede Spezies hat ihre Besonderheiten, die mal besser, mal schlechter zu einer Fragestellung passen. Umwelteinflüsse auf die individuelle Entwicklung lassen sich an der Taufliege wegen der mangelnden Plastizität nun einmal nur beschränkt untersuchen. Gleiches gilt für in gezüchtete Rattenstämme wegen ihrer geringen genetischen Bandbreite. Beide eignen sich dagegen hervorragend dazu, einzelne Genfunktionen während der Entwicklung zu erkennen. Für die biomedizinische Forschung könnte es viel bringen, das Spek-

trum der Modellarten um Spezies zu erweitern, die mit besonderen Anpassungen aufwarten. Zum Beispiel kommen Antarktisfische, die bei Gefrierpunkttemperaturen leben, mit geringsten Mengen an Hämoglobin aus und haben ein wenig verknöchertes Skelett, beides Anpassungen an ihre spezielle Umwelt. Genetische Eigenheiten von blinden Höhlenfischen zeigen, wie manche Augenkrankheiten entstehen könnten. Die Darwinfinken mit ihren verschiedenen Schnabelformen liefern Hinweise auf die Genetik von Kieferfehlbildungen. Und die Alabama-Küstenmaus, die alle benötigte Feuchtigkeit aus ihrer Nahrung bezieht, fällt durch ihren Stoffwechsel aus dem Rahmen. Bei Arten wie diesen kommen Merkmale vor, deren Hintergründe für menschliche Krankheiten durchaus relevant erscheinen, vom grauen Star über Osteoporose bis hin zu Krebs.

Daher sollte das US National Center for Advancing Translational Sciences (Ncats) in Bethesda (Maryland) die Entwicklung neuer Forschungssysteme unterstützen – solcher, die es erlauben, Fragen anzugehen, die sich an den derzeit üblichen Modellen nicht untersuchen lassen. Diese Einrichtung beim NIH hat die Aufgabe, dafür zu sorgen, dass neue Krankheitsdiagnosen und Therapien zügig entwickelt und umgesetzt werden, unter anderem für seltene Krankheiten. Sie müsste außerdem Untersuchungen über grundlegende Fragen zu modellbasierter Forschung finanzieren. Das dürfte es Wissenschaftlern der Grundlagen- wie der angewandten Forschung leichter machen, das jeweils am besten geeignete Modell auszuwählen und zwischen beiden Bereichen immer tragfähige Brücken zu schlagen. ↵

DIE AUTORIN



Jessica Bolker ist Meeres- und Entwicklungsbiologin und Zoologieprofessorin an der University of New Hampshire in Durham.

QUELLEN

- Beckers, J. et al.:** Towards Better Mouse Models: Enhanced Genotypes, Systemic Phenotyping and Envirotype Modelling. In: *Nature Reviews Genetics* 10, S. 371–380, 2009
- Geerts, H.:** Of Mice and Men: Bridging the Translational Disconnect in CNS Drug Discovery. In: *CNS Drugs* 23, S. 915–926, 2009
- Maher, B.:** Biology's Next Top Model? In: *Nature* 458, S. 695–698, 2009
- Schnabel, J.:** Neuroscience: Standard Model. In: *Nature* 454, S. 682–685, 2008

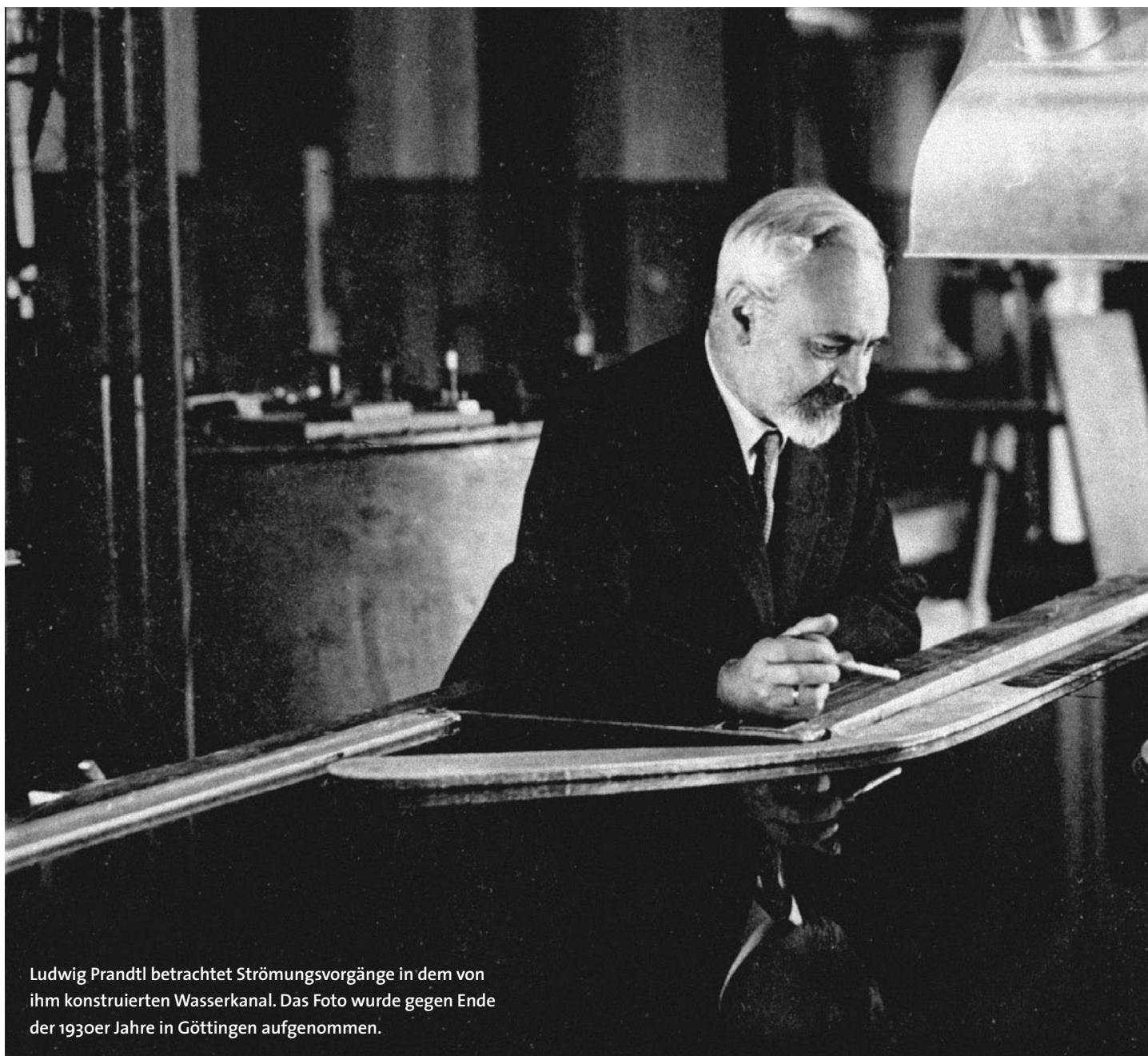
WEBLINK

Diesen Artikel, weitere Literatur und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1205321

Ein Leben für die Turbulenz

Anfang des 20. Jahrhunderts wagte sich der Göttinger Strömungsforscher Ludwig Prandtl an die komplizierten Probleme verwirbelter Flüssigkeiten und Gase. Mit viel experimentellem und mathematischem Geschick schuf er die Grundlagen einer umfassenden Theorie der Turbulenz.

Von Eberhard Bodenschatz und Michael Eckert



Ludwig Prandtl betrachtet Strömungsvorgänge in dem von ihm konstruierten Wasserkanal. Das Foto wurde gegen Ende der 1930er Jahre in Göttingen aufgenommen.

Unter Naturforschern galt Göttingen schon vor 200 Jahren als ein Mekka der Mathematik und praktischen Physik. Koryphäen wie der Mathematiker Carl Friedrich Gauß (1777–1855) und der Physiker Wilhelm Weber (1804–1891) hatten hier gewirkt; mit der Berufung des Mathematikers Felix Klein (1849–1925) setzte sich diese Tradition fort. Er sorgte etwa dafür, dass 1895 mit David Hilbert (1862–1943) und 1902 mit Hermann Minkowski (1864–1909) zwei der bedeutendsten Mathematiker seiner Zeit nach Göttingen geholt wurden. Da ihm aber anwendungsnahe Disziplinen besonders am Herzen lagen, rief Klein 1904 auch den jungen Ludwig Prandtl (1875–1953) als Professor für technische Physik an die Göttinger Univer-

sität. Ein Jahr später wurde Prandtl zusammen mit dem Mathematiker Carl Runge (1856–1927) die Leitung des neu gegründeten Instituts für angewandte Mathematik und Mechanik zugesprochen.

Wer war dieser Ludwig Prandtl? 1898 hatte er an der Technischen Hochschule in München sein Studium als »Maschineningenieur« absolviert, zwei Jahre später promovierte er mit einer Arbeit zur Elastizitätstheorie, die ihn sofort als aufsteigenden Stern dieser Disziplin auswies. Danach ging er als Ingenieur nach Nürnberg zur Maschinenfabrik MAN. Arnold Sommerfeld (1868–1951), der damals noch ganz am Anfang seiner Karriere als theoretischer Physiker stand, war von Prandtls Dissertation so begeistert, dass er ihn gleich für eine Anstellung an der Technischen Hochschule in Hannover empfahl. Und so wurde 1901 aus dem Maschineningenieur der jüngste Professor Preußens.

Origineller Denkansatz

Prandtl rechtfertigte seine Berufung nach Hannover schon bald mit einem originellen Denkansatz, der unter dem Namen Grenzschichttheorie bekannt wurde. Den Anstoß dafür lieferte seine Erfahrung als Ingenieur: Er hatte beobachtet, wie es in einer Anlage zum Absaugen von Hobelstäben und Schleifstaub zu unerklärlichen Druckverlusten gekommen war. »In einer größeren Luftleitungsanlage in der Maschinenfabrik Nürnberg hatte ich ein konisch erweitertes Rohr angeordnet, um dadurch Druck wiederzugewinnen«, erinnerte er sich viele Jahre später; »der Druckwiedergewinn ist aber ausgeblieben, und dafür ist eine Ablösung der Strömung eingetreten.« Um den Strömungsabriss zu untersuchen, konstruierte der frischgebackene Professor einen kleinen Wasserkanal, der heute im Deutschen Museum in München zu sehen ist: Ein handbetriebenes Wasserrad versetzt die Flüssigkeit in Bewegung, und auf einem Zwischenboden können verschiedene Gegenstände der Strömung ausgesetzt werden. Indem Prandtl dem Wasser Eisenglimmer zusetzte, machte er die Umströmung und die dabei einsetzende Wirbelbildung sichtbar.

Besonders faszinierten Prandtl die Vorgänge an den Rändern. Er nahm an, dass die Flüssigkeit unmittelbar an der Wand eines umströmten Körpers haftet. Bei kleiner innerer



DURZENTRALARCHIV (FS-258)

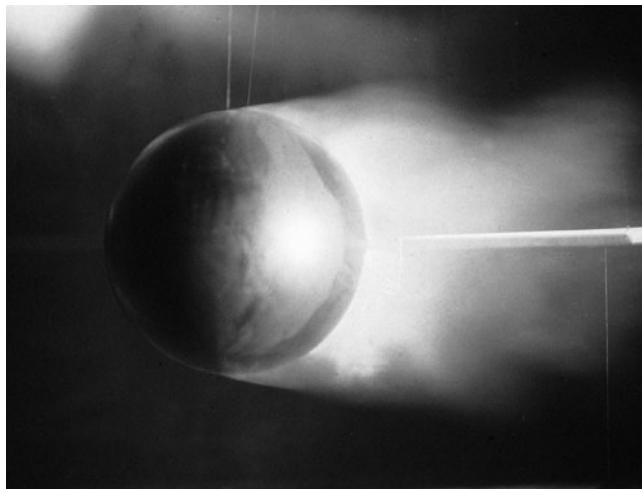
AUF EINEN BLICK

DEN WIRBELPHÄNOMENEN AUF DER SPUR

1 Zunächst erregte Prandtl unter Fachkollegen mit seiner **Grenzschichttheorie** Aufsehen; sie vereinfachte die mathematische Beschreibung von realen Strömungen entscheidend.

2 Die turbulenten Vorgänge innerhalb der Grenzschicht ließen sich aber nicht so einfach berechnen. Auch hier leistete Prandtl durch seinen »**Mischungswegansatz**« einen wichtigen Beitrag.

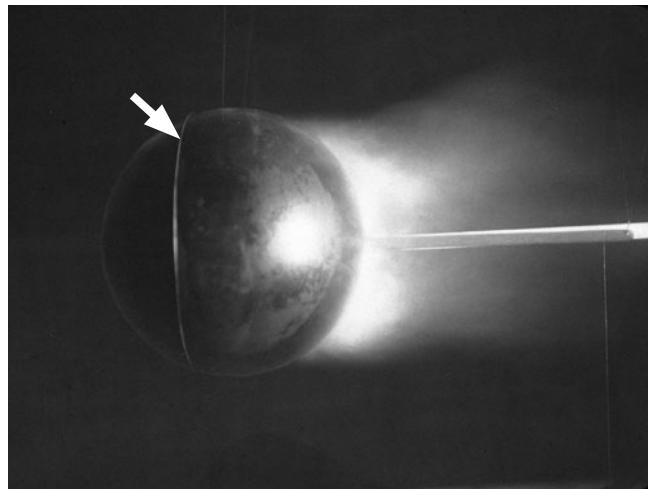
3 Gegen Ende des Zweiten Weltkriegs formulierte Prandtl eine **universelle Theorie der Turbulenz**. Infolge der Kriegswirren blieben diese Manuskripte jedoch unveröffentlicht.



Durch einen vor dem Bauch einer Kugel im Windkanal angebrachten »Stolperdraht« (Pfeil rechts) wird die Grenzschicht dahinter turbulent. Sie haftet länger an der Kugeloberfläche und sorgt für weniger Wirbel im Nachlauf: Der Luftwiderstand sinkt.

Reibung – auch Viskosität oder Zähigkeit genannt – herrscht aber schon in geringem Abstand von der Wand dieselbe Geschwindigkeit wie in der freien Strömung. Also muss die Strömungsgeschwindigkeit in einer sehr schmalen Übergangsschicht steil ansteigen. Nur in dieser Schicht wirkt sich die Reibung zwischen den Flüssigkeitsteilchen aus; außerhalb der dünnen Grenzschicht kann man so tun, als sei gar keine Reibung vorhanden, und darf dort die Theorie idealer Flüssigkeiten verwenden. Das erleichtert die mathematische Beschreibung von realen Strömungen enorm. Für den Einfluss der Reibung in der Grenzschicht leitete Prandtl vereinfachte Differenzialgleichungen her. Sie stellen zwar noch immer eine große mathematische Herausforderung dar, sind aber leichter lösbar als die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen für reale Fluide, mit denen der französische Ingenieur Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836) und der irische Physiker George Gabriel Stokes (1819–1903) erstmals die Viskosität in Fluiden – Flüssigkeiten und Gasen – berücksichtigt hatten.

Seine Theorie präsentierte Prandtl im August 1904 beim Dritten Internationalen Mathematikerkongress in Heidelberg – allerdings fast ohne Mathematik. »Es schiebt sich also eine Flüssigkeitsschicht, die durch die Reibung an der Wand in Rotation versetzt ist, in die freie Flüssigkeit hinaus«, so beschrieb er die Vorgänge in der Grenzschicht, die zur Ablösung der Strömung von der Wand führen. Für Prandtl war die Mathematik zeitlebens nur Mittel zum Zweck. Bei all seinen Arbeiten sei es ihm immer zuerst darum gegangen, sich »eine möglichst eingehende Anschauung zu verschaffen«, schrieb er 1948 in einem Rückblick über seine Art des Theoretisierens. »Die Gleichungen kommen erst später daran, wenn ich glaube, die Sache verstanden zu haben.« So mancher Mathematiker mag sich über den Vortrag Prandtls – mit Bildern



DR ZENTRALARCHIV/CGAR GK-0016 + CK-0118

von seinem Wasserkanal und fast ohne Gleichungen – gewundert haben. Für Felix Klein aber war er »der schönste des ganzen Kongresses«, wie sich Sommerfeld erinnerte. Klein habe »sofort die Tragweite der Prandtlschen Methode« erkannt. Ihm imponierte, »dass Prandtl mit der Sachkenntnis des Ingenieurs und der Beherrschung des mathematischen Apparats eine starke Kraft der Intuition und eine große Originalität des Denkens verbindet«. Das hatte Klein an den preußischen Kultusminister zur Begründung des Rufs geschrieben, mit dem er Prandtl nach Göttingen holte.

Schon kurze Zeit später betraute er Prandtl auch mit der Planung einer aerodynamischen Forschungsanstalt, die im Auftrag der Industrie Luftschiffmodelle im Windkanal untersuchen sollte. Prandtl entwarf die beste Testanlage seiner Zeit. Noch heute ist die Konstruktion als »Windkanal Göttinger Bauart« bekannt. Der Kanal war turbulenzarm, und die Testobjekte konnten in einen offenen Bereich eingefahren werden. Die »Modellversuchsanstalt der Motorluftschiff-Studiengesellschaft m.b.H.«, wie die außeruniversitäre Göttinger Forschungseinrichtung zunächst hieß, nahm im November 1907 ihren Betrieb auf – mit Prandtl als Direktor.

Die Entdeckung der Grenzschichtturbulenz

So stand Prandtl mit einem Bein in der Strömungstechnik des beginnenden 20. Jahrhunderts, mit dem anderen in der akademischen Tradition der Göttinger Universität. Zu den ersten Prandtl-Schülern gehörten der Ungar Theodore von Kármán (1881–1963) und der Deutsche Heinrich Blasius (1883–1970); beide sollten sich bald selbst mit wichtigen Beiträgen zur Strömungsforschung einen Namen machen. Blasius berechnete in seiner Doktorarbeit das Geschwindigkeitsprofil in der Grenzschicht einer längs angestromten ebenen Platte, und Kármán analysierte als Prandtl's Assistent die Stabilität von Wirbeln hinter einem gleichmäßig angeströmten Zylinder – die kármánsche Wirbelstraße.

Schon vor dem Ersten Weltkrieg zeichnete sich ab, dass hier eine Wissenschaftsschule ganz besonderer Art entstand, die sich der Technik der Zukunft zuwandte, ohne die Tradition preiszugeben, mit der die Göttinger Mathematik und

Physik groß geworden war. Bei den Messungen von Modellkörpern im Göttinger Windkanal traten zwei Ursachen für den Luftwiderstand zu Tage: Der »Formwiderstand« stammte von den hinter dem angeströmten Körper erzeugten Wirbeln und variierte mit dessen geometrischer Gestalt, während die »Hautreibung« von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhing. Bei Luftschiffmodellen ließ sich durch Stromlinienform der Formwiderstand so weit reduzieren, dass fast nur noch die Reibung entlang der Oberfläche übrig blieb. Bei Kugeln oder anderen nichtstromlinienförmigen Körpern wirkte hingegen vorwiegend der durch Wirbelablösung verursachte Formwiderstand.

Doch als die Göttinger Aerodynamiker ihre Widerstandsmessungen an Kugeln mit den entsprechenden Daten des Ingenieurs Gustave Eiffel (1832–1923) in Paris verglichen, zeig-

ten sich eklatante Abweichungen. Der im Göttinger Windkanal gemessene Widerstandswert war mehr als doppelt so groß wie der eiffelsche. Ein so großer Unterschied bei Körpern gleicher Form ließ sich nicht durch die geringfügigen Oberflächenunterschiede der verwendeten Kugeln erklären.

Darum stattete Prandtl dem Pariser Laboratorium im Herbst 1913 einen Besuch ab. Wie sich herausstellte, verwendete Eiffel höhere Strömungsgeschwindigkeiten. Um dem Phänomen auf den Grund zu gehen, ließ Prandtl in den Göttinger Windkanal eine Verengung einbauen, die wie eine Düse wirkte und den Luftstrom beschleunigte. Schon die ersten Messungen im modifizierten Windkanal bestätigten Eiffels Daten. Prandtl folgerte: Das Widerstandsverhalten ändert sich bei Überschreiten einer kritischen Geschwindigkeit sprunghaft. Dies komme dadurch zu Stande, erklärte der

Der von Prandtl 1935 konstruierte Göttinger Windkanal wurde in den 1970er Jahren originalgetreu wiederhergestellt (rechts). Heute steht er einrächtig neben dem modernen Turbulenzwindkanal (unten, im Hintergrund) am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen.



MPF FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION



MPF FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION

Physiker, »dass die bei niederen Geschwindigkeiten laminar (glatt) verlaufende Strömung bei Überschreitung der Grenze turbulent (wirbelig) wird«. Die turbulente Grenzschicht sauge mehr Strömung auf und hafte länger an der Kugeloberfläche, so dass hinter der Kugel weniger Wirbel entstünden – und somit weniger Widerstand.

Von der Hydraulik zur Theorie der Turbulenz

Dass beim Umschlag vom laminaren in den turbulenten Zustand der Widerstand nicht wächst, sondern sinkt, mutet zunächst paradox an. Um seine Hypothese zu testen, setzte Prandtl einen dünnen Drahtring knapp vor den Bauch einer Kugel im Windkanal; die von diesem »Stolperdraht« ausgelösten Wirbel sorgten dafür, dass die Grenzschicht turbulent wurde. Erwartungsgemäß verschob sich dadurch die Ablösstelle der Wirbel weiter nach hinten, und der Widerstand fiel tatsächlich geringer aus (siehe Bilder S. 46).

Berechnen ließ sich die Grenzschichtturbulenz damit freilich noch nicht. Den Anstoß für eine theoretische Klärung lieferte die Hydraulik. Blasius hatte nach seinem Stu-

dium eine Stelle bei der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin angenommen. Er sei jetzt damit beschäftigt, schrieb er 1911 an Prandtl, die Daten über den hydraulischen Reibungswiderstand als Funktion der Reynolds-Zahl darzustellen. Mit »hydraulisch« bezeichnete man damals den Widerstand in einer Wasserleitung, wenn die Strömung nicht mehr glatt, sondern turbulent verlief. Der Brite Osborne Reynolds (1842–1912) hatte 1883 entdeckt, dass für den Umschlag vom einen in den anderen Strömungszustand die später nach ihm benannte Reynolds-Zahl maßgeblich ist: Strömungsgeschwindigkeit mal Rohrdurchmesser dividiert durch Viskosität.

Wie Blasius herausfand, lässt sich das hydraulische Widerstandsgesetz als einfache Funktion der Reynolds-Zahl ausdrücken. Allerdings gibt diese Formel nur rein empirisch die Daten wieder; sie folgt nicht aus einer physikalischen Theorie. »Sie fragen nach der theoretischen Ableitung des Blasiusschen Widerstandsgesetzes für Rohre«, antwortete Prandtl 1923 einem Kollegen. »Wer die findet, der wird dadurch ein berühmter Mann!«

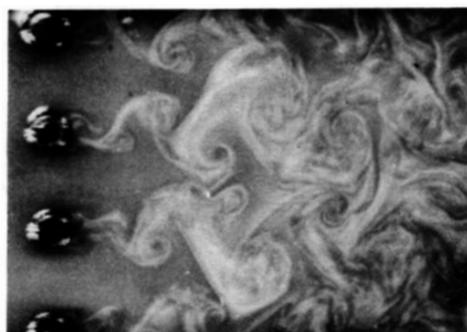


Bild 1

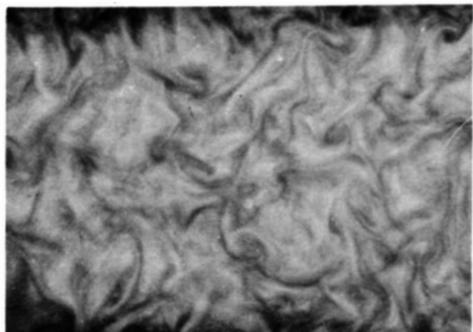


Bild 5

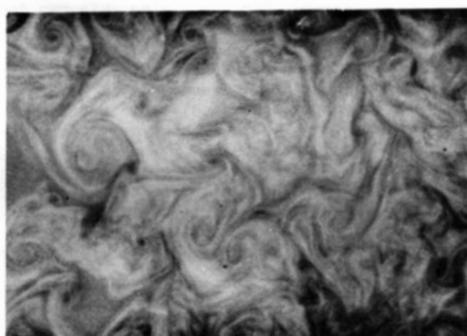


Bild 2

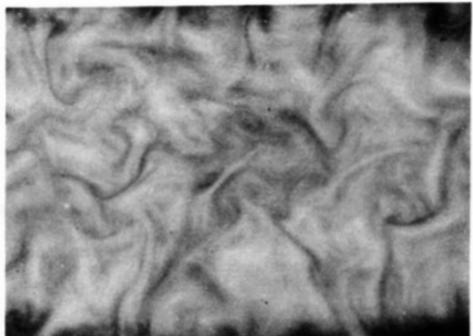


Bild 8

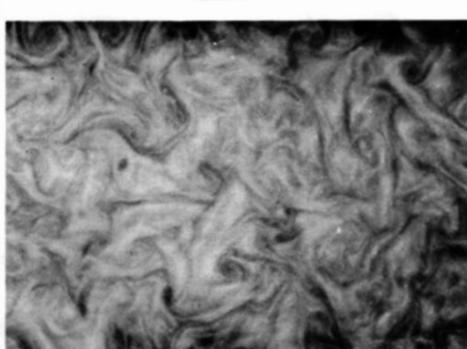


Bild 3

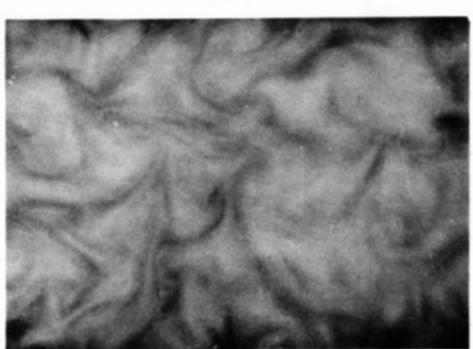


Bild 12

Prandtl veranschaulichte das Entstehen von Turbulenz an umströmten Gitterstäben (links in Bild 1), indem er dem Wasser Eisenglimmer beimengte. Zwischen den Einzelbildern – in wachsendem Abstand hinter dem Gitter von oben aufgenommen – liegen jeweils 1,35 Sekunden.

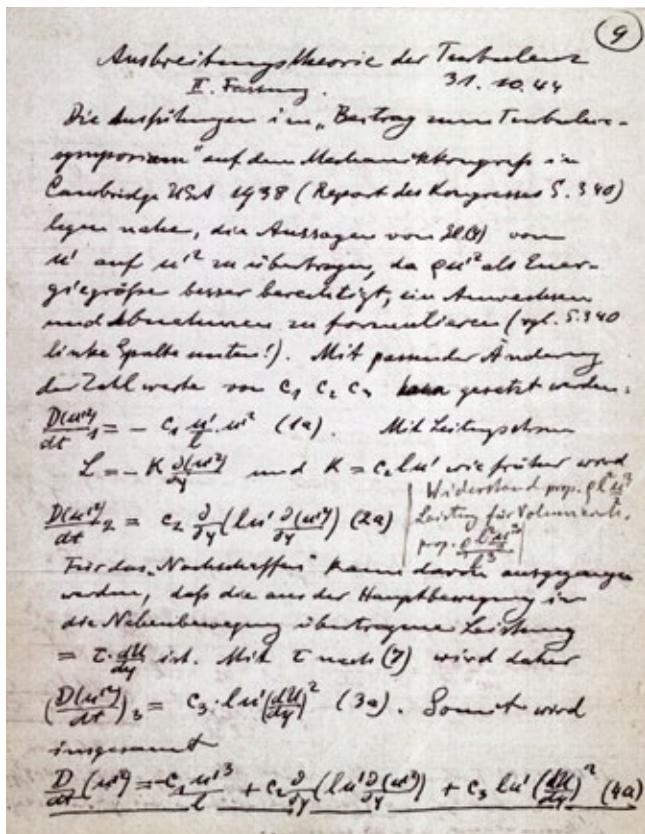
Prandtl und Kármán, der nun als Direktor des Aerodynamischen Instituts der Technischen Hochschule Aachen seinem ehemaligen Lehrer bei der Erforschung der Turbulenz kräftig Konkurrenz machte, versuchten aus der Formel von Blasius Anhaltspunkte für die gesuchte Theorie zu gewinnen. Sie folgerten zum Beispiel, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der turbulenten Grenzschicht mit der siebten Wurzel aus dem Wandabstand anwächst. Für kurze Zeit galt das » $1/7$ -tel-Gesetz« als Richtschnur auf dem Weg zu einer Turbulenztheorie, doch dann zeigten Messungen, dass es bei sehr hohen Reynolds-Zahlen seine Gültigkeit verlor. Ein logarithmischer Zusammenhang schien besser zu den Daten sowie zu theoretischen Annahmen zu passen.

Aus diesem Wechselspiel von empirischen Formeln und physikalischen Hypothesen entstanden um 1930 zwar Theorien, die sich in der Ingenieurspraxis hervorragend bewährten, doch folgten sie nicht ohne Weiteres aus den Navier-Stokes-Gleichungen. In Prandtls Theorie gab es eine Größe, die er Mischungs- oder Bremsweg nannte. Sie bezeichnete die mittlere Weglänge eines Wirbels in der turbulenten Strömung, bevor er seinen Impuls an die Umgebung abgibt. Um diesen Ansatz anzuwenden, waren aber je nach Strömung weitere Annahmen nötig; von einer kompletten Turbulenztheorie war man noch weit entfernt. Dieser Mangel besteht im Prinzip bis heute, und notgedrungen wird Prandtl's Mischungswegansatz noch immer verwendet. Zum Beispiel hilft er in der Simulation astrophysikalischer Phänomene bei der Beschreibung des turbulenten Impuls- und Wärmetransports.

Während es im Fall voll entwickelter Turbulenz wenigstens halbempirische Formeln für Widerstand und mittlere Strömungsgeschwindigkeit gab, blieb der Übergang vom laminaren in den turbulenten Strömungszustand ein hartnäckiges Rätsel. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts unternahmen Forscher viele Versuche, den Turbulenzumschlag mathematisch als Stabilitätsproblem zu behandeln: Wenn in einer laminaren Strömung eine kleine, wellenförmige Störung mit der Zeit abklingt, bleibt die Strömung stabil; wächst die Amplitude der Welle mit der Zeit an, wird die Strömung turbulent. Mit solchen Stabilitätsanalysen wollte man herausfinden, für welche Störwellen und bei welchen Reynolds-Zahlen eine vorgegebene laminare Strömung in Turbulenz übergeht. Doch Theorie und Praxis wollten partout nicht zusammenpassen.

Ein universelles Phänomen

Aus München sei »vielleicht eine Sensation« zu erwarten, schrieb ein Mitarbeiter Kármáns 1922 an Prandtl. Anscheinend habe eines der Wunderkinder aus der Sommerfeld-Schule – gemeint war der später als Quantenphysiker berühmt gewordene Werner Heisenberg (1901–1976) – »das Problem der Turbulenz gemeistert«. Tatsächlich leitete Heisenberg in seiner Doktorarbeit eine Grenze der Stabilität bei großen Reynolds-Zahlen her; allerdings galt diese Grenze



Auf den 31. Oktober 1944 datierte Prandtl eine elegante »Ausbreitungstheorie der Turbulenz«, in der er allerdings die Rolle der inneren Reibung oder Zähigkeit noch nicht berücksichtigte.

nicht für alle Störwellenlängen, und Heisenbergs Näherungsverfahren war nicht über jeden Zweifel erhaben.

Wo Heisenberg nur ein Teilerfolg beschieden war, konnte der Prandtl-Schüler Walter Tollmien (1900–1968) fünf Jahre später eine hieb- und stichfeste Theorie vorlegen. Er untersuchte in seiner Doktorarbeit die Stabilität eines Geschwindigkeitsprofils, das dem der laminaren Grenzschicht entlang einer ebenen Platte glich. Sein Ergebnis besagte für jede Störwellenlänge und Reynolds-Zahl, ob die Strömung stabil blieb oder instabil wurde. Die Instabilitätsschwelle erschien zwar unrealistisch niedrig, doch wenn man annahm, dass sie nur den unscheinbaren Beginn der Turbulenz markierte, war das Ergebnis nicht widersinnig. Hermann Schlichting (1907–1982), ein weiterer Prandtl-Schüler, beschrieb einige Jahre später, wie die Störwellen in der Plattengrenzschicht beim Durchqueren des Instabilitätsgebiets anwachsen und wieder abflauen. Doch da es den Göttingern trotz solcher Erfolge nicht gelang, ihre Theorie experimentell zu bestätigen, nahm man außerhalb der Prandtl-Schule wenig Notiz davon. Den meisten Forschern erschien die »Tollmien-Schlichting-Instabilität« als alleinige Turbulenzursache eher unwahrscheinlich.

Es sollte noch lange dauern, bis man verstand, dass es sich bei der Turbulenz um ein universelles Phänomen handelt,

für das die statistische Physik zuständig ist. Der Durchbruch gelang dem großen russischen Mathematiker Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow (1903–1987) im Jahr 1941, inmitten des Zweiten Weltkriegs. Erst Ende 1945 wurde seine Theorie im Westen bekannt. Damals war die Zeit offenbar reif für Kolmogorows Entdeckung, denn in diesem Jahr gelangten völlig unabhängig voneinander erst Prandtl, dann der Norweger Lars Onsager (1903–1976) sowie ein halbes Jahr später Heisenberg und Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) zu gleichen Schlussfolgerungen.

Heute wissen wir, dass die voll entwickelte Turbulenz in genügender Entfernung von den turbulenzzeugenden Teilen – Wände, Propeller, Gitter – eine so genannte Energiekaskade bildet: Die vom Turbulenzzeuger in das Fluid eingebrachte Energie wird durch Instabilitäten auf immer kleinere Bereiche übertragen. Sie verteilt sich somit von anfangs großen Wirbeln auf immer winzigere. Das geschieht zunächst durch bloße Trägheits- oder Inertialkräfte; man spricht deshalb vom Inertialbereich der Energiekaskade. Erst wenn die Wirbel sehr klein geworden sind, zieht die innere Reibung sie ganz auf und verwandelt sie in Wärme.

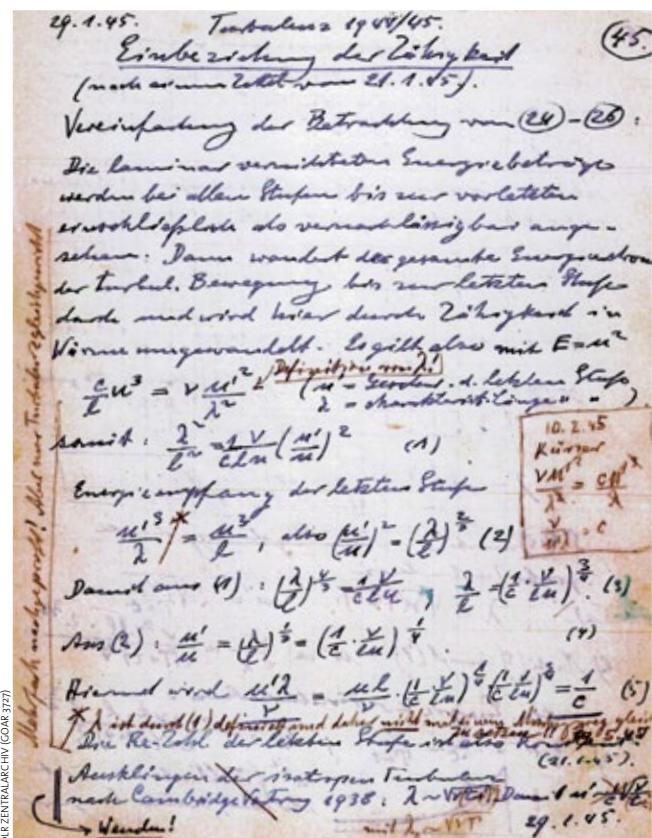
Auf dem Weg zur statistischen Turbulenztheorie leistete Prandtl wichtige Beiträge. Seit 1923 stand er in engem Kontakt mit dem englischen Strömungsforscher Geoffrey In-

gram Taylor (1886–1975) vom Trinity College in Cambridge. Die beiden hatten Zugang zu den besten Messwerten der Zwischenkriegszeit – nicht nur aus Göttingen und Cambridge, sondern auch aus Delft in den Niederlanden und vom National Bureau of Standards in den USA. Die Windkanalforscher verwendeten so genannte Hitzdrahtsonden: Ein feiner, elektrisch erwärmter Draht wird durch die umströmende Luft je nach deren lokaler Geschwindigkeit mehr oder weniger stark abgekühlt. Zum Ausgleich muss die an den Draht gelegte elektrische Spannung erhöht werden, die damit die Geschwindigkeitsvariationen der Turbulenz getreu wiedergibt. 1932 schrieb Taylor an Prandtl, dass ihn nun die spektralen Eigenschaften der Turbulenz besonders interessierten, das heißt die Verteilung der Energie auf die verschiedenen Wirbelgrößen. Prandtl antwortete sofort: Er sei gerade dabei, mit zwei Hitzdrähten solche Zusammenhänge zu messen.

1935 rückte Taylor mit einer Artikelserie über die »statistische Theorie der Turbulenz« die so genannte isotrope – nach allen Richtungen gleich verlaufende – Turbulenz ins Zentrum der Forschung. Den Anstoß lieferte wieder einmal die Praxis: Für zuverlässige Windkanalmessungen muss die Luft das Modell möglichst gleichmäßig umströmen. Durch statistische Analyse der turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen kam Taylor auf zuverlässigere Formeln für die Stärke der Turbulenz. Als Prandtl im selben Jahr seinen 60. Geburtstag feierte, beteiligte sich Taylor als einziger nichtdeutscher Wissenschaftler mit einem einschlägigen Fachartikel an der zu diesem Anlass verfassten Festschrift.

Drei Jahre später fand im Rahmen eines internationalen Mechanikkongresses in Cambridge (US-Bundesstaat Massachusetts) unter Prandtls Vorsitz ein Turbulenzsymposium statt, bei dem er Messungen von Geschwindigkeitsschwankungen in einem eigens dafür gebauten Windkanal präsentierte. In seinem Bericht unterschied Prandtl vier Turbulenztypen: Wandturbulenz, freie Turbulenz, Turbulenz geschichteter Strömungen und den Zerfall der isotropen Turbulenz. Für den letzten Fall gab er Formeln an, die durch Erfassen der Geschwindigkeitsfluktuationen hinter einem in den Luftstrom eingebrachten Gitter experimentell überprüft werden konnten. Obendrein zeigte Prandtl Bilder von mit Eisenglimmer sichtbar gemachten Wasserwirbeln hinter einem Gitter (siehe Fotos S. 48). Wie sich zeigte, stand die Größe der Wirbel in Widerspruch zu Folgerungen aus Taylors Theorie. Es war charakteristisch für Prandtls Arbeitsweise, auf solch einfache Weise theoretische Vorstellungen auf die Probe zu stellen.

Der im Rückblick wichtigste Teil von Prandts Vortrag be traf die durch Reibung an den Wänden eines Strömungs kanals erzeugten Schwankungen der mittleren Strömungs geschwindigkeit. In den mit einer raffinierten elektromechanischen Vorrichtung gewonnenen Messdaten zeigte sich dieselbe spektrale Energieverteilung wie bei der vollständigen Turbulenz inmitten des Windkanals. Aus diesen Daten zog Prandtl später weit gehende theoretische Schlüsse: Im Frühjahr 1945, kurz nach seinem 70. Geburtstag, erkannte er



Mit »Einbeziehung der Zähigkeit« leitete Prandtl erstmals die später so genannte Kolmogorow-Länge her – hier als λ –, die angibt, wie rasch sich große Wirbel in kleine verwandeln.

Unmittelbar nach Kriegsende kommt es 1945 in Deutschland zur Begegnung der Strömungsforscher Hugh L. Dryden und Tsien Hsue-shen aus den USA (links außen und rechts außen) sowie Prandtl und Theodore von Kármán (innen, links und rechts).



ABDRUCK GENEHMIGT VON DEN ARCHIVEN DES CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

die universelle Bedeutung der Energiekaskade bei turbulenten Strömungen.

Mit Beginn des Zweiten Weltkriegs verlor die Göttinger Turbulenzforschung den Kontakt zu Cambridge und anderen Zentren. Das mag erklären, warum Prandtls Vortrag auf dem Mechanikkongress von 1938 international kaum mehr Beachtung fand. Doch in den Göttinger Messungen offenbarte sich bereits der universelle Charakter der Turbulenz, für den Kolmogorow 1941 in seiner bahnbrechenden Arbeit die theoretischen Argumente liefern sollte.

Unveröffentlichte Manuskripte

Als US-Truppen am 8. April 1945 Göttingen besetzten, brachte Prandtl gerade in einem Manuskript »Über die Rolle der Zähigkeit im Mechanismus der ausgebildeten Turbulenz« just die Gedanken zu Papier, die später als Kolmogorow-Theorie Geschichte machten. Prandtl datierte das fertige Manuskript auf den 4. Juli 1945. Doch in den Tagen und Wochen kurz nach Kriegsende stand sein Institut unter Aufsicht der britischen Besatzung. Prandtl und andere führende Wissenschaftler wurden aufgefordert, für die Besatzungsmächte Berichte über ihre Forschungen im Krieg zu verfassen. Ihre aktuelle Arbeit durften sie nicht fortsetzen, worüber sich Prandtl erfolglos beim Präsidenten der Royal Society in London beschwerte. Als dann im Januar 1946 Heisenberg und Weizsäcker aus der Internierung im englischen Landsitz Farm Hall entlassen wurden und nach Göttingen kamen, erfuhr Prandtl von deren ganz ähnlicher Theorie. Darum verzichtete er auf die Publikation seines Manuskripts. In seinem

Bericht über die Turbulenzforschung während der Kriegsjahre erwähnte er zwar sein Manuskript vom Juli 1945, doch eine Veröffentlichung erschien ihm angesichts der schönen Arbeiten von Weizsäcker und Heisenberg nicht mehr geboten.

Als beim ersten Mechanikkongress nach dem Krieg im September 1946 in Paris von den Fortschritten auf dem Gebiet der Turbulenzforschung berichtet wurde, kam zwar die »bemerkenswerte Koinzidenz« der Theorien von Kolmogorow, Onsager, Weizsäcker und Heisenberg zur Sprache, doch von Prandtl war keine Rede. Offenbar wusste niemand von den Erkenntnissen Prandtls während der letzten Kriegsmonate, die er in seiner unveröffentlichten Arbeit dargestellt hatte.

Zusammen mit anderen Manuskripten, die in Prandtls Nachlass erhalten sind, können wir heute diese Phase der Göttinger Turbulenzforschung ziemlich genau rekonstruieren. Bereits im Oktober 1944 gelang Prandtl die vollständige Formulierung einer Theorie, die er 1945 mit seinem Mitarbeiter Karl Wieghardt (1913–1996) in der Arbeit »Über ein neues Formelsystem für die ausgebildete Turbulenz« veröffentlichte. Darin beschrieb er mit einer Differenzialgleichung, wie sich die Energie in einer turbulenten Strömung zeitlich verändert. Die Rolle der Zähigkeit blieb zwar noch offen, aber Prandtl hatte davon schon eine konkrete Vorstellung: Die Größe der »Turbulenzballen« sollte kaskadenartig stufenweise immer weiter schrumpfen, bis sie sich auf niedrigster Stufe durch die Zähigkeit in pure Wärmebewegung verwandelten. Diese kleinste Längenskala – heute Kolmogorow-Länge genannt – findet sich unter dem Datum vom 29. Januar 1945 in Prandtls Manuskripten. Dass er es datierte,

zeigt, dass er um die Bedeutung des Ergebnisses wusste. Aus dem unveröffentlichten Manuskript vom Juli 1945 und aus anderen Aufzeichnungen geht jedoch hervor, dass er damit noch nicht zufrieden war. Er bemühte sich vor allem um eine strengere Ableitung der Kolmogorow-Länge – und dies wurde dann der wesentliche Inhalt weiterer Manuskripte.

Wenn man diese Phase rückblickend betrachtet, wird klar, dass vor allem die 1938 beim Mechanikkongress in den USA präsentierten Windkanalmessungen von Prandtls Doktorand Heinz Motzfeld – dessen Name in der Geschichte der Turbulenzforschung bislang völlig unbekannt ist – den entscheidenden Beitrag geliefert hatten. Damit erscheint schon das Jahr 1938, und nicht erst das Datum 1941 der kolmogorowschen Arbeiten, als die eigentliche Wende zur Entdeckung der universellen Gesetze der voll ausgebildeten Turbulenz. Dies im Einzelnen aufzuzeigen, bleibt aber einer genaueren Analyse von Prandtls Manuskripten vorbehalten.

Politik und Wissenschaft: Kein Happy End

Eine so praxisnahe Wissenschaft wie die Strömungsforschung entstand nicht im Elfenbeinturm. Prandtls Modellversuchsanstalt wurde bereits im Ersten Weltkrieg beträchtlich erweitert und 1919 in »Aerodynamische Versuchsanstalt« (AVA) umbenannt. 1925 übernahm Prandtl die Leitung eines für ihn errichteten Kaiser-Wilhelm-Instituts (KWI) für Strömungsforschung. Nach Hitlers Machtergreifung erlebten die prandtschen Forschungseinrichtungen einen steilen Aufstieg. Besonders profitierte die AVA, der das Regime gleich einen großen Windkanal spendierte. 1937 wurde die AVA unter der Leitung von Prandts Schüler Albert Betz (1885–1968) verselbstständigt. Prandtl widmete danach seine ganze Kraft dem KWI, ohne jedoch die Verbindung zur benachbarten AVA abzubrechen. »Die Strömungsforschung muss sich mit der Luftwaffenforschung verbinden, um die physikalischen Grundgesetze für die Anwendung der Luftwaffe aufzuhellen und der Entwicklung grundsätzlich neue Wege zu weisen«, forderte Luftwaffenoberbefehlshaber Hermann Göring 1938. Prandtl gehorchte und übernahm im Krieg eine führende Rolle für die Forschungspolitik des Luftfahrtministeriums.

Prandts großes Ansehen im In- und Ausland wies ihm eine besondere repräsentative Rolle zu – und er nahm diese bereitwillig an. Zwar wurde er nicht Mitglied der NSDAP, doch seine führende Position in der deutschen Luftfahrtforschung machte ihn mehr und mehr zum Komplizen. Prandtl sah keinen Widerspruch darin, einerseits Maßnahmen der Nationalsozialisten zu kritisieren – etwa die Entlassung jüdischer Universitätswissenschaftler – und auf der anderen Seite das Regime gegen Kritik von außen zu verteidigen. Als ihm Taylor 1938 vorhielt, er mache sich nicht klar, was für ein »krimineller Irrer« sein Land beherrsche, entgegnete Prandtl, Taylor möge nach Deutschland kommen, »um sich davon zu überzeugen, daß wir hier doch sehr gut regiert werden«. Hitler wolle mit seiner Politik nur »die letzten Reste des Vertrages von Versailles« beseitigen. Selbst als der Diktator mit dem Überfall auf Polen den Zweiten

Weltkrieg auslöste, warb Prandtl um Verständnis. Noch am 7. März 1945 schrieb er in einem Brief an Göring vom »erhofften Endsieg«.

»He was a sad figure«, schrieb Kármán, der in die USA emigriert war und in den 1930er Jahren am California Institute of Technology ein Forschungszentrum nach Göttinger Vorbild aufgebaut hatte, über sein Wiedersehen mit Prandtl nach dem Krieg. Und sein früherer Freund Taylor ignorierte Prandtl, als er wieder Kontakt herstellen wollte.

Auch für Prandts Turbulenztheorie gab es kein Happy End. Der Durchbruch, den er in den letzten Kriegsmonaten erzielt hatte, blieb unveröffentlicht. Eine kleine Andeutung davon erschien 1949 in der dritten Auflage seines Lehrbuchs »Führer durch die Strömungslehre« – doch in diesen knappen Ausführungen dürfte kaum jemand die Quintessenz seiner jahrelangen Bemühungen um die Turbulenz erkannt haben. Während die Theorien von Onsager, Weizsäcker und Heisenberg schon 1946 als herausragende Errungenschaften an die Seite der Theorie von Kolmogorow gestellt wurden, ist Prandts Beitrag bis heute praktisch unbekannt geblieben. ↵

DIE AUTOREN



Eberhard Bodenschatz (links) ist seit 2005 Direktor des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen und seit 2007 Physikprofessor an der dortigen Universität. Davor forschte er 16 Jahre in den USA – zunächst als Postdoc an der University of California in Santa Barbara, von 1992 bis 2005 als Professor an der Cornell University in Ithaca (New York). **Michael Eckert** promovierte 1979 an der Universität Bayreuth in theoretischer Physik – wie Bodenschatz – und wandte sich danach der Wissenschafts- und Technikgeschichte zu. Er ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Museum in München und arbeitet gegenwärtig an einer Prandtl-Biografie.

QUELLEN

Bodenschatz, E., Eckert, M.: Prandtl and the Göttingen School. In: Davidson, P.A. et al. (Hg.): *A Voyage through Turbulence*. Cambridge University Press, 2011

Eckert, M.: *The Dawn of Fluid Dynamics. A Discipline between Science and Engineering*. Wiley-VCH, Berlin/Weinheim 2006

Rotta, J.C.: Die Aerodynamische Versuchsanstalt in Göttingen, ein Werk Ludwig Prandtls. Ihre Geschichte von den Anfängen bis 1925. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen 1990

Vogel-Prandtl, J.: Ludwig Prandtl: ein Lebensbild; Erinnerungen, Dokumente. In: Mitteilungen aus dem Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen 1993

LITERATURTIPP

Samulat, G.: Großer Wirbel um die Turbulenz. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2013, S. 50–59
Überblick über die aktuelle Strömungsforschung

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1205323

herrenhäuser **FORUM**

Mensch-Natur-Technik

Können Roboter fühlen und lachen?
Wie lernt eine Maschine?
Können Roboter denken?

Do 28.11.2013 / 19.00 / HANNOVER EIN ROBOTER IN JEDEM HAUS? Vom Leben mit der Technik von morgen

MIT Prof. Dr. Gregor Schöner Institut für Neuroinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr. Rudolf Drux
Institut für Deutsche Sprache und Literatur I, Universität Köln, Prof. Dr. Ipke Wachsmuth Universität Bielefeld,
Prof. Dr. Frank Kirchner Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI GmbH), Bremen
MODERIERT VON Steve Ayan Redaktionsleiter Gehirn und Geist

VERANSTALTUNGSORT Tagungszentrum Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG mensch@volkswagenstiftung.de

MEHR INFOS www.volkswagenstiftung.de/veranstaltungen und www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



Volkswagen**Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Schlabbern mit Stil

Ihre Anatomie hindert Katzen und Hunde daran, Flüssigkeiten einfach einzusaugen. Den Durst können die Tiere nur dank einiger Tricks stillen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Wer trinkt, tut das einfach und fragt nicht, wie der Vorgang eigentlich vonstattengeht. Doch die Beobachtung unserer Mitgeschöpfe bringt eine erstaunliche Vielfalt zu Tage. »Das Pferd saugt, wenn es trinkt, der Ochse schlurft, der Hund leckt und der Vogel schöpft und gießt ein ... Der Mensch kann es nach allen Arten. Er saugt an der Mutter-Brust schon und beständig wenn er ordentlich stark trinkt, den Tee schlurft er mit erweiterter Brust ein, und wenn er aus einer Bouteille mit einem engen Hals trinkt, so gießt er«, beobachtete bereits der erste deutsche Experimentalphysiker Georg Christoph Lichtenberg. Damit umriss er ein Untersuchungsprogramm, das Wissenschaftler noch heute

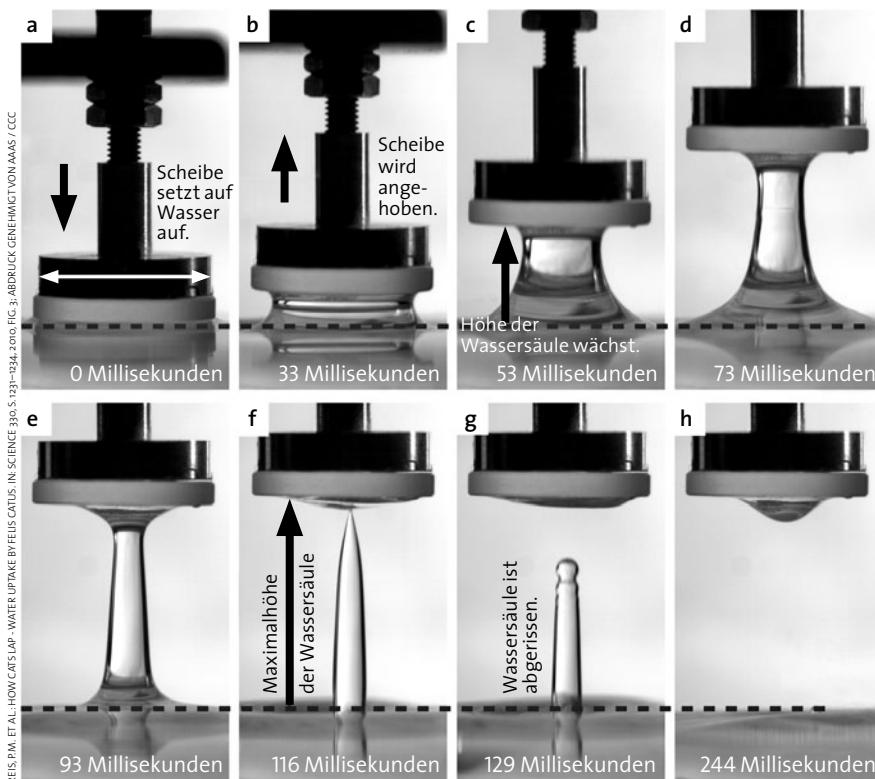
beschäftigt (und dem auch wir uns schon gewidmet haben, siehe »Schnell und schmerzlos – Physik am Morgen« in SdW 3/2009, S. 32, zur Frage des Trinkens von heißem Tee).

Für landlebende Wirbeltiere stellt das Trinken physikalisch eine Herausforderung dar. Sie finden frisches Wasser in Teichen, Pfützen oder – im Fall von Haustieren – in Schalen vor und müssen es dann gegen die Schwerkraft aufwärtsbewegen. Schweinen, Schafen, Pferden (und Menschen) macht es die Natur recht leicht, denn dank ihrer Backen können sie Maul und Mund luftdicht verschließen. Dann lassen sie darin einen Unterdruck entstehen und saugen das Wasser einfach ein. Die Ba-

cken von Katzen und Hunden sind jedoch nur unvollständig ausgebildet, ihnen wird daher die Zunge zum entscheidenden Hilfsmittel. Wer die Tiere beobachtet, könnte den Eindruck gewinnen, dass sie diese beim Trinken ein wenig nach Art einer Schöpfkelle formen. Mit einer solchen Vermutung hatten sich auch die meisten Forscher lange Zeit zufriedengegeben.

Dann aber kam Roman Stocker vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge, USA, zu der Ansicht, dass das nicht die volle Wahrheit sein kann. Seine Katze ging nämlich stets ruhig und anmutig zu Werke – kaum vorstellbar, dass zungenverrenkendes Schlabbern dabei die Hauptrolle spielte. Stocker und Kollegen machten sich also daran, das Geheimnis zu lüften. Ihre Aufnahmen mit High-Speed-Kameras zeigen, dass die Katze mit der nach unten abgeknickten Zungenspitze die Wasseroberfläche kurz berührt, sie jedoch nicht durchstößt. An der hydrophilen Zungenoberfläche haftet das Wasser gut und wird angehoben, sobald die Zunge wieder nach oben schnellt.

Nun kommt zusätzlich die Schwerkraft ins Spiel: Sie beschleunigt das



REIS, P.M. ET AL.: HOW CATS LAP - WATER UPTAKE BY FELIS CATUS. IN: SCIENCE 330, 5.12.2010, FIG. 3; ABBRUCH GENEHMIGT VON AAAS / CCC

Die Sequenz von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigt das Wechselspiel zwischen Trägheit und Schwere. Eine Glasscheibe berührt eine Wasseroberfläche, wird hochgehoben und zieht dabei eine Flüssigkeitssäule mit sich. Diese sackt wieder zurück und reißt schließlich ab. Zwischen Bild e und f liegt der optimale Zeitpunkt, zu dem eine trinkende Katze zwecks maximaler Flüssigkeitsaufnahme die Säule abbeißen sollte.



Dem Autor gelang dieser Schnappschuss: Eine Katze rollt die Zungenspitze so ein, dass die Zungenunterseite die Wasserober-

fläche berührt (links); daneben eine Abfolge von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der MIT-Forscher um Roman Stocker.

Wasser nach unten und zieht es damit in die Länge. Kurz bevor die Flüssigkeitssäule reißen kann und der Großteil des Wassers wieder zurückfällt, schließt die Katze das Maul und beißt den oberen Teil der Säule einfach ab. Die Rückseite der eingezogenen Zungenspitze kommt nun auf dem Gaumen zu liegen und schließt das Wasser zwischen dessen Querleisten ein. Von hier aus gelangt es schließlich in den Magen.

Mechanisches Katzenmodell

Eine weitere Vermutung widerlegten die Aufnahmen ebenfalls. Dieser zufolge spielen auch die haarähnlichen rauen Strukturen auf der Zunge eine Rolle beim Flüssigkeitstransport. Doch tatsächlich benutzen die Tiere nur die Zungenspitze – und die ist völlig glatt.

Die MIT-Forscher konstruierten sogar ein mechanisches Modell. Dabei wird eine runde Glasscheibe computergesteuert auf einer Flüssigkeitsoberfläche aufgesetzt und wieder angehoben (Bildfolge links). Glas, das sich leicht von Wasser benetzen lässt, reproduziert die Adhäsionswirkung der nasen Zunge recht gut. Indem die Forscher die Kräfte abschätzten, die bei diesem künstlichen Trinken auftraten, gewannen sie schließlich ein Bild von der Dynamik des Vorgangs. Demnach dominieren die Trägheit, mit der die beschleunigte Flüssigkeit ihren Weg nach oben fortsetzen »möchte«, und die Schwerkraft, die dieser Aufwärtsbewegung entgegenwirkt. Oberflächenspannung und Viskosität der Flüssigkeit spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

Da am Ende stets die Schwerkraft siegt und zum Abreißen der Flüssig-

keitssäule führt, muss die Katze ihr Maul zu einem geeigneten Zeitpunkt schließen. Sie tut das just in dem Moment, in dem die Flüssigkeitssaufnahme maximal wird. Dazu muss sie die gegengläufigen Wirkungen von Trägheit und Schwere genau abschätzen. Schleckt die Katze zu schnell, so reißt die Flüssigkeitssäule ab, bevor sie die maximale Höhe erreicht, und schleckt sie zu langsam, schließt sie das Maul zu spät, weshalb ihr auch dann ein Teil der Flüssigkeit entgeht. Großkatzen schlecken übrigens langsamer. Denn die optimale Frequenz hängt eng mit dem Körpergewicht zusammen, wie die Wissenschaftler anhand zahlreicher Aufnahmen von Mitgliedern der Felidae nachweisen.

Dann aber machten sie einen Fehler. In ihrer Publikation unterstellten sie dem Hund ohne genauere Prüfung, dass er anders als eine Katze seine Zunge eben doch zur Schöpfkelle verformt, deren Inhalt er irgendwie ins Maul schlabbert. Doch warum sollten Hund und Katze, deren Mundbereiche einander sehr ähnlich sind, auf unterschiedliche Weise trinken? Eine Reaktion ließ denn auch nicht lange auf sich warten. Der Hundebesitzer Alfred Crompton – Professor an der Harvard University, die in unmittelbarer Nachbarschaft des MIT gelegen ist, hatte nach der Lektüre das Gefühl, für die Hunde einstehen und eine Gegendarstellung verfassen zu müssen: »We felt we should stand up for the dogs and write this paper.«

Gemeinsam mit Kollegen machte er sich an eine eigene Untersuchung. Und tatsächlich: Der einzige Unterschied zwischen dem Trinken von Hund und Katze liegt wohl darin, dass die angewinkelte Zungenspitze des Hundes die

Flüssigkeitsoberfläche nicht nur berührt, sondern meist durchdringt. Allerdings: Quasi als Nebeneffekt füllt sich dabei auch eine Zungen-»Kelle« und führt zu der für das Hundetrinken so typischen Schweinerei.

Bemerkenswerterweise war es in beiden Fällen wohl erst die persönliche Beziehung zu bestimmten Tieren, welche die Arbeiten überhaupt motivierte. Und mehr noch: Beim zweiten Team stand das wissenschaftliche Anliegen womöglich sogar im Hintergrund. Es ging ihm anscheinend weniger darum, die ohnehin kaum haltbare Behauptung einer vermeintlichen Sonderstellung der Katze zu widerlegen, als zu verhindern, dass der Hund zumindest implizit als weniger kultiviert dargestellt wird als die Katze. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

QUELLEN

- Crompton, A.W., Musinsky, C.:** How Dogs lap: Ingestion and Intraoral Transport in *Canis familiaris*. In: *Biology Letters* 23, S. 882–884, Dezember 2011
Reis, P.M. et al.: How Cats Lap: Water Uptake by *Felis Catus*. In: *Science* 330, S. 1231–1234, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1205327

Einstein im Quantentest

Mit ausgefeilten quantenphysikalischen Tests überprüfen Physiker einen Grundpfeiler der allgemeinen Relativitätstheorie, das einsteinsche Äquivalenzprinzip. Der Streit darüber, wie sich ihre Ergebnisse interpretieren lassen, berührt fundamentale Fragen, etwa: Wie funktioniert Gravitation auf atomarer Ebene?

Von Domenico Giulini

Um die Natur zu beschreiben, brauchen Wissenschaftler Theorien. Diese sollen es erlauben, ihre Beobachtungen mit möglichst wenigen, einfachen Prinzipien zu erklären. Dabei darf eine Theorie grundsätzlich nie endgültig »richtig« genannt werden. Denn zukünftige Beobachtungen könnten ihren Voraussagen auch einmal widersprechen. Außerdem gilt eine Übereinstimmung sowieso immer nur im Rahmen der unvermeidlichen Messfehler. Deshalb ist es hilfreich, wenn es sich um eine gut formulierte Theorie handelt – das heißt, wenn die Ausgangsannahmen möglichst vollständig und klar dargelegt sind und zwischen ihnen und den Voraussagen eine Kette logischer Folgerungen liegt. Nur dann kann man hoffen, aus einem beobachteten Widerspruch auch wertvolle Schlüsse ziehen zu können, welche der Annahmen falsch waren. Dies ist aber meist nicht eindeutig möglich, so dass es oft zu lebhaftem Streit zwischen den Forschern kommt, die an unterschiedlichen Grundsätzen festhalten wollen. Ganz verschiedene Ansätze können oft lange nebeneinander existieren, bis genauere Experimente eine Entscheidung herbeiführen.

Trotzdem gelten heute einige physikalische Theorien als fundamental. Das bedeutet: Sie beschreiben (im Rahmen der Messgenauigkeit) eine große Zahl verschiedener Phänomene, sind möglichst allgemein anwendbar und natürlich in ihren Konsequenzen widerspruchsfrei. Dazu gehören vor allem Einsteins allgemeine Relativitätstheorie und die Quantentheorie. Beide hielten bislang unzähligen experimentellen Überprüfungen stand.

Sinnbildlich für ihren grundlegenden Charakter ist, dass jede dieser Theorien wesentlich mit einer Naturkonstanten zusammenhängt. Für die von Einstein zuerst formulierte spezielle Relativitätstheorie ist dies die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum; für ihre Erweiterung, die allgemeine Relativitätstheorie, ist es die Gravitationskonstante. Die Quantentheorie hingegen gründet auf dem planckschen Wirkungsquantum. Diese drei elementaren Größen lassen sich durch verschiedene Kombinationen der Einheiten von Länge, Zeit und Masse ausdrücken. Umgekehrt liefern die drei Konstanten gemeinsam ein System, das man die Planckseinheiten nennt, etwa die plancksche Länge und Zeitdauer (siehe »Die Planckseinheiten«, S. 59). Sie lassen erahnen, unter welchen physikalischen Bedingungen und in welchen raumzeitlichen Größendimensionen wohl Relativitäts- und Quantentheorie gleichermaßen wichtig werden. Dann ließen sich Phänomene nur noch durch eine »Quantengravitation« beschreiben, deren Formulierung den Forschern trotz jahrzehntelanger Bemühungen noch nicht vollständig gelungen ist.

Das liegt auch daran, dass Schwerkraft und quantenphysikalische Effekte unter bisherigen Beobachtungsbedingungen auf jeweils ganz unterschiedlichen Skalen wichtig werden. Beide Wirkungen gleichzeitig festzustellen, würde enorm empfindliche Versuche erfordern. Die planckschen Skalen sind so aberwitzig klein, dass es zunächst ausgeschlossen scheint, sie experimentell auch nur annähernd aufzulösen. So liegen zwischen der Plancklänge und der Dimension eines Korns feinem Sand genauso viele Zehnerpotenzen wie zwischen dem Sandkorn und dem Durchmesser des gesamten sichtbaren Universums!

Allerdings lassen sich mit ausgefeilten Experimenten unvorstellbare Größenordnungen überbrücken. Beispielsweise messen Physiker auf der Jagd nach Gravitationswellen in heutigen Laserinterferometern bereits Längenänderungen, die tausendmal kleiner sind als ein Proton. Von der Plancklänge freilich ist der Durchmesser des Protons immer noch rund 20 Zehnerpotenzen weit entfernt.

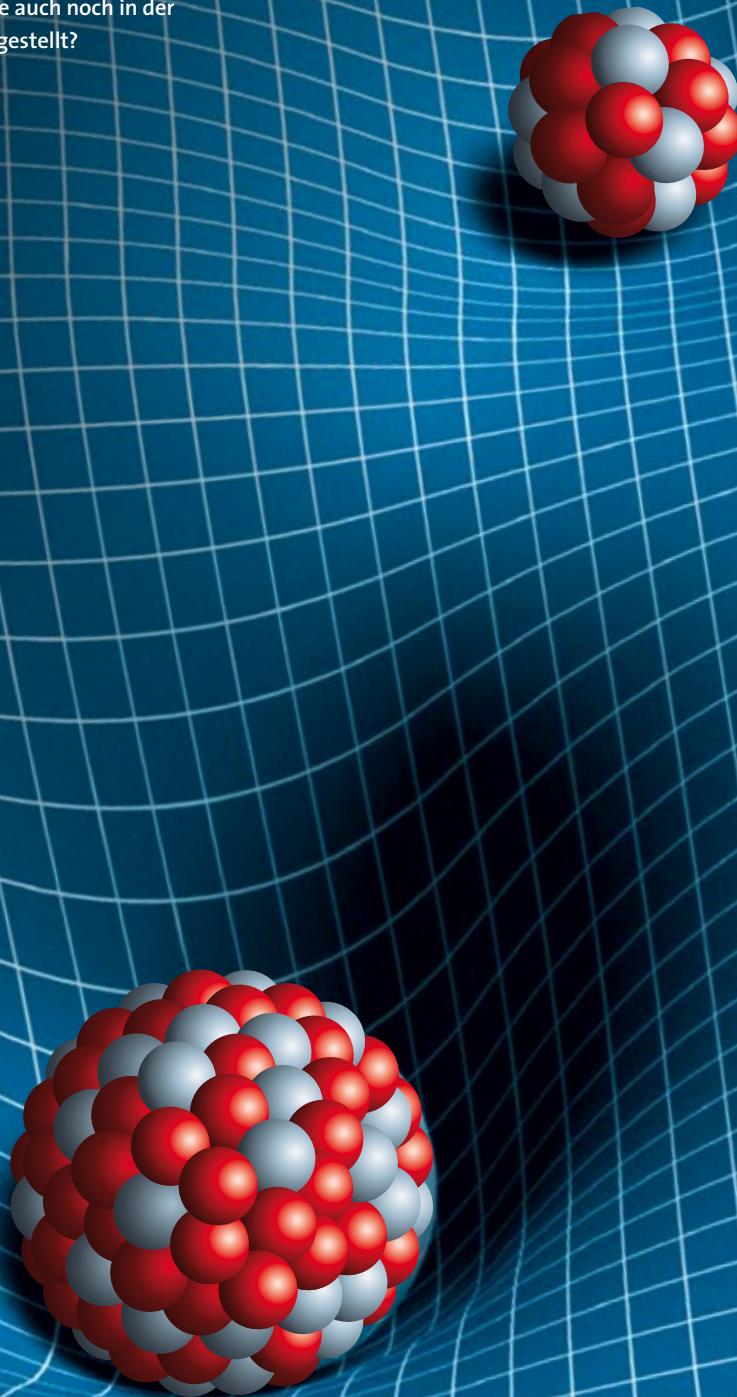
Aber auch ohne in die ambitionierte Suche nach einer Quantengravitation einzusteigen, kann man sich nach den

DIE NEUE SERIE IM ÜBERBLICK

GROSSE FRAGEN DER PHYSIK

Teil 1	► Einstein im Quantentest <i>Domenico Giulini</i>	Oktober 2013
Teil 2	► Teilchenbeschleuniger der Zukunft <i>Gerhard Samulat</i>	November 2013
Teil 3	► Fundamentalkonstanten <i>Harald Fritzsch</i>	Dezember 2013

Die Wirkung von Massen auf die vierdimensionale Raumzeit, beschrieben in der Relativitätstheorie, veranschaulicht ein dreidimensionales Bild: Körper dehnen ein gespanntes Gummizelt ein und beeinflussen so andere Objekte in der Umgebung. Doch gelten Einsteins Gesetze auch noch in der Welt der Atome, wie hier dargestellt?



AUF EINEN BLICK

MIT ATOMEN DIE RAUMZEIT VERMESSEN

1 Die Schwerkraft ist gemäß Einsteins allgemeiner **Relativitätstheorie** keine Kraft im newtonischen Sinn, sondern ein Merkmal der Geometrie von Raum und Zeit. Dem zu Grunde liegt das **Äquivalenzprinzip**: Schwere und träge Masse sind identisch.

2 Mit Hilfe der Quantenmechanik wollen Forscher die **Wirkung der Gravitation auf einzelne Atome** bestimmen und so das Äquivalenzprinzip prüfen.

3 Ein experimenteller Brückenschlag zwischen Quantenphysik und Relativitätstheorie könnte zudem wertvolle Hinweise auf dem Weg zu einer noch ausstehenden Theorie der **Quantengravitation** liefern.

physikalischen und begrifflichen Grundlagen fragen, die das Wechselspiel zwischen quantentheoretischer Materie und Schwerkraft beschreiben: Fällt ein Atom immer so wie ein Stein? Und was bedeutet diese Frage angesichts einer der zentralen Aussagen der Quantenmechanik, dass sich nämlich das Atom in einem so genannten Superpositionszustand befinden kann, der räumlich gar nicht lokalisiert ist?

Die Wechselwirkung von Materie und Gravitation schlägt sich im so genannten Äquivalenzprinzip nieder. Es besagt, dass sich »schwere« und »träge« Masse nicht unterscheiden lassen: Ein schwerer Körper, der im Gravitationsfeld der Erde ruht, verhält sich in jeder Hinsicht identisch zu einem trügen Objekt, das ohne Anwesenheit von Gravitationsfeldern beschleunigt wird. Ein klassisches Gedankenexperiment veran-

schaulich das mit der Situation in einem Fahrstuhl (Grafik unten, rechts): Innerhalb der Kabine haben Sie prinzipiell keine Möglichkeit, herauszufinden, ob es Ihr eigenes Gewicht in einem Gravitationsfeld ist, das Sie auf den Boden drückt, oder ob der Fahrstuhl Sie gleichförmig nach oben beschleunigt, ohne dass gravitativ wirksame Massen anwesend wären.

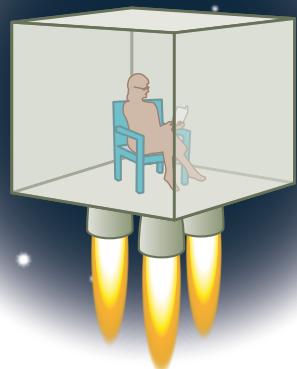
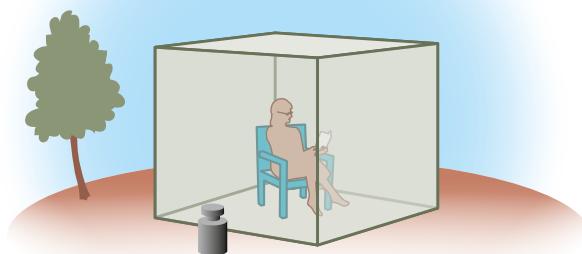
Das Phänomen, dass »irgend zwei Mengen von Materie, welche gleiche Trägheit besitzen, auch gleiche Gravitationswirkung ausüben, einerlei, welches der Stoff ist, aus dem sie bestehen« und die seinerzeitige Verwunderung der Fachwelt darüber beschrieb schon Heinrich Hertz (1857–1894) in einer Vorlesung im Jahr 1884. Er sprach von zwei Eigenschaften, die völlig unabhängig voneinander gedacht werden könnten und die sich nur durch die Erfahrung als gleich erwiesen. Hertz vermutete aber zugleich, dass auch »eine einfache und verständliche Erklärung möglich ist, und daß uns diese Erklärung einen weitgehenden Einblick in die Constitution der Materie gestatten wird«.

30 Jahre später lieferte Albert Einstein (1879–1955) diese Erklärung in Form seiner allgemeinen Relativitätstheorie. Sie vereinheitlicht Trägheit und Gravitation durch die gemeinsame geometrische Struktur von Raum und Zeit, die Raumzeit. Deren Struktur ist aber nicht wie in der newtonischen Physik unabhängig vom materiellen Geschehen ein für alle Mal fest vorgegeben. Stattdessen wird sie dynamisch davon beeinflusst, und umgekehrt wirkt die Raumgeometrie auch auf die Materie zurück. Diese Wechselseitigkeit ist vom physikalischen Gesichtspunkt aus viel befriedigender als die einseitige Wirkung, die gemäß der newtonischen Vorstellung

Das Äquivalenzprinzip

Ein Beobachter kann prinzipiell nicht unterscheiden, ob er in einem homogenen Gravitationsfeld ruht (näherungsweise etwa auf der Erde, die ihn mit der Erdbeschleunigung g zu Boden

zieht), oder ob er, fernab anderer Massen, in der Schwerelosigkeit beschleunigt wird (hier wieder genau mit g): Seine schwere und seine träge Masse sind identisch.



Die Plankeinheiten

Für die moderne Physik haben drei Naturkonstanten fundamentale Bedeutung: In der Quantenmechanik verknüpft das plancksche Wirkungsquantum h die Energie eines Teilchens mit dessen Welleneigenschaften. Die konstante Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c nahm Einstein als Grundlage für seine spezielle Relativitätstheorie. Die Gravitationskonstante G schließlich verbindet die Massen mit der Schwerkraft zwischen ihnen.

Kombiniert man die drei Werte, erhält man ein System von Einheiten für Länge, Zeit und Masse. In einer Theorie der Quantengravitation wären dies die »natürlichen Einheiten«:

$$L_P = \sqrt{\frac{h \cdot G}{c^3}} = 4,05 \cdot 10^{-35} \text{ Meter}$$

$$T_P = \sqrt{\frac{h \cdot G}{c^5}} = 1,35 \cdot 10^{-43} \text{ Sekunden}$$

$$M_P = \sqrt{\frac{h \cdot c}{G}} = 5,46 \cdot 10^{-5} \text{ Gramm}$$

Die Plancklänge ist Antwort auf die Frage, unterhalb welcher Wellenlänge ein Licht- oder Materiequant genug Energie besäße, um ein Schwarzes Loch zu bilden. Dieses hätte dann mindestens eine Planckmasse. Diese Frage ist etwas naiv – aktuelle Theorien können eine solche Situation nicht vernünftig beschreiben. Die Plankeinheiten zeigen, wann »neue Physik« nötig wird.

vom unveränderlichen »absoluten Raum« auf die Materie aussehen soll.

Die geometrische Auffassung der Gravitation ist nur dann sinnvoll, wenn alle Formen von Masse und Energie die gleiche Struktur der Raumzeit »sehen«, also in einer universellen Weise auf Schwerkraft reagieren. Genau das postulierte das Äquivalenzprinzip, das zur Grundlage von Einsteins Theorie wurde. Heute hat sich eine vereinheitlichte Sprechweise herausgebildet, in der das Prinzip aus drei Teilen besteht:

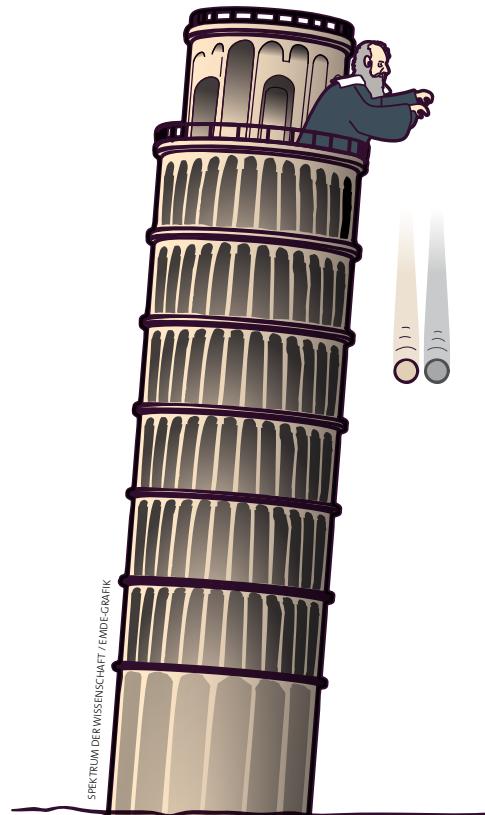
1. Die Universalität des freien Falls (UFF)

Eine Testmasse – so klein, dass ihre eigene Schwerkraft vernachlässigbar ist – bewegt sich im Gravitationsfeld auf einer Bahn, die nur von Ort, Zeitpunkt und Geschwindigkeit zu Beginn der Bewegung abhängt und von sonst nichts. Auch die chemische Zusammensetzung ist unbedeutend. Das heißt dann: Zwei Gegenstände, die am gleichen Ort und zur gleichen Zeit fallen gelassen werden, werden identisch beschleunigt (sofern man von der Luftreibung absieht): Alle Körper mit gleichen Anfangsbedingungen fallen gleich schnell. Dieses Prinzip erkannte bereits Galileo Galilei (1564–1642) – auch wenn seine berühmten Fallexperimente am schiefen Turm von Pisa (rechts) wohl bloß eine Legende sind.

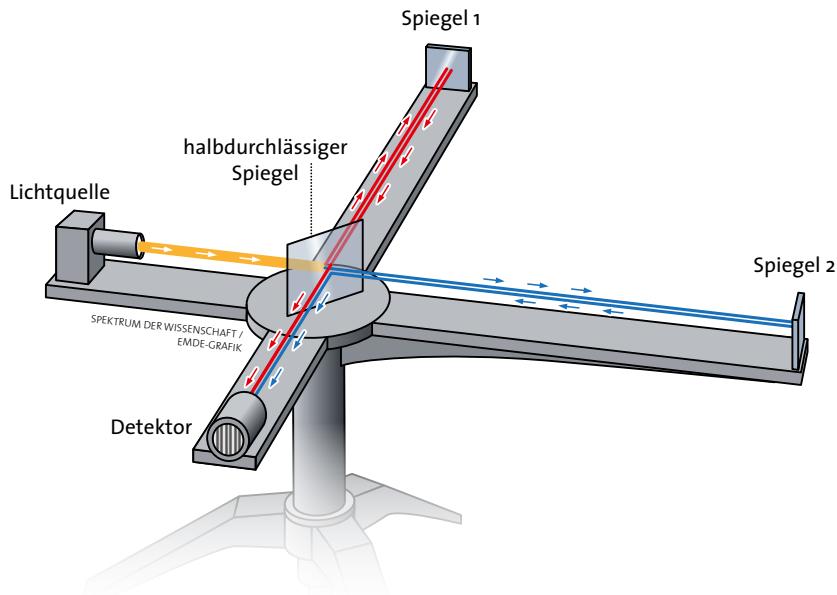
Sollte sich bei sehr genauen Experimenten messen lassen, dass diese Gleichheit nicht immer gilt, wäre die UFF verletzt. Das Ausmaß dieser Abweichung würde ein Parameter darstellen, der nach dem ungarischen Physiker Loránd Eötvös (1848–1919) benannt ist. Dieser führte zu Beginn des 20. Jahrhunderts zusammen mit Kollegen Präzisionsexperimente zur Gleichheit von schwerer und trüger Masse verschiedener Materialien durch. Mathematisch gibt der Eötvös-Parameter η den Betrag der Beschleunigungsdifferenz zweier Testmassen an, geteilt durch deren Mittelwert. Eötvös konnte in seinen

eigenen Versuchen mit so genannten Torsionswaagen η auf einen Wert von weniger als 10^{-8} – ein Hundertmillionstel – begrenzen. Heute ist diese Schranke noch einmal hunderttausendfach kleiner: So bestimmte die »Eöt-Wash«-Gruppe an der University of Washington im US-amerikanischen Seattle den Eötvös-Parameter für die Materialkombination Beryllium und Titan im Gravitationsfeld der Erde auf einen Wert von etwa 10^{-13} . Mit anderen Worten: Bis auf diese verbliebene Messungenaugigkeit gilt jener Teil des Äquivalenzprinzips.

In den nächsten Jahren wollen verschiedene Forschungsgruppen die Gültigkeit der UFF noch eingehender überprüfen. Hundertfach genauer soll ein Experiment an Bord eines Satelliten sein: Voraussichtlich 2016 untersuchen Wissen-



Eine Konsequenz aus dem Äquivalenzprinzip ist, dass alle Körper, die gleichzeitig aus einer Höhe fallen gelassen werden, gleich schnell zu Boden fallen. Erste Experimente dazu stellte bereits Galileo Galilei an. Einer Legende nach ließ er dazu Objekte mit verschiedenen Massen auch vom schiefen Turm von Pisa fallen.



Ein geteilter Lichtstrahl durchläuft zwei Wege und erzeugt auf einem Schirm ein Überlagerungsmuster: Mit so einem Interferometer prüfte Albert Michelson 1881, ob die Lichtgeschwindigkeit richtungsabhängig ist. Mit negativem Ausgang – das Muster blieb bei allen Orientierungen der drehbaren Apparatur gleich.

schaftler damit die Relativbeschleunigungen zweier frei fallender Testmassen aus einer Platin-Rhodium-Legierung und aus Titan.

2. Lokale Lorentzinvianz (LLI)

Eine Grundlage für Einsteins Überlegungen zur Struktur der Raumzeit war die Erkenntnis, dass der Ausgang eines physikalischen Experiments an einem bestimmten Ort weder von seiner Ausrichtung im Raum abhängt noch von seiner Geschwindigkeit. Gäbe es eine das ganze Universum erfüllende Substanz, wie den hypothetischen Äther älterer Theorien, dann würde man erwarten, dass sich eine lokale Bewegung relativ zu dieser Substanz auch auf das lokale physikalische Geschehen auswirkt. So wäre etwa auch die Lichtgeschwindigkeit verschieden, je nachdem, in welche Richtung sich ein Lichtstrahl bewegt.

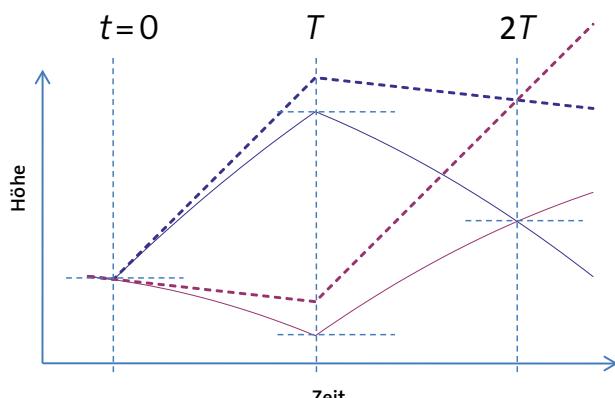
Das überprüften Albert Michelson (1852–1931) und Edward Morley (1838–1923) in einem klassischen Experiment, das zunächst 1881 in Potsdam von Michelson allein und dann 1887 von beiden mit einer wesentlich verbesserten Apparatur an der Cleveland State University im US-Bundesstaat

Ohio durchgeführt wurde. Dieser Versuch nutzt ein so genanntes Interferometer, in dem ein geteilter Lichtstrahl auf verschiedenen Wegen läuft (oben). Auf einem Schirm treffen sich die Teilstrahlen und erzeugen dort ein Überlagerungsmuster, dessen Gestalt davon abhängt, wie lange die beiden Strahlen auf ihren jeweiligen Wegen unterwegs waren. Sollte sich die Lichtgeschwindigkeit je nach Orientierung der Lichtwege unterscheiden, könnte das sehr genau gemessen werden. Die Ergebnisse waren negativ – und blieben es auch seitdem. Die Obergrenze für den theoretisch noch möglichen, relativen Richtungsunterschied der Lichtgeschwindigkeit liegt mittlerweile dank modernster Experimente bei 10^{-17} .

3. Die Universalität der gravitativen Rotverschiebung (UGR)

Aus dem Äquivalenzprinzip folgt auch, dass Gravitationsfelder den Gang von Uhren beeinflussen, die sich in ihnen befinden. Diese Gesetzmäßigkeit verdeutlicht die so genannte gravitative Rotverschiebung: Strahlung, die ein Atom in einem Schwerefeld aussendet, schwingt für einen Beobachter, der sich in einem höheren Gravitationspotenzial befindet,

Das Atominterferometer



NACH HOHENSEE, M.A. ET AL.: EQUIVALENCE PRINCIPLE AND GRAVITATIONAL REDSHIFT. IN: ARXIV:1102.4362, 2011, FIG. 1

Nicht nur Licht kann Überlagerungsmuster erzeugen, sondern nach den Gesetzen der Quantenmechanik auch ein Atom, das »mit sich selbst interferiert«. Dazu muss es sich vor der Messung auf verschiedenen Wegen bewegen können. In dem Atominterferometer wirkt ein Laserpuls zur Zeit $t=0$ als Strahlteiler, in dem er jedem Zäsimumatom mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent einen Impuls in vertikaler Richtung überträgt. Ein weiterer Laserpuls bei $t=T$ gibt den Teilstrahlen entgegengesetzte Impulse, so dass sie bei $t=2T$ wieder zusammentreffen. Die Situation ohne Schwerkraft ist gestrichelt dargestellt. Unter dem Einfluss der Gravitation verformen sich die Pfade, da das Atom währenddessen »fällt« (durchgezogene Linien). Daher hängt die Phasendifferenz auch von der Gravitationsbeschleunigung ab. Der Versuch ist so ein Fallexperiment mit »Quantenmaterie«.

langsamer und rückt somit in Richtung des langwelligeren roten Lichts.

Für diesen Effekt gibt das Äquivalenzprinzip zwei allgemeine Regeln vor. Erstens gehen Uhren unterschiedlicher Bauart, die sich auf der gleichen Bahn durch die Raumzeit bewegen, immer synchron – beispielsweise auf der Internationalen Raumstation ISS eine Zäesium-Atomuhr und eine Uhr basierend auf einem so genannten Wasserstoff-Maser. Zweitens zeigen zwei Uhren gleicher Bauart auf verschiedenen Bahnen zwar einen Gangunterschied, dieser ist aber universell, das heißt, nur vom Gravitationsfeld abhängig, nicht jedoch von anderen Feldern oder vom Typ der Uhren. Mögliche Verletzungen dieses Prinzips beschreibt man durch einen Parameter α . Er ist null, sofern das Äquivalenzprinzip gültig ist. Würde er sich in einem Experiment als von null verschieden erweisen, hätte man einen Widerspruch zur allgemeinen Relativitätstheorie.

Erstaunlicherweise liegt der bisher beste Test der UGR bereits mehr als drei Jahrzehnte zurück. Im Juni 1976 stieg eine amerikanische Rakete mit einer hochgenauen Wasserstoff-Maser-Uhr an Bord auf eine Höhe von mehr als 10 000 Kilometern. Während der fast zweistündigen Flugzeit verglichen die Forscher die Signale mit denen einer baugleichen Uhr auf der Erde. Dieses Experiment namens »Gravity Probe A« lieferte eine obere Schranke für α von $7 \cdot 10^{-5}$ (70 Millionstel).

Der Versuch funktionierte, weil sich mit wachsendem Abstand zum Erdboden das irdische Gravitationsfeld ändert. Pro Meter erhöht dies die relative Frequenz um etwa 10^{-16} . Die genauesten Uhren von heute, die so genannten optischen Atomuhren, haben zehnmal bessere relative Ganggenauigkeiten. Das heißt, sie gehen in 10^{17} Sekunden, das sind etwa drei Milliarden Jahre, nur um eine Sekunde vor oder nach. Mit einem solchen Zeitmesser wiesen Forscher am US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology im Jahr 2010 die gravitative Rotverschiebung über eine Distanz von nur 33 Zentimetern nach. Die Genauigkeit von Gravity Probe A würden aber auch optische Atomuhren nur dann verbessern, wenn man sie in große Höhen von mehreren Kilometern brächte.

Neue Einsichten durch genauere Tests

Bemerkenswert ist die Diskrepanz zwischen der hohen Präzision, mit der die ersten zwei Teile des Äquivalenzprinzips, also die UFF und die LLI, überprüft wurden, und der drastisch geringeren Genauigkeit unserer Kenntnis von UGR. Das Äquivalenzprinzip kann aber insgesamt nur als so gut bestätigt gelten wie sein am wenigsten bekannter Teil. Physiker stehen also vor der Aufgabe, Experimente zu entwickeln, um die Universalität der gravitativen Rotverschiebung möglichst exakt festzustellen. Genau dies könnten Versuche auf quantenmechanischer Grundlage leisten – Methoden also, die sich in atomaren statt kosmischen Größenordnungen abspielen und sich ganz anderer Begriffe und Prinzipien bedienen. Beide Welten in einem Test zusammenzubringen, bedeutet einen großen Aufwand. Der könnte sich aber lohnen,



Claude Cohen-Tannoudji (links) und Steven Chu erhielten im Jahr 1997 gemeinsam den Physiknobelpreis. Heute streiten sich beide darüber, ob Chus Atominterferometer von 1999 auch eine neue Form der Zeitmessung und Tests einer der Säulen des Äquivalenzprinzips ermöglichen könnte.

denn von einer genaueren Überprüfung des Äquivalenzprinzips erhoffen sich die Wissenschaftler fundamentale physikalische Einsichten. Eine wichtige Frage dabei ist: Kennen wir eigentlich alle Kräfte, die im Universum wirken?

Die moderne Teilchenphysik geht davon aus, dass es vier fundamentale Wechselwirkungen gibt, nämlich die nur auf subatomaren Distanzen relevante starke und schwache Wechselwirkung sowie den Elektromagnetismus und die Gravitation. Letztere wirken über große Entfernung und bestimmen die physikalischen Strukturen von atomaren Längenskalen bis hinauf zu den kosmologischen. Doch angeommen, es gäbe in der Natur neben den uns bereits bekannten Wechselwirkungen noch weitere, die so schwach sind, dass sie die Struktur der Materie nicht wesentlich beeinflussen. Könnte man sie überhaupt beobachten?

Diese Frage beschäftigte den US-amerikanischen Physiker Robert Henry Dicke (1917–1997) von der Princeton University seit Ende der 1950er Jahre. Er wies darauf hin, dass sich zusätzliche Naturkräfte unter Umständen lediglich durch Veränderungen des Gravitationsgesetzes bemerkbar machen könnten – und zwar solche, die dem Äquivalenzprinzip widersprechen. Der tiefere Grund dafür liegt darin, dass ein Zufallsfeld nicht auf die totale Masse wirken würde. Das ist die Masse im Sinn von Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$, zu der alle Energieformen beitragen. Stattdessen könnte die Kraft abhängig davon sein, woraus sich die Materie zusammensetzt. Damit wäre das Prinzip der Universalität des freien Falls verletzt. Deswegen ist es bei den Experimenten wichtig, viele verschiedene Materialien zu betrachten und buchstäblich gegeneinander abzuwägen.

Diese zusätzlichen, bisher rein hypothetischen Kräfte treten in einigen Konzepten auch ganz automatisch auf. Ge-

meint sind »vereinheitlichte Theorien«, die auf Raumzeiten mit mehr als den bekannten vier Dimensionen beruhen – etwa die Stringtheorie. Hier könnten UFF-Verletzungen auftreten, sobald der Eötvös-Parameter 10^{-13} unterschreitet. Dieser Bereich rückt durch die in Zukunft geplanten Experimente erstmals in greifbare Nähe.

Wie fallen Atome?

Die vielleicht einfachste Art, die Gravitationsbeschleunigung auf der Oberfläche der Erde zu messen ist die, einen Gegenstand anzuheben, loszulassen und Falldauer und Höhenunterschied zu bestimmen. Macht man dies mit atomaren und subatomaren Teilchen – von den begrifflichen und experimentellen Problemen einmal abgesehen, die eine solche Übertragung aus der klassischen Physik mit sich bringt –, so hilft der Umstand, dass die Quantenmechanik der Schwerpunktsbewegung eine eigene Materiewelle zuordnet. Geeignete Vorrichtungen können diese teilen und wieder zusammenführen. Die überlagerten Teilwellen interferieren dann, und ein Muster entsteht, mit dem die Forscher genau auf das unterwegs wirksame Gravitationsfeld schließen können.

Die quantenmechanische Messung eines fallenden Zäsiumatoms im Gravitationsfeld der Erde gelang 1999 den Physikern Achim Peters, Keng-Yeow Chung und Steven Chu an der Stanford University. Sie erreichten eine Genauigkeit von drei Teilen eines Milliardstels ($3 \cdot 10^{-9}$). Diesen Wert verglichen sie mit dem der Schwerebeschleunigung eines makroskopischen Körpers aus Glas, dessen freien Fall sie im gleichen Labor mit Hilfe von Lasern ebenfalls sehr präzise untersucht hatten. Innerhalb der Messunsicherheit ergaben sich keine Unterschiede. Man kann ihr Experiment also durch die Aussage zusammenfassen, dass der Eötvös-Faktor zwischen einzelnen Zäsiumatomen und Glas kleiner als 10^{-9} ist.

Das mag angesichts des um vier Zehnerpotenzen besseren Werts aus den klassischen Experimenten zunächst nicht sonderlich beeindrucken, ist aber doch in einer Hinsicht bemerkenswert: Die beiden verglichenen Materialien sind einzelne Atome in quantenmechanischen Zuständen einerseits, und andererseits ein makroskopisches Objekt. Damit gelang den Forschern ein direkter Test der Gültigkeit von UFF zwischen klassischer und »Quantenmaterie«.

Überraschenderweise soll sich dieses Experiment nachträglich aber auch als Test der UGR eignen – laut einer neuen Interpretation, die ein Jahrzehnt später in einem Artikel im Fachjournal »Nature« erschien. Das käme einer Sensation gleich, denn für die mögliche UGR-Verletzung wäre eine obe-



re Schranke von 10^{-9} um vier Zehnerpotenzen besser als der bisher genaueste Wert. Damit wäre auch das gesamte einsteinsche Äquivalenzprinzip um vier Größenordnungen besser bestätigt.

Seit dieser Veröffentlichung im Jahr 2010 läuft eine hitzige wissenschaftliche Debatte über die Deutung des physikalischen Geschehens. Bemerkenswerterweise haben die beiden Lager je einen Nobelpreisträger auf ihrer Seite: Steven Chu von der Stanford University und Claude Cohen-Tannoudji von der École Normale Supérieure in Paris. Beide teilen sich zusammen mit einem dritten Forscher den Physiknobelpreis des Jahres 1997. Selbst unter den profiliertesten Quantenphysikern unserer Zeit herrscht also Uneinigkeit darüber, wie sich Zeit unter Verwendung einzelner Atome überhaupt messen lässt. Steven Chu war sowohl am Originalexperiment als auch an dessen Neuinterpretation beteiligt. Der Ideengeber der Deutung von 2010, Holger Müller, veröffentlichte im Januar 2013 im Fachmagazin »Science« sogar ein neues Experiment auf Grundlage des gleichen Prinzips. Doch Cohen-Tannoudji widerspricht: Die gezogenen Schlüsse seien nicht zulässig.

Der kritische Punkt röhrt dabei an fundamentalen Fragestellungen, die sowohl unser Verständnis der Quantenmechanik betreffen als auch die Antwort auf die Frage »Was ist eine Uhr?« – eine Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. Um nachzuvollziehen, worum es in dieser Auseinandersetzung geht, lohnt es sich, das Experiment von 1999 genauer zu betrachten. Bei diesem handelt es sich um ein so genanntes Atominterferometer. Laserstrahlen bringen ein Zäsiumatom, das sich durch die Apparatur bewegt, in verschiedene mögliche energetische Zustände (siehe Bild S. 60). Dabei erhält es mit 50-prozentiger Chance einen Impuls in vertikaler Richtung, der dem Teilchen zwei Wege mit gleicher Wahrscheinlichkeit ermöglicht. Nach den Regeln



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

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

www.spektrum.de/quanten



Im 123 Meter hohen Bremer Fallturm (links) kann eine Kapsel mit Experimenten (rechts) mehrere Sekunden lang frei fallen. Währenddessen ist ihr Inneres schwerelos – perfekte Bedingungen, um das Äquivalenzprinzip auf die Probe zu stellen.



FALLTURM LINKS: ZARM, FALLTURM-BETRIEBSFELLENSCHAFT, KAISERZARM, UNIVERSITÄT BREMEN

der Quantenmechanik befindet sich das Teilchen bis zur Messung am Ende in einer so genannten Superposition beider Wege. Zwischen diesen kommt es dann zur Interferenz.

Umstrittene Neudeutung eines alten Experiments

Quantenphysiker können relativ einfach eine Formel dafür berechnen, wie das Interferenzmuster hinter diesem Atominterferometer aussieht. Maßgeblich dafür ist die »Phasenverschiebung« der beiden Teilstrahlen. Das bedeutet, dass die Berge und Täler der einzelnen Wellen gegeneinander versetzt sind und sich zu helleren und dunkleren Bereichen addieren, wenn beide wieder zusammengeführt werden. Rechnerisch hängt diese Phasenverschiebung von drei Werten ab: der Gravitationsbeschleunigung auf der Erde, dem Impulsübertrag durch den Laser und der Zeit zwischen den verschiedenen Laserpulsen. Die Fachwelt ist sich zwar darüber einig, dass man mit dieser Formel auf die Beschleunigung des Atoms im Schwerkraftfeld der Erde rückschließen und damit die UFF überprüfen kann. Das Experiment ist also die quantenmechanische Version von Fallexperimenten mit klassischer Materie. Doch ob sich die Formel wie 2010 geschehen auch so interpretieren lässt, dass man mit ihr die UGR bestimmen kann – das ist umstritten.

Zu dieser zusätzlichen Interpretation der Phasendifferenz als Rotverschiebung gelangten die Physiker so: Angenommen jedes Atom sei eine Uhr, die mit einer gewissen Frequenz tickt. Nach der Relativitätstheorie laufen die Uhren im oberen Teilstrahl schneller, da er sich in einem höheren Gravitationspotenzial bewegt. Sie schwingen also bis zum Ende des Wegs öfter, was einer Phasenverschiebung zwischen den Teilchenstrahlen entspricht. Berücksichtigt man für die andere Seite der Gleichung jetzt noch, dass der Unterschied des Gravitationspotenzials durch den Höhenunterschied der Teilstrahlen ausgedrückt werden kann, und dieser wiederum

durch den Impulsübertrag und die Zeit, dann erhält man genau die gleiche quantenmechanische Formel für die Phasenverschiebung – wenn eine weitere Voraussetzung erfüllt ist, die den Kern der ganzen Auseinandersetzung bildet.

Diese Grundvoraussetzung der eben gemachten Überlegung war, dass die Zäsimatome in der Apparatur »ticken«, also tatsächlich Uhren sind, von denen man die Zeit ablesen kann. Das müssen sie insbesondere hinreichend schnell tun, so dass überhaupt eine Rotverschiebung messbar ist. Dies gelang, wie erwähnt, mit modernsten Zeitmessern bestens bei einem Höhenunterschied von 33 Zentimetern. Die Höhendifferenz der beiden Atomstrahlen im eben beschriebenen Experiment war aber dreitausendmal kleiner, lediglich ein Zehntelmillimeter. Um dann noch auf eine relative Genauigkeit von 10^{-9} zu kommen, muss die Uhr noch einmal entsprechend hochfrequenter ticken – insgesamt rund 10^{12} -mal schneller als die beste heutige Atomuhr.

Das wäre nun in der Tat der Fall, sofern man annimmt, dass die Taktfrequenz der Zäsimatome ihrer so genannten Comptonfrequenz entspricht. Diese erhält man, indem man die Gesamtenergie des Atoms durch das plancksche Wirkungsquantum teilt. Dann ergibt sich die enorme Frequenz von etwa $3 \cdot 10^{25}$ Hertz. Der Faktor 10^{12} entspricht tatsächlich der Steigerung von den typischen Frequenzen einer Atomuhr zur Frequenz einer solchen hypothetischen »Comptonuhr«. Aber diese Hypothese ist nicht notwendig, um die tatsächlich beobachtete Phasenverschiebung herzuleiten. Sie dient zunächst lediglich einer Interpretation, die erwünscht ist, aber theoretisch nicht zwingend.

Das führt zu der viel grundsätzlicheren Frage, um die der Streit der Wissenschaftler kreist: Sind die Zäsimatome so überhaupt als Uhren geeignet? Schließlich hat ihre Energie auf den beiden möglichen Wegen im Interferometer fast überall einen wohlbestimmten Wert, sie verharren in zeitlich unveränderlichen »Energieeigenzuständen«. Nur während der sehr kurzen Wechselwirkung mit dem Laser springen manche der Atome von einem Eigenzustand in einen nahe benachbarten. Eine wirkliche Uhr jedoch, von der man die Zeit auch ablesen kann, wird aber niemals in einem solchen stationären Zustand sein können, denn sie muss ihren Zustand mit der Zeit verändern: Ihr »Zeiger« muss sich bewegen. Deswegen befinden sich die Atome in herkömmlichen Atomuhren auch nie in einem einzigen Energieeigenzustand, sondern immer in einer zeitabhängigen Überlagerung zweier Zustände. Die Differenz der zugehörigen Energien – und nicht die Gesamtenergie! – geteilt durch das plancksche Wirkungsquantum gibt dann die Frequenz an, mit der die Uhr tickt. Bei den bislang besten Zeitmessern, den optischen Atomuhren, ist diese Frequenz in der Größenordnung derjenigen des sichtbaren Lichts (deshalb »optisch«).

Die Forscher um Holger Müller und Steven Chu folgen der Vorstellung, dass jedem Stück Masse über die Comptonfrequenz bereits eine Art »Eigenuhr« zugeordnet werden kann. Diese Idee entwickelte Louis de Broglie, der Urheber des Konzepts der Materiewelle, in seiner Doktorarbeit aus dem Jahr

1924. Er verband Einsteins berühmte Folgerung, dass Masse und Energie äquivalent sind, mit Plancks Einsicht, dass zu jeder Energie eine Frequenz gehört. Allerdings merkte er selbst an, dass seine Hypothese zunächst auf einen Widerspruch führt: Der periodische Vorgang eines bewegten Objekts müsste auf Grund der so genannten Zeitdilatation – eine Vorraussetzung der speziellen Relativitätstheorie – verlangsamt erscheinen. Andererseits sollte die Frequenz aber auch höher sein, denn sie steigt mit der Energie – und die nimmt um den Betrag der kinetischen Energie zu.

Eine »innere Uhr« ohne praktische Bedeutung?

De Broglie unterschied daher zwischen zwei Frequenzen: Der eines hypothetischen »inneren« Vorgangs, also der Comptonfrequenz, und der einer Materiewelle, die zur äußeren Bewegung des Objekts gehört. Die zwei Jahre später entwickelte Schrödinger-Gleichung lieferte die allgemeine mathematische Beschreibung dazu. Aus ihr geht hervor: Bei einem einzelnen Atom lässt sich ein periodischer Vorgang nur dann beobachten, wenn das Teilchen in einer Superposition von Energiezuständen ist, und die Frequenzen hängen dabei immer von Differenzen möglicher Energiewerte ab. Diese Erkenntnis ist auch die Grundlage moderner Atomuhren. Ist die »innere Frequenz« damit ohne praktische Bedeutung im Atominterferometer, oder wird sie bei der Teilchenbewegung im Gravitationsfeld auf eine Weise bedeutsam, über die sich die Theoretiker erst noch einigen müssen?

An der Schnittstelle zwischen Gravitationstheorie und Quantenmechanik tauchen also schwierige konzeptionelle Fragen auf, die beide Theorien gleichermaßen betreffen. Dabei haben wir es bisher nur mit einer vergleichsweise einfachen Situation zu tun, nämlich einem quantenmechanischen System in einem äußeren Gravitationsfeld, etwa dem der Erde. Letzteres wird klassisch beschrieben, so dass eine »Quantengravitation« noch gar nicht benötigt wird. Der nächste Schritt bestünde darin, zu untersuchen, wie das vom Atom selbst erzeugte Gravitationsfeld beschrieben werden kann und wie es auf quantenmechanischer Ebene wirkt. Vermutlich lässt sich diese Frage sogar, zumindest in einem beschränkten Rahmen, ohne eine volle Theorie der Quantengravitation beantworten. Immerhin gelingt es Wissenschaftlern auch, etwa die elektromagnetische Wechselwirkung quantenmechanischer Systeme teilweise klassisch zu beschreiben.

Allerdings treten hier erneut die charakteristischen Unterschiede der Schwerkraft zu anderen Wechselwirkungen auf. Alle bislang vergeblich gebliebenen Versuche, eine konsistente Theorie der Quantengravitation zu formulieren, gehen davon aus, dass sich Quantisierungsregeln – so kommt beispielsweise Energie nur in »Portionen« von Vielfachen des planckschen Wirkungsquantums und einer Grundfrequenz vor – auch angepasst auf die Gravitation übertragen lassen. Diese Regeln haben sich im Zusammenhang mit anderen Kräften bewährt. Das heißt aber noch nicht, dass man auch den physikalischen Hintergrund solcher Annahmen

verstanden hätte. Hier könnten Experimente wie das Atominterferometer hilfreich sein, nicht zuletzt wegen der realistischen Aussicht, dank der anhaltend rasanten technischen Entwicklung viele Fragen bald experimentell überprüfen zu können. Die Quantengravitation bleibt zwar auch dann noch eine unverändert anspruchsvolle Aufgabe. Doch die Theoretiker hätten neue Werkzeuge, mit denen sie wertvolle Hinweise auf die notwendigen begrifflichen Anpassungen und auf eine gemeinsame Sprache der zwei grundverschiedenen fundamentalen Theorien gewinnen könnten. Danach suchen viele Forscher auf diesem Gebiet im Moment händlerigend, denn innerhalb der Grenzen der Fantasie und mit dem alleinigen Kriterium der formalen Konsistenz kommen sie dem Problem nicht bei.

Derzeit arbeiten Wissenschaftler intensiv daran, die experimentelle Genauigkeit zu steigern, etwa dadurch, dass sie die Flugzeit der Teilchen im Atominterferometer verlängern. Die Phasenverschiebung steigt nämlich mit dem Quadrat dieser Zeit; von der Gravitationsbeschleunigung hängt sie nur direkt proportional ab. Je weniger Schwerkraft das Atom spürt, desto langsamer fällt es und desto mehr Zeit verbringt es in der Apparatur. Dadurch steigt insgesamt die Messgenauigkeit. Das wäre etwa bei einem kontrollierten Fall in einem Fallturm (Bild S. 62) möglich oder, wenn man das Experiment in einem Satelliten unterbrächte. Die Aussichten sind gut, dass grundlegende Fragen zum Verhältnis von Gravitation und Quantenmechanik in naher Zukunft nicht mehr nur in der Theorie formuliert werden, sondern auch innerhalb machbarer Physik auf den Prüfstand kommen – und dabei auch das einsteinsche Äquivalenzprinzip in quantenphysikalischen Dimensionen untersucht werden kann. ☾

DER AUTOR



Domenico Giulini ist Professor für Theoretische Physik an der Leibniz Universität Hannover. Dort forscht er an der Schnittstelle zwischen Quanteneffekten und Relativitätstheorie – im Excellencecluster QUEST und gemeinsam mit dem Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation der Universität Bremen.

QUELLEN

- Lan, S.-Y. et al.:** A Clock Directly Linking Time to a Particle's Mass. In: *Science* 339, S. 554–557, 2013
- Müller, H. et al.:** A Precision Measurement of the Gravitational Redshift by the Interference of Matter Waves. In: *Nature* 463, S. 926–930, 2010
- Peters, A. et al.:** Measurement of Gravitational Acceleration by Dropping Atoms. In: *Nature* 400, S. 849–852, 1999

WEBLINKS

Einen noch weiter ins Detail gehenden Artikel des Autors zum Thema können Sie hier lesen: <http://arxiv.org/abs/1309.0214>

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1205322

Wie unsere Sinne eine ganze Welt erschaffen
– und uns dabei gehörig täuschen.

The cover features a close-up portrait of a woman's face. Overlaid on the image are five German words: ' hören' (top left), 'sehen' (center right), 'riechen' (bottom center), 'schmecken' (bottom left), and 'fühlen' (bottom right). The title 'GEO kompakt' is at the top in large white letters, with 'Nr. 36' to its right. Below the title is the subtitle 'Die Grundlagen des Wissens'. The central title 'Unsere Sinne' is written in large red letters. Below it is the subtitle 'Wie wir die Welt wahrnehmen'. A small vertical strip on the left edge reads 'GEO kompakt Sinne und Wahrnehmung'. In the bottom right corner, there is a small image of a DVD case titled 'WIE MUSIK IM KOPF ENTSTEHT' and a CD disc next to it. A price box in the bottom right corner states 'Heft 9,00 € – mit DVD 16,50 €*'. At the very bottom, there are four small boxes with headings: 'Neurologie', 'Forschung', 'Wirklichkeit', and 'Geruch', each with a brief description.

GEO kompakt Nr. 36

Die Grundlagen des Wissens

Unsere Sinne

Wie wir die Welt wahrnehmen

hören sehen riechen schmecken fühlen

GEO kompakt Sinne und Wahrnehmung

WIE MUSIK IM KOPF ENTSTEHT

Heft 9,00 € – mit DVD 16,50 €*

www.GEOkompakt.de

Neurologie
Wenn Menschen plötzlich wie im Zeitraffer leben

Forschung
Wo im Hirn Farben, Klänge, Düfte und Gefühle entstehen

Wirklichkeit
Weshalb wir nur eine von vielen Welten sehen

Geruch
Die geheime Macht der Düfte

INKA

Ordnungsmacht der Anden

In schweren Zeiten errichteten die Inka einen straff durchorganisierten Staat. Nur so konnten sie die kargen Ressourcen der peruanischen Bergwelt optimal nutzen.

Von Doris Kurella

LUDEN-MUSEUM STUTTGART (INV.-NR. 1995). FOTO: ANATOL DREYER



FEDERHEMDEN FÜR DIE MILITÄRS

Federn zählten in den Andenkulturen zu den kostbarsten Materialien, wie Textilien zeigen, die in den Gräbern Hochrangiger gefunden wurden. Zu diesen Glücksfällen – organische Materialien sind vergänglich, Federn zudem fragil – gehört dieser gut 70 Zentimeter lange Überrest eines Männerhemdes, eines so genannten uncu. Die Federn wurden auf einen Baum-

wollstoff genäht, mitunter gleich mit eingewebt. Dieser »uncu« folgte dem inkatypischen Farbkanon Braun-Gelb-Weiß-Rot, wobei Gelb die Farbe Gold symbolisiert, die Farbe der Sonne. Da Federn mit Krieg assoziiert wurden, gehörte dieses Hemd wohl einem hochrangigen Offizier. Dazu passt auch das Bildmotiv, das vermutlich zwei Pumas darstellt.

CAPACCOCHA- FIGÜRCHE

Mit Alpakastoff und Federn bekleidete silberne Figürchen fand man bei Kindermumien auf Gletschern. Die im Eis ausgesetzten Kinder trugen bei ihrem Tod tatsächlich einen Federkopfschmuck und fein gewebte Textilien, die gut 14 Zentimeter hohe Miniaturen gibt also die Realität wieder. Sie waren als kostbarste Gabe anlässlich des Capaccocha-Rituals, des ideologisch wichtigsten Rituals im Jahreslauf, den Göttern geopfert worden: für die Fruchtbarkeit der Felder, Menschen, Pflanzen und Tiere, und um den Kreislauf der Welt aufrechtzuerhalten. Jüngste Untersuchungen an Mumien zeigen, dass die Kinder durch Alkohol, Drogen oder einen Schlag auf den Kopf betäubt wurden, mitunter hatte man ihnen auch die Halsschlagader durchtrennt. Die kleine Frauenfigur ist aus Spondylus-Muschel gearbeitet, die als Fruchtbarkeitsbringer verehrt wurde. Sie wurde ebenfalls bei einer Kindermumie gefunden, über die Bedeutung ist aber noch nichts bekannt.



KERAMIK DER FRÜHEN INKA

Als Adelsschicht konnten sich die Inka einen erlesenen Geschmack leisten. Bei Grabungen in ihrer Hauptstadt Cusco und der näheren Umgebung kamen in den vergangenen Jahren Gefäße zum Vorschein, die weit älter waren und dennoch Elemente der Inka-Keramik erkennen lassen wie dieses etwa 13 Zentimeter hohe Behältnis: sich erweiternde Öffnungen, Darstellungen einfacher Gesichter und eine Bemalung mit farbigem, flüssigem Ton vor dem Brennen (so genannte Engobebemalung). Diese Entdeckung erlaubte es, eine frühe Phase der Inka-Kultur von der des Imperiums abzugrenzen und ihren Beginn auf das 11. Jahrhundert zu datieren.



»**A**ma llulla«, sei kein Lügner; »ama quella«, sei nicht faul; »ama sua«, sei kein Dieb: Das waren die drei wichtigsten Gebote, nach denen die Menschen im Inka-Reich zu leben hatten. Effizienz und Ordnung galten als zentrale Leitlinien in der Theokratie, die das Herrschergeschlecht der Inka im 15. bis 16. Jahrhundert auf dem Gebiet der heutigen Staaten Ecuador, Peru, Bolivien sowie in Teilen Argentiniens und Chiles errichtet hatte.

Das Inka-Reich erstreckte sich mit einer Nord-Süd-Spanne von annähernd 5000 Kilometern über den größten Teil des Andengebirges. Es war das ausgedehnteste indigene Imperium, das in Amerika jemals errichtet wurde. In deutlichem Gegensatz zu diesen Superlativen steht allerdings die Quellenlage, die wesentlich schlechter ist als etwa bei der zeitgleich blühenden Kultur der Azteken in Zentralmexiko. Die Inka waren nach unserem gegenwärtigen Kenntnisstand keine schriftführende Kultur, hatten jedenfalls keine alphabetische oder Hieroglyphenschrift. Alle uns überlieferten Aufzeichnungen stammen aus der Kolonialzeit, und zumindest die frühen Texte zu Beginn des 16. Jahrhunderts wurden von Europäern für Europäer verfasst. Man muss daher davon ausgehen, dass sie ein recht einseitiges Bild der Inka-Kultur vermitteln.

Erst ein halbes Jahrhundert später entstanden Berichte der indigenen Seite, die eine andere Sicht der Dinge vermitteln. Guaman Poma de Ayala, Nachkomme einer lokalen adeligen Aymara-Familie, und später Garcilaso de la Vega »el Inca«, Sohn einer Inka-Prinzessin und eines Spaniers, hinterließen uns Chroniken, die jedoch ihrerseits ebenfalls voreingenommen erscheinen. Viele Beschreibungen müssen daher vage bleiben, auch wenn dies für Wissenschaftler wie interessierte Laien zutiefst unbefriedigend ist.

Umso höhere Bedeutung kommt daher archäologischen Forschungen zu. Die Archäologen konzentrierten sich in den letzten 15 Jahren dabei vor allem auf die frühe Phase der Inka-Kultur: die Herkunft der Inka, ihr Erstarken als führende Gruppe im Tal von Cusco und den Beginn der Expansion sowie der imperialen Phase. So geht man gegenwärtig davon aus, dass die Inka als eher kleine, vermutlich ethnische Gruppe um das Jahr 1000 n. Chr. von der Hochebene um den Titicaca-See aus in das Hochland zogen.

AUF EINEN BLICK

DAS REICH DER OPTIMIERER

1 Archäologen erforschen derzeit verstärkt die **Anfänge des Inka-Reichs**. Demnach breite sich diese ethnische Gruppe zwischen 1000 und 1200 n.Chr. im peruanischen Hochland aus.

2 Um die vorhandenen natürlichen Ressourcen optimal zu nutzen, installierten die Inka eine **straffe Verwaltung** ihrer Hoheitsgebiete und machten auch vor Umsiedlungen nicht Halt.

3 Lokale Herrscher, die kooperierten, durften auf eine gut dotierte Position in einer mittleren Führungsebene hoffen. Integrierendes Element des **Vielvölkerstaats** war der Sonnenkult.

KLASSISCHES TRINKGEFÄSS

Aryballos wie dieses gut 34 Zentimeter hohe Exemplar (unten) waren typische Keramikgefäß der Inka-Kultur, um Wasser und Maisbier zu transportieren. Dazu wurde eine Schnur durch die beiden Ösen gezogen – nun konnte der Aryballo auf dem Rücken getragen werden, wie die 22 Zentimeter große Figur eines sitzenden Mannes zeigt. Dieser hält auch einen Becher in der Hand. Da solche Plastiken meist aus Gräbern stammen, könnten sie ein Totenkultritual symbolisieren, bei dem Maisbier getrunken wurde.



LINKS: LINDEN-MUSEUM STUTTGART (INV.-NR. M 30136), FOTO: ANATOL DREYER.
RECHTS: ETHNOLOGISCHES MUSEUM, STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN, PREUßISCHER
KULTURBESITZ (INV.-NR. VA 11997), FOTO: ANATOL DREYER

cacasee in das Hochtal von Cusco eingewandert sind. Wie zahlreiche andere Gruppen auch waren sie auf der Suche nach fruchtbarem Land – bedingt durch spürbare klimatische Veränderungen, die zu einer deutlichen Verschlechterung der Lebensbedingungen geführt hatten.

Laut Klimaforschern waren die Jahrhunderte vor 1000 n. Chr. im Andengebiet extrem instabil. Es gab eine deutliche Tendenz zu erhöhter Trockenheit und Kälte, was insbesondere das ohnehin nicht sehr lebensfreundliche Hochland des Andengebirges nahezu unbewohnbar machte. Nach aktueller Ansicht zerbrachen etwa die Kulturen von Tiahuanaco und Huari, die zeitgleich zwischen 200 n. Chr. und 700 n. Chr. ihre Hochphase hatten, an diesen Klimaschwankungen.

Die großen Zeremonial- und Handelszentren wurden zu Gunsten kleinerer Siedlungen in milderen Zonen aufgegeben. Gleichzeitig änderte sich dort die Siedlungsweise hin zu befestigten Wehrdörfern, was auf Landkonflikte zwischen Alteingesessenen und neu Zugewanderten schließen lässt.

Diese Verhältnisse treffen auch auf das Tal von Cusco und seine Seitentäler zu. Hier allerdings machten sich die Inka entschlossener als andere Gruppen daran, die vorhandenen Ressourcen besser zu nutzen. Als ideologisches Konzept diente dazu die Zähmung der Natur, die sich zunächst in der weiträumigen Errichtung von Feldbauterrassen, Änderungen von Flussläufen zur Landgewinnung und der Errichtung von Bewässerungsanlagen äußerte. Um dies zu bewerkstelligen

STAATLICHES MUSEUM FÜR VÖLKERKUNDE MÜNCHEN (INV.-NR. G 3679), FOTO: MARIETTA WEIDNER

LAMA AUS GOLDBLECH

Für das alljährliche Capaccocha-Ritual, mit dem der Zyklus der Welt und die Fruchtbarkeit aufrechterhalten werden sollten, schmiedeten Handwerker im ganzen Reich Miniaturen aus Gold- und Silberblech. Dieses Lama ist sechs Zentimeter hoch und besteht teilweise aus Tumbaga, einer in Altamerika beliebten Gold-Kupfer-Legierung. Sie hat einen niedrigeren Schmelzpunkt und größere Härte als Gold. Kehrten die Gäste in ihre Heimatorte zurück, nahmen sie die Miniaturen mit und vergruben sie dort als Opfergabe.



gen, musste die Gesellschaft, in der die Inka durch stetiges Schmieden von Allianzen – aber auch durch Eroberungen – zur Adelsschicht avancierten, straff durchorganisiert sein sowie jederzeit in der Lage, entsprechende Mengen an Arbeitskräften zur Verfügung zu stellen.

Tausche Kokablätter gegen Kartoffeln

Die Inka lösten das Problem durch Erheben von Steuern mittels Arbeitsleistung, der so genannten m’ita. Jeder arbeitsfähige Mann musste einige Monate im Jahr für die Inka in den Krieg ziehen, an der Errichtung von Bauwerken als Steinschlepper mitwirken, Keramik herstellen oder sich in anderer Weise gemäß seiner Qualifikation nützlich machen. Auch Frauen und Jugendliche hatten Aufgaben zu erledigen. Weben, das Hüten von Lamas und Alpakas sowie das Pflegen der Terrassenanlagen und Felder standen hier im Vordergrund. Die erwirtschafteten Überschüsse an Mais, Baumwolle, Kartoffeln (roh oder gefriergetrocknet), Lama- und Alpakawolle, Trockenfleisch sowie Güter aus eroberten Gebieten wie Federn tropischer Vögel oder Kokablätter wurden in den riesigen Speicheranlagen der Inka gelagert: den colcas. Große Siedlungen wiesen bis zu 300 dieser Speicher auf. Dabei handelte es sich in der Regel um Rundtürme mit Grasdächern, die eine Belüftung ermöglichten.

Beim Abliefern ihrer Güter wurden die Menschen durch Feste belohnt und erhielten Dinge, die in ihrer Region nicht vorkamen. Die Hochlandbewohner bekamen Kokablätter und Baumwolle, die Küstenbewohner Kartoffeln und Alpakawolle. Dieses Prinzip des Sammelns und Wiederverteilens versorgte alle Menschen im Inka-Reich gleichmäßig. Verbunden waren die einzelnen Regionen durch das überregionale Wege- und Straßennetz, das insgesamt ungefähr 40 000 Kilometer umfasste. Die Lager ermöglichten darüber hinaus auch eine Absicherung für Notzeiten, in denen die Bauern dann Saatgut und Nahrungsmittel von den Inka erhielten. Dies gilt zu Recht als einer der großen Fortschritte der Inka.

Der Preis dafür war die völlige Unterordnung unter die staatlichen Prinzipien, was für die Andenbewohner jedoch nichts Neues war. Auch in den Vorläuferkulturen war die Gemeinschaft wichtiger als das Individuum gewesen, und persönliche Freiheit wohl eher unbekannt. Es gab keine freie Wahl des Wohnortes, der Religion, des Berufs und nicht einmal des Ehepartners. Alles wurde von der Gemeinschaft oder vom Staat bestimmt. So führten die Inka großräumige Umsiedlungen durch, um die Ressourcen ihres ausgedehnten Reichs optimal zu nutzen. Dabei zerrissen sie ethnische Gruppen, von denen eine Hälfte durchaus mehrere tausend Kilometer nach Norden oder Süden verlagert werden konnte. Dies war auch ein beliebtes Mittel zur Befriedung aufrührerischer Untertanen. Das ganze System wurde kontrolliert durch die breite mittlere Führungsschicht der lokalen Herrscher, der curacas.

Ideologisch zusammengehalten wurde das Inka-Reich durch die Religion. Die höchste Autorität im Staat, der Sapa Inka, bezeichnete sich als Sohn der obersten Gottheit, der Sonne. Nach der Eroberung durch die Inka oder freiwilliger



EIN INKA-ADLIGER

Inka-Adlige trugen große Ohrflöcke mit Schmuckscheiben als Zeichen ihres Status. Ein wichtiger, im Sonnentempel der Hauptstadt durchgeföhrter Ritus war das Durchbohren der Ohrläppchen junger Männer – damit waren sie in den Kreis der Erwachsenen aufgenommen. Der Brauch veränderte die Anatomie nachhaltig, wie der Name verdeutlicht, den die spanischen Eroberer den Inka gaben: »orejones« – Großohren. Auch diese sieben Zentimeter große Skulptur aus der imperialen Zeit besteht aus Tumbaga.

LINDENMUSEUM STUTTGART (INV.NR. 10550) (Foto: ANTON DEPEL)



EINE SCHRIFT AUS KNOTEN

Die Quipus genannten Schnüre aus Baumwollgarn – hier ein 135 Zentimeter langes Exemplar – dienten als Buchhaltungssystem, Rechenmaschine oder Kalender. Sie waren nach dem Dezimalsystem aufgebaut: Den verschiedenen Strängen und Positionen der Knoten kam dabei ein unterschiedlicher Stellenwert zu. Vermutlich trugen auch die Farben Bedeutung, doch das ist nicht sicher. Manche Forscher glauben, dass die Quipus Textinformationen wie Mythen enthalten konnten, andere bezweifeln dies. Der Grund der Wissenslücke: Die »Quipu-camayoc«, die Knotenschnur-Kundigen, kamen bei der spanischen Eroberung ums Leben, bevor diese Art der Schrift dokumentiert werden konnte.



LINDEN-MUSEUM STUTTGART (INV.-NR. M 33902). FOTO: ANTOLO DREYER

Unterwerfung durften die eingegliederten Völker ihre alten Gottheiten behalten, wenn sie bereit waren, den Sonnengott Inti als höchste Instanz anzuerkennen. Einmal im Jahr fand in der Hauptstadt Cusco ein großes Ritual statt, an dem alle Regionen des Inka-Reiches teilnehmen mussten. Diese entsandten Teilnehmer, die nicht nur die lokalen Götterfiguren mit sich trugen, sondern auch Opfergaben wie Lamas, Edelmetalle, Textilien, Nahrungsmittel – und vor allem das höchste Gut: Kinder. Beim Capaccocha-Ritual, das den Kreislauf der Welt und die Fruchtbarkeit in Gang halten sollte, wurden Gold- und Silberbleche zu kleinen Figürchen geschmiedet, die als Opfergut dienten (siehe S. 67). Die ausgewählten Kinder blieben ein Jahr in Cusco und wurden dort auf ihren Weg zu den Ahnen vorbereitet. Danach kehrten sie zu ihren Herkunftssorten zurück, wo sie geopfert wurden.

Der vorletzte Inka-Herrschler, Huayna Capac, verstarb 1527 überraschend an Pocken, ohne eine klare Nachfolgeregelung getroffen zu haben. In der Folge kämpften zwei Söhne um den Thron und stürzten das Imperium in einen blutigen Bürgerkrieg, der erst kurz vor Eintreffen der Spanier 1532 beendet wurde. Ein weiterer Faktor für den Untergang des Reichs war, dass sich die lokalen Herrscher mit den Spaniern gegen die Inka verbündeten und ihnen Soldaten zur Verfügung stellten. Den größten Einfluss hatten jedoch die von den Europäern eingeschleppten Krankheiten. Masern, Windpocken, Grippeviren und Pocken verursachten unter der einheimischen Bevölkerung bis zum Ende des 16. Jahrhunderts eine Sterblichkeit von bis zu 90 Prozent. Heute leben jedoch zahlenmäßig wieder weitaus mehr Indigene in den Andenländern als zur Zeit der Inka. ~

DIE AUTORIN



Die Altamerikanistin **Doris Kurella** ist Kuratorin der Inka-Ausstellung im Linden-Museum Stuttgart.

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/
artikel/1205324](http://www.spektrum.de/artikel/1205324)

ANZEIGE



Die Inka zu Besuch in Stuttgart

Die Große Landesausstellung »Inka – Könige der Anden« im Linden-Museum Stuttgart vom 12. Oktober 2013 bis 16. März 2014 ist europaweit die erste Schau zur Kultur der Inka. Sie präsentiert hochkarätige Leihgaben aus peruanischen und vielen weiteren internationalen Museen. Nähere Informationen: www.inka2013.de

Monsun in Westafrika

Jeden Sommer entstehen in Westafrika großräumige Windsysteme, die der Bevölkerung lebenswichtigen Regen bringen – doch manchmal bleibt der Niederschlag aus. Mit dynamischen Modellen können Forscher den westafrikanischen Monsun jetzt besser vorhersagen.

Von Jean-Philippe Lafore, Françoise Guichard und Romain Roehrig

Beim Wort Monsun denkt man an Überschwemmungen in Indien oder Bangladesch, aber eigentlich bezeichnet der Begriff ein viel komplexeres und in den Tropen weit verbreitetes Phänomen. Das Wort stammt vom arabischen »mausim« für Jahreszeit und bezeichnet den Südwestwind, der sich im Sommer über dem Golf von Oman im Nahen Osten und dem Golf von Bengalen im Indischen Ozean ausbildet; sonst weht der Wind dort vorwiegend aus Nordost. In der Ära der Segelschiffe beförderte der sommerliche Monsun Handel und Verkehr. Die von ihm abhängigen Menschen sehen im Monsun mehr als nur eine periodische Umkehr der Windrichtung. In Indien symbolisiert er die Bipolarität des Universums, einen grundlegenden Wechsel zwischen trocken und feucht.

Folgenreiches Wetterphänomen

Tatsächlich gilt der Monsun als Synonym für die Regenzeit, die für das tropische Klima besonders typisch ist. Aber keineswegs alle Tropenregionen erleben einen Monsun im engeren Sinn – also eine feuchte Jahreszeit mit Umkehr der vorherrschenden Windrichtung. Andererseits ist umstritten, ob es auch außerhalb der Tropen Vergleichbares gibt, etwa in Nordamerika.

AUF EINEN BLICK

DER AFRIKANISCHE REGENMACHER

- 1 Der jährliche **Monsun** ist nicht nur für das Wetter in **Asien** typisch, sondern tritt auch in **Westafrika** auf.
- 2 Allerdings bringt der westafrikanische Monsun nicht zuverlässig jene Regenmengen, welche die Menschen, Tiere und Pflanzen in der **Sahelzone** dringend brauchen.
- 3 Das internationale Forschungsprojekt AMMA untersucht mittels **Satellitendaten** und **Computermodellen** die komplizierten Mechanismen, die dem Monsun in Afrika zu Grunde liegen. Davon erhoffen sich Forscher bessere Prognosen für die trockenen und feuchten Monsunphasen.



Alles in allem lebt mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung unter dem Einfluss von Monsunen, die Wasser- und Energieressourcen, Landwirtschaft und Gesundheit entscheidend prägen. Neben Asien betrifft das vor allem Westafrika.

Zwischen 1960 und 1990 litt die Region zwischen der Sahelzone und dem Golf von Guinea praktisch ununterbrochen unter Dürre. Das regionale Niederschlagsdefizit mit seinen dramatischen Folgen gilt als das heftigste Klimereignis jener Zeit. In solchen ländlichen Gebieten sind die Menschen den klimatischen Wechselfällen, vor allem den Folgen der Erderwärmung, besonders wehrlos ausgeliefert. Darum haben Wissenschaftler aus aller Welt 2002 das Forschungsprojekt AMMA (kurz für »Afrikanischer Monsun: Multidisziplinäre Analysen«) gegründet, das sich speziell der Untersuchung des westafrikanischen Monsuns widmet. Innerhalb eines Jahrzehnts hat AMMA wichtige Erkenntnisse

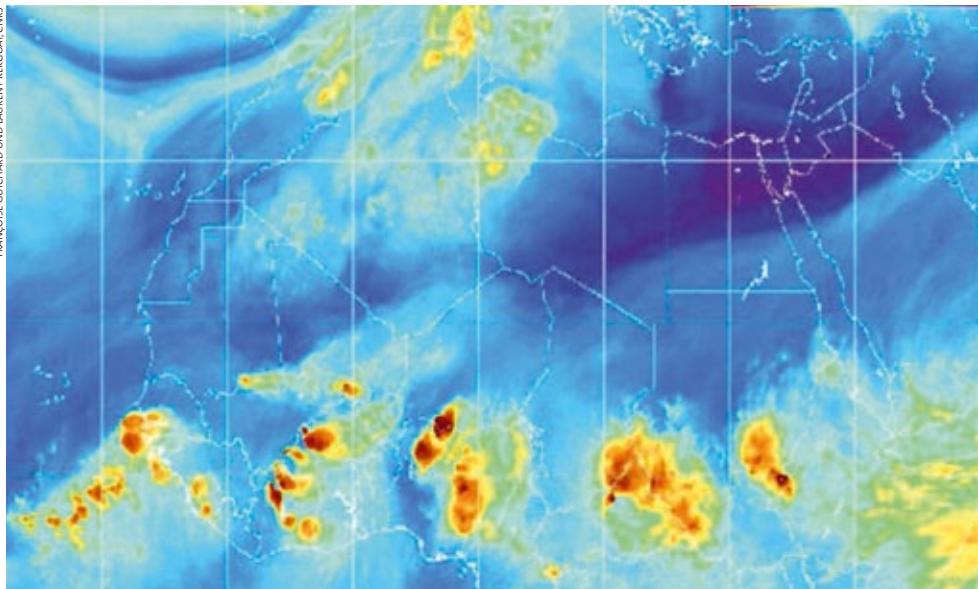
geliefert, zugleich aber auch neue, noch ungelöste Fragen aufgeworfen.

Westafrika liegt auf der Nordhalbkugel und wird Richtung Süden bei fünf Grad nördlicher Breite vom Golf von Guinea begrenzt. Im Sommer erhitzt sich der afrikanische Kontinent rapide; er wird deutlich wärmer als das Meerwasser des Atlantiks im Golf von Guinea. Der Temperaturunterschied erzeugt eine großräumige Luftzirkulation. Zunächst entsteht eine Meeresbrise, die von Südwesten her kühle und feuchte Seeluft ins Landesinnere transportiert. Auf ihrem Weg nach Nordosten trifft diese Monsunströmung nördlich der Sahelzone auf warme und trockene Luft aus der Sahara. Wo die beiden Luftmassen zusammentreffen, entstehen die Monsunregen.

Im Frühjahr kommt zusätzlich der von der Südhalbkugel her wehende Südostpassat ins Spiel, der sich unter dem Ein-



AMMA / FRANÇOISE GUILHARD, CNRS/URA CNRS & MÉTÉO-FRANCE



Die Aufnahme des europäischen Wettersatelliten Meteosat zeigt die Verteilung von Gewittern anhand von Gebieten erhöhter Luftfeuchtigkeit (gelb bis dunkelrot) über der Sahelzone am 17. Juni 1997. Die dunkelblauen Bereiche entsprechen sehr trockenen Luftsichten in der mittleren und oberen Troposphäre.

fluss des Hochdruckgebiets bei der Insel St. Helena intensiviert. Als ablandiger Wind treibt er oberflächennahe Wasserschichten von der Küste weg. Zum Ausgleich steigt kühles Wasser aus der Tiefe auf. Dadurch bildet sich eine Kaltwasserrunge im Golf von Guinea, die den Temperaturgegensatz zum Festland und damit die Monsunströmung verstärkt.

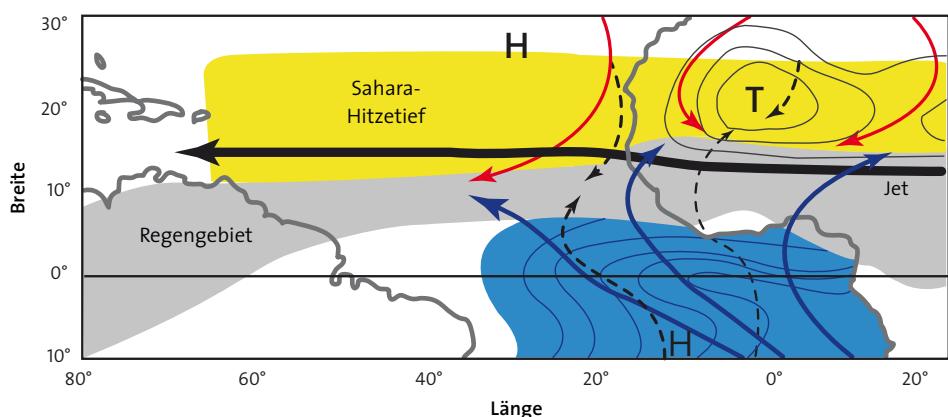
Zusammen mit der Sonne wandert der Südostpassat nach Norden und überquert schließlich den Äquator. Dabei verwandelt er sich unter dem Einfluss der Erdrotation in einen Südwestwind. Dieser erreicht den afrikanischen Kontinent und treibt dort die Monsunströmung in den unteren Schichten der Atmosphäre weiter an. Am größten ist die kontinentale Erwärmung über der Sahara, wo sich bei 20 Grad nördlicher Breite eine fünf Kilometer dicke Kuppel warmer Luft herausbildet: das so genannte Sahara-Hitzetief. Es bewirkt, dass sich die kühle, feuchte südwestliche Monsunströmung mit dem warmen, trockenen Nordostpassat vereinigt, der erhitzte Luftmassen heranführt, die ursprünglich vom Mittelmeer und vom Nordatlantik stammen.

Durch den Temperaturunterschied der Luftmassen entsteht über der Sahelzone in vier Kilometer Höhe ein extrem starker Ostwind, fachsprachlich »African Easterly Jet« genannt. Das Phänomen ähnelt den Westwinden, die in mittleren Breiten durch den umgekehrten Gegensatz zwischen lauen und polaren Luftmassen entstehen. Allerdings bläst der afrikanische Ostjet weder geradlinig noch konstant. Durch Wärmekonvektion – vertikale Luftzirkulation – und andere Einflüsse wird er ein wenig abgelenkt und pendelt hin und her, während er sich mit rund 800 Kilometer pro Tag westwärts bewegt. So entstehen in der Höhe lang gezogene Luftwellen, die »African Easterly Waves«. Jede ist 2000 bis 3000 Kilometer lang. Sie rufen in Abständen von vier bis fünf Tagen Wetter Schwankungen hervor: Veränderungen von Niederschlag, Wind und Temperatur.

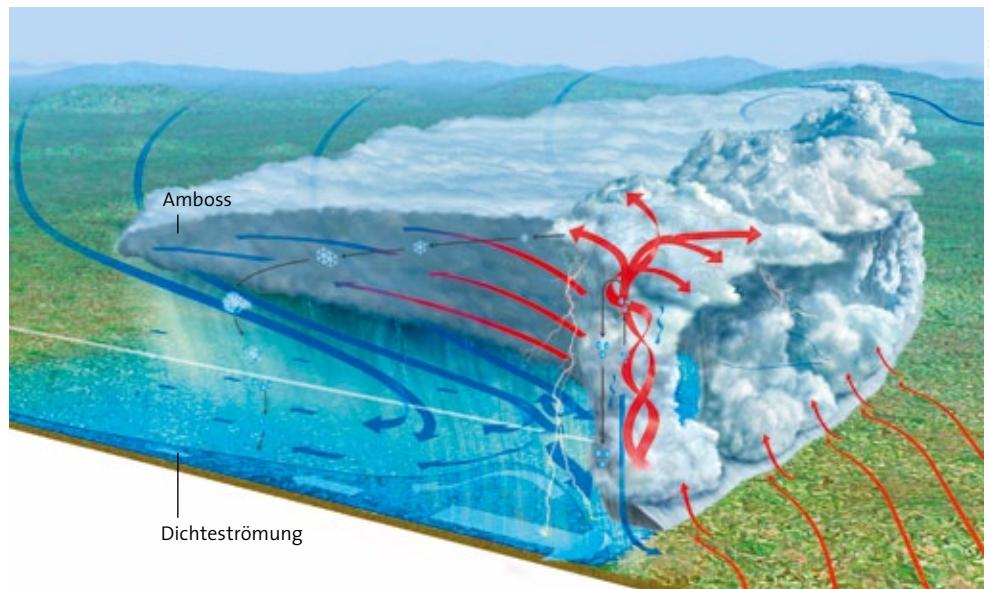
Wie neue Untersuchungen zeigen, gehen die Oszillationen des Jets mit einem Wechsel trockener und feuchter Phasen einher, die einem alternierenden Rückzug und Vordringen des Monsuns auf dem Kontinent entsprechen. Die

Komplexes Zusammenspiel

Der westafrikanische Monsun entwickelt sich durch das Zusammenspiel mehrerer Faktoren. Über dem Golf von Guinea sammelt sich feuchtkalte Luft (blau). Sie fließt unter dem Einfluss der südöstlichen Passatwinde (blaue Pfeile) nach Norden und trifft dort auf eine



Eine Gewitterlinie besteht aus einem lang gestreckten Band von Gewittern. An der ambossförmigen Rückseite der Linie fallen Niederschläge, deren Kühlwirkung in Bodennähe eine Dichteströmung (hellblau) speist. Aufsteigende warme Luftmassen sind durch die roten Pfeile gekennzeichnet, Blau steht für kalte Luft.



POUR LA SCIENCE / POULAIN

Wellen fördern die Konvektion und können sich dadurch wiederum selbst verstärken. Sobald eine Welle den Atlantik erreicht, erzeugen die infolge des Temperatursprungs besonders heftigen Konvektionen tropische Unwetter, die sich später auf der anderen Seite des Atlantiks als Hurrikane bemerkbar machen. Die im Osten der Sahelzone, etwa im Sudan, beobachteten Wind- und Feuchtigkeitsschwankungen sind wiederum verlässliche Vorboten regenreicher oder trockener Luftmassen, die Afrika binnen einer Woche von Ost nach West überqueren.

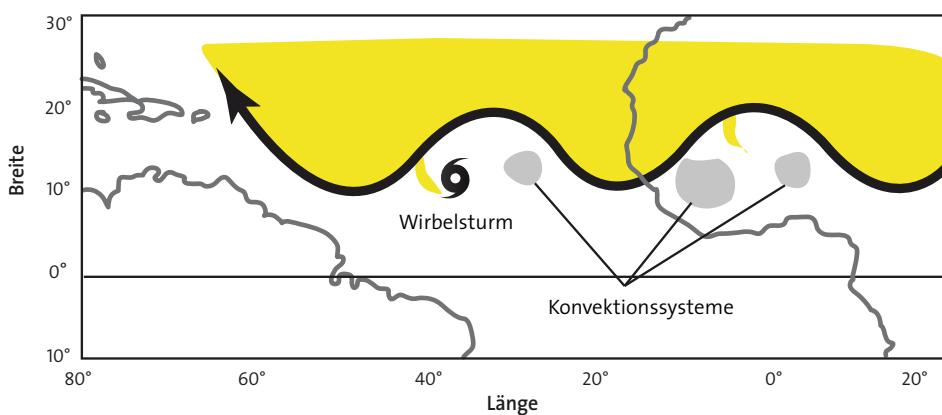
Diese Zusammenhänge lassen sich für die Wettervorhersage nutzen. Das größte Hindernis für die Verbesserung solcher Prognosen ist die Tatsache, dass die Konvektion ein ungeheuer komplexes Phänomen ist.

Regen, der nicht am Boden ankommt

Der Regen geht südlich der Sahara großenteils in Form von kurzen, heftigen und lokal begrenzten Gewittern nieder. Kurioserweise gibt es auch Unwetter, bei denen kein Tropfen

den Boden erreicht, insbesondere zu Beginn des Sommers. Der Grund ist, dass der in großen Höhen gebildete Niederschlag unterwegs sehr trockene Luftsichten durchquert und dabei schnell verdunstet. Dadurch kühlst sich die Atmosphäre ab und bildet kalte Taschen; da diese viel dichter sind als ihre Umgebung, stürzen sie förmlich ab und bilden unter den Gewittern ungewöhnlich kalte Strömungen, so genannte Dichteströmungen (siehe Grafik oben).

Am Boden erzeugt die mit den Gewittern vorüberziehende Kaltluft einen brutalen Temperatursturz um oft mehr als zehn Grad Celsius sowie starke Windböen. Je weniger Regen dabei bis zur Erde gelangt, desto stärker zerstört Winderosion den Boden. Im Frühjahr, wenn noch keine Vegetation vorhanden ist, sind die starken Dichteströmungen solcher Gewitter, so genannte Habubs, ein bis zwei Kilometer hoch und wirbeln riesige Staubmengen auf. In der Monsunsaison selbst führen die Gewitter zu Überschwemmungen – zugleich die einzige Erneuerung der mageren Wasservorräte. In der Sahelzone liefern ein paar Dutzend Monsungewitter den

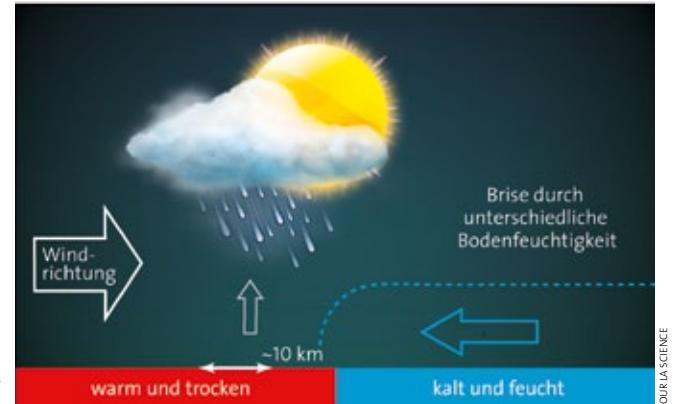


warme Luftmasse: das Sahara-Hitzetief (gelb), um das staubige Wüstenwinde kreisen (rote Pfeile). Dabei entsteht ein ausgedehntes Regengebiet (grau), das von einem von Ost nach West gerichteten Strahlstrom (schwarzer Pfeil) durchquert wird. Dieser afrikanische Ostjet oszilliert und bildet eine Welle, in der sich Konvektionssysteme entwickeln.

POUR LA SCIENCE



Auch durch lokale Unterschiede der Bodenfeuchte kann eine Gewitterzelle entstehen (Foto links). Sie erzeugen eine bodennahe Luftströmung, die von der kalten, feuchten Bodenregion zum warmen, trockenen Gebiet hin weht (blauer Pfeil rechts). Wo diese Strömung auf den vorherrschenden Wind mittlerer Stärke trifft, der in umgekehrter Richtung weht, entwickelt sich über der warmen, trockenen Zone eine aufsteigende Luftströmung (vertikaler Pfeil). Sie löst die Gewitterzelle aus.



Niederschlag eines ganzen Jahres. Darum sind Mensch und Tier, Boden und Wirtschaft dort so verletzlich.

Welche Faktoren steuern das Verhalten von Gewittern? Ein wesentlicher Antrieb ist die Konvektion, die durch die instabile vertikale Struktur der Atmosphäre entsteht: Die unteren Luftsichten enthalten mehr Energie in Form von Temperatur und Wasserdampf als die mittleren und höheren. Der Dampf kondensiert in den aufsteigenden Strömungen zu Wolken und setzt damit Wärme frei, die ihrerseits die Konvektion antreibt und so Niederschläge verursacht.

Die vertikale Zirkulation verteilt Energie um und stabilisiert die Atmosphäre. Voraussetzung ist eine hohe, von der Monsunströmung herangeführte Luftfeuchtigkeit in den unteren Schichten, verbunden mit vergleichsweise kühleren Temperaturen in der mittleren Troposphäre. Daher kommt die Konvektion immer schwerer in Gang, je mehr man sich der Sahara nähert, denn die Luftfeuchtigkeit nimmt dort ab, und die mittlere Troposphäre wird wärmer.

Wann Gewitter entstehen

Die Feuchtigkeit der mittleren Troposphäre kann sich je nachdem gegensätzlich auswirken: Die Entwicklung heftiger Gewitter wird gehemmt, sobald sie in trockene Luftsichten geraten. Doch ist ein Gewitter bereits gut ausgebildet, begünstigt die Verdunstung der Niederschläge in einer trockenen Schicht die Entstehung von Dichteströmungen. Diese wandern am Boden entlang, drücken dabei die Monsunströmung aufwärts und lösen weitere Gewitterzellen aus. Das passiert freilich nur dann, wenn der Wind in der mittleren Troposphäre stärker ist als in der Monsunströmung.

In der Sahelzone sind alle drei Bedingungen für Gewitterbildung – Wärmekonvektion sowie trockene und windige

mittlere Troposphäre – während der Monsunsaison von Juli bis September erfüllt. Dadurch entstehen mächtige Konvektionssysteme, so genannte Gewitterlinien. Diese Unwetterketten pflanzen sich rasch, mit 50 bis 70 Kilometer pro Stunde, nach Westen fort. Die heftigen Gewitter können bis in die untere Stratosphäre aufsteigen und deren Gleichgewicht stören, da große Mengen an Wasserdampf und Eiskristallen emporschießen.

Hinter der Gewitterfront bildet sich der typische »Amboß«, aus dem schwächere Niederschläge fallen (siehe Grafik S. 77 oben). Deren Verdunstung erzeugt eine kräftige Dichteströmung, welche die vorhandenen Gewitter verstärkt und neue Gewitterzellen auslöst. Ein solches System erreicht 500 bis 1000 Kilometer Länge und einige hundert Kilometer Breite. Die Gewitterlinien können über Nacht bestehen bleiben, auch wenn die Bedingungen dafür dann weniger günstig sind. Teilweise halten sie sich länger als 24 Stunden und fegen in dieser Zeit über riesige Flächen hinweg.

Mit AMMA haben wir bis 2006 umfassende Daten über alle mit dem Monsun verbundenen Atmosphärenphänomene gewonnen. Anhand von Computersimulationen konnten wir den gesamten Ablauf und die beteiligten Rückkopplungsprozesse klären, vor allem die Rolle der trockenen Luft, der Dichteströmungen und der Staubzyklen. Die Modelle erreichen eine hohe, auf wenige Kilometer genaue Auflösung und simulieren überall in Westafrika die regionale Konvektion.

Den für die Konvektion unverzichtbaren »Treibstoff« Wasserdampf führt die Monsunströmung heran. Er entsteht aber auch durch Verdunstung am Erdboden, abhängig von Sonneneinstrahlung und Bodenfeuchtigkeit. Beispielsweise ist der Boden nach einem Regenschauer feuchter, es

entsteht mehr Wasserdampf. Dadurch steigt die Feuchtigkeit in der Atmosphäre, was die Entwicklung der Konvektion begünstigt. Zugleich kühlt sich dabei der Boden ab, und der Wärmefluss wird schwächer, was wiederum die Konvektion hemmt.

Diese Rückkopplungsschleifen zwischen Bodenverhältnissen und Konvektion ließen sich mit Hilfe von Satellitendaten über Bodenfeuchtigkeit, Temperatur und Konvektionsströme untersuchen. Dabei stellte sich heraus, dass die Gewitterhäufigkeit in semiariden Gebieten – also Halbwüsten wie der Sahelzone – deutlich zunimmt, sobald die Oberfläche über einige zehn Kilometer hinweg unterschiedlich feucht ist. Demnach spielt die durch Bodenunterschiede verursachte Luftzirkulation in dieser Region eine wichtige Rolle bei der Gewitterbildung. Das gilt umso mehr, je weniger sonstige Konvektionsfaktoren wirken. Darum dürften die neu entdeckten Rückkopplungen vor allem die Dürreperioden in semiariden Milieus prägen, die auf klimatische Entwicklungen besonders empfindlich reagieren.

Jahreszeitliche Variabilität

Auch großräumigere Rückkopplungen sind inzwischen besser erforscht. Betrachtet man Gebiete von etwa 200 Kilometer Seitenlänge, so entwickeln sich Gewitter häufiger über besonders trockenen und heißen Flächen. In diesem Maßstab herrscht demnach eine negative Rückkopplung zwischen Bodenfeuchtigkeit und Niederschlag. Dieser Zusammenhang unterscheidet sich radikal von den Annahmen in aktuellen Klimamodellen, die meist eine positive Rückkopplung simulieren.

Die Niederschläge des westafrikanischen Monsuns variieren zeitlich und räumlich sehr stark, unabhängig vom gewählten Maßstab – ob lokal oder regional, ob täglich, jahreszeitlich oder über Jahre hinweg betrachtet. In den letzten zehn Jahren haben Forscher die jahreszeitliche Variabilität vorwiegend innerhalb von drei Zeiträumen untersucht: rund 40 Tage, rund 15 Tage sowie 3 bis 10 Tage. Wir streben die Entwicklung eines dynamischeren Modells an, das echte Vorhersagen ermöglicht.

Nach neuen Studien, die mit Zeitschritten von jeweils 14 Tagen arbeiten, wirkt das Sahara-Hitzetief als »Transmissionsriemen« zwischen den gemäßigten Breiten und Afrika. Es oszilliert zwischen zwei Extremzuständen. Im einen dehnt es sich stark aus und liegt ungewöhnlich weit im Nordosten bei Libyen und Ägypten. Das geht mit ungewöhnlicher Wärme über dem Mittelmeer und nur schwachem Nordwind einher; zugleich strömt in Atlantiknähe bei Marokko und Mauretanien Kälte von Norden ein und drängt das Sahara-Hitzetief ostwärts. Beide Vorgänge können sehr heftig verlaufen. Eine Woche später kehrt sich die Lage um: Über dem Mittelmeer baut sich ein starker, kalter Wind aus Norden auf und schiebt das Sahara-Hitzetief nach Westen, wobei gleichzeitig die Temperatur über der marokkanischen Küste ansteigt.

Im Lauf der vier Monsunmonate lösen drei oder vier solche Ereignisse einander ab. Ihnen gehen starke Tiefdruck-

störungen in mittleren Breiten voraus; diese so genannten Rossby-Wellen ziehen ostwärts über den Atlantik und beeinflussen die gesamte Troposphäre.

Sobald die Störungen Nordafrika erreichen, verändern sie Position, Ausdehnung und Intensität des Sahara-Hitzetiefs. In einem Drittel der Fälle hat dieses sich gerade westwärts verschoben. Dadurch erreicht kalte, absteigende Luft aus dem Mittelmeerraum etwa vier Tage später den Osten der Sahelzone, wo nun weniger Regen fällt. Dieser Bereich mit Niederschlagsmangel durchquert binnen weniger Tage die gesamte Sahelzone nach Westen. Zum gegenteiligen Szenario kommt es, falls das Sahara-Hitzetief im Osten liegt: Dann verstärken sich die Regenfälle, die durch Afrika westwärts ziehen.

AMMA hat erstmals solche dynamischen Wechselwirkungen zwischen den Systemkomponenten Atmosphäre, Ozean, Kontinente, Aerosole und Wolken detailliert erforscht. Das eröffnet die Chance, die bisher für Afrika oft fehlerhaften Monsunprognosen entscheidend zu verbessern – sowohl für lokale Wettervorhersagen als auch für die globale Klimaforschung.

Künftig rückt bei AMMA der Kreislauf des Wassers ins Zentrum der Aufmerksamkeit. Wie die bisherigen Ergebnisse gezeigt haben, prägt in Afrika besonders die Feuchtigkeit das Wechselspiel zwischen kontinentalen Flächen, atmosphärischen Grenzschichten, Konvektion und Niederschlag. Wir müssen daher den Wasserdampf noch genauer beobachten und in Computermodellen darstellen. Von seinem Verhalten hängt ab, wie viel Regen der Monsun den Äckern und Weiden Westafrikas alljährlich spendet. ↞

DIE AUTOREN

Jean-Philippe Lafore, Françoise Guichard und Romain Roerig
arbeiten am Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-GAME) in Toulouse, das mit dem Centre national de la recherche scientifique (CNRS) und dem französischen Wetterdienst Météo-France zu einer Forschungseinheit verbunden ist.

QUELLEN

- Poan, E. et al.:** West African Monsoon Intraseasonal Variability: A Precipitable Water Perspective. In: *Journal of the Atmospheric Sciences* 70, S. 1035–1052, 2013
- Redelsperger, J.-L. et al.:** African Monsoon Multidisciplinary Analysis: An International Research Project and Field Campaign. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 87, S. 1739–1746, 2006
- Roerig, R. et al.:** 10–25-Day Intraseasonal Variability of Convection over the Sahel: A Role of the Saharan Heat Low and Midlatitudes. In: *Journal of Climate* 24, S. 5863–5878, 2011
- Taylor, C. et al.:** Afternoon Rain more Likely over Drier Soils. In: *Nature* 489, S. 423–426, 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1195009

Das ist ja interessant!

Neugier ist die Triebkraft für Entdeckungen. Aber was genau macht uns neugierig?

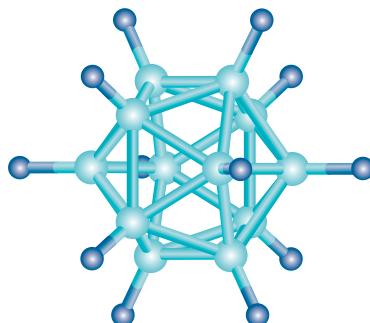
VON ROALD HOFFMANN

Die Phrase in der Überschrift, mit mühsam unterdrücktem Gähnen gemurmelt, meint oft das Gegenteil: eine höfliche, jedoch kaum verhüllte Art, zu sagen: »Es interessiert mich nicht wirklich.« Aber wir wollen uns hier mit der aufrichtigen Variante beschäftigen – insbesondere in der Wissenschaft, wenn jemand den Satz halblaut zu sich selbst sagt. Denn dann hat etwas seine Wissbegierde geweckt.

Zur Beschreibung eines Experiments oder einer Theorie liegt »interessant« ungefähr in der Mitte zwischen »schön« und »merkwürdig«. Wenn Wissenschaftler ihre Ergebnisse publizieren, vermeiden sie in der Regel wertende oder gar ästhetische Urteile. Mir kommt das paradox vor; denn eigentlich hätten sie es schon gern, wenn die Leser nicht nur den Erkenntniswert oder technischen Nutzen einer Arbeiten würdigen, sondern auch deren Eleganz.

Ist es nur Bescheidenheit, dass Forscher in einem Fachartikel Aussagen wie »dieses Molekül ist schön« scheuen? Mir scheint es in erster Linie die Angst davor zu sein, in die Klasse der Kunstkritiker eingereiht zu werden. Oder gar, Gott bewahre, der Theologen. Und »merkwürdig« im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Beobachtung klingt, als ob da etwas faul wäre: ein nicht ganz korrekt interpretiertes Spektrum oder ein Vorzeichenfehler in einer Herleitung. Aber »interessant«, ohne Hintergedanken ausgesprochen, gilt allgemein als sehr positive Wertung. Das heißt, so positiv, wie Wissenschaftler sich überhaupt öffentlich über die Arbeit anderer zu äußern pflegen.

Neulich habe ich mich dabei ertappt, wie ich zu mir sagte: »Elektronisch ist das Dodekaborat-Anion uninteressant.«



AMERICAN SCIENTIST, NACH ROALD HOFFMANN

Die Synthese des ikosaedrischen Dodekaborat ($B_{12}H_{12}^{2-}$) stieß 1960 auf großes Interesse; denn sie entschied die Streitfrage, ob und in welcher Form der bis dahin rein hypothetische Borwasserstoff stabil sei: im neutralen Zustand oder als zweifach negativ geladenes Ion.

Ich erinnere mich an den Tag vor 53 Jahren, als der Anorganiker Marion Fred Hawthorne in das Büro eines meiner Betreuer trat und erzählte, er habe $K_2B_{12}H_{12}$ hergestellt. Ich kannte die Voraussage des großen Linus Pauling (1901–1994), dass neutrales $B_{12}H_{12}$ stabil sein sollte. Dem widersprach jedoch, wie ich gleichfalls wusste, eine Berechnung der theoretischen Chemiker H. Christopher Longuet-Higgins und M. de V. Roberts, wonach das polyedrische Molekül vermutlich nur als zweifach negativ geladenes Ion beständig wäre. Hawthorne hatte die Streitfrage gerade experimentell entschieden. Damals konnte ich mir kein interessanteres Molekül vorstellen.

Aber jetzt, 50 Jahre später, verhielt es sich anders. Seither hatte ich von vielen Verbindungen mit $(B_{12}H_{12})^{2-}$ -Ionen oder Varianten davon erfahren und war mit der Struktur bestens vertraut. Es handelt sich um ein Molekül »mit abgeschlossener Schale«, das eine große

Lücke zwischen den besetzten und den unbesetzten Orbitalen (Energieniveaus für Elektronen) aufweist und dadurch sehr stabil ist. Seine Salze sind demzufolge reaktionsträge und in der Regel farblos.

All das ist heute etabliertes Wissen und nicht mehr weiter aufregend. Inzwischen fesseln mich andere Dinge wie das anomale Verhalten von Elektronen oder Moleküle, die elektrische Leiter statt Isolatoren sind. $(B_{12}H_{12})^{2-}$ dagegen vermag mich nicht mehr zu faszinieren. Dabei hat es das schon allein wegen seiner geometrischen Schönheit – es bildet ein perfektes Dodekaeder – wirklich nicht verdient. Aber Interesse schwindet, ähnlich wie der Reiz des Neuen verblasst. Eine zu oft gehörte Melodie langweilt uns ebenso wie Wiederholungen im Fernsehen.

Die Bedeutung von Vorkenntnissen

Das Ungewöhnliche weckt dagegen Interesse. Aber ob etwas banal oder außerordentlich erscheint, hängt von den Vorkenntnissen des Betrachters ab. Der muss wissen, was normal ist, bevor er das Anomale erkennen kann. Tetramminolithium ($Li(NH_3)_4$) zum Beispiel ist bei Zimmertemperatur eine bronzefarbene metallische Flüssigkeit (Bild rechts oben) – was für sich allein schon aus dem Rahmen fällt, weil Metalle so gut wie immer fest sind. Überdies aber kristallisiert $(Li(NH_3)_4)$ erst bei 89 Kelvin (−184 Grad Celsius). Es gibt zwar einige wenige Moleküle oder Elemente, deren Gefrierpunkt noch tiefer liegt – so erstarrt molekularer Wasserstoff bei 14 Kelvin und Helium gar nicht. Aber keines davon ist ein Metall. $Li(NH_3)_4$ gefriert bei einer um 145 Grad tieferen Temperatur als Quecksilber, das Metall mit dem nächsthöheren Schmelzpunkt.



Tetramminlithium ($\text{Li}(\text{NH}_3)_4$) zählt zu den wenigen bekannten metallischen Substanzen, die bei Zimmertemperatur flüssig sind. Was es noch interessanter macht: Sein Gefrierpunkt liegt mit -184 Grad Celsius um mehr als 145 Grad unter dem jedes anderen Metalls.

Elemente oder Verbindungen erstarrn umso früher, je stärker die anziehenden Kräfte zwischen den jeweiligen Atomen oder Molekülen sind. Metallischer Charakter wiederum beruht darauf, dass sich Elektronen frei in dem Material bewegen können. Das aber ist nur möglich, wenn die Atome oder Moleküle relativ eng aneinander gebunden sind. Wie kann es sein, dass $\text{Li}(\text{NH}_3)_4$ trotzdem erst bei so einer so niedrigen Temperatur fest wird? Wegen dieser Frage ist der extrem tiefe Gefrierpunkt der Verbindung für mich hochinteressant – und wird es bleiben, bis jemand die Antwort gefunden hat.

Wenn wir neue Beobachtungen machen, vergleichen wir sie mit unserer bisherigen Sicht der Welt. Doch diese Sicht wandelt sich stetig, weil neue Befunde nicht mehr hineinpassen und eine Revision erzwingen. Bei manchen Wissenschaften wie der Chemie häufen sich immerzu Unmengen an neuen Fakten an. Ich habe dieses Geschäft lang genug betrieben, um über einen reichen Erfahrungsschatz zu verfügen, der meine Intuition speist. Aber die meisten anderen Gebiete, von venezolanischer Literatur bis zu dem Ökosystem der kasachischen Steppe, sind mir ziemlich fremd. Natürlich schätze ich eine Beobachtung anders ein, wenn sie aus einem Gebiet ist, in dem ich mich auskenne. Ein neues Tourenskiwachs sagt mir nichts, aber als eine meiner Studentinnen bei einer der üblichen Zusammenkünfte meiner Forschungsgruppe die Strukturen zweier verwandter organometallischer Verbindungen vorstellte (Bild rechts), horchte ich auf.

Jedes dieser Moleküle, die Kiyoshi Isobe und seine Mitarbeiter an der Universität Kanasawa synthetisiert hatten, enthält ein Rechteck aus Schwefelato-

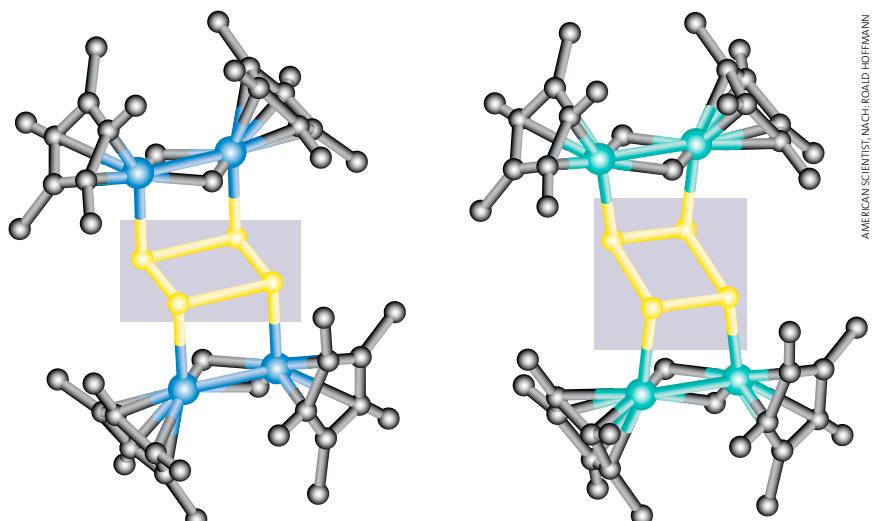
men, die an ein Edelmetall gebunden sind – in einem Fall Iridium und im anderen Rhodium. Diese beiden Elemente stehen im Periodensystem direkt übereinander und sollten deshalb sehr ähnliche Eigenschaften haben. Das traf hier aber nicht zu: Seitenverhältnis und Orientierung des Schwefelrechtecks in den zwei Verbindungen differieren erheblich. Das war nun wirklich interessant! Interessant genug jedenfalls, dass dieses Problem einen Teil der Doktorarbeit von Anne Poduska bildete – sie hatte die Moleküle und ihre Strukturen in der Literatur gefunden.

Natürlich muss man auch unterscheiden lernen. Viele Anomalien in der Welt sind unwichtig: Die Summe kleiner Abweichungen bei einer Vielzahl von Variablen lässt etwas manchmal ungewöhnlicher erscheinen, als es in Wahrheit ist. Gelegentlich steckt auch nur ein

Messfehler hinter einer vermeintlichen Besonderheit. Aber es gibt Anomalien, die ernst zu nehmen sich lohnt. Da ist dieses Molekül mit einer unerklärlichen Eigenschaft und starrt mich an, als wolle es sagen: »Versteh mich, wenn du kannst« oder »Stell mich her, wenn du kannst«. Die Herausforderung lässt mich nicht ruhen, und ich beginne, an einer Erklärung zu basteln. Vielleicht habe ich Erfolg. Wenn nicht, wartet schon in der nächsten Ausgabe einer der vielen Zeitschriften, die ich sichte, ein neues Rätsel, das mein Interesse erregt.

Die letztlich gefundene Erklärung für den merkwürdigen Tanz der Rechtecke ist zwar leider zu kompliziert, um sie hier zu beschreiben, aber trotzdem keine weltbewegende Sache, wie Anne und ich bereitwillig zugeben. Und doch – irgendwie hängt alles zusammen. Deshalb glaube ich, dass das Lösen von Tausenden solcher Bindungsrätsel, jedes nur von marginaler Bedeutung, und das genaue Analysieren der Verknüpfungen zwischen ihnen wesentliche neue Erkenntnisse bringen kann, die unser Weltbild bereichern, jedenfalls den chemischen Teil davon.

Auch das Auffinden solcher Verknüpfungen ist natürlich interessant;



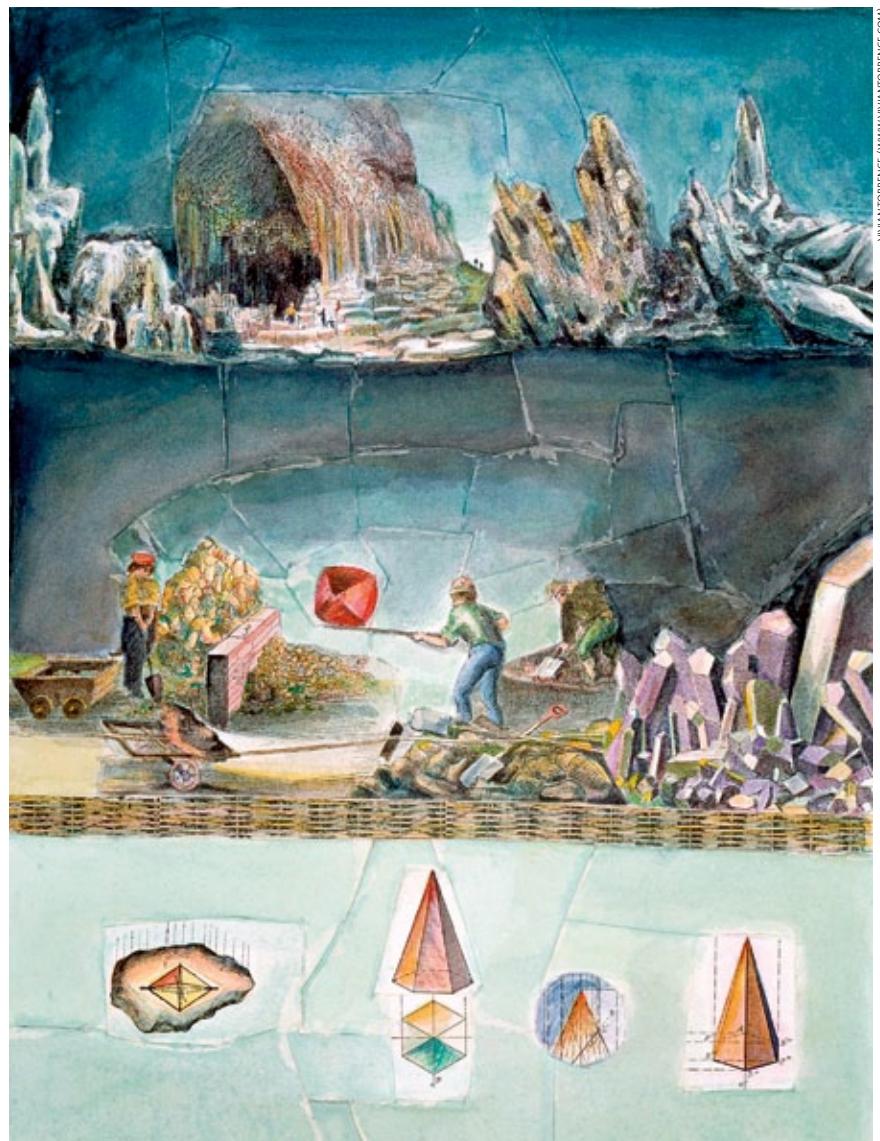
Rhodium (Rh, blau) und Iridium (Ir, grün) sind chemisch sehr ähnliche Edelmetalle. Trotzdem ändert sich, wenn man die beiden Elemente gegeneinander austauscht, die Geometrie der Schwefelrechtecke (gelb) in der hier gezeigten »Sandwichverbindung«: einem organometallischen Cyclopentadienylcarbenkomplex, dessen chemische Formel $\left[\{\text{M}_2(\eta^5\text{-C}_5\text{H}_5)_2\}(\mu\text{-CH}_2)_2\right]^{2+}$ lautet, wobei M für Rhodium oder Iridium steht. Dieser überraschende Befund erregte die Neugier des Autors.

Alles Neuartige und Ungewöhnliche erweckt Interesse. In der Collage »On the Crystal Scale« von Vivian Torrence, einer mit dem Autor befreundeten Grafikerin, sucht ein von Kristallen umgebener Bergmann eine einzigartige Form zur näheren Untersuchung aus. In der Illustration verengt sich der Blickwinkel stufenweise von der Landschaft (oben) auf die Menschen (Mitte) und schließlich bestimmte Kristallformen (unten).

denn es führt zuvor getrennte Teile des Universums zusammen. Hier ein Beispiel aus meinem persönlichen Umfeld: Viele anorganische Moleküle kann man als aus Fragmenten wie ML_3 , ML_4 oder ML_5 aufgebaut ansehen, wobei M ein Übergangsmetall und L ein so genannter Ligand wie Carbonyl (CO), Phosphin (PH_3) oder Chlorid (Cl^-) ist. In der organischen Chemie lassen sich ganz analog Gruppen wie CH_3 CH_2 und CH als Legobausteine betrachten. Ausgehend von grundlegenden Arbeiten anderer fiel mir irgendwann auf, dass sich die Elektronen in beiden Baustein- sätzen in ähnlichen Orbitalen bewegen. Auf diese Weise ließen sich erstaunliche Übereinstimmungen zwischen Strukturen und Reaktionen organischer und anorganischer Moleküle ausmachen. Das Auffinden dieses Zusammenhangs zählt für mich zu den Erfahrungen in meinem Leben, die mir die größte Befriedigung verschafft haben.

Schlüssel zur Kreativität

Eine interessante Sache ist also neu und ungewöhnlich, aber doch nicht so neu, dass man nichts damit anfangen kann. Vielmehr muss sie in Beziehung zu bekannten Fakten stehen. Ich denke etwa an Heike Kamerlingh Onnes (1853–1926), als er vor 100 Jahren zum ersten Mal beobachtete, wie der elektrische Widerstand von Quecksilber beim Abkühlen plötzlich auf null abfiel. Damals war bekannt, dass die Leitfähigkeit von Metallen mit abnehmender Temperatur steigt, und es gab widerstreitende Ansichten, wie sich dieser Trend bei Annäherung an den absoluten Nullpunkt der Temperaturskala bei $-273,16$ Grad



VIVIANTORRENCE (WWW.VIVIANTORRENCE.COM)

Celsius fortsetzt. Da es Onnes als Erster geschafft hatte, Helium zu verflüssigen, befand er sich in der glücklichen Lage, Messungen bei bis dahin unerreichten Temperaturen zu machen. Dabei entdeckte er die Supraleitung – ein Phänomen, das zu keiner der existierenden Theorien passte.

Ein anderes Beispiel liefern die Be trachtungen von Paul Dirac, der aus seiner grundlegenden quantenmecha nischen Gleichung von 1928 für das relativistische Verhalten von Elektronen be fremdliche, aber gültige Lösungen mit negativer Energie ableitete. Ernst ge nommen, ermöglichten diese drei Jahre später die Voraussage des Positrons.

In der psychologischen Literatur fand ich meine Ansicht bestätigt, dass

wissenschaftliches Interesse aus neuartigen, aber prinzipiell verstehbaren Be funden erwächst. So beschreibt Paul J. Silvia in seinem Buch »Exploring the Psychology of Interest« (»Untersuchungen zur Psychologie des Interesses«) unter anderem ein Experiment, bei dem die Probanden angeben sollten, wie interessant ihnen zufällig erzeugte Viellecke erschienen. Zugleich wurde ihre Wissbegierde und Offenheit für neue Erfahrungen gemessen. In einem anderen Experiment ging es um abstrakte Bilder. Wieder mussten die Teilnehmer die Interessantheit, außerdem aber auch die Verständlichkeit beurteilen. Aus den Ergebnissen solcher Versuche schließt Silvia, dass Interesse aus einer »Würdigung der Neuartigkeit und Kom

plexität eines Gegenstands« sowie seiner Verständlichkeit herröhrt.

Andere Psychologen haben weitere Aspekte des Interesses untersucht – etwa welche Rolle es beim Lernen spielt, welchen Anpassungswert es aus Evolutionssicht hat und wie es aus der Beurteilung einer Situation entsteht. Daniel E. Berlyne (1924–1976) nannte vor mehr als 50 Jahren Neuartigkeit, Komplexität, Ungewissheit und Konflikt als Größen, die entscheiden, ob eine Sache als interessant empfunden wird.

Abgrenzung von Obsessionen

Die psychologische Literatur half mir auch, den Unterschied zwischen Interesse und Interessen zu verstehen, der mir vorher nicht so klar war. Die Sache mit den Schwefelrechtecken war für mich echt interessant. Aber ich habe auch allgemeinere, weniger aufregende Interessen. Sie betreffen etwa das Verhalten von Molekülen unter hohem Druck, wie er beispielsweise tief im Erdinnern herrscht. Außerdem interessiere ich mich generell für Carbene – reaktive Verbindungen, in denen der Kohlenstoff nur zwei Einfachbindungen gebildet hat und über ein freies Elektronenpaar verfügt – sowie kaukasische Teppiche, Indigo und eine Menge anderer Dinge. Man beachte, dass ich nicht sage, ich sei spezifisch an Silan (SiH_4) unter hohem Druck, Methylen (CH_2), einem Akstafa-Teppich oder dem im Altertum aus Murex-Schnecken gewonnenem Farbstoff interessiert, den die Hebräer für rituelle Zwecke benutzten. Meine breiten Interessen sind wie Strände, die ich regelmäßig nach wertvollem Treibgut absuche.

Aber wieso habe ich unter den Millionen möglicher Strände gerade die genannten herausgepickt? Das geschah durch eine Kombination von Zufall und Wissbegierde. Silan und Methylen, ein spezieller kaukasischer Teppich, das biblische Blau – das waren die neuartigen Dinge, die mich zu den jeweiligen Stränden lockten. Jetzt warte ich dort nur noch geduldig, was sonst noch alles angespült wird.

Diese gelassene Erwartungshaltung ist etwas ganz anderes als die geistige

Erregung, in die mich das Atypische versetzt. Sie hat aber auch nichts mit jenem übersteigerten Interesse zu tun, das an Obsession grenzt. Letzteres empfinde ich etwa gegenüber Mühlrädern. Obwohl sich deren Bewegung ständig wiederholt, kann ich mich von ihrem Anblick kaum losreißen. Oder vielleicht kann ich gerade deshalb nicht aufhören hinzuschauen, weil die Bewegung unaufhörlich ist. Auch hier handelt es sich, wie der Philosoph Michael Weisberg von der University of Pennsylvania in Philadelphia anmerkt, um eine Spielart von Interesse. Meine Faszination geht so weit, dass ich Umwege in Kauf nehme, um Mühlräder zu finden, in deren Betrachtung ich versinken kann. Das Wort »fasziniert« trifft den Sachverhalt übrigens genau, leitet es sich doch von lateinisch »fascinare« = bezaubern ab. Ich bin in der Tat verzaubert, wann immer ich ein Wasserrad betrachte.

Mit wissenschaftlichem Interesse hat das aber nichts zu tun. Ich sehe darin eher eine Verhaltensweise am Rand des autistischen Spektrums. Mir scheint es etwas mit Ruhezuständen des Bewusstseins, Meditation und Biorhythmus zu tun zu haben. Das Interesse, das uns auf den Pfad der Entdeckung führt, ist ein anderes. Es bricht den Zauber, indem es den Geist beflügelt.

Wie Verständnis beginnt

Das Interesse der aufregenden Art ist meines Erachtens eng mit beginnendem Verständnis verknüpft. Insofern verbindet es psychologische mit erkenntnistheoretischen Aspekten. Wahres Verständnis kommt selten zu Stande, indem man nur neue Folgerungen aus einer schon existierenden Theorie zieht. Ein gutes Beispiel ist die Voraussage des Positrons durch Paul Dirac. Der dachte zunächst, das Proton sei das Antiteilchen zum Elektron. Er musste erst sein Weltbild umsortieren, um das Positron als richtige Lösung zu erkennen.

Wir halten etwas für interessant, weil wir es uns nicht recht erklären können oder, wie Anne Poduska meint, einfach niemand es vorher bemerkt hat. Meist ist es ein einzelner Mensch oder ein kleiner Personenkreis, der diese Be-

wertung vornimmt, ohne sie gleich an die große Glocke zu hängen. Allerdings gibt es auch Ausnahmen wie die 23 mathematischen Probleme, die David Hilbert (1862–1943) an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert für interessant erklärte. Wegen seines Renommes und seines intuitiven Gespürs hat er damit große Teile der mathematischen Forschung seither inspiriert.

Werde ich mit etwas merkwürdigem konfrontiert und dadurch zum Nachdenken angeregt, so versuche ich, es zu verstehen. Kann ich keine schnelle Erklärung finden und habe trotzdem das Gefühl, sie müsse zum Greifen nahe sein, ist das eine starke psychologische Motivation. Wenn ich Glück habe, führt mich mein Denken nach einiger Zeit auf die richtige Spur. Dann entdecke ich vielleicht eine Erklärung, die nicht nur mir, sondern auch anderen Chemikern plausibel erscheint. So weit wäre ich aber nie gekommen, ohne zunächst zu denken: »Das ist ja interessant!«

DER AUTOR



Roald Hoffmann ist emeritierter Frank H. T. Rhodes Professor of Humane Letters an der Cornell University in Ithaca (New York) und Träger des Chemie-Nobelpreises 1981.

QUELLEN

Berlyne, D.: Conflict, Arousal and Curiosity. McGraw-Hill, New York 1960

Pitocchelli, A.R., Hawthorne, M.F.: The Isolation of the Icosahedral $\text{B}_{12}\text{H}_{12}^+$ -Ion. In: Journal of the American Chemical Society 82, S. 3228–3229, 1960

Poduska, A.R. et al.: »Half Bonds« in an Unusual Coordinated $\text{S}_42-\text{Rectangle}$. In: Chemistry, an Asian Journal 4, S. 302–313, 2009

Silvia, P.J.: Exploring the Psychology of Interest. Oxford University Press, New York 2006

Silvia, P.J.: Interest – the Curious Emotion. In: Current Directions in Psychological Science 17, S. 57–60, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1205325

Die Helfer der Zukunft

Roboter können nicht nur Kotflügel montieren und den Mars erkunden. Sie helfen auch dem Chirurgen mit unerreichter Präzision, dem Betreuungsbedürftigen mit unerschöpflicher Geduld und dem Autofahrer mit niemals nachlassender Aufmerksamkeit.

Von Gerd Hirzinger

Mit sicherer Hand löst der Techniker an dem die Erde umkreisenden Satelliten die defekte Solarzelle aus ihrer Halterung, schiebt eine neue an deren Stelle, verbindet sie mit dem Stromnetz und fixiert sie in der richtigen Position. Dabei schwebt er selbst gar nicht im Weltraum. Vielmehr sitzt er im Kontrollzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen bei München, mit einer Maske auf dem Kopf und die Hände in Datenhandschuhen. Die eigentliche Arbeit verrichtet ein Roboter, dessen Hände präzise den Handbewegungen des Technikers folgen. Die Maske ist ein »Head-Mounted Display«: Die Kopfbewegungen des Technikers werden von einem speziellen Apparat nachverfolgt und an den Roboter übermittelt. Der bewegt daraufhin seinen Kopf mit den beiden Kameraaugen synchron mit dem Menschen am Boden und speist die Kamerabilder in die kleinen Bildschirme vor dessen Augen ein. Dadurch hat der Techniker denselben visuellen Eindruck, als wenn er selbst dort draußen schweben würde.

Das Prinzip nennt sich »Telepräsenz«; es ist die direkteste Form der Telerobotik (Bilder S. 86). Ein Mensch verrichtet aus der Ferne mittels eines Roboters eine Arbeit an einem schwer zugänglichen oder unwirtlichen Ort und hat dabei das Gefühl, er wäre selbst dort. Die Vorteile dieses Verfahrens sind

offensichtlich. Künstliche Arme und Hände lassen sich mit vergleichsweise bescheidenem Aufwand an die Weltraumbedingungen anpassen; und wenn der Roboter durch einen Steuerungsfehler in der Atmosphäre verglüht, ist das nur ein finanzieller Verlust. Dagegen erfordert es einen weit größeren Aufwand, einen Menschen in den Weltraum zu transportieren, ihn dort am Leben zu erhalten und wieder sicher zur Erde zurückzubringen.

Allerdings sollte für eine effiziente Telepräsenz der Techniker das ferne Bauteil nicht nur sehen, sondern auch spüren können: Damit er es mit der gewohnten Feinfühligkeit an den richtigen Platz bringen kann, muss es ihm denselben mechanischen Widerstand entgegensetzen, als hätte er es tatsächlich in den Fingern. Diese Kraftrückkopplung zählt zu den schwierigeren Aufgaben der Mechatronik, einer neuen Disziplin, die durch die vereinten Bemühungen aus Maschinenbau (einschließlich Kamera- und Displaytechnik), Elektronik, Informationstechnik und Softwareentwicklung »intelligente Mechanismen« schafft.

Komplexe mechatronische Systeme der Zukunft sind Autos, die sich auf Grund ihrer Sensoren und Aktoren »weigern, einen Unfall zu begehen«, unbemannte Flugsysteme, die selbsttätig starten, landen und anderen Flugzeugen ausweichen können, vor allem aber Roboter für die Eroberung des Weltraums, für die Produktion in Fabriken, für die persönliche Betreuung von Menschen und die schonende Chirurgie. Dies und noch mehr erforschen wir im Robotik- und Mechatronik-Zentrum (RMC) des DLR mit Sitz in Oberpfaffenhofen.

AUF EINEN BLICK

ROBOTIK UND MECHATRONIK

1 Roboter nehmen dem Menschen viele Arbeiten ab, die ihm zu mühsam, zu gefährlich oder schlicht unmöglich sind: **Montage in der Fabrik, Einsätze im Weltraum oder bei Katastrophen, Präzisionschirurgie** und andere.

2 Ihre Aufgaben erfüllen sie zunehmend **autonom**. Das heißt, sie setzen ein vorgegebenes Grobziel selbstständig in Einzelaktionen um.

3 Die neuen Fähigkeiten verdanken sie umfangreichen Neuentwicklungen in Hard- und Software, insbesondere einer Feinmotorik namens »**soft robotics**« und dem Algorithmus »**semi-global matching**« zur Erstellung eines räumlichen Bilds der Umgebung aus zwei Kamerabildern.

Aufräumen in der Umlaufbahn

Für die Telepräsenz müssen sensorische Signale – Kamerabild und Meldung des Kraftsensors – vom Roboter zu dessen »Agentenführer« (die offizielle Bezeichnung ist »Operator«) und motorische Signale in umgekehrter Richtung durch Funk übermittelt werden. Bei Entfernungen wie der zwischen Erde und Satellit spielt die Laufzeit dieser Signale eine wesentliche Rolle. Das ist noch unproblematisch für einen Satelliten in erdnaher Umlaufbahn (low earth orbit, LEO) während der sieben bis acht Minuten, die er – theoretisch – am Himmel sichtbar ist; dann braucht das Signal für Hin-

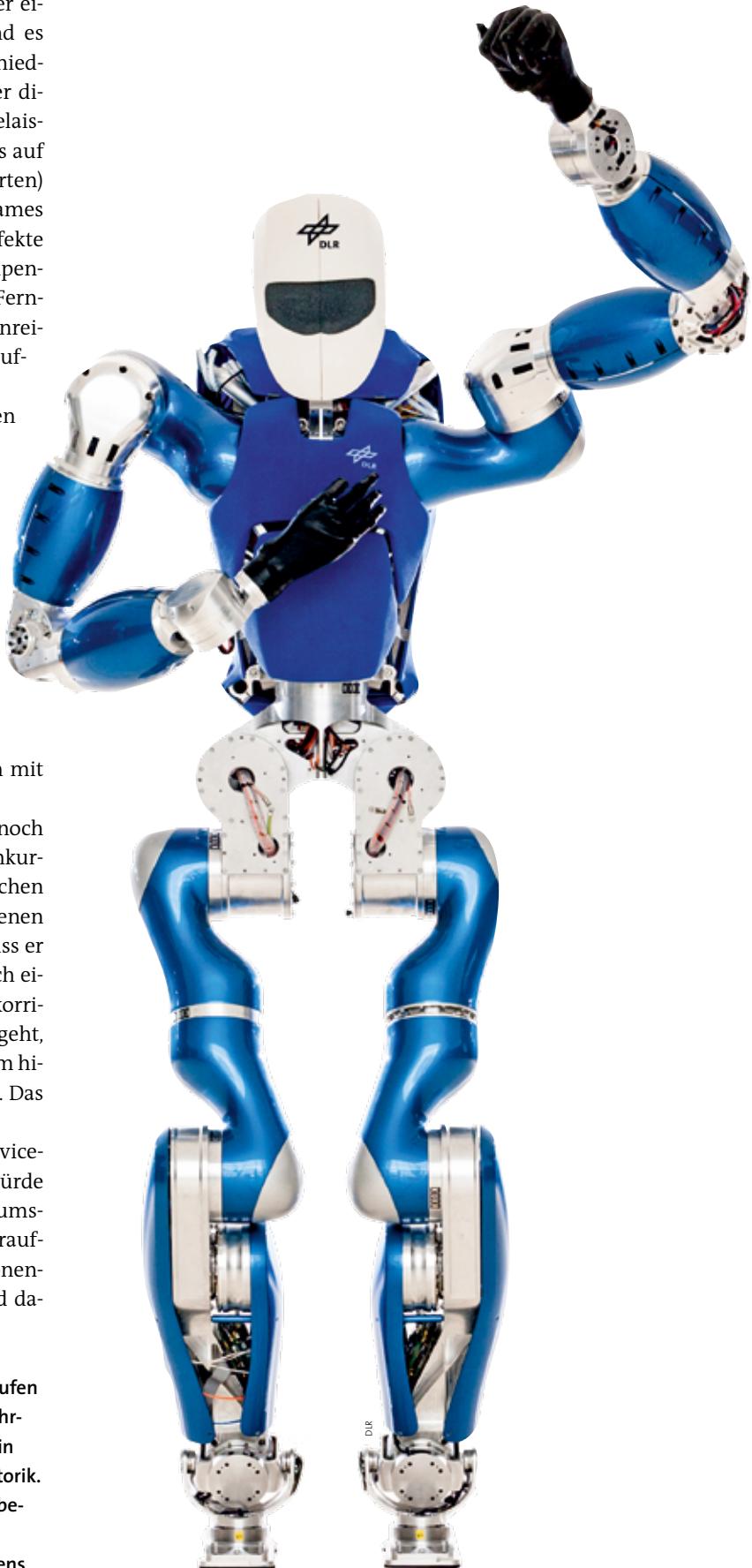
und Rückweg nur 20 Millisekunden. Für einen geostationären Satelliten (GEO), der in 35 790 Kilometer Höhe über einem festen Punkt der Erde zu schweben scheint, sind es schon knapp 0,3 Sekunden, und wenn das Ziel zwar auf niedriger Bahn umläuft, aber während der Zeiten fehlender direkter Sichtverbindung über einen geostationären Relaisatelliten angesprochen werden muss, steigt die Zeit bis auf 0,6 Sekunden an. Insbesondere bei der (wünschenswerten) Kraftrückkopplung wäre dann nur mehr ein sehr langsames und fahriges Arbeiten möglich; aber man kann die Effekte dieses Zeitverzugs durch komplexe Algorithmen kompensieren (Kasten S. 86). Diese ermöglichen telepräsente Fernsteuerung an jedem Punkt auf der Erde, denn mit hinreichend schnellen Internetverbindungen erreicht man Laufzeiten von weniger als einer halben Sekunde.

Bislang werden Weltraumroboter nur »an der kurzen Leine« eingesetzt: Der Astronaut sitzt in der Raumstation und steuert den Roboter auf der anderen Seite der Außenhülle; der macht die von der Erde eintreffende Raumfähre mit ihrer Ladebucht fest, entlädt sie und führt Reparaturen an den Solarzellen aus. Im Prinzip könnten Roboter auch im Inneren eingesetzt werden: Bei der Betreuung von Experimenten gibt es Routinetätigkeiten, die man ihnen einprogrammieren könnte. In dieser Umgebung sind sie zwar nicht geschickter als ein Mensch, aber weit kostengünstiger. Außen an der Raumstation dagegen werden sie auch an Geschicklichkeit vermutlich bald einen Astronauten mit dickem Schutzanzug und Handschuhen übertreffen.

In einer geostationären Umlaufbahn waren ohnehin noch nie Astronauten. Dort wären die Roboter sozusagen konkurrenzlos – und ausreichend beschäftigt: Jeder der zahlreichen Kommunikationssatelliten hat einen fest zugewiesenen Standort, den er nicht verlassen sollte. Gelegentlich muss er Abweichungen von der vorgeschriebenen Position durch einen kurzen Gasausstoß aus einer Lageregelungsdüse korrigieren. Wenn der dafür vorrätige Treibstoff zur Neige geht, sollte er sich mit dem letzten Rest in den freien Weltraum hinausschießen, um seinem Nachfolger Platz zu machen. Das hat nicht in allen Fällen funktioniert.

Hier könnte ein robotisches System in Form eines Servicessatelliten Abhilfe schaffen. Ein solcher Flugkörper würde über ein Einfangwerkzeug an der so genannten Apogäumsdüse des Problemsatelliten automatisch andocken. Daraufhin würde er über sein von Solarpaneelen gespeistes Ionentriebwerk entweder die Lageregulation übernehmen und da-

TORO, das jüngste Kind aus dem Robotiklabor des DLR, hat laufen gelernt. Schon sein Vorgänger »Rolling Justin«, der auf ein Fahrgestell montiert ist, verfügt dank der Drehmomentregelung in seinen Armen und Händen über eine herausragende Feinmotorik. Mit ebendieser Technik in den Hüft-, Knie- und Fußgelenken bewältigt sein Nachfolger TORO (TORque-controlled humanoid RObot) nun auch das diffizile Problem des zweibeinigen Gehens.



Telepräsenz mit Zeitverzögerung

Von Jordi Artigas

Ein Operator am Boden soll einen Roboter kollisionsfrei durch eine Raumstation bewegen. Da er dessen Bewegungen wegen der Signallaufzeit nur verzögert wahrnimmt, droht er, ihn gegen die Wand zu steuern.

Dem Problem ist leicht abzuholen, wenn der Computer am Boden über ein vollständiges Modell der Raumstation verfügt. Während der Operator dem Roboter die Steuerbefehle erteilt, sieht er – ohne Verzögerung – einen virtuellen Roboter diesen Befehlen folgend durch eine virtuelle Raumstation schweben. Der echte Roboter tut dasselbe mit Zeitverzögerung; das beobachtet der Operator per Videokamera mit doppelter Zeitverzögerung, aber nur, um sich zu vergewissern, dass alles gut ging.

Das funktioniert jedoch nicht mehr, wenn ein ausreichend getreues Modell der fernen Umgebung nicht zur Verfügung steht. Bei einer etwas komplexeren mechanischen Interaktion laufen echte und virtuelle Welt rasch auseinander – und das gilt bereits für das Eindrehen einer Schraube. Bei dem von mir entwickelten Verfahren »time domain passivity control«, das sogar

patentiert wurde, wird in den Roboter eine Art automatischer Aufpasser eingebaut. Wenn die Ausführung eines Befehls mehr Energie in das gesteuerte System einführen würde, als im selben Zeitraum durch Reibung verloren geht, erzeugt der Aufpasser zusätzliche Reibung, um die Gesamtenergiebilanz auf null zu halten.

Dadurch wird das System in der Tendenz langsamer und für den Operator am Boden schwerer durchschaubar. Es kommt also entscheidend darauf an, dass der Aufpasser die eingebrachte Energie zu jedem Zeitpunkt präzise misst und nur so viel vernichtet, wie für die Stabilität erforderlich ist.

Selbst bei optimaler »passivity control« nimmt der Operator die ferne Realität als irgendwie merkwürdig wahr – je größer die Signallaufzeit, desto schlimmer. Doch glücklicherweise kommt unser Kraft- und Bewegungssinn mit gewissen Deformationen der Wahrnehmung zurecht. Mit dem beschriebenen Ansatz gelingt es, Signallaufzeiten bis zu etwa 650 Millisekunden so zu kompensieren, dass man noch vernünftig mit Kraftrückkopplung fernsteuern kann.

Jordi Artigas arbeitet am Institut für Robotik und Mechatronik des DLR. Er ist Vorstandsmitglied des IEEE Telerobotic Technical Committee.

mit dessen Lebensdauer verlängern oder ihn auf den »Satellitenfriedhof« hinausschicken.

Im erdnahen Weltraum in der LEO-Höhe von 300 bis 1000 Kilometern kreisen inzwischen einige tausend Tonnen Weltraumschrott – nicht mehr steuerbare Satelliten, abgebrannte Raketenstufen und Kollisionstrümmern –, was in der Zukunft die bemannte Raumfahrt wegen der hohen Kollisionsgefahr problematisch oder sogar unmöglich zu ma-

Telepräsenz: Der Operator trägt einen Helm mit eingebautem Display und Datenhandschuhe, die ihrerseits an einem dreimomentgeregelten Leichtbauarm angebracht sind (links). Die in den Kopf des Roboters (rechts) eingebaute Kamera folgt den Kopfbewegungen des Operators, seine Hände dessen Handbewegungen.



chen droht. Ferngesteuerte Roboter sollten diese Objekte einfangen und aus dem Weg räumen. Dazu würde es in vielen Fällen genügen, ein kleines Bremssegel anzubringen. Durch den Widerstand der dort noch in Spuren vorhandenen Atmosphäre verliert das Schrottteil so viel Bewegungsenergie, dass es schließlich abstürzt und verglüht.

Das DLR hat heute die weltweit längste Erfahrung mit der Bodenfernsteuerung von Robotern in der Erdumlaufbahn. Schon 1993 flog unser kleiner Roboterarm ROTEX, ausgestattet mit einer Vielzahl von Sensoren sowie zwei Miniaturkameras, auf der D2-Mission des Spacelab mit. Wegen der langen Signallaufzeiten war ROTEX bereits mit einer gewissen Autonomie ausgestattet. Dem System gelang es, unter der Führung der Rechner am Boden vollautomatisch ein tauelndes Objekt einzufangen, und das bei einer Signallaufzeit von sechs Sekunden.





Das japanische Satellitenpaar ETS-VII, das 1999 mit dem Ziel gestartet wurde, Andockmanöver zu erproben, hatte den ersten im Weltraum frei fliegenden Roboterarm an Bord. Mit einer Weiterentwicklung der Technologie von ROTEX gelang es uns, mit dem an dem einen Satelliten des Paars montierten Arm durch »Schwimmbewegungen« den Trägersatelliten aus seiner Lage im Raum gezielt auszulenken. Die japanischen Kollegen griffen mit dem Arm den mit speziellen Markierungen versehenen zweiten Satelliten, allerdings unter unrealistisch günstigen Bedingungen: Der zweite Satellit bewegte sich nur sehr geringfügig gegenüber dem ersten.

Mit dem zweigelenkigen Arm ROKVISS (»Robotik-Komponenten-Verifikation auf der ISS«) an der Außenhaut der Internationalen Raumstation ISS konnten wir von 2005 bis 2012 das Prinzip der wirklichkeitsnahen Telepräsenz mit Bild- und Kraftrückkopplung demonstrieren. Wir wählten dazu die Zeiten, in denen die ISS über die Bodenstation hinwegflog und wir von einer Signallaufzeit von nur 20 Millisekunden profitieren konnten. Die Kraftrückkopplung erfolgte über einen »kraftreflektierenden« (eine Gegenkraft ausübenden) Joystick, wie ihn manche Computerspiele schon nutzen. Dabei konnten wir den Nachweis führen, dass unsere drehmomentgeregelten Leichtbauantriebe (siehe unten), wie sie jetzt Einzug in die Fabrikhallen finden, weltraumtauglich sind.

ETS-VII war gewissermaßen ein Projekt zum Üben: Der Satellit mit dem Greifarm hatte sich sein Zielobjekt mitgebracht, wobei dessen Gestalt und Bewegungsweise vorab bekannt waren. Dagegen probt das jetzt anlaufende deutsche Projekt DEOS (»Deutsche Orbitale Servicing-Mission«; Bild oben) den Ernstfall. Der zugrifffende Satellit hat die Aufgabe,

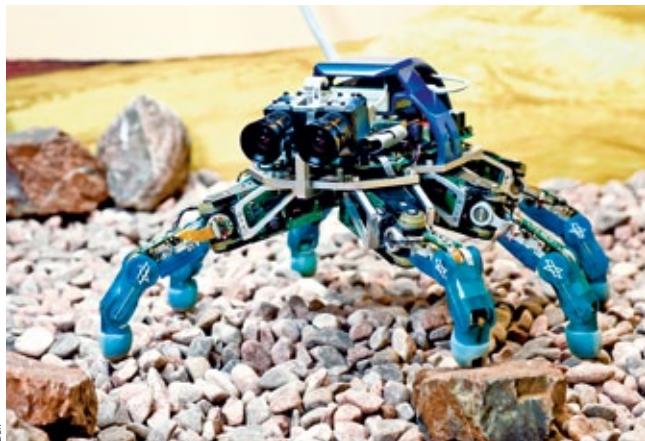
die Gestalt seines Zielobjekts und dessen taumelnde Bewegung durch Beobachtung zu erschließen, einfache Reparatur- und Wartungsarbeiten an ihm durchzuführen und es bei Bedarf so zum Absturz zu bringen, dass es irgendwo mitten im Atlantik oder Pazifik aufschlägt und keinen Schaden in bewohnten Gebieten anrichtet. Für diesen Zweck entwickeln wir einen Greifarm mit sieben Gelenken und die zugehörige Software für die Greifstrategie unter Einschluss von Echtzeit-Bildverarbeitung.

Autonome Marsfahrzeuge

So nützlich und technisch anspruchsvoll auch das Reparieren und Aufräumen in Erdnähe (»orbital servicing«) sein mag – spektakulärer ist natürlich die Erforschung des Sonnensystems. Und die wiederum gelingt mit Robotern effizienter und kostengünstiger als mit Menschen.

Bei Signallaufzeiten von 2,5 Sekunden zum Mond und zurück oder gar mehr als 15 Minuten beim Mars ist allerdings an Telepräsenz nicht mehr zu denken. Der Operator auf der Erde kann hier nur noch Grobziele vorgeben. Der Roboter muss dann selbstständig das Ziel ansteuern, Objekte erkennen und sie greifen oder anbohren können.

Diese Idealvorstellung ist bei den bisherigen Missionen nur unvollkommen realisiert worden. Immerhin brachte es der Marsrover »Sojourner« bei der »Pathfinder«-Mission 1997 auf annähernd 100 Meter autonom zurückgelegter Fahrstrecke. Auf diesen Erfolg hin schickte die NASA 2003 die beiden baugleichen Fahrzeuge »Spirit« und »Opportunity« zum Mars. Sie fuhren ab 2004 über die Oberfläche des Planeten und hielten viel länger durch, als ursprünglich geplant



DLR

Der DLR-Krabbl bewegt sich sehr geschickt über schwieriges Terrain, weil seine Beine im Wesentlichen die dreimomentgeregelten Finger des Roboters Justin sind und er sich mit Hilfe des SGM-Algorithmus räumlich orientiert.

war. Erst nach fünf Jahren und fast acht Kilometer Wegstrecke blieb »Spirit« im Sand stecken; inzwischen ist der Funkkontakt zu ihm abgebrochen. Dagegen hat »Opportunity« schon 35 Kilometer zurückgelegt und ist immer noch aktiv. Beide Marsrover verfügen über einen Roboterarm mit fünf Freiheitsgraden, der Instrumente und Kameras bewegen kann. Ähnlich wie bei »Sojourner« gibt ein Operator auf der Erde dem Rover eine Folge von Wegpunkten vor, die dieser der Reihe nach ansteuern soll.

Der neue, 2012 gelandete Rover »Curiosity« hat ebenfalls einen Arm und zahlreiche Experimente an Bord. Auch er fährt aber noch nicht vollautonom über den Mars, sondern schickt seine Bilder für eine kollisionsfreie Wegplanung durch den Operator zur Erde. Immerhin kann er für ein von dort aus vorgegebenes Ziel an Bord einen Pfad bestimmen. Dazu erstellt er aus selbst aufgenommenen Stereobildpaaren eine »Landkarte« seiner unmittelbaren Umgebung, berechnet einen hindernisfreien Weg, der zumindest ein Stück weit auf das Ziel zuführt, fährt dieses Stück, nimmt ein neues Bildpaar auf und so weiter. »Curiosity« kann schon vier Bilder pro Minute an Bord verrechnen. Allerdings setzt die NASA dieses Verfahren nur in Ausnahmefällen ein, weil sie bislang noch der autonomen Navigation misstraut.

Die Vision künftiger, wesentlich schnellerer und wirklich autonomer Rover verkörpert der Mondrover »Asimov«. Unser Institut hat ihn gemeinsam mit den »Part-Time-Scientists« (PTS) entwickelt, einer deutsch-österreichischen Gruppe junger Ingenieure, die eine privat finanzierte Mondrover-Mission vorantreiben.

Die autonome Navigation beruht auf langjährigen Vorarbeiten des DLR. Ein schwenkbarer Stereokamera-Kopf verarbeitet 14 Bilder pro Sekunde zu einem dreidimensionalen Modell der Umgebung. Der verwendete Algorithmus »semi-global matching« (SGM) ist inzwischen zum Standard in der modernen Photogrammetrie geworden (Kasten S. 90/91).

Alle vier Räder sind einzeln angetrieben und gelenkt. »Asimov« soll bei vollautonomer Wegplanung und Kollisionsvermeidung Geschwindigkeiten bis zu zehn Kilometer pro Stunde erreichen. Ob und wann es eine Mondrover-Mission oder die schon länger geplante europäische Marsrover-Mission Exo-Mars geben wird, ist unklar, obwohl wir mit dem sechsrädrigen Prototypen bereits ausgiebige Fahrtests in unserer Versuchsanlage, dem »Mars-Testbed«, unternommen haben.

In den Zukunftsvisionen der Robotiker fahren autonome Vehikel über die Marsoberfläche, sammeln Gesteinsproben und analysieren sie, bauen Infrastrukturen und Wohnplätze für ihre maschinellen wie menschlichen Nachfolger auf und übertragen Echtzeitstereobilder in bisher unbekannter Bandbreite zur Erde. Ob sie sich auf vier bis sechs Rädern, mit sechs bis acht Insektenbeinen oder einer Kombination aus beiden bewegen werden, ist noch nicht ausgemacht.

Auf einem Asteroiden dagegen kann dank der winzigen Schwerkraft eine Kiste mit Primitivantrieb im Wortsinn große Sprünge machen. Ein kleiner Elektromotor bewegt ruckartig eine exzentrisch angebrachte Masse; dadurch stößt sich die Kiste vom Boden ab und kommt ungezielt einige zehn oder hundert Meter weiter auf der Oberfläche auf. Diese vom DLR entwickelte Antriebstechnik werden wir demnächst unseren japanischen Partnern für deren Asteroidenmission Hayabusa II zur Verfügung stellen.

Ein Roboter, der sich auf Beinen laufend fortbewegen kann, ist auch von militärischem Interesse. So entwickelt die US-Armee einen vierbeinigen robotischen Lastenesel, der schon in den nächsten Jahren bis zu 30 Kilometer selbstständig durch unwegsames Gelände laufen und bis zu 200 Kilogramm Lasten für die Soldaten tragen soll. In Deutschland gibt es dagegen derzeit nur eine spektakuläre vierbeinige Laufmaschine, den mit Unterstützung des DLR für das älteste deutsche Volksschauspiel, den »Further Drachenstich«, entwickelten Drachen. Als weltweit größter Schreitroboter ist er sogar im Guinnessbuch der Rekorde verzeichnet.

Hilfsarbeiten im Altenheim

Jede Nutzlast, die in eine Umlaufbahn oder gar zum Mars befördert werden soll, erfordert ein Vielfaches ihres Eigengewichts an Raketentreibstoff. Deswegen ist für Weltraumroboter extreme Leichtbauweise gefordert. Die dort gesammelten Erfahrungen kommen uns nunmehr für irdische Anwendungen zugute. Nicht nur in der Industrie werden Roboter in den Hochlohnländern zunehmend mit menschlichen Produktionsarbeitern kooperieren; sie werden zumindest längerfristig in den Alten- und Pflegeheimen Hol- und Bringdienste leisten und sich als Haushaltshilfe vor allem für Ältere und Bettlägerige nützlich machen. Microsoft-Gründer Bill Gates hat mehrfach vorausgesagt, dass die Assistenzrobotik in den nächsten 20 Jahren denselben Aufstieg erleben wird wie die PC-Technik in den letzten 20 Jahren.

Man sollte nicht von »Pflegerobotern« sprechen, weil zur Pflege menschliche Zuwendung gehört, die ein Roboter nicht geben kann. Aber ein Getränk aus dem Kühlschrank holen,

eine zu Boden gefallene Brille aufheben, eine einfache Mahlzeit aufwärmen und bringen, und das rund um die Uhr: All das und mehr werden Assistenzroboter in den nächsten 15 bis 20 Jahren leisten. In Fernost ist das Thema »elderly care« längst in aller Munde. Man hat dort auch keinerlei Bedenken, künstliche Robbenbabys in die Altersheime zu bringen. Demenzkranke freuen sich sichtbar, wenn die kleinen Roboter-Robben beim Streicheln die Augen »entzückt« verdrehen.

NASA und DLR arbeiten intensiv an Systemen mit menschenartigem Oberkörper und zwei geschickten Händen. Die DLR-Leichtbauarme (Bilder unten) bewegen ihr eigenes Gewicht von etwa 14 Kilogramm mit bescheidenen 100 Watt elektrischer Leistung. Eine über alle Gelenke verteilte Drehmomentregelung verschafft ihnen jede gewünschte Nachgiebigkeit. Damit kann ein Industrieroboter nicht nur seinem menschlichen Kollegen feinfühlig ein Werkstück zugeben oder abnehmen, sondern sich sogar von einem Menschen direkt die Hände führen lassen. Die derart vorgenommene Bewegung kann er dann reproduzieren und sogar in andere Bewegungsabläufe einbetten. Mit solchen fortgeschrittenen Techniken (soft robotics) ausgestattete Roboter dringen jetzt als Produktionsassistenten in die Autofabriken vor; sie sind so feinfühlig und »vorsichtig«, dass man auf die bislang üblichen Schutzzäune verzichten kann.

Eine Roboterhand erreicht bereits mit vier Fingern ein hinreichend vielfältiges Sortiment an Bewegungsmöglichkeiten. Bei einer klassischen »modularen« Hand stecken alle Antriebe (typischerweise 13 oder mehr) in der Handwurzel. Dadurch wird die ganze Hand zwar relativ groß und schwer; die Bauweise hat jedoch den Vorteil, dass der Roboter bei Bedarf seine eigene Hand demontieren und zum Beispiel durch ein Spezialwerkzeug ersetzen kann.

Schlankere Hände sind realisierbar, wenn man entsprechend dem lebenden Vorbild die Antriebe in den Unterarm verlegt und die Kraft durch Seilzüge ähnlich den menschlichen Sehnen in die Finger überträgt. Nach diesem Konzept

haben wir das integrierte Hand-Arm-System HASY entwickelt (Bild unten, links), das dem menschlichen Vorbild an Größe, Dynamik und Greifkraft so nahe kommt wie vermutlich noch kein System zuvor. Auch die Gelenke von HASY haben eine einstellbare Nachgiebigkeit. Sie wird wie beim natürlichen Vorbild dadurch realisiert, dass an jedem Gelenk zwei antagonistische (gegeneinander gerichtete) Antriebe angreifen. In integrierten Federelementen kann der Arm auch Energie speichern und damit zum Beispiel auf sehr natürlich wirkende Weise schwungvoll einen Ball werfen.

Die erste Generation von Staubsaugerrobotern fuhr ziellos, immerhin unter Vermeidung von Kollisionen, durch die Wohnung. Inzwischen kommen Systeme auf den Markt, die sich im Steuercomputer eine elektronische Karte der Umgebung zurechtlegen und systematisch arbeiten. Aber für viele Aufgaben sind Arme und Hände unentbehrlich; ein komplexeres System, das die »mobile Manipulation« beherrscht, hat heute unweigerlich einen menschenähnlichen Oberkörper, einen Kopf und zwei Arme mit Händen. Entweder ist der Roboter auf einer omnidiagonalen (in alle Richtungen vom Stand weg beweglichen) Plattform montiert wie der am DLR entwickelte »Rolling Justin« mit seinen insgesamt 53 drehmomentgeregelten Antrieben; oder er läuft wie ein Mensch auf zwei Beinen (Bild S. 85) und löst damit ein anspruchsvolles Problem der numerischen Mathematik (Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 84). Bei Häusern mit Treppen dürften diese »Humanoiden« die beste Lösung darstellen, bei nur ebenerdigen Umgebungen sind wahrscheinlich rollende Systeme wie Justin effizienter.

Roboter als Chirurgen

Manchen Menschen ist die Vorstellung unheimlich, von einer »seelenlosen Maschine« operiert zu werden. Dabei geht es den Robotikern zunächst nur um Hilfsgeräte für den Arzt, der stets die Kontrolle behalten soll. Sie sollen ihm die Operation erleichtern und sie für den Patienten schonender ma-



chen. Die Aufgabe, eine Biopsienadel zielsicher in einen vielleicht nur wenige Millimeter großen Gehirntumor zu stechen, erledigt ein kleiner Roboterarm auf Basis der 3-D-Computertomografie völlig zitterfrei und präziser als die ruhigste Chirurgenhand. Der Arzt muss nur noch die Vorschubgeschwindigkeit vorgeben und kann den Prozess jederzeit anhalten.

Ein solcher Anfangserfolg wirft die Frage auf, ob robotische Systeme auch größere Teilaufgaben übernehmen könn-

ten, wie etwa Gewebe zu vernähen oder in der Hüftchirurgie aus dem Beckenknochen den kugelförmigen Hohlraum (die »Kugelkalotte«) für die Aufnahme des künstlichen Gelenkkopfs auszufräsen. Gerade bei dem letzteren Projekt gab es vor einigen Jahren viel diskutierte Rückschläge. Offenbar war das System ROBODOC so sperrig, dass es bestimmte Muskelgruppen stärker in Mitleidenschaft zog als das herkömmliche Verfahren, und mit zu wenig Sensorik und Navigation ausgestattet, so dass es beim Fräsen in manchen Fällen sogar

Beidäugiges Sehen für Roboter

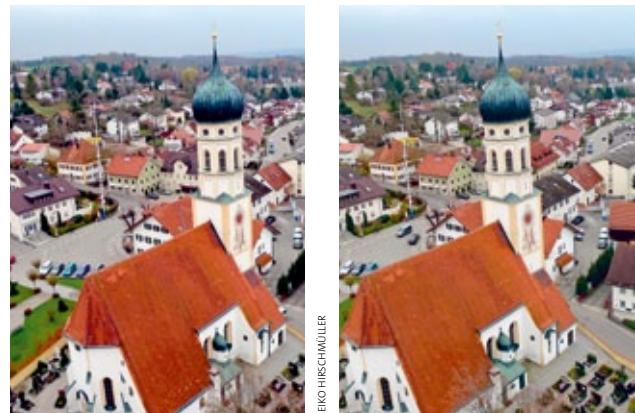
Von Heiko Hirschmüller

Wir öffnen die Augen, schauen in die Welt – und ohne merkliche Anstrengung haben wir ein räumliches Bild unserer Umgebung im Kopf. Vor allem bemerken wir – meistens – rechtzeitig, wenn uns ein Gegenstand bedrohlich nahe kommt. Unsere beiden Augen liefern nämlich geringfügig verschiedene Netzhautbilder an das Gehirn; dieses stellt beim Vergleich der beiden zum Beispiel fest, dass eine Bleistift- (oder Kirchturm-)spitze im rechten Bild weiter links steht als im linken. Dagegen sieht die Landschaft am Horizont in beiden Bildern genau gleich aus, weil der Mensch in die Ferne blickt und daher die optischen Achsen beider Augen parallel stehen. Aus den Abweichungen (»Disparitäten«) in den beiden Bildern erschließt das Gehirn, dass die Spitze ein nahes Objekt ist.

Was jedem von uns mühelos gelingt, ist überraschend schwer zu programmieren. Das liegt erstens daran, dass an die Software höhere Anforderungen gestellt werden als an unser Sehsystem. Unser Gehirn kennt aus Erfahrung unseren Augenabstand und erschließt aus der Anspannung der entsprechenden Muskeln den Schielwinkel und die Entfernungseinstellung der Linse; derlei Informationen stehen dem Computerprogramm im Allgemeinen nicht zur Verfügung. Zweitens fehlt der Software das Wissen darüber, wie Gegenstände auszusehen pflegen; auf diese Erfahrungen greift unser Gehirn bei der Rekonstruktion einer Szene aber massiv zurück.

Was tut also ein Computerprogramm, wenn es mit zwei Digitalbildern einer Szene ohne weitere Informationen alleingelassen wird? In einem ersten Schritt sucht es sich ungefähr 10 bis 100 markante Punkte, die in beiden Bildern vorkommen, und bestimmt daraus die relative Position und Orientierung der beiden Kameras – oder auch ein und derselben Kamera, die nacheinander von verschiedenen Orten aus die Bilder aufgenommen hat. Durch geeignete Drehung, Skalierung und Verzerrung transformiert es dann die Bilder in eine Gestalt, die sie hätten, wenn die optischen Achsen beider Kameras parallel und in horizontaler Richtung gegeneinander verschoben wären. Diese »Rektifizierung« hat in den Beispielbildern oben bereits stattgefunden.

Beide Bilder bestehen aus Einzelpunkten (»Pixeln«), denen jeweils ein Farbwert, zusammengesetzt aus Rot-, Grün- und Blau-



anteil, zugewiesen ist. Das Programm müsste also nur noch jedem Pixel des linken Bilds dasjenige im rechten Bild zuordnen, das zum selben Punkt der Szene gehört und daher denselben oder zumindest einen sehr ähnlichen Farbwert hat. Für weit entfernte Punkte der Szene ist das sehr einfach, denn die werden wie im oben genannten Beispiel in beiden Bildern auf dieselbe Stelle abgebildet. Für näher gelegene Szenepunkte muss das Programm im rechten Bild nur eine gewisse Anzahl von Pixeln nach links wandern, um den korrespondierenden Bildpunkt zu finden.

Dieser theoretisch so einfache Schritt ist in der Praxis der problematischste. Der Farbwert erweist sich nämlich als sehr unzuverlässiges Unterscheidungsmerkmal. In einer großen, einheitlich gefärbten Fläche – der blaue Himmel im Hintergrund oder das Kirchendach – passt ein Pixel so gut wie jedes andere. Möglicherweise sind die Kameras in ihrer Farbempfindlichkeit nicht gleich kalibriert, und es gelingt nicht, diese Effekte rechnerisch zu kompensieren. Eine Kamera sieht das Spiegelbild der Sonne in einem Schaufenster, die andere nicht; allgemein kann eine kleine Abweichung im Blickwinkel die Farbwerte drastisch verändern (»radiometrische Differenzen«). An manchen Stellen existiert das korrespondierende Pixel gar nicht, weil ein Vordergrundobjekt den entsprechenden Szenepunkt für eine der beiden Kameras verdeckt. Und wenn zwischen beiden Aufnahmen eine gewisse Zeit vergangen ist, dann sind die Autos vom Marktplatz inzwischen weggefahren, und der Computer sucht ihre Pixel vergebens.

die seitliche Knochenwand durchbrach. Obwohl die Roboter nach Aussagen der behandelnden Chirurgen die Komplikationsrate im Vergleich zur herkömmlichen Operation auf die Hälfte gedrückt hatten, stellten die Kliniken sie nach der öffentlichen Kritik erst einmal in den Keller.

Trotz solcher Rückschläge wird sich aber die Chirurgie mit Roboterhilfe immer mehr durchsetzen. Experten der Kopfchirurgie und Orthopädie sind davon überzeugt, dass sie bereits in den nächsten Jahren Knochen, insbesondere Schädel-

knochen, nicht mehr selbst mit Bohrer oder Säge bearbeiten werden. Vielmehr werden dann einarmige Manipulatoren mit einem Laser sehr präzise, ultradünne Schnitte ausführen. Hinterher muss das Gewebe bei der Wundheilung nur noch weniger als einen Millimeter überbrücken.

Zur Königsdisziplin der Chirurgierobotik ist jedoch heute schon die minimal invasive Chirurgie herangereift. Bislang hantiert der Chirurg mit zwei langen Instrumenten, die durch kleine Einstichlöcher (»Trokare«) in den Körper des Patienten

Um eine einigermaßen korrekte Korrespondenz zu finden, muss man neben dem Farbwert ein weiteres Kriterium zu Hilfe nehmen. In dem Verfahren SGM (semi-global matching) ist das die Forderung, dass die Disparitäten benachbarter Pixel möglichst wenig voneinander abweichen sollten. Das gibt die Erfahrungstatsache wieder, dass die allermeisten Pixel im Inneren einer Fläche liegen, die eine einheitliche Entfernung von den Kameras hat. Die Kanten, die ein nahes Vordergrundobjekt vom entfernten Hintergrund trennen und an denen daher die Disparität einen großen Sprung macht, sind zwar von entscheidender Bedeutung für die Bilderkennung, aber die zugehörigen Pixel sind in der Minderheit.

Unter den Pixeln des rechten Bilds, die für die Zuordnung zu einem Pixel des linken Bilds in Frage kommen, wählt das Programm also dasjenige aus, für das die Summe aus Farbabweichung und Disparitätsabweichung von den Nachbarpixeln minimal ist. Man nennt diese Summe die »Kostenfunktion« und stellt sich dabei vor, man müsse für jede Abweichung von den idealen Verhältnissen bezahlen und suche unter allen möglichen Arrangements das preisgünstigste. Die Bestimmung der »Preise« für die einzelnen Abweichungen ist eine Kunst für sich. Bei den Farben setzt man zunächst an die Stelle der rohen Farbwerte eine Zahl (einen »Kode«), in den auch die Farbwerte der Nachbarpixel eingehen: ein Mittel, um radiometrische Differenzen fast vollständig zu kompensieren. Der Preis der Farbabweichung ist dann das Quadrat der Differenz der Codes. Sprünge in der Disparität – oberhalb einer gewissen Mindestgröße – werden mit einem Einheitspreis bewertet. Das – sorgfältig zu wählende – Verhältnis zwischen den Preisen für die Abweichungen beider Arten bestimmt darüber, wie sehr das Programm geneigt ist, ein Pixel trotz großer Farbabweichung für einen Bestandteil der umgebenden Fläche zu halten.

Mit der Auswahl des »billigsten« Pixels bestimmt das Programm zugleich die Disparität an dieser Stelle. Die wiederum geht in die Berechnung der Kostenfunktion für die benachbarten Pixel ein, mit dem Effekt, dass die Kos-

ten verschiedener Pixel voneinander abhängen. Macht man ein Pixel besonders billig, werden vielleicht alle Nachbarn teurer. Also müsste das Programm eigentlich alle Pixel zugleich variieren, um die insgesamt billigste Lösung zu finden, sofern ein solches globales Optimum überhaupt existiert. Der Aufwand dafür steigt mit der Anzahl der Pixel rasch ins Unermessliche, ähnlich wie das Durchprobieren aller Möglichkeiten für das Problem des Handlungsreisenden bereits bei mäßig großen Städtezahlen alle Computer der Welt überfordern würde (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 76).

Ersatzweise optimiert das Programm nicht global, sondern nur »halb global« (semi-global). Es wandert gewissermaßen in acht verschiedenen Richtungen über das ganze Bild und bessert auf dem Weg ein Pixel nach dem anderen nach, während alle anderen Pixel ihre mehr oder weniger nachgebesserten Werte beibehalten (Grafik links unten). Am Ende führt das Programm unter den acht verschiedenen Vorschlägen, die für jedes Pixel zusammenkommen, eine Mehrheitsentscheidung herbei.

Der letzte Rechenschritt ist einfach: Die Entfernung eines Objekts ist umgekehrt proportional zu seiner Disparität.

Unvermeidlich kommt das System zu Fehleinschätzungen, wie übrigens das menschliche Sehsystem auch (die beliebten Autostereogramme sind darauf angelegt, eine globale Fehlzuordnung herbeizuführen). Das System SGM zeichnet sich dadurch aus, dass solche Fehler sehr selten vorkommen; vor allem aber sind die einzelnen Rechenoperationen so konzipiert, dass sie sich auf spezialisierten Chips mit beschränkten Fähigkeiten – zum Beispiel Grafikchips – durchführen lassen. Dadurch arbeitet der Algorithmus insgesamt sehr schnell. SGM findet also fast immer eine fast richtige Lösung – und vor allem rechtzeitig, bevor der Roboter oder das autonome Auto gegen die Wand prallt.

Über die Robotik hinaus dient SGM inzwischen dazu, von komplizierten und/oder schwer zugänglichen Objekten vollautomatisch ein dreidimensionales Modell anzufertigen. Ein erstes Beispiel war die Marsoberfläche. Die Klosterkirche Andechs und das Markgräflische Opernhaus Bayreuth wurden mit Hilfe dieser Technologie mit einer Genauigkeit von unter einem Millimeter erfasst und für die Nachwelt archiviert.

Heiko Hirschmüller ist promovierter Informatiker und arbeitet am Institut für Robotik und Mechatronik des DLR. Er hat das SGM-Verfahren entwickelt.



BEIDE FOTOS: DLR

Der Chirurg steuert, bequem vor dem Bildschirm sitzend (rechts), mit Handhebeln die beiden Roboterarme des Systems MiroSurge mit den Operationsinstrumenten (links, zu Demonstrationszwecken an einem Phantom an Stelle eines echten Menschen). Ein dritter Roboterarm führt präzise und zitterfrei das Endoskop nach.

eingeführt werden, während er ständig auf den Bildschirm schaut. Dabei muss er die Enden der Instrumente gegenläufig zur eigentlich beabsichtigten Richtung bewegen; wegen der Reibung im Trokar und des langen Hebelarms hat er wenig Gefühl für den mechanischen Widerstand des Gewebes, an dem er arbeitet; der Kameramann, der das Endoskop durch einen dritten Trokar nachführt, muss stets konzentriert sein und sollte nicht zittern. Schon relativ früh wurde klar, dass das alles nur eine Zwischenlösung sein kann.

Vielmehr bietet sich hier ein Telepräsenzsystem an. Ein solches haben als Erste ehemalige NASA-Mitarbeiter mit dem Robotersystem »da Vinci« realisiert, das im Jahr 2000 von der amerikanischen Medizinbehörde FDA zugelassen wurde und heute in mehr als 2000 Exemplaren weltweit installiert ist.

Mit seinen Händen, deren Bewegung mechanisch abgegriffen wird, steuert der Chirurg, vor einem hoch aufgelösten, vergrößerten Stereobild aus dem Körperinneren sitzend, die beiden abwinkelbaren Instrumente, die ihrerseits von zwei Manipulatoren geführt werden. Das Zittern der Hände wird weggefiltet und die Bewegung der Chirurgenhände in eine viel kleinere der Instrumente umgesetzt, was eine größere Präzision erlaubt. Ein dritter Manipulator führt das Endoskop, das ein Stereobildpaar liefert, durch einen eigenen Trokar automatisch nach.

Der eigentliche Durchbruch des Systems kam etwa 2009, als Urologen und Gynäkologen entdeckten, dass sich die zusätzliche Präzision bei Operationen im kleinen Becken, wo Harnröhre und empfindsame Nervenstränge auf engem Raum nebeneinanderliegen, in einer geringeren Komplikationsrate auszahlt. Mittlerweile werden über 85 Prozent aller radikalen Prostataoperationen in den USA mit dem Robotersystemen ausgeführt, weltweit sind es an die 10 000 Operationen pro Woche.

Als einzige marktfähige Alternative gilt das System »MiroSurge« der DLR (Bilder oben). Es ist wesentlich kleiner und kann daher nicht nur an der Decke, sondern auch am Operationstisch befestigt und dort über eine intelligente Planungssoftware optimal platziert werden. Es vermeidet Kollisionen der Arme untereinander oder mit dem ärztlichen Personal. In die in zwei Richtungen abwinkelbaren Instrumente sind winzige Kraftsensoren integriert, die über entsprechende Geräte in den Handgriffen dem Chirurgen das Gefühl zurückgeben und daher erstmalig echte Telepräsenz im Operationssaal anbieten. Führende Chirurgen haben kritisiert, dass die deutsche Medizinindustrie diesen Trend verpasst hat, der dem Patienten ebenso wie dem Operator, der nicht mehr stundenlang vornübergebeugt stehen muss, wesentliche Vorteile bringt.

Auf die Dauer wird die roboterassistierte Chirurgie immer mehr Arbeitsfelder erobern. Insbesondere die Herzchirurgie bietet noch enormes Potenzial, weil mittels Bildverarbeitung Instrumente und Endoskop vollautomatisch mit der Herzbewegung mitgeführt werden können. Damit kann der Chirurg so arbeiten, als stünde das Herz still; so sieht es auf dem Bildschirm auch aus. Die Operation am schlagenden Herzen könnte zur Routine werden.

Auto und Roboter werden eins

Der Mensch gibt das grobe Ziel vor, daraufhin macht der Roboter die Feinarbeit, wobei der Mensch die Grenze zwischen grob und fein jederzeit verschieben darf: Dieses Konzept nams »shared autonomy«, das sich bereits in der Raumfahrt und der Chirurgie bewährt hat, findet zunehmend Anwendung auf eine Allerweltsaktivität wie das Autofahren. Die Gründe sind im Wesentlichen dieselben. Gewisse Dinge – im Auto vor allem schnelles und präzises Reagieren auf Gefahrensituationen – kann der Roboter einfacher besser; zudem weiß der Fahrer die Entlastung von Routineaufgaben zu schätzen.

Ungeklärt ist zurzeit die Frage, wer etwa bei einem Unfall unter »shared autonomy« für den Schaden verantwortlich ist. Aber diese Diskussionen werden den Einzug der Robotik ins Auto wohl nur vorübergehend aufhalten. Die US-Bundesstaaten Nevada und Kalifornien lassen als erste sogar vollau-

tomatisch fahrende Fahrzeuge im Straßenverkehr zu. Vor allem die Elektromobilität bietet die Chance für grundlegend neue Fahrzeugkonzepte. Dies zeigt unser »ROboMObil« (Bilder unten), in das Erfahrungen mit den Mars- und Mondfahrzeugen eingeflossen sind. Auf der Elektromobilitätsleitmesse EcarTec 2012 wurde es mit dem ersten Preis in der Kategorie Produktvision ausgezeichnet.

Das ROboMObil (ROMO) ist ein Elektroauto mit zwei hintereinander angeordneten Sitzen. In jedes der vier Räder sind Antrieb, Lenkung, Dämpfung und Bremse integriert. Insbesondere ist jedes Rad unabhängig von den anderen lenkbar, mit dem Effekt, dass das Auto zum Beispiel quer zur Fahrrichtung einparken oder auf der Stelle eine Pirouette drehen kann. Die Bremse für den Normalbetrieb ist eine »Rekuperationsbremse«, das heißt, sie verwandelt über den als Generator betriebenen Motor die Bewegungsenergie des Fahrzeugs in elektrische Energie zurück; für den Notfall kommt eine elektromechanische Bremse hinzu. Statt eines Lenkrads hat das ROboMObil einen Steuerknüppel, wie er zum Beispiel im Airbus verwendet wird: den in drei Raumrichtungen beweg-

lichen »Sidestick«. Die dritte Bewegungsrichtung nutzt man für Drehungen um eine vertikale Achse.

Seine Fahrbefehle erhält das ROboMObil entweder über den Sidestick, der auch von einem Operator aus der Ferne betätigt werden kann, oder vom »Bahnplaner«, einem Programm, das ein vorgegebenes Grobziel in Einzelaktionen umsetzt. Es folgt diesen Befehlen jedoch nicht unmittelbar. Vielmehr verschafft es sich zunächst ein Bild seiner Umgebung, indem es mit dem SGM-Algorithmus (Kasten S. 90/91) bis zu zehnmal pro Sekunde aus den Signalen der 18 rund um seinen Umfang verteilten Stereokameras eine Punktwolke errechnet (Bild links unten). Jeder Punkt steht für ein potenzielles Hindernis; aus dem Vergleich vergangener und gegenwärtiger Punktwolken erkennt das System, ob sich das Fahrzeug und ein externes Objekt auf Kollisionskurs befinden. Am Ende befolgt das Fahrzeug einen Befehl nur insoweit, als kein Konflikt mit der (durch die Punktwolke modellierten) Umgebung droht. Auf dem SGM-Algorithmus basiert auch der »Ausweichassistent«, mit dem bereits jetzt Daimler-Fahrzeuge der E- und der S-Klasse schneller als ein Mensch auf Gefahrensituationen reagieren sollen.

In einer Großstadt der Zukunft könnte sich der Mensch von der Notwendigkeit befreien, ein eigenes Auto zu besitzen – und immer wieder einen Parkplatz dafür finden zu müssen. Vielmehr fordert er bei Bedarf per Telefon oder Internet ein ROboMObil an. Das fährt aus dem nächstgelegenen Depot vollautonom mit mäßiger Geschwindigkeit (vielleicht 30 Stundenkilometer) und damit kalkulierbarer Sicherheit zum Standort des Kunden. Der steigt ein, fährt selbst oder »lässt fahren«, macht seine Erledigungen und gibt das Fahrzeug wieder frei, sowie er es nicht mehr benötigt. Dieses kehrt daraufhin in sein Depot zurück; bei Bedarf führt es der Depotverwalter per Fernsteuerung heim.

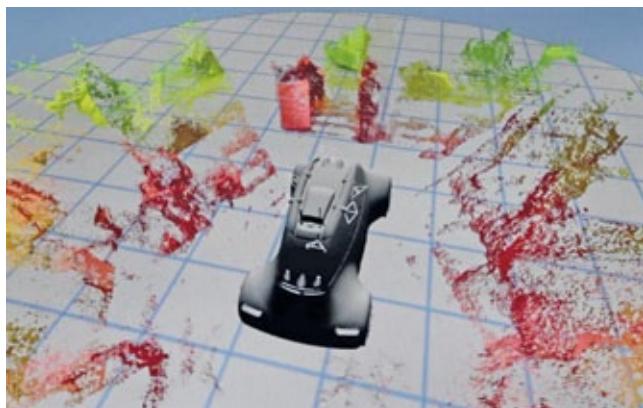
Autonome Fluggeräte

Die am Landfahrzeug perfektionierten Techniken finden in der Luft eine Fülle weiterer Anwendungen. Bereits jetzt gibt es unbemannte, ferngesteuerte Fluggeräte (unmanned aerial vehicles, UAVs) als kleine herkömmliche Flugzeuge mit Tragflächen oder als beliebig langsam bewegliche Luftschiffe, als Hubschrauber und als Multicopter – das sind Rahmen, in denen vier bis acht separat angesteuerte Propeller Auftrieb und Vortrieb zugleich erzeugen. Eine kleine digitale Standbild- oder Videokamera gehört gewissermaßen zur Standardausstattung. Damit beobachten die fliegenden Roboter zum Beispiel den Straßenverkehr, sicherheitsbedürftiges (Firmen- oder Kasernen-)Gelände oder gewaltsame Demonstrationen; mit Wärmebildkameras zählen sie den Wildbestand im Wald aus und finden Vermisste in unzugänglichen Bergregionen; sie überfliegen historisch und touristisch bedeutsame Gebäudekomplexe und Landschaften und erstellen, zum Beispiel mit Hilfe des SGM-Verfahrens, dreidimensionale Modelle davon.

In 22 Kilometer Höhe, wo wenig Wind herrscht, kann ein ultraleichtes Flugzeug, von Sonnenenergie gespeist, wochen-



BEIDE ABBILDUNGEN: DLR



Das ROboMObil (oben) konstruiert aus den Bildern seiner 18 rundum verteilten Kameras ein rudimentäres Bild seiner Umgebung in Gestalt einer Punktwolke (unten).



Mit seinem Roboterarm kann ein unbemannter Kleinhubschrauber in unwegsamem Gelände einem in Not Geratenen Hilfe bringen, Gegenstände wegschaffen oder sogar Hochspannungsleitungen reparieren.

oder monatelang über ein größeres Gebiet kreisen und zum Beispiel bei Erdbeben, Überschwemmungen oder Waldbränden permanent ein aktuelles Bild der Lage liefern. Dagegen kann ein Satellit bestenfalls alle anderthalb Stunden vorbeischauen.

Über das schlichte Beobachten hinaus wird der Flugroboter der Zukunft ins Geschehen eingreifen können (Bild oben): einem in Bergnot Geratenen Essen, Trinken und Verbandszeug bringen; Pflanzenschutzmittel gezielt versprühen; ein verdächtiges Objekt am Boden ergreifen und wegtragen; eine Hochspannungsleitung reparieren; Erdbebentrümmer wegräumen. Für den Katastropheneinsatz müssen die autonom fliegenden Systeme mit den am Boden laufenden oder fahrenden Roboterkollegen kooperieren. Am DLR werden derartige Szenarien mit kamerabestückten Multicoptern, Krabbbern (Bild S. 88 oben) und Rovern in einer Freianlage mit Kiesbett und Kratern getestet.

Natürlich hat diese Technik eine Fülle militärischer Anwendungen. Es ist auch kein grundsätzliches Problem, einen fliegenden Roboter so mit intelligenter Sensorik und Reaktionsfähigkeit auszustatten, dass er die Sicherheit des zivilen Luftverkehrs nicht beeinträchtigt. Von daher entbehrt es nicht einer gewissen Ironie, dass das EuroHawk-Projekt just daran gescheitert ist. Man kann davon ausgehen, dass in der Kriegsführung die Bedeutung bemannter Kampfflugzeuge stark abnehmen wird.

Robotik der Zukunft

In ihren Anfängen vor etwa 50 Jahren schöpften die Roboter ihre Kraft vor allem aus hydraulischen Antrieben. Diese sind heute weitestgehend von Elektromotoren abgelöst worden. Die Antriebs- und Sensortechnik wird in naher Zukunft weiter perfektioniert und vor allem leichter werden. Der Natur ähnliche bionische Muskeln auf Polymerbasis oder Gedächtnislegierungen haben dagegen bisher nicht den Durchbruch erzielt.

Weiter verbessерungsbedürftig sind die Erkenntnis- und Handlungsfähigkeit der Systeme. Der Roboter der Zukunft soll über zahlreiche Sensoren verschiedener Art seine Umwelt wahrnehmen, diese Informationen interpretieren und demgemäß handeln können. So müsste er zum Beispiel eine Türklinke als solche erkennen, wissen, ob er auf sie drücken soll, und das dann auch tun.

Das weite Feld der Robotik war schon immer anfällig für Spekulationen, geschürt vor allem durch Sciencefiction-Filme. Vor 20 Jahren gab es erhebliche Bedenken gegen die Industrieroboter als Jobkiller. Aber die Branchen, welche die weitaus meisten Roboter einsetzen, wie die Automobilindustrie, haben schwierige Jahre am besten überstanden, während andere, die das kaum tun, wie etwa die Unterhaltungselektronik, fast vollständig nach Asien abgewandert sind. Von daher hofft heute doch so mancher darauf, dass Produktionsassistenten, die mit dem menschlichen Werker kooperieren, endlich den Montagebereich der Robotik zugänglich machen und so verloren gegangene Produktion nach Deutschland und Europa zurückholen.

Auch die Ängste vor den sich selbstständig machenden Robotern sind heillos übertrieben. Wenn man sieht, wie langsam die Fortschritte trotz der weltweit ständig wachsenden Zahl von Roboterentwicklern in der Vergangenheit waren und wie wenig wirklich nützliche Helfer es bisher im Alltag gibt, dann wird deutlich, dass wir noch weit davon entfernt sind, menschliche Kreativität und Intelligenz nachzubilden. Oft reicht schon eine Veränderung der Umgebungsbeleuchtung aus, um Roboter zu verwirren.

Weiterhin wird es langsame, aber stetige Fortschritte geben. Zentrales Ziel der Robotikforschung ist und bleibt die echte Hilfe und Entlastung für Menschen. ~

DER AUTOR



Gerd Hirzinger promovierte 1974 an der Technischen Universität München und ist dort seit 1991 Honorarprofessor in der Fakultät für Informatik. Von 1992 bis 2012 war er Leiter des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik in Oberpfaffenhofen. In dieser Zeit hat er mit seinen Mitarbeitern die weltweit längste Erfahrung in der Fernsteuerung von Robotern im Erdorbit gesammelt. Er ist Träger aller hochrangigen internationalen Auszeichnungen in der Robotik; 1995 erhielt er den Leibniz-Preis, 1996 den Karl-Heinz-Beckurts-Preis und 2004 das Bundesverdienstkreuz am Bande.

WEBLINKS

Die Website www.robotik.de bietet in englischer und deutscher Sprache einen Überblick über die Arbeiten des DLR-Instituts für Robotik und Mechatronik einschließlich einer umfangreichen Liste wissenschaftlicher Arbeiten zu den Themen dieses Beitrags.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1205326

DIGITAL AM
SONNTAG
MONTAG
AM KIOSK

WIRTSCHAFT

Den Überblick nicht verlieren. Den **Ausblick** geben.



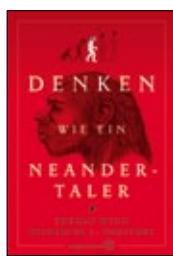
Sehen Sie die Welt der Wirtschaft mit anderen Augen. Mit objektiven Reportagen und präzisen Analysen bietet Ihnen FOCUS jede Woche Orientierung und interessante Perspektiven. Damit Sie das Wesentliche immer im Blick haben.

Jetzt per QR-Code zum digitalen Angebot von FOCUS.

Neu: Erleben Sie das FOCUS Magazin multimedial mit Augmented Reality.

Das Entscheidende im

FOCUS



Thomas Wynn, Frederick L. Coolidge
Denken wie ein Neandertaler
 Aus dem Englischen von Cornelius Hartz
 Philipp von Zabern, Darmstadt 2013.
 288 S., € 29,99

ANTHROPOLOGIE

Stoisch, risikotolerant und einfühlsam

Aus Knochen und Steinwerkzeugen lässt sich allerlei über das geistige Leben der Neandertaler erschließen.

Der provokante Buchtitel weckt sofort starkes Interesse – und gleichzeitig erhebliche Skepsis. Aus den spärlichen Hinterlassenschaften der Neandertaler soll man herauslesen können, wie sie gedacht haben? Kann das mehr sein als Paläopoesie und Paläophrenologie – zu Deutsch: Kaffeesatzlesen? Durchaus! Zwei renommierte Professoren von der University of Colorado in Colorado Springs liefern den Beweis. Der Archäologe Thomas Wynn hat als Forschungsschwerpunkte paläolithische Archäologie und kognitive Evolution, der Psychologe Frederick L. Coolidge Verhaltensgenetik und kognitive Archäologie. Ihr facettenreiches und alles andere als oberflächliches Sachbuch will »das geistige Leben der Neandertaler« darstellen, »soweit wir es

vom wilden Mann zum Kulturträger stilisiert. Auch neueste paläogenetische Daten belegen eine unerwartete Nähe zum modernen Menschen. Wo liegen dann die Unterschiede?

Die Autoren beschreiben zunächst die körperlichen Merkmale der »echten Kerle« aus dem »Volk« der Neandertaler und schildern ihr »hartes Leben« unter den Bedingungen der Eiszeit. Welche Einstellungen und Wahrnehmungsweisen haben sie unter diesen rauen und gefahrvollen Lebensumständen erworben? Nach Ansicht der Autoren sind das unter anderem Durchhaltevermögen (zum Beispiel bei Schmerzen, Müdigkeit und Hunger), Vorsicht (gegenüber Fremden) und Liebe (insbesondere Einfühlungsvermögen und emotionale Bindung an

Nach Ansicht der Autoren besaßen die Neandertaler Durchhaltevermögen, waren vorsichtig und liebevoll

heute anhand von Fossilien und archäologischen Funden rekonstruieren können«. Da frühere Arbeiten die Autoren als »lustvolle« Provokateure ausweisen, sind wissenschaftliche Grenzgänge zu erwarten.

In den mehr als 150 Jahren seit der Entdeckung des ersten Neandertaler-skeletts haben Anthropologen und Archäologen unseres fossilen Verwandten sukzessive vom Stereotyp des primitiven Höhlenmenschen befreit, ihn

Familienmitglieder) – Eigenschaften, die auch wir besitzen. Darin sehen die Verfasser ein Zeugnis »unserer gemeinsamen Menschlichkeit«.

Unterschiede gilt es also woanders zu suchen. Die Autoren analysieren im Detail Jagdverhalten und -technologie, Ressourcennutzung und Ernährung, Sozialverhalten und Verwendung von Symbolen sowie den Umgang mit Toten und finden neben zahlreichen Gemeinsamkeiten mit modernen Jägern

und Sammlern auch entscheidende Hinweise auf andere Denkweisen. So hätten die Neandertaler über ein hervorragendes Langzeitgedächtnis für die Erinnerung an gute Ressourcenstandorte und ein ausgeprägtes Wissen um ihre relativ kleinen Streifgebiete verfügt. Nachweisbar sind ihre erstaunlichen Fertigkeiten in der Herstellung von Jagdwaffen: Sie konnten Pfeilspitzen mit der Levallois-Technik von Steinen abschlagen, sie mit einem Schaft versehen und das Ganze mit Bitumen und Birkenpech zusammenkleben. Dagegen halten die Autoren – für mich unverständlich – wenig von den Holzspeeren des *Homo heidelbergensis*, die seit der diesjährigen Eröffnung des Forschungs- und Erlebniszentrums »paläon« in Schöningen das Museumspublikum begeistern. Jedenfalls schreiben sie den Neandertalern ein besseres Arbeitsgedächtnis zu als deren älteren Verwandten.

Dennoch stellen sie ihnen letztlich ein vernichtendes Zeugnis aus: »Die Neandertaler haben sich so gut wie nie etwas Neues einfallen lassen«, und zwar weil ihre »Theory of Mind«, die Fähigkeit, sich in die Bewusstseinsvorgänge anderer Personen hineinzuversetzen, nicht weit genug entwickelt gewesen sei. Ihre Sozialstruktur bestand aus Familiengruppen, in denen jeder jeden kannte; sie verfügten offensichtlich über eine sehr schwach ausgeprägte Arbeitsteilung, und ihre soziale Kognition war auf den erfolgreichen Aufbau und die Pflege sozialer Beziehungen in Kleingruppen ausgerichtet. Sie benötigten offenbar noch kein Kosten-Nutzen-Denken – und keinen Betrugsdetektor. Dieses Defizit könnte im Konkurrenzkampf mit unseren direkten Vorfahren in der jüngeren Altsteinzeit (Jungpaläolithikum) entscheidend gewesen sein, ebenso wie das weit gehende Fehlen von Symbolen, die als Indikator für Identität und Gruppenzusammensetzung galten.

Durchaus angreifbar ist die Annahme, dass die Neandertaler über keine symbolträchtigen Rituale und keine narrative Tradition verfügten. Warum sollten sie einander nicht alte Geschich-

ten am Lagerfeuer erzählt haben? Dass sie bereits eine direkte und handlungsorientierte Sprache hatten, ist zwar plausibel, wissenschaftlich bewiesen jedoch nicht. Und insbesondere in den Exkursen zum Humor (Kapiteltitel: »Kommt ein Neandertaler in die Kneipe ...«) sowie zum Schlafen und Träumen lehnen sich die Autoren weit aus dem Fenster, wie sie selbst zugeben. Hier erfährt man zwar Wissenswertes aus der Humor- und Schlafforschung am modernen Menschen, die Rückschlüsse auf den Neandertaler sind aber höchst spekulativ. Am Ende beschreiben Wynn und Coolidge die Per-

sönlichkeitsmerkmale eines durchschnittlichen Neandertalers als »pragmatisch und auch skrupellos, wenn nötig; stoisch; risikotolerant; empathisch und einfühlsam; neophobisch; einfallslos, dogmatisch und unflexibel; fremdenfeindlich; direkt, aber lakonisch« – und zwar im Konjunktiv: So könnte er getickt haben!

Die ideenreichen Gedankenexperimente zum Aufwachsen eines Neandertalers in der modernen Welt und umgekehrt sind beispielhaft für die Leichtigkeit, mit der angloamerikanische Sachbücher wissenschaftlichen Anspruch und Verständlichkeit mit

einer gehörigen Portion augenzwinkerndem Humor verbinden. Zahlreiche kleine Rechtschreibfehler und Übersetzungsstilblüten (»Durch schieres Glück überlebte das Skelett von Kebara 2, wenn auch ohne Kopf und untere Extremitäten«) zeigen, dass der deutsche Verlag sich etwas mehr Mühe hätte geben sollen.

Ein kurzweiliges Buch, dessen Lektüre jedoch viel Kritikfähigkeit erfordert.

Winfried Henke

Der Rezensent war bis zu seiner Pensionierung 2010 Professor für biologische Anthropologie an der Universität Mainz.



Lawrence M. Krauss
Ein Universum aus Nichts
... und warum da trotzdem etwas ist
 Aus dem Amerikanischen von Helmut Reuter
 Albrecht Knaus, München, 2013.
 252 Seiten, € 19,99

KOSMOLOGIE

Die Freude an der Erkenntnis

Ein begeisterter Forscher erzählt, wie sich das Wissen über das Universum und seinen Ursprung entwickelt hat.

Von nichts kommt nichts? Falsch: In der Natur ist es nicht nur möglich, dass aus dem Nichts etwas hervorgeht, sondern völlig normal. Ständig entstehen aus dem leeren Raum Elementarteilchen – ohne besonderen Grund. Auf ähnliche Weise könnte unser Universum vor knapp 14 Milliarden Jahren aus dem Nichts entsprungen sein, ganz ohne Schöpfer. Wie die Geschichte des Kosmos begonnen haben könnte, und was wir über seine Entwicklung und Zukunft wissen, erzählt der amerikanische Kosmologe Lawrence M. Krauss in seinem aktuellen Buch auf spannende und amüsante Weise.

Den Schwerpunkt legt er auf den naturwissenschaftlichen Erkenntnispro-

zess: Woher wissen wir eigentlich, was wir wissen, und wie können wir prüfen, ob das auch stimmt? Detailliert erklärt er, wie Forscher auf das heute allgemein akzeptierte Urknallmodell kamen und welche Beobachtungen für seine Richtigkeit sprechen. Außerdem erfahren wir, welche Methoden Wissenschaftler anwenden, um die Geometrie des Universums zu vermessen, und warum man heute davon ausgeht, dass ein großer Teil des Kosmos aus Dunkler Materie und Dunkler Energie besteht. Der Autor beschreibt, auf welchen Annahmen wissenschaftliche Theorien beruhen, und legt ihre Fehlerquellen und Wissenslücken offen. Dabei schont er weder sich noch andere Wissen-

schaftler und geizt nicht mit ironischen Seitenhieben auf Religionen und esoterische Welterklärungen.

Krauss' Buch ist ein leidenschaftliches Plädoyer für die Naturwissenschaften und die Freude an der Erkenntnis. Jedem blinden Glauben, insbesondere an einen persönlichen Schöpfer, erteilt er eine klare Absage, die er naturwissenschaftlich und philosophisch begründet. Insbesondere spricht er sich gegen den Kreationismus aus, dessen Vertreter die Bibel wörtlich auslegen und wissenschaftliche Erkenntnisse verleugnen. Sein Vortrag »A Universe from Nothing«, auf dem das Buch basiert, hat in den USA für hitzige Diskussionen gesorgt. Dort haben Kreationisten großen Einfluss. Auch hier zu Lande ist das Buch hochaktuell angesichts der Hochkonjunktur von esoterischen Weltbildern.

Die Vorstellung, dass hinter allem ein Sinn stecke, ist tief im menschlichen Denken verankert. Doch fehle ihr jede Grundlage, wie der Autor erklärt: Da Teilchen ständig und ohne jeden Grund aus dem leeren Raum heraus entstehen, sei es physikalisch gesehen vielleicht gar nichts Besonderes, dass das Universum mit uns darin existiere. Zumal in ferner Zukunft wahrscheinlich jede Information darüber, dass es die Menschheit jemals gegeben hat, verschwunden sein werde. Somit kann unsere Existenz laut Krauss keinen tie-

feren Sinn haben. Genau das eröffne uns aber die Möglichkeit, unserem Leben selbst Bedeutung zu geben.

Abschließende Antworten über den Ursprung aller Dinge finden sich in diesem Buch nicht. Doch der Autor erläutert, warum die Existenz des Universums mit modernen wissenschaftlichen Theorien gut vereinbar und plausibel ist. Selbst die Frage, wie die Naturgesetze entstanden sind, können moderne Theorien der Quantengravitation möglicherweise beantworten.

Krauss' Begeisterung ist fühlbar. Mit Gedankenspielen und Beispielen aus dem Alltag versucht er, die Themen zugänglich zu machen. So ist schon die Definition, was man unter »Nichts« zu verstehen hat, weitaus schwieriger, als man sich das zunächst vorstellt. Philosophische Ausschweifungen regen dazu an, die eigenen Vorstellungen zu

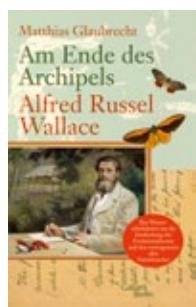
überdenken – auch wenn man manchen Argumenten und Schlussfolgerungen des Autors nicht zustimmt. Im Gedächtnis bleiben die persönlichen Anekdoten und unkonventionellen Vergleiche, die er anführt: Da werden Elementarteilchen zu Engeln und Sterne zu Erlösern der Menschheit. Leider ging ein Großteil des ursprünglichen Wortwitzes bei der Übersetzung verloren, und nicht alle Metaphern sind hilfreich. Gut getan hätten dem Werk zudem einige zusätzliche Bilder, denn die wenigen Schwarz-Weiß-Grafiken sind zwar nützlich, aber nicht unbedingt ansprechend.

So fesselnd das Buch geschrieben sein mag, es spricht wohl leider nur Menschen an, die naturwissenschaftliche Vorkenntnisse auf Abiturniveau und eine gute Portion Neugier mitbringen. Auf Formeln verzichtet Krauss

zwar, doch neigt er mitunter zu umständlichen Formulierungen und schwer verständlichen Abstraktionen. Zusammenfassungen und Hervorhebungen, ein Glossar oder ein Stichwortverzeichnis wären hilfreich gewesen. Auch eine Literaturliste fehlt. All das macht es Lesern mit wenig Berührung zur Wissenschaft schwer, dem Text zu folgen. Das ist schade, denn das Thema besitzt durchaus Potenzial, eine breitere Öffentlichkeit anzusprechen. Doch der Mut, sich an dieses Buch zu wagen, wird belohnt: Neugierige Leser, die nicht erwarten, alles sofort zu verstehen, wird das Buch zum mehrfachen Lesen und zu tief gehenden Diskussionen inspirieren.

Manuela Kuhar

Die Rezensentin ist Physikerin und Wissenschaftsjournalistin in Braunschweig.



Matthias Glaubrecht
**Am Ende des Archipels –
Alfred Russel Wallace**
Galiani, Berlin 2013.
442 S., € 24,99

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Der genügsame Zweite

Alfred Russel Wallace gilt als Zweitentdecker der natürlichen Selektion – nach dem berühmten Charles Darwin. Er war mit dieser Rolle zufrieden. Nichtsdestoweniger wirft ein neues Buch Fragen auf: Handelte Darwin immer ganz korrekt?

Nied gilt als verwerfliche Empfindung; so zählt er seit alters her zu den Hauptsünden der römisch-katholischen Kirche. Tatsächlich führt er mitunter zu hässlichen Auswüchsen, auch in der Wissenschaft. Ein Beispiel hierfür ist der Streit zwischen den amerikanischen Paläontologen Othniel Charles Marsh (1831–1899) und Edward Drinker

Cope (1840–1897). Beide wollten als Alleinentdecker so berühmter Dinosaurierarten wie *Allosaurus*, *Diplodocus* oder *Triceratops* in die Geschichte eingehen. Um dies zu erreichen, stritten sie sich gegenseitig jeden Erfolg beim Rekonstruieren der »Schreckensechsen« ab. Keiner erkannte die wissenschaftliche Leistung des anderen an,

von Wertschätzung ganz zu schweigen. Ihre heftigen Debatten, die durchaus auch persönlich wurden, waren in der damaligen Öffentlichkeit weithin unter dem Begriff »Bone Wars« (Knochenkriege) bekannt.

In seinem neuen Sachbuch »Am Ende des Archipels« zeigt der Berliner Zoologe und Evolutionsforscher Matthias Glaubrecht, dass es auch anders geht. Darin befasst er sich mit dem britischen Biologen Alfred Russel Wallace (1823–1913). Dieser musste mit 14 Jahren die Schule verlassen, um seinen Lebensunterhalt zu verdienen, und konnte nie eine Universität besuchen. Dennoch machte er sich einen Namen als Biodiversitätsforscher, Systematiker, Zoogeograf, evolutionärer Anthropologe, Begründer der Astrobiologie und der neodarwinschen Theorie sowie als Humanist und Freidenker.

Im Alter von 35 Jahren hatte Wallace, der damals auf den Molukken lebte, eine wichtige Einsicht bezüglich der Artentransformation, heute als Evolution bezeichnet. Im Fieberrausch kam er darauf, dass sämtliche Veränderungen, die für die Anpassung der Arten an ihre Umwelt erforderlich sind, durch Überleben der besser geeigneten Individuen



DE2300c5: a potential therapeutic treatment for hyponatremia

[Author information provided by MSC]

Patients with loss-of-function mutations in *11 β -HSD2* (11 β -hydroxysteroid dehydrogenase type 2) are characterized by sodium retention. The direct inhibition of this enzyme therefore represents a potential therapy for chronic hyponatremia, which is often present among elderly patients. To identify agents with the ability to bind to this enzyme, we used a virtual screen of several compound libraries. We used a newly developed algorithm for detecting compounds with the required binding and to predict their biological and structural characteristics. The top candidate compounds identified in this screen were evaluated for their ability to interact with recombinant human 11 β -HSD2. One compound, DE2300c5, strongly bound to 11 β -HSD2 without affecting 17 β -HSD2. Binding was confirmed *in vitro* using HEK293 cells, and increased levels of DE2300c5 increased intracellular sodium levels in renal cortex cells. It is clear from these findings that DE2300c5 administration. The findings of the present study indicate that DE2300c5 is a potential treatment for hyponatremia, which is a common cause of electrolyte imbalances.

INTRODUCTION

11 β -Hydroxysteroid Dehydrogenase (11 β -HSD2) catalyzes the reversible reaction of biologically active steroid hormone cortisol to cortisone (Fig. 1). This reaction is co-factor dependent, as it

Nature-standard editing and advice on your scientific manuscripts

MSC's editors can get to the crux of your paper with their detailed edits and incisive comments thanks to their advanced understanding of journal publishing — each paper is assessed by an editor with a PhD and experience of professional editing at a high-impact journal.

The service also includes a written report containing:

- Constructive feedback and helpful advice
- A discussion of the main issues in each section
- Journal recommendations tailored to the paper

Our editors understand what it takes to get published in high-impact journals. Get them to work on your manuscript today!

msc.macmillan.com

*Nature Publishing Group editorial and publishing decisions are independent of MSC services.



Julie Coquart

Die Welt von innen. Faszination Mikrokosmos

Aus dem Französischen von Regine Schmidt

Ullmann, Potsdam 2013. 208 Seiten, € 39,90

Die Wissenschaftsjournalistin Julie Coquart hat das Beste zusammengesucht, was die Archive zum Thema Mikrofotografie hergeben. Bei vielen Bildern kommt man ohne Erklärung nicht darauf, worum es sich überhaupt handelt. Was aussieht wie zahllose dicht an dicht gepflasterte Zungen, ist – eine Zunge: Jene der Katze nämlich. Und die Behälter, aus denen der Salbei seine duftenden Ölträpfchen beim Zerreiben frei gibt, gleichen alten Straßenlaternen. Wild zerklüftete »Gebirgsformationen« entpuppen sich als Raspelzähne einer gewöhnlichen Gartenschnecke. Leider verschwindet bei doppelseitigen Bildern oft das Schönste im Bund. Und die poetischen französischen Texte klingen im Deutschen ziemlich albern – wofür die Übersetzerin allerdings nichts kann.

ALICE KRÜSSMANN



Karl Kruszelnicki

Warum Enten Dialekt sprechen und andere kuriose Phänomene aus der Wissenschaft

Aus dem Englischen von Friedrich Gries

Piper, München 2013. 238 S., € 9,99

Haben Goldfische ein Gedächtnis? Sind Tampons gefährlich? Und war Einstein wirklich ein Schulversager? Fragen rund um die Wissenschaft, auf die Karl Kruszelnicki vergnügliche Antworten findet, wobei er hartnäckige Mythen geschickt entlarvt. Der Autor ist eingefleischter Wissenschaftscomedian und Professor für Physik an der University of Sydney. Diese Kombination macht sein Buch erst richtig lesenswert. In jedem der 52 Kapitel präsentiert Kruzelnicki einschlägige Forschungsergebnisse und ergänzt das Ganze mit zahlreichen Quellenangaben, so dass man sich beim Lesen nicht nur amüsiert, sondern auch weiterbildet.

MIRIAM BERGER



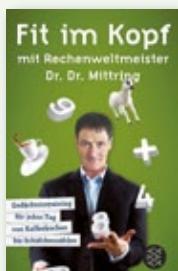
John Capener

Bionik Revolution. Die besten Ideen der Natur

polyband, München 2013. Laufzeit: 159 Minuten, DVD € 17,99, Blu-ray € 19,99

Die Natur war schon oft Lehrmeister der Ingenieure. Das belegt diese dreiteilige Serie mit faszinierenden Aufnahmen aus der Natur und aus Laboren. Die kurzweiligen Anekdoten punkten eher mit Bildgewalt und Vielfalt denn mit Tiefgang. Wenn etwa ein Roboter mit Schnurrhaaren unbeholfen umhertastet und als Beispiel für die »Bionikrevolution« nicht so recht überzeugen will, legt der Film mit Bildern eines Militärtransporters nach, der autonom durchs Gelände rast. Dessen Orientierungssystem als »unsichtbare Tasthaare aus Laserlicht« zu bezeichnen, verkennt, dass es zwar technische Errungenschaften gibt, die vage Entsprechungen in der Natur haben – es sich aber nur dann um Bionik handelt, wenn der Natur abgeschaute Prinzipien gezielt übernommen werden. So vermischt sich in dem Film manchmal, was der Erfindungskraft des Menschen und was der Evolution geschuldet ist. Jedoch gelingt es den Episoden sehr gut, Ehrfurcht vor beidem zu vermitteln.

MIKE BECKERS



Gert Mittring

Fit im Kopf mit Rechenweltmeister Dr. Dr. Mittring. Gedächtnistraining für jeden Tag von Kaffeekochen bis Schäfchenzählen

Fischer Taschenbuch, Frankfurt am Main 2013. 233 S., € 8,99

Gert Mittring, seit Jahren Weltmeister im Kopfrechnen, bringt eine Engelsgeduld für die Leser auf: Er macht ihnen das schriftliche Dividieren aus der Grundschule mehrfach in allen Einzelheiten vor, verpackt die sorgfältig nach Schwierigkeitsgrad geordneten Probleme in Textaufgaben mit Lebensweltbezug und lässt es an aufmunternden Nebenbemerkungen (»ich war auch einmal Schlusslicht in Englisch«) nicht fehlen. Gegen Ende bringt er einige interessante Tricks, um die Teilbarkeit großer Zahlen durch »schwierigere« Primzahlen wie 17 oder 19 zu überprüfen. Und eine unkonventionelle Form des Malnehmens, das »Überkreuzmultiplizieren«, lässt zumindest erahnen, wie der Meister die monumentalen Wettbewerbsaufgaben löst, ohne ein einziges Zwischenergebnis zu notieren. Aber der Weg dorthin ist beängstigend weit, zum Gedächtnistraining erfährt man fast nichts, und das Buch bietet wirklich nur einen ersten Einstieg.

CHRISTOPH PÖPPE

hervorgebracht werden – ein Gedanke, der auf das Prinzip der natürlichen Selektion hinausläuft. Wallace schrieb seine Ideen nieder und sandte sie 1858 an den 14 Jahre älteren Charles Darwin (1809–1882). Dieser stellte fest, dass Wallaces These seiner eigenen Theorie, an der er bereits seit 20 Jahren gearbeitet hatte, stellenweise sehr ähnelte. Deshalb fühlte er sich dazu gedrängt, sein Hauptwerk »On the Origin of Species« (Über die Entstehung der Arten) zu veröffentlichen, was er im darauf folgenden Jahr auch tat. Zuvor jedoch veranlasste Darwin eine gemeinsame Publikation von Wallaces Abhandlung und seinen eigenen Schriften. Darin wurde die Prioritätenfrage klar beantwortet: Darwin trat als Erstentdecker des Selektionsprinzips in der Natur auf, während Wallace die Position eines Mitentdeckers zugewiesen bekam.

Glaubrecht beschreibt das Leben dieses »Mannes im Schatten von Charles Darwin« in seinem brillant verfassten Buch ausführlich. Er schildert zahlreiche Episoden, die in bisherigen Darstellungen gefehlt haben. Seinen Schwerpunkt legt er auf Wallaces frühe Jahre, also die Zeit bis etwa 1862. Detailliert geht er auf die »zweifache Entdeckung der Evolution durch Wallace und Darwin« ein. Nach sorgfältiger Analyse der Dokumente kommt er zu dem Schluss, Darwin habe sich nicht ganz korrekt verhalten. Der berühmte Forscher habe Wallaces Manuscript zu einem früheren Zeitpunkt bekommen, als er zugab, und Inhalte daraus abgeschrieben, um sein Hauptwerk vor der Veröffentlichung nachzubessern. Das zielt ein wenig in die Richtung einer populären »Verschwörungstheorie«, wonach Darwin sich als Erstentdecker der natürlichen Selektion in den Vordergrund gedrängt habe.

Dieser These ist entgegenzuhalten, dass Darwin bereits zwei Jahrzehnte zuvor das Selektionsprinzip entdeckt und dokumentiert hatte, und dass Wallace zeitlebens die Priorität von Darwin akzeptierte, wie er etwa in seinem Bestseller »The Malay Archipelago« (1869) zum Ausdruck brachte. Die neidlose Anerkennung des Älteren zieht sich

durch Wallaces gesamte zweite Lebenshälfte. Er betonte sie erneut, als er im Jahr 1908 die »Darwin-Wallace-Medaille« verliehen bekam. Wallace stellte Darwin in zahlreichen Schriften etwa mit dem Physiker Isaac Newton (1642–1727) auf eine Stufe. Hätte er sich hintergangen gefühlt, so wäre er spätestens nach Darwins Tod in der Lage gewesen, dies offen zu artikulieren – was er nicht tat.

Unabhängig davon, ob man Glaubrechts These zuneigt oder nicht: Sein Buch ist jedem zu empfehlen, der sich für Darwin, Wallace und die Entdeckung der natürlichen Selektion interessiert. Es kann dazu beitragen, Wal-

lace einen ebenbürtigen Platz neben Darwin einzuräumen. Heute gibt es eine »Darwin-Buchindustrie«, aber Wallace, der zeitlebens anstellunglos gebliebene Autodidakt mit spiritistischer Nebenbeschäftigung, führt noch immer ein Schattendasein. Er ist ein Vorbild für Ehrlichkeit und Fairness in den Naturwissenschaften, während andere – etwa Othniel Charles Marsh und Edward Drinker Cope – ein trauriges Beispiel dafür abgeben, wie man sich als Forscher *nicht* verhalten sollte.

Ulrich Kutschera

Der Rezensent ist Professor für Biologie an der Universität Kassel und in Stanford (Kalifornien).



Joachim Radkau, Lothar Hahn

Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft

Oekom, München 2013.

413 S., € 24,95

TECHNIK UND WIRTSCHAFT

Knietief im Atomsumpf

Joachim Radkau und Lothar Hahn beschreiben detailliert die Entwicklung der deutschen Atomwirtschaft. Ein Abgesang auf eine überholte Technik.

Mit Joachim Radkau und Lothar Hahn haben zwei Experten zusammengefunden, die einen ungewöhnlich genauen Blick auf die Entwicklung der deutschen Atomgeschichte werfen können. Hahn, von Haus aus Physiker und bis zu seiner Pensionierung technisch-wissenschaftlicher Leiter der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, bringt in das Buch »Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft« den physikalisch-technischen Expertenblick ein. Radkau, Wissenschafts- und Technikhistoriker sowie Kenner der deutschen Atomwirt-

schaft, liefert die geschichtliche Perspektive. Er hatte sich bereits 1980 mit einer Studie über »Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft« habilitiert. Drei Jahre später erschien sein gleichnamiges, viel beachtetes Sachbuch.

Heute sind sich die Autoren sicher, dass der Fall der deutschen Atomwirtschaft besiegelt ist und Radkaus 30 Jahre altes Werk als »Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft« fortgeschrieben werden kann. In der Einleitung zitiert Radkau ausführlich die positive Rezeption seiner Habilitations-

schrift. Ein Eigenlob, das nicht nötig gewesen wäre, da seine sachliche Kompetenz ohnehin deutlich durchscheint. Nach Lektüre des 400-seitigen Werks kennt der Leser alle wichtigen Protagonisten, alle Weichenstellungen und zum Teil bizarre Entscheidungen und Zufälligkeiten der deutschen Kerntechnik, von der frühen Entwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg bis zum so genannten Atomausstieg.

Laut den Autoren war die Entwicklung der Atomwirtschaft von Unkenntnis, Heimlichtuerei sowie offener und verdeckter Interessenpolitik geprägt. Ein schwer zu durchdringendes Geflecht, in dem mitnichten nur sachliche Erwägungen eine Rolle spielten. Radkau und Hahn entwirren es – ein großes Verdienst. Sie sind sich sicher: Zwar wurde der hiesigen Atomwirtschaft durch äußere Anlässe (die Katastrophen von Tschernobyl und Fukushima) der Todesstoß versetzt. Die eigentlichen Ursachen für ihren Niedergang liegen aber in der Atomwirtschaft selbst. Sie seien in einer überstürzten technischen Entwicklung und mangelhaften Informationspolitik zu sehen, die keine Möglichkeiten für Kurskorrekturen und offene Diskussionen der technischen Probleme boten.

Aber wie sollten diese auch möglich gewesen sein in einer Zeit, als übersteigerte Erwartungen eine heute nicht mehr nachvollziehbare Atomeuphorie auslösten? Da glaubten Vertreter der großen Energiekonzerne tatsächlich, dass Erdöl schon bald keine Rolle mehr als Energieträger spielen würde. Führende Politiker befürchteten, den technischen Anschluss zu verlieren und in eine »koloniale Abhängigkeit« von Atomnationen zu geraten. Man träumte von Kernenergie-Motoren für Lokomotiven und glaubte, die bis heute nicht realisierten Kernfusionskraftwerke binnen zweier Jahre (!) als Energiequelle nutzen zu können. All dies beschreiben Radkau und Hahn sehr eindrucksvoll.

Deutlich wird auch, wie sehr die Entwicklung in Deutschland von außen gesteuert wurde. Ein Beispiel hierfür ist die Einführung des in den USA verwen-

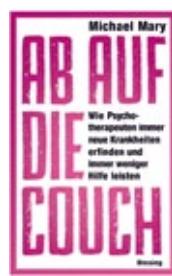
deten Leichtwasserreaktors in der Bundesrepublik – ohne, dass hierfür seinerzeit rationale Argumente vorgelegt hätten. Angesichts der großen Rolle, die die Vereinigten Staaten dabei spielten, wäre ein separates Kapitel wünschenswert gewesen. Dort hätten die Autoren die Geschichte der Kernenergie in den USA nachzeichnen können, ähnlich wie sie das im Hinblick auf die ehemalige DDR tun. Doch vermutlich hätte dies den Rahmen des ohnehin sehr ausführlichen Werks gesprengt.

Insgesamt ist »Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft« verständlich geschrieben und gut zu lesen, allerdings eher erweiterte Habilitationschrift als fesselnder Krimi. Womit sich die Frage stellt, an wen es sich in erster

Linie richtet. Jedenfalls muss man nicht Wirtschafts- und Technikgeschichte studiert haben, um aus dem Buch einen Gewinn zu ziehen. Das Werk hilft, gegenwärtige Entwicklungen der Energiepolitik besser zu verstehen und aus den Fehlern der Vergangenheit zu lernen. Ganz abgeschlossen ist der »Fall der Atomwirtschaft« laut den Autoren noch heute nicht. Sie schließen ihr Buch mit einer Warnung: Es zeichne sich ab, dass in Zukunft nicht genügend Fachpersonal bereitstehen werde, um die noch bestehenden Reaktoranlagen zurückzubauen.

Tim Haarmann

Der Rezensent arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Bremen.



Michael Mary
Ab auf die Couch!
*Wie Psychotherapeuten immer neue Krankheiten
erfinden und immer weniger Hilfe leisten*
 Blessing, München 2013.
 269 S., € 17,99

PSYCHOTHERAPIE

Das Leid mit den Leitlinien

Michael Mary schimpft gar nicht auf die Psychotherapeuten, sondern auf die Bedingungen, die ihnen die Arbeit erschweren.

Burnout ist heutzutage eine Allerweltskrankheit. Es gibt ausgefallenere psychologische Diagnosen. »Posttraumatische Verbitterungsstörung«, »Atmosphere-related Syndrome« oder »Megaloblastic Madness« sind Beispiele für nagelneue Abweichungen von der Normalität, die der Leipziger Psychologieprofessor Elmar Brähler gerade in einem Lexikon über »Moderne Krankheiten« zusammenfasst.

Gleichwohl kränkt der Titel des neuen Buchs von Michael Mary: Abgesehen davon, dass die allermeisten Psychotherapeuten heute gar keine Couch mehr in ihrer Praxis haben, hat kaum

einer von ihnen über ein leeres Wartezimmer zu klagen, im Gegenteil: Bundesweit muss ein Patient zwischen vier und zwölf Monaten auf ein Erstgespräch warten. Es sitzen genug ausgebildete Psychologen in den Startlöchern, aber das Gesundheitssystem erteilt einfach keine neuen Kassenzulassungen. Die approbierten Behandler haben also wenig Bedarf, noch weitere Störungen zu erfinden. Überdies dürfen sie nur psychische Krankheiten behandeln, die auch in der ICD-10 enthalten sind. In dieses international gebräuchliche Klassifikationssystem hineinzukommen ist alles andere als

einfach, es bedarf langer und umfassender Studien in Hinblick auf Diagnose und Differenzialdiagnose. Auf der Homepage des Deutschen Instituts für Medizinische Dokumentation und Information finden sich dutzende Anträge für neue Krankheiten – von denen kaum einer vom Zulassungsgremium akzeptiert wird.

Gut gefallen hat mir Marys Metapher, dass psychische Probleme stets etwas »Vages« sind, so dass sie sich mit normierten diagnostischen Bezeichnungen nicht wirklich treffend erfassen lassen. Dies entspricht meiner eigenen Erfahrung. Krankenkassen bezahlen die Behandlung nur, wenn jemand »krank« ist. Also verlangt das computergesteuerte Abrechnungsprogramm die Eingabe einer Diagnose – und zwar sobald man beim Erstkontakt die Krankenversicherungs-Chipkarte in das Lesegerät schiebt, also lange bevor man mit dem Patienten auch nur drei Sätze gesprochen hat. Schiebt man die Eingabe einer Diagnose wochenlang vor sich her, weil nebulös bleibt, was der Patient eigentlich hat, weigert sich das Programm am Quartalsende, die Abrechnung zu erstellen. Also ist der Therapeut gezwungen, jedem eine psychopathologische Diagnose aufzustempeln.

An dieser Stelle muss ich zähneknirschend feststellen, dass Mary durchaus Recht hat, wenn er die Medzinisierung der Psychologie angreift, denn auch ich habe in diesem Absatz den Begriff »Patient« unkritisch benutzt: Ist wirklich jeder Mensch, der zum Psychotherapeuten geht, ein Kranke? Oder braucht er einfach nur fachliche Hilfe in einer Lebenskrise?

In einigen Punkten ist »Ab auf die Couch!« schon nicht mehr aktuell. So wurde inzwischen die Neuropsychologie als weitere Methode in den Kreis der von den Richtlinien anerkannten Therapien aufgenommen, und nach neuestem Urteil haben PiAs (Psychotherapeuten in Ausbildung) in ihrem Praxisjahr ein Recht auf Bezahlung. Mary hat zwar gut recherchiert, doch die Vorgaben unseres Gesundheitssystems ändern sich so rasch, dass der rasendste Reporter nicht mitkommt.

Die Stelle, an der Mary nachweist, dass Psychotherapeuten immer weniger Hilfe leisten, sucht man vergeblich in dem Buch. Und eigentlich will er auch gar nicht den bösen Psychologen eins auswischen – schließlich ist er selbst einer. Vielmehr stellt er die schwierigen Bedingungen in den Vordergrund, unter denen sie dennoch gute Arbeit zu leisten versuchen.

Mary studierte Sozialpädagogik, arbeitet seit 1980 als Paar- und Individualberater und machte für NDR und SWR Paarberatungssendungen. Gemeinsam mit seiner damaligen Frau, der Psychotherapeutin Henny Nordholt, führte er zahlreiche Seminare zu Persönlichkeitsentwicklung, Vergangenheitsbewältigung und Zukunftsgestaltung durch. Er schrieb etliche weitere Bücher mit wohlklingenden Titeln wie »Wer etwas ändern will, braucht ein Problem« oder »Wie Sie den passenden Partner finden, ohne ihn zu suchen«. Mit der »Erlebten Beratung« entwickelte er sogar eine eigene Methode, die im Wesentlichen auf der Annahme beruht, dass die Reaktionen, die Menschen in schwierigen Lebenssituationen entwickeln, grundsätzlich Hinweise zu deren Bewältigung enthalten. Psychische Probleme erklärt er aus sozialpsychologischen Rollenkonflikten und behandelt sie mit Methoden, die stark die Gestalttherapie erinnern.

Auf die Vorstellung dieses Ansatzes muss der Leser allerdings bis zum hinteren Drittels des Buchs warten, denn Mary kritisiert zunächst – und zwar nicht ganz zu Unrecht – das bestehende System. Er schildert das enge Korsett, in dem den staatlich zugelassenen Psychotherapieverfahren in einem Gemenge von (berufs-)politischen Interessen kaum Luft zur kreativen Entfaltung bleibt. Seit mehr als zwei Jahrzehnten verweigern die Krankenkassen sinnvollen und durchaus fundierten Behandlungsmethoden wie etwa der systemischen Therapie und der Gesprächspsychotherapie die Zulassung, während zugelassene Methoden sich ihre Pfründe sichern, dort aber die Anwendung von Elementen aus genau den abgelehnten Verfahren emp-

fehlen und hemmungslos in ihren eigenen Fundus aufsaugen. Mit der Schematherapie übernimmt die Verhaltenstherapie inzwischen sogar unzählige Elemente aus der jahrzehntelang bekämpften Psychoanalyse.

Akribisch beschreibt Mary, woran die psychotherapeutische Behandlung in dem Land der formularsüchtigen Bürokraten typischerweise krankt. Eines seiner vielen Beispiele bezieht sich auf Leitlinien, von manchen Insidern als »Leid-Linien« geschrieben. Ähnlich wie eine Qualitätsnorm für Plastikbierflaschen sollen sie medizinische Abläufe standardisieren und verbindlich regeln, so dass jeder Patient mit einer bestimmten Störung bundesweit exakt dieselbe Diagnostik und Therapie bekommt. Ein edles Ziel – und gerade den Novizen unter den Behandlern geben diese Leitlinien durchaus eine hilfreiche Orientierung an die Hand. Aber wer ihnen nicht gefolgt ist, kann haftbar gemacht werden!

Unter den Leitlinien blühen so exotische Gewächse wie »Zahnärztliche Sanierung vor Herzklappenersatz«, »Leitlinie Human Biomonitoring« oder »Leitlinie Grübchenversiegelung«. Inzwischen gibt es auch für die Psychotherapie diverse standardisierte Therapieprogramme, etwa für Angsterkrankungen oder Depressionen, die Sitzung für Sitzung wortgenau festlegen, was dem Patienten beigebracht werden muss. Damit soll es möglich sein, eine Erkrankung in einer genau festgelegten Stundenzahl zu erledigen. Nur eine Leitlinie, die fordert, individuell auf die Bedürfnisse des Patienten einzugehen, gibt es bisher nicht.

Abgesehen von dem vielleicht etwas irreführenden Titel hat Mary mit seinem Buch im Kern Recht. In vielerlei Hinsicht ist die psychotherapeutische Behandlung in diesem Land schon lange selbst zum Patienten geworden. Und an dieser Stelle stehe ich auch zu dem Begriff »Patient«.

Erich Kasten

Der Rezensent ist Professor für Psychologie an der Medical School Hamburg und approbiert Verhaltenstherapeut.

AUS UNSEREM LESERSHOP

BILDKALENDER »HIMMEL UND ERDE 2014«

Sterne und Weltraum präsentiert 13 überragende astronomische Motive von Wissenschaftlern und von Amateurastronomen: Vom Polarlicht über die ISS und den Asteroiden Vesta geht es zu Gasnebeln, dem Milchstraßenband, einem Kugelsternhaufen bis hin zu fernen Galaxien. Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2014 und erläutert ausführlich alle abgebildeten Objekte. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm.

Blättern Sie im Internet schon jetzt durch die Seiten.

€ 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order **€ 27,-**
inkl. Inlandsversand.



JAHRGANGS-CD-ROM SDW 2012

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das Spektrum.de-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. Spektrum.de und das Suchregister laufen nur unter Windows.

Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-943702-22-4



KALENDER FÜR STERNFREUNDE 2014

Ahnerts Astronomisches Jahrbuch erscheint nun als **Kalender für Sternfreunde** mit überarbeiteter Struktur im DIN-A-4-Format. Die Herausgeber und Autoren liefern alle grundlegenden Informationen über das Himmelsjahr 2014 und geben eine Fülle von praktischen Tipps für die Beobachtung astronomischer Phänomene. Wer die vielfältigen Erscheinungen am Sternenhimmel selbstständig erkunden möchte, wird auf dieses Standardwerk nicht verzichten wollen.

220 Seiten mit zahlreichen Abbildungen und Tabellen.
Preis **€ 12,90** (zzgl. Versand); als Standing Order **€ 10,-** (inkl. Inlandsversand)



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743
www.www.spektrum.de/jahr

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



Vertragsabschluss per Telegraph

»Bindende rechtsverbindliche Erklärungen bedürfen einer rechtsgültigen Unterschrift und diese kann mit dem heutigen Telegraphen nicht übermittelt werden. Hier ist ein Hilfsmittel erforderlich, das Skizzen, die auf der einen Stelle aufgezeichnet werden, sofort nach der anderen Stelle elektrisch und



Der Fernschreiber
»Telepan«.

als getreue Kopien des Originals überträgt. Diese Aufgabe erfüllt der Fernsprecher »Telepan«. Um eine Mitteilung zu entsenden, ist es nur erforderlich, den an dem Geberapparat befindlichen Schreibstift in die Hand zu nehmen und auf eine Schreibfläche dasjenige niedezuschreiben. Wenn der Schreibstift wieder aus der Hand gelegt ist, so rollt auf der andern Station aus dem dort befindlichen Apparat ein Stück Papier heraus und weist genau übereinstimmende Schriftzüge auf.« Die Welt der Technik 20, S. 394–395, 1913

Tontafeln fertig gebacken

»Der Statthalter Graf von Wedel schenkte der Universitäts-Bibliothek in Straßburg 400 Tontafeln Babylonischen Ursprungs mit Keilschriften aus der Zeit von der Mitte des dritten bis zum Anfang des zweiten Jahrtausends v. Chr. Unter diesen Tontafeln finden sich solche, die fertig gebrannt sind, andere aber sind nur in der Sonne getrocknet, und besonders diese haben naturgemäß durch den Zahn der Zeit erheblich gelitten, manche so stark, daß ihre Erhaltung zweifelhaft schien. Da kam man auf den Gedanken, diese ungebrannten Stücke noch nachträglich im elektrischen Ofen zu brennen, und dieser Versuch ist so gut gelungen, daß nunmehr die Erhaltung der Stücke keine Schwierigkeiten mehr macht.« Prometheus 1252, S. 64, 1913

Spaziergänge im Flugzeug

»Der Sport-Zeitung »Aero« zufolge soll in Rußland eine Flugmaschine gebaut sein, die mit ihren Abmessungen und Leistungen alles bisher Gelieferte übertreffen dürfte. Im August soll diese Maschine zwei Stunden mit sieben Passagieren geflogen sein. Die Passagiere sollen in ihrer Kabine spazieren gegangen sein, wie im Zimmer einer Wohnung. Die Berichte über diese Leistung werden vorläufig noch mit Mißtrauen aufgenommen werden müssen, da man nicht glaubt, daß das Flugzeug das Hin- und Herwandern der Passagiere ohne Gefahr für seine Standsicherheit erträgt.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 41, S. 863, 1913

Tief hinab ins Münsterland

»Wichtige Ergebnisse erbrachte die tiefste Bohrung Europas, die unter der Bezeichnung »Münsterland 1« kürzlich bei Billerbeck im Kreis Coesfeld bis 5956 m niedergebracht worden ist. Überrascht waren die Geologen von der großen Mächtigkeit des zum Oberkarbon gehörenden Namurs. Mit rund 2000 m ist das Schichtpaket dieser Stufe im Münsterland viel mächtiger als westlich des Rheins. Wie weiter aus dem Bericht hervorgeht, ist das untere Oberkarbon stärker gestört als erwartet. Daraus ist zu schließen, daß die 230–320 Millionen Jahre zurückliegende variscische Gebirgsfaltung nur allmählich nach Nordwesten abklingt.« Kosmos 10, S. 342, 1963

Stimmabdruck ist unverkennbar

»Ein neues Verfahren zur Identifizierung von Personen hat der amerikanische Forscher Lawrence G. Kersta vor kurzem entdeckt. Bei diesem werden die individuellen Besonderheiten der menschlichen Stimme mit Hilfe eines elektronischen »Stimmspektrographen« optisch dargestellt. Der Vergleich von insgesamt 25 000 akustischen Spektrogrammen hat ergeben, daß die menschliche Stimme einen erstaunlich hohen

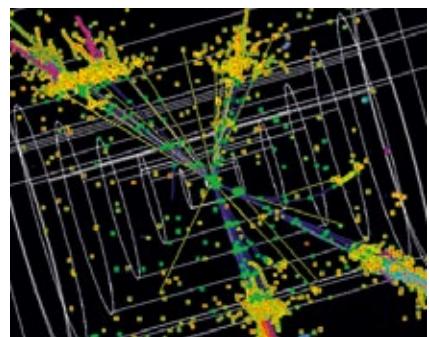
Grad von Individualität besitzt, der dem der Fingerabdrücke nicht nachsteht. Weder durch das Lebensalter noch durch Krankheit wie Schnupfen oder Heiserkeit wird der Stimmabdruck in



seinem Gepräge verändert.« Kosmos 10, S. 342, 1963

Astronautentelefon per Laser

»In den Vereinigten Staaten wird damit gerechnet, daß bei dem Gemini-Projekt (1964/1965) Sprechverbindungen über Laser hergestellt werden können. Man denkt dabei an die mögliche Erprobung von drei Nachrichtenwegen: zwischen Raumschiff und Erde; zwischen Raumschiff und einem Erdsatelliten, von dem aus dann die Verbindung zur Erde über Mikrowellen hergestellt wird; und drittens zwischen Raumschiff und einer Laserstation auf dem Mond, von der aus ebenfalls die Verbindung mit der Erde über Mikrowellen erfolgt. Sollten die Experimente zur Zufriedenheit ausfallen, wird man auch beim Projekt Apollo Laser-Nachrichten-Verbindungen verwenden.« Elektronik 10, S. A 23, 1963



Künftige Teilchenbeschleuniger

Kaum liefert der Large Hadron Collider LHC erste Ergebnisse, denken Physiker schon über noch mächtigere Partikel-schleudern nach. Der geplante International Linear Collider ILC soll aus zwei gegeneinandergerichteten Teilchen-kanonen bestehen.



Das wahre Gallien

Dichte Eichenwälder, Misteln schneidende Druiden und grausame Krieger? Nichts als römische Propaganda. Gallien sah nach heutigem Wissen anders aus: Die Landwirtschaft florierte, Handwerker produzierten Qualitätswaren für den Export, und in stadtähnlichen Siedlungen wurden sogar demokratische Regierungsformen erprobt.

Neue Bedrohung für Meerestiere

Zunehmend leiden – und sterben – Tiere im Meer an pathogenen Keimen, die vom Land ins Wasser gelangen. So verenden Delfine an der Katzenkrankheit Toxoplasmose, Robben an Erregern, die von Kühen stammen. Ihre verdreckte Umwelt macht die Meeressäuger für die Infektionen anfällig.

Vom Mikroprozessor zum Mikrorechner

Die Computerchips der nächsten Generation vereinigen auf derselben Fläche noch mehr Funktionen als ihre Vorgänger – und legen immer wieder zwischendurch Teile ihrer selbst schlafen: zur Energieersparnis.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
DIGITAL-
ABO*



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnierten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv! *Für Printabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* kostenlos!

So einfach erreichen Sie uns:

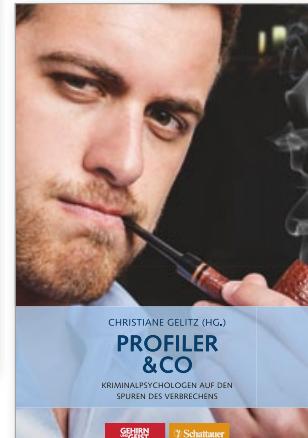
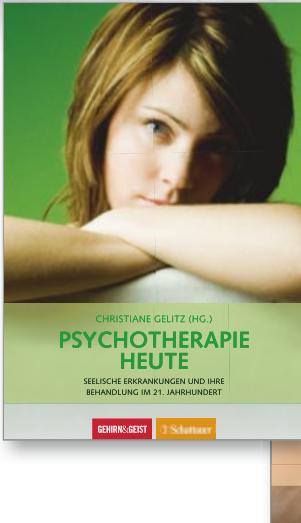
Telefon: 06221 9126-743
www.spektrum.de/digitalabo

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: service@spektrum.com

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!



GEHIRN UND GEIST



Christiane Gelitz (Hrsg.)

Psychotherapie heute

Seelische Erkrankungen und ihre Behandlung im 21. Jahrhundert

Was steckt hinter ADHS bei Erwachsenen, Computerspielsucht, sozialer Phobie und anderen psychischen Störungen, die durch die Medien geistern? Wann werden Alltagsprobleme zu Störungen und welche innovativen Therapien gibt es? Medizijnjournalisten, Psychologen, Psychiater und Psychotherapeuten geben Antwort.

2012, 200 Seiten, 16 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A) | ISBN 978-3-7945-2867-7

Andreas Jahn (Hrsg.)

Wie das Denken erwachte

Die Evolution des menschlichen Geistes

Wie intelligent sind wir wirklich? Der Mensch ist ein Kind der Evolution. Wie und wieso wurden wir zu dem, was wir heute sind? Renommierte Verhaltensforscher, Genetiker, Psychologen, Philosophen und Biologen nehmen Sie mit auf eine faszinierende Entdeckungsreise zu unseren geistigen Ursprüngen.

2012, 158 Seiten, 26 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A) | ISBN 978-3-7945-2869-1

Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hrsg.)

Kinder brauchen Nähe

Sichere Bindungen aufbauen und erhalten

Dieses Buch ist kein Erziehungsratgeber im üblichen Sinn. Vielmehr präsentiert es wichtige Ergebnisse der Bindungsforschung und leitet daraus ab, wie sich eine vertrauliche Beziehung zu Kindern aufbauen lässt. Dabei ist eine sichere Bindung nicht nur entscheidend für eine gelingende Erziehung. Sie fördert auch nachweislich die seelische Gesundheit und den sozialen Erfolg im späteren Leben.

Vor diesem Hintergrund bietet „Kinder brauchen Nähe“ vertiefte Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in wissenschaftlich fundierten und gleichzeitig unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.

2012, 160 Seiten, 27 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)
ISBN 978-3-7945-2872-1

Christiane Gelitz (Hrsg.)

Profiler & Co

Kriminalpsychologen auf den Spuren des Verbrechens

Im Dienste der Wahrheit arbeiten Polizei und Gerichte mit Psychologen und Hirnforschern zusammen. Wissenschaftler und Journalisten schildern, welche Methoden den Strafverfolgern beim Ermitteln helfen – Profiling, Computerprogramme, Verhörtechniken, Aussageanalyse, Lügendetektoren.

Fundiert und eindrücklich ergründen die Autoren Motive und Hintergründe von Verbrechen, erstellen psychologische Täterprofile und analysieren die Ursachen von Gewalt.

Auch die Bedeutung psychologischer und neurobiologischer Befunde für die Rechtsprechung wird beleuchtet. Wissenschaftler und Journalisten erzählen dazu wahre Geschichten aus der kriminologischen Forschung und Praxis.

2013, 172 Seiten, 16 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)
ISBN 978-3-7945-2962-9



Jetzt bestellen!

Internet: www.schattauer.de/shop
E-Mail: order@schattauer-shop.de