

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ROBOTER
ALS FORSCHER
Automaten
stellen Hypo-
thesen auf –
und testen sie

MÄRZ 2011

ELEMENTARTEILCHEN
Das komplexe Innere
des Neutrons

MEDIZIN
Schwefelwasserstoff –
Giftgas mit Heilkraft

EVOLUTION
Das überraschend träge
Erbgut des Menschen

NEUE SERIE

Die größten Rätsel der Philosophie

TEIL 1/2:

- ▶ Wer bin ich?
- ▶ Willensfreiheit



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





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Erkenntnissuche mit sozialer Verantwortung

Helmut Schmidt und die Grundlagenforschung – wie passt das zusammen? Ich war einigermmaßen überrascht, dass die Max-Planck-Gesellschaft den Altkanzler als Hauptredner anlässlich des 100. Gründungsjubiläums ihrer Vorgängerorganisation, der Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft (KWG), aufbot. Bei dem Festakt am 11. Januar 2011 hätte Schmidt zum Thema »Wissenschaft und Verantwortung« vieles abhandeln können – etwa die Verstrickung von KWG-Forschern in die »Rassenhygiene«-Projekte der NS-Zeit. Doch der 92-Jährige blickte nach vorn, beschrieb die für ihn drängendsten Probleme der Zukunft – Ernährung, globale Wirtschaftskrisen, Aufrüstung, Klimawandel sowie Energieversorgung – und forderte Lösungsvorschläge aus der Wissenschaft. Den anwesenden Politikern schrieb er eine Flurbereinigung der zerklüfteten deutschen Wissenschaftslandschaft ins Stammbuch und geißelte die Mischfinanzierung von Forschung innerhalb unseres föderalen Systems. Das Gerangel der zuständigen Bürokraten in Bund und Ländern führe vor allem zu einer Verschwendung von Ressourcen und Steuergeldern.

»Den heutigen Wissenschaftlern fehlt häufig ein das eigene Feld einordnender Überblick über den Kosmos unseres Wissens – und unseres Könnens«

Helmut Schmidt am
11. Januar 2011 in der Berliner
Akademie der Künste



Aber auch Wissenschaftler bekamen ihr Fett weg: Viele von ihnen würden sich allzu behaglich in den Verästelungen ihrer Forschungsgebiete einrichten, kaum jemand ringe noch um einen Überblick über das große Ganze. Zudem stehe es schlecht um das Verantwortungsbewusstsein für das Gemeinwohl. Wörtlich definierte Schmidt Wissenschaft als »zur sozialen Verantwortung verpflichtete Erkenntnissuche«. Ausdruck dieser Pflicht sei es nicht zuletzt, dass Forscher ihre Arbeit für die Allgemeinheit transparent machen, sonst würde das Vertrauen der Bürgerinnen und Bürger in die Wissenschaft schwinden. Fast beschrieb der Bundeskanzler a. D. damit die Mission von »Spektrum der Wissenschaft«: Forschung aus erster Hand, kompetent und kritisch vermittelt, um Orientierung über die Disziplingrenzen hinaus zu geben – auf dass Sie sich, liebe Leserinnen und Leser, ein eigenes Urteil über die wichtigsten neuen Erkenntnisse und Anwendungen bilden können.

Herzlich Ihr

Carl Mönzel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die meisten Mutationen im Erbgut verschiedener Menschengruppen entpuppen sich als überraschend alt. Neuere leicht erkennbare Spuren von Umweltanpassungen hingegen sind selten, wie der Humangenetiker **Jonathan K. Pritchard** von der University of Chicago berichtet (S. 28).



Die Philosophen **Albert Newen** von der Ruhr-Universität Bochum (links) und **Michael Pauen** von der Humboldt-Universität Berlin erläutern, wie die Wissenschaft von heute die klassischen Fragen von Selbsterkenntnis und Willensfreiheit neu beantwortet (S. 62, S. 68).

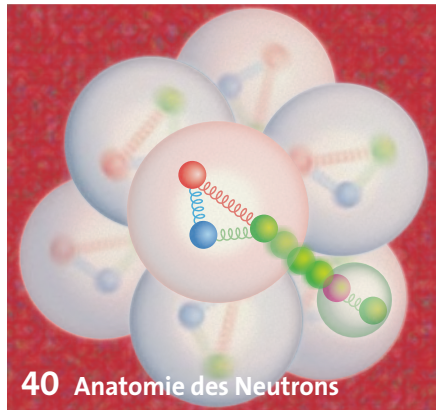


Der Informatiker **Ross D. King** von der Aberystwyth University in Wales entwickelt intelligente Roboter, die Wissenschaftlern beim Forschen helfen – von der Hypothesenfindung bis zum Auswerten von Experimenten (S. 88).

22 Schwefelwasserstoff: Giftgas mit Heilkraft



74 Lebensraum Walkadaver



40 Anatomie des Neutrons



80 Maniok: Wurzel der Hoffnung

BIOLOGIE & MEDIZIN

► **22 Giftgas mit Heilkraft**

Rui Wang

Der eklig stinkende und in hoher Dosis tödliche Schwefelwasserstoff spielt eine erstaunliche Rolle im Körper. Diese Erkenntnis könnte Behandlungsstrategien für Herzinfarkt und andere Krankheiten eröffnen

► **28 Evolution auf der Kriechspur**

Jonathan K. Pritchard

In jüngster Zeit tat sich in der menschlichen Evolution scheinbar nicht viel. Die meisten deutlichen Unterschiede zwischen modernen Menschengruppen haben überraschend alte Wurzeln. Wahrscheinlich ereignen sich aber auch heute noch Anpassungen – doch sie betreffen nur selten einzelne Gene

PHYSIK & ASTRONOMIE

38 Eiszapfen, die gen Himmel wachsen

H. Joachim Schlichting

Für die Entstehung aufwärtsstrebender Eiszapfen müssen zahlreiche Bedingungen erfüllt sein

► **40 Reise ins Innere des Neutrons**

Timothy Paul Smith

Die Anatomie der ungeladenen Bausteine des Atomkerns stellt unser Anschauungsvermögen auf eine harte Probe

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

50 Bezaubernde Bildnisse II

Norbert Treitz

Zylinderspiegel geben rätselhaft verzerrten Bildern ihre richtige Gestalt zurück, und eine einfache Drehscheibe erzeugt in unserer Wahrnehmung ein Farbnegativ

MENSCH & KULTUR

► **TITELTHEMA**

INTERVIEW

57 »Uns bleiben die unlösbaren Probleme«

Der Philosoph Julian Nida-Rümelin über das Wesen der Philosophie und ihre Bedeutung für Wissenschaft und Gesellschaft

62 Wer bin ich?

Albert Newen

Die Frage nach dem Ich beschäftigt die Philosophen schon lange. Heute rückt eine allgemein akzeptierte Antwort näher – nicht zuletzt dank neuropsychologischer Erkenntnisse

68 Eine Frage der Selbstbestimmung

Michael Pauen

Willensfreiheit ist die Fähigkeit, ohne Zwang zwischen Möglichkeiten zu wählen. Ist sie eine Illusion?

TITELTHEMA

Die größten Rätsel der Philosophie

- 56 Einleitung
- 57 Interview
- 62 Selbsterkenntnis
- 68 Willensfreiheit



ERDE & UMWELT

74 Oasen der Tiefsee

Crispin T.S. Little

An Walkadavern bilden sich reiche Ökosysteme, die jahrzehntlang bestehen. Sie beherbergen exotische Organismen, die auch an Tiefseequellen vorkommen



80 Wurzel der Hoffnung

Nagib Nassar und Rodomiro Ortiz

Maniok ist schon heute eines der wichtigsten Nahrungsmittel in der Dritten Welt. Durch Kreuzung mit Wildpflanzen ließe sich daraus eine noch viel ertragreichere und hochwertigere Kulturpflanze züchten

TECHNIK & COMPUTER

▶ 88 Roboter als Naturforscher

Ross D. King

Mittels künstlicher Intelligenz können Maschinen Hypothesen aufstellen, sie experimentell testen und die Resultate bewerten – ganz ohne menschliches Zutun. Zwei Prototypen führen bereits vor, wie Automaten wissenschaftlich arbeiten

Titelmotiv: Fotolia / Davi Sales

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

- 8 Plasmajets heizen Sonnenkorona auf • Vielseitiges Nanogarn aus Pulver • Schleimpilzfarmer kultivieren Bakterien • Auch enttarnte Placebos wirken • Rekordmolekül mit Baumstruktur • Gruselfilmeffekt bei Vögeln

BILD DES MONATS

- 11 Und sie bewegen sich doch!

FORSCHUNG AKTUELL

- 12 **Monopole aus Nanomagneten**
Physiker realisierten die hypothetischen Elementarteilchen als »Quasiteilchen« in einem Festkörper
- 14 **Arithmetik aus Babylonien?**
Neue Theorien über den antiken Mechanismus von Antikythera
- 18 **Defekte Kraftwerke in grauen Zellen**
Gestörte Energieversorgung lässt Nervenzellen bei der Parkinsonkrankheit absterben
- 20 **Springers Einwürfe**
Macht Sex hellsichtig?

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial
- 6 Leserbrief/Impressum
- 96 Rezensionen
Darlene T. Crist et al.: Schatzkammer Ozean
Hans-Heinrich Körle: Die phantastische Geschichte der Analysis
Stanislas Dehaene: Lesen
Horst Rademacher: Am Rande des Kraters u. a.
- 104 Im Rückblick
Vom Wettlauf zum Südpol bis zum Tonband als Datenspeicher
- 106 Vorschau



Ideale Form gefunden

Mit dem Januarheft 2011 wurde die Gestaltung im Innenteil von »Spektrum der Wissenschaft« überarbeitet.

Leo Nick, Bad Dürkheim: Ich finde die dezenten Änderungen im Layout des Hefts außerordentlich gelungen. Insbesondere der von mir in meinen fast 28 Abonnementsjahren öfter kritisierte Umgang mit Illustrationen auf der ersten Doppelseite eines Artikels hat nun eine ideale Form gefunden: Dort, wo es ansprechende Bilder mit Aussagekraft gibt – zum Beispiel die simulierte groß-

räumige Struktur des Kosmos –, sind diese so groß wie möglich angebracht. Wenn es keine gibt – auch gut, dann ein kleines Bild und vor allem Text. Die Seriosität und Qualität der Texte machen Spektrum aus – »Bildzeitung der Wissenschaft« sollen andere machen und lesen.

Überlebenszeit bei Krebs

Hans Lehrach und Urban Wiesing diskutierten die Möglichkeiten einer individualisierten Medizin auf Grundlage der Genomsequenz des jeweiligen Patienten. (»Der modellierte Patient«, Januar 2011, S. 60)

Lutz-Michael Weiß, Berlin: Ist es wirklich so, dass – wie im aktuellen Heft auf S. 60 beschrieben – sich die »Lebenszeit durch Krebsmedikamente ... nur um ein bis zwei Monate erhöht«? Sind nicht ein bis zwei Jahre Lebensverlängerung im Schnitt gemeint?

Antwort von Prof. Dr. Hans Lehrach: Mit meiner Formulierung habe ich mich auf eine wissenschaftliche Untersuchung zu Pankreas-Tumoren bezogen, die an der Charité in Berlin durchgeführt wurde. Demnach erhöht sich die mittlere Lebenserwartung nach ei-

ner Chemotherapie von 20 auf 22 Monate (*Journal of the Medical Association* 297, S. 267–277, 2007). Es handelt sich jedoch um Durchschnittswerte; die Wirksamkeit von Krebsmedikamenten kann bei verschiedenen Tumortypen sehr unterschiedlich sein.

Vier statt fünf keulenförmige Wolken

Laut Rainer Waser und seinen Mitautoren werden Memristoren Computer schneller und effizienter machen. (»Die kleinsten Bits der Welt«, Januar 2011, S. 86)

Dietrich H. Nies, Halle: Der Satz » ... d-Orbitale ähneln einem Komplex aus fünf keulenförmigen Wolken« im Glossar trifft so nicht zu. Die Lösung der Schrödinger-Gleichung (für das Wasserstoffatom) mit der Hauptquantenzahl $n=3$ und der Nebenquantenzahl $l=2$ (l zwischen 0 und $n-1$) ergibt zwar fünf mögliche magnetische Quantenzahlen ($-2, -1, 0, 1, 2$). Sie ähneln aber Doppelhanteln, also vier keulenförmigen Wolken, von denen jeweils drei sich in den drei möglichen Ebenen des xyz-Koordinatensystems befinden und Nummer vier entlang der x- und y-Achse. Nummer fünf ist ein »Doppelschnuller«-Or-

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Jan Osterkamp (Spektrumprogramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke
 E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Entwicklungsredaktion: Dr. Reinhard Breuer (Ltg.)
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Claudia Hecker, Andrea Jungbauer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Ursula Loos, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L/Sfr. 14.–); im Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten 5dW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Ursula Haslauer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preislite Nr. 32 vom 01.01.2011.
Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2011 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der 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 10013-1017
 Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchocombe, 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.



bital, das aus der Hybridisierung der beiden Lösungen entlang der y- und z-Achse und entlang der x- und z-Achse resultiert. Dieses »Hybrid« ist nötig, da nur fünf Orbitale (nach der magnetischen Quantenzahl) erlaubt sind, aber theoretisch sechs räumliche Möglichkeiten berechnet werden können. So habe ich das jedenfalls als nicht fachkundiger Biologe verstanden.

Auf immer und ewig

Der industrielle Einsatz von CO₂-Luftfiltern könnte dem Treibhauseffekt entgegenwirken, behauptete Klaus S. Lackner. (»Große Wäsche für das Klima«, Januar 2011, S. 70)

Christian Synwoldt, Malborn: Es ist faszinierend und unglaublich zugleich: Mehr als ein halbes Jahrhundert nach dem Beginn der »friedlichen Nutzung der Kernenergie« existiert weiterhin keinerlei Konzept zur Endlagerung radioaktiver Abfälle.

Mit dem Eintritt in die CSS-Technik wird nun derselbe Fehler ein zweites Mal begangen. Schlimmer noch: Ist auf Grund der endlichen Halbwertszeiten zumindest theoretisch in einigen Jahr-milliarden das Gefahrenpotenzial radioaktiver Abfälle deutlich geringer, so sind etwaige Kohlendioxidlagerstätten buchstäblich auf immer und ewig verschlossen zu halten. Zudem sind die Mengen bei Kohlendioxid ungleich größer: Die Größenordnung liegt im Bereich von Millionen Tonnen pro Jahr und Kohlekraftwerk.

Über welche Zeiträume derzeitige Technologien Sicherheit versprechen, zeigt das Beispiel Asse – kein Grund also, die Fehler der Vergangenheit zu wiederholen. Auch wirtschaftlich sieht die Bilanz bei Weitem nicht so rosig aus, wie der Artikel vermuten lässt. Den kurzfristig erzielbaren Gewinnen aus einem Emissionszertifikate-Handel stehen die Kosten für Sicherung und Betrieb der Lagerstätten über unabsehbare Zeiträume gegenüber. Und es ist schon heute abzusehen, dass wie im Fall der Kernenergie Gewinne privatisiert, die Kosten hingegen sozialisiert werden.

Auch Amseln klopfen Würmer aus der Erde

Kenneth Catania beschrieb, wie Boden-vibrationen bei bestimmten Regenwürmern den Fluchtreflex auslösen. (»Maulwurf-Alarm à la Darwin«, Februar 2011, S. 30)

Wolfgang Leikauf, Baden (Schweiz): Das vom Biologen Nikolaas Tinbergen beobachtete Verhalten von Heringsmöwen konnte ich sehr oft auch in Gärten und Parkanlagen bei Amseln sehen. Diese Vögel klopfen quasi rhythmisch mit den Füßen auf den kurz geschnittenen Rasen, um nach einer Pause die hervorkommenden Regenwürmer zu packen und vollends aus der Erde herauszuziehen.

Erratum

*»Nützliche Katastrophen«
Februar 2011, S. 72*

Der Text zum Bild auf S. 80 unten, welches in Fels geritzte Buddhafiguren zeigt, ist leider missverständlich formuliert. Das abgebildete Felsrelief von Manthal stammt wohl erst aus dem 8. Jahrhundert n. Chr. und ist nicht etwa 5000 Jahre alt.



In Stein geritzte Buddhafiguren samt Inschriften sind weit verbreitet in den Tälern des Indus und seiner Nebenflüsse. Die im Bild gezeigten Beispiele sind wahrscheinlich die bekanntesten. Sie wurden vermutlich im 8. Jahrhundert n. Chr. in einen Felsblock graviert, der von einem Bergsturz südlich von Skardu stammt.

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

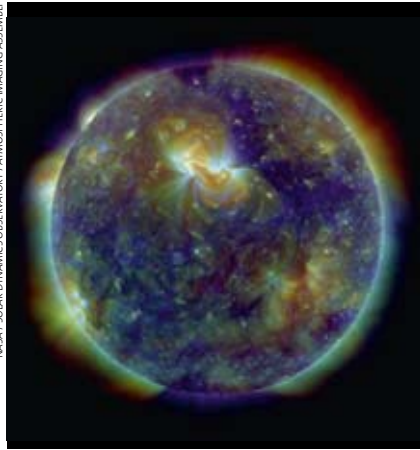
... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

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

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

ASTROPHYSIK

Plasmajets heizen Sonnenkorona auf



Im extremen ultravioletten Wellenlängenbereich werden die Temperaturen der Sonnengase deutlich: Grüne Farbtöne repräsentieren Temperaturen von rund 1,3 Millionen Grad Kelvin, rote Bereiche erreichen sogar etwa 2 Millionen Grad. In unregelmäßigen Abständen schießen Jets derart heißes Plasma in die Korona und heizen sie auf.

Die äußere Sonnenatmosphäre, die Korona, ist mehr als eine Million Grad Celsius heiß, die Sonnenoberfläche dagegen nur etwa 5500 Grad. In den vergangenen Jahrzehnten haben Wissenschaftler eine Vielzahl von theoretischen Modellen vorgeschlagen, um diese Temperaturdiskrepanz zu erklären. Nun fanden Wissenschaftler um Bart De Pontieu vom Lockheed Martin Solar and Astrophysics Laboratory in Palo Alto Belege für eine zuvor schon fast ausgemusterte Theorie: Eine besondere Art dünner Plasmajets treibt offenbar heißes Gas in die Korona und heizt sie auf.

Forscher hatten bisher allerdings vergebens nach Jets Ausschau gehalten, die dafür verantwortlich sein könnten. Zwar schießen so genannte Spikulen gelegentlich in die äußere Sonnenatmosphäre, aber noch nie wurden darin Temperaturen von mehreren Millionen

Grad beobachtet, und Astronomen hielten es daher zuletzt für unwahrscheinlich, dass sie einen Beitrag zum Aufheizen der Korona leisten.

De Pontieus Team blieb jedoch einer Klasse von sehr schnellen, nur kurz andauernden Spikulen auf der Spur, die es bereits vor Jahren beschrieben hatte. Und nun belegen präzise Beobachtungen des Solar Dynamics Observatory sowie der japanischen Hinode-Sonde tatsächlich, dass mehrere Millionen Grad heißes Plasma zusammen mit solchen seltenen Spikulen auftritt. Welche besonderen physikalischen Prozesse die Jets antreiben und wie das Gas in ihnen auf derart hohe Temperaturen aufgeheizt wird, müssen De Pontieu und seine Kollegen noch herausfinden – der Beitrag der kurzen Spikulen zur Erwärmung der Korona scheint nun aber erwiesen.

Science 331, S. 55–58, 2011

MATERIALWISSENSCHAFT

Vielseitiges Nanogarn aus Pulver

Wissenschaftler haben ein Nanogarn hergestellt, das aus einem Gerüst aus Kohlenstoffnanoröhrchen und aus winzigen Partikeln unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung besteht. So erhält man ein sehr vielseitiges Material, mit dem sich stricken, weben oder nähen lässt, erklären Ray Baughman von der University of Texas in Dallas und seine Kollegen.

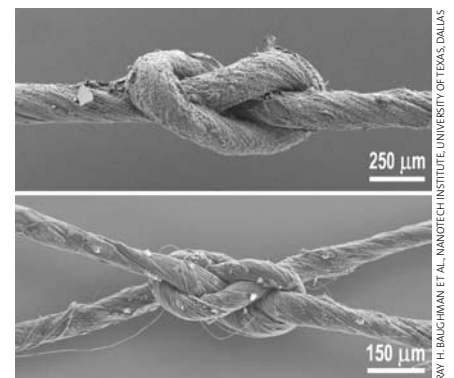
Für ihre Prototypen trugen sie zunächst eine gleichmäßige Schicht der Partikel auf einen rund 50 Nanometer dicken Streifen aus Kohlenstoffnanoröhrchen auf. Das Ergebnis verdrehten sie dann zu einem haardünnen Garn, in dem Dutzende der Nanoschichten nebeneinanderliegen. Abhängig von den verwendeten Partikeln und der Spinnentechnik – etwa der Wahl des Drehwinkels oder einer asym-

metrischen »Fadenspannung« – erhält das Garn schließlich verschiedene Strukturen mit unterschiedlichen Eigenschaften. Dabei bleibt der Faden elektrisch leitfähig, lässt sich verbiegen und ist äußerst belastbar: Selbst bei einer regulären Maschinenwäsche gehen nur unwesentliche Mengen des Pulvers verloren. Baughmans Labor konnte bereits eine Vielzahl von unterschiedlichen Garnen herstellen; darunter Fäden mit LiFePO_4 -Partikeln, die sich als Elektroden für Lithiumionen-Akkus eignen und zukünftig beispiels-

Diese Garne bestehen aus Kohlenstoffnanoröhrchen, die mit winzigen Partikeln beschichtet sind. Verwendet man hierfür zum Beispiel Siliziumdioxidpulver, so wird der Faden stark genug, um verknotet zu werden.

weise in Kleidung Energie speichern und abgeben sollen. Eine Magnesium-Bor-Mischung wird bei sehr tiefen Temperaturen dagegen zum supraleitenden Garn, während eingesponnenes Titandioxid fotokatalytisch wirkt und sich beispielsweise für selbstreinigende Textilien verwenden ließe.

Science 331, S. 51–55, 2011



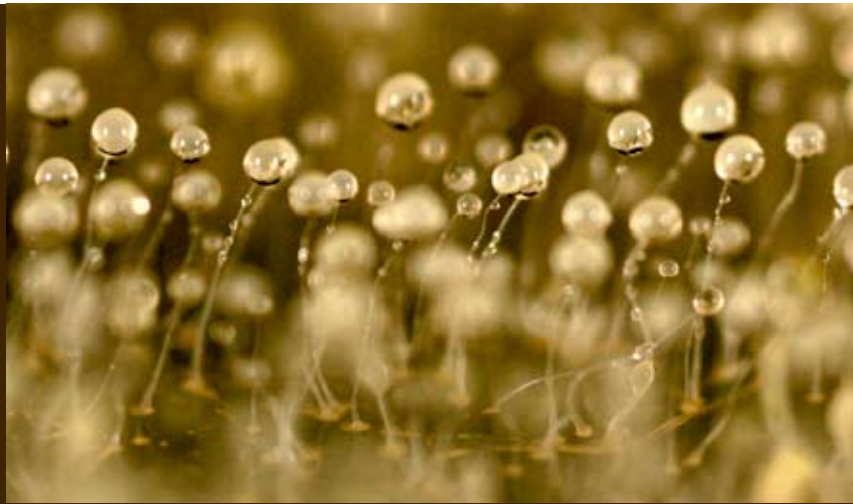
RAY H. BAUGHMAN ET AL., NANOTECH INSTITUTE, UNIVERSITY OF TEXAS, DALLAS

SOZIALE EVOLUTION

Schleimpilzfarmer kultivieren Bakterien

Schleimpilze bestreiten große Teile ihres Lebens als amöbenähnliche Einzelgänger, die Bakterien fressen. Erst wenn sich ihre Umweltbedingungen verschlechtern, werden sie gesellig. Dann formen sie einen vielzelligen Körper aus Stiel und Sporenbhälter. Während die Stielzellen bald absterben, überdauern einige Artgenossen in den Sporen. Rund ein Drittel dieser Überlebenden, so berichten nun US-Forscher, sorgt dabei völlig selbstlos für die nächste Generation und hält eine eiserne Nahrungsreserve aus Bakterien in speziellen Zellorganellen vor, anstatt sie gleich aufzubrechen. Die aufgesparten Keime säen sie dann beim Verlassen der Spore aus, um einen Bakterienrasen als frische Nahrungsquelle für die Gemeinschaft sprießen zu lassen.

Joan Strassman und ihre Kollegen von der Rice University in Houston, Texas, entdeckten das vorsorgende Verhaltensmuster in 35 wild lebenden Populationen von *Dictyostelium discoideum*, der bekanntesten Spezies der Schleimpilze. Mit dem Modellorganismus wird in vielen Labors die



SCOTT SOLOMON, RICE UNIVERSITY

Schleimpilze überleben schlechte Zeiten, indem sie vielzellige Fruchtkörper bilden: Die Köpfchen auf den Stielen enthalten Sporen, die bei günstigeren Umweltbedingungen wieder keimen.

Evolution primitiven Sozialverhaltens erforscht. Vor allem suchen Wissenschaftler dabei nach Gründen, die den selbstlosen Verzicht einer Zelle zu Gunsten ihrer Nachbarn erklärt.

Denn die Bakterienfarmer müssen deutliche Nachteile in Kauf nehmen: Sie wachsen langsamer und überleben in freier Wildbahn kürzer als Artgenossen, die alle verfügbaren Keime immer sofort verspeisen. Trotzdem stirbt die altruistische Form des Schleimpilzes nicht aus. Offenbar verschafft sie sich

und den Mitinsassen eines Sporenbhälters einen deutlichen Startvorteil beim Besiedeln neuen Lebensraums nach einer Umweltkrise. Die Zellen, die sich zu Sporen zusammenfinden, sind auch enger miteinander verwandt: Der Altruismus der säenden Schleimpilze kommt somit also vor allem der eigenen Sippe zugute. Und über die Zellen der Verwandtschaft gelangt auch das genetische Programm für Selbstlosigkeit in die nächste Generation.

Nature 469, S. 393–396, 2011

MEDIZIN

Auch enttarnte Placebos wirken

Wichtigste Voraussetzung für den Nachweis eines Placeboeffekts ist die Ahnungslosigkeit des Patienten: Er darf nicht wissen, dass er nur ein Scheinmedikament erhielt – so glaubte man bislang. Nun zeigten Wissenschaftler, dass Placebos sogar dann wirken, wenn sie unumwunden als solche gekennzeichnet sind.

Forscher um Ted Kaptchuk von der Harvard Medical School in Boston führten dazu eine Studie an 80 Patienten durch, die am Reizdarmsyndrom litten. Sie teilten die Probanden dabei

in zwei Gruppen auf: Die eine Hälfte wurde gar nicht behandelt, die andere nahm zweimal täglich ein Placebo ein. Den Patienten gegenüber wurden diese freimütig als Zuckerpillen bezeichnet, die keinerlei wirksame Substanzen enthielten. Zusätzlich waren die Packungen mit dem Wort »Placebo« beschriftet. »Wir erzählten den Patienten, sie sollten sich keine Wirkung erhoffen und einfach nur die Pillen einnehmen«, erläutert Kaptchuk. Drei Wochen später hatten sich die Symptome bei sechs von zehn Patienten,

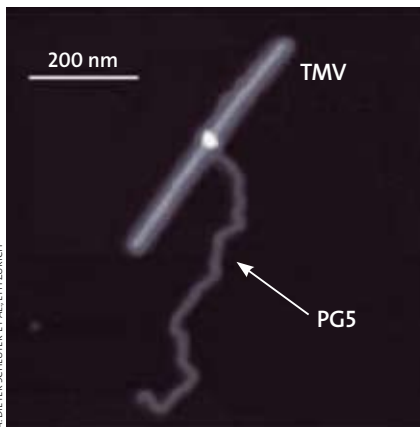
die das Placebo bekommen hatten, deutlich verbessert – unter den Unbehandelten dagegen nur bei jedem Dritten. Die Ergebnisse müssen sich noch in umfangreicheren Tests bestätigen; offen bleibt zudem, ob auf herkömmliche Weise verabreichte Placebos nicht noch besser gewirkt hätten. Dennoch betont Kaptchuk: »Nicht allein positives Denken, sondern bereits die schlichte Durchführung eines medizinischen Rituals kann Patienten nützen.«

PLoS One 5, e15591, 2010

CHEMIE

Rekordmolekül mit Baumstruktur

Mit einem Durchmesser von zehn Nanometern ist PG5 das bislang größte stabile Molekül mit definierter Struktur, das Forscher im Labor herstellen konnten: Die baumartig verzweigte Verbindung wiegt so viel



A. DIETER-SCHLÜTER ET AL., ETH ZÜRICH

wie 200 Millionen Wasserstoffatome. Ihre Synthese gelang Chemikern um Dieter Schlüter von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Bisher hielt ein Polystyrolmolekül die Bestmarke mit einem Gewicht von 40 Millionen Wasserstoffatomen. PG5 erreicht die Größe von natürlich entstehenden Stärkekettchen oder manchen Viren, etwa dem Tabakmosaikvirus.

Bisherige Versuche, Riesenverbindungen wie PG5 zu erzeugen, scheiterten an der Instabilität der verwendeten

Das künstliche Riesenmolekül PG5 ist im Elektronenmikroskop gut zu erkennen. Hier wickelt es sich um ein stangenförmiges Tabakmosaikvirus (TMV).

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie unter

spektrumdirekt.de

Bausteine: Die Moleküle zerfielen wieder ab einer bestimmten Größe. Schlüters Team umging das Problem, indem die Forscher mit einer einfachen, standardisierten Polymerisationsreaktion starteten und an die entstehende Kohlenwasserstoffkette nach und nach Benzolringe, Stickstoffverbindungen und weitere Kohlenwasserstoffe durch Reaktionen anfügten, die standardmäßig in der Chemie eingesetzt werden. Anschließend hängten sie weitere Seitenäste an die bestehenden Verzweigungen, so dass sich eine baumartige Struktur herausbildete. Insgesamt benötigte die Synthese 170 000 Bindungsvorgänge bis zum Endprodukt, das unter dem Elektronenmikroskop gut zu erkennen ist.

Angew. Chem. 50, S. 737–740, 2011

ORNITHOLOGIE

Gruselfilmeffekt bei Vögeln

Normalerweise verhalten sich Vögel möglichst unauffällig, wenn ein Fressfeind in der Nähe ist – Aufsehen zu erregen kann tödlich enden. Der australische Prachtstaffelschwanz (*Malurus cyaneus*) jedoch macht das Gegenteil: Er wirbt besonders intensiv um Weibchen, wenn der Ruf seines Fressfeinds, des Graurücken-Krähenwürgers (*Cracticus torquatus*), ertönt.

Emma Greig und Stephen Pruett-Jones von der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York) beobachteten dieses gewagt erscheinende Balzverhalten zunächst im Freiland. Immer wenn die Fressfeinde sich in der Nähe bemerkbar machen und die Weibchen beunruhigen, beginnen die männlichen Staffelschwänze eine spezielle Melodie zwischen die Rufe des Feindes zu mischen. Auf das Duett aus Krähenwürger-Lauten und dem eingeschobenen »Typ-II-Ruf« des Prachtstaffelschwanzes reagierten die Weibchen besonders intensiv, ermittel-

ten die Forscher in ihren Versuchen: Trotz der möglichen Gefahr antworteten sie potenziellen Partnern häufiger und zeigten sich eher paarungsbereit.

Die männliche Bereitschaft zum Draufgängertum könnte dem Weibchen signalisieren, dass es ein besonders potentes Gegenüber vor sich hat. Wissenschaftler bezeichnen die Balzstrategie als Gruselfilmeffekt, da sie an die Taktik männlicher Jugendlicher erinnert, potenzielle Freundinnen durch gemeinsames Anschauen von Horrorstreifen zu beeindrucken. Das Verhalten gefährdet die Männchen dabei weniger, als man vermuten könnte: Anfliegende Graurücken-Krähenwürger machen so viel Lärm, dass die Beute gewarnt ist; vor allem aber jagen die Beutegreifer nie, während sie singen. Das Risiko für die Prachtstaffelschwänze ist also überschaubar. Greig und ihre Mitarbeiter wollen nun überprüfen, ob nicht auch weitere Vogelarten die erhöhte Wachsamkeit

nutzen, die durch die Rufe ihrer Fressfeinde entsteht. Bei mindestens zwei anderen Spezies konnten sie ein ähnliches Verhalten bereits beobachten.

Beh. Ecol. 21, S. 1360–1366, 2010



MITCHELL WALTERS, UNIVERSITY OF CHICAGO

Wenn sich hungrige Raubvögel nähern, dürften die auffälligen blauen Männchen der Prachtstaffelschwänze gefährlicher leben als ihre eher tarngrauen Weibchen. Gerade dann werben die Hähne aber besonders lautstark und auffällig um eine Partnerin.

UND SIE BEWEGEN SICH DOCH!

Die Sanddünen in den nordpolaren Regionen des Mars sind nicht so statisch, wie Astronomen lange dachten. Bilder des Mars Reconnaissance Orbiter offenbarten jetzt, dass an manchen Orten binnen eines Marsjahres hunderte Kubikmeter Sand die Dünen herabrutschen. Ein internationales Forscherteam zeigte außerdem, dass die Veränderlichkeit der Dünen auch von sublimierendem Kohlendioxideis herrührt. Das im Frühjahr unter der Oberfläche entstehende Gas drängt durch feine Spalten ins Freie und bringt dadurch zunächst am Dünenkamm einzelne Sand- und Eiskörner ins Rollen. Aus dem feinen Rieseln entstehen schließlich neue Rinnen in den Hängen und frische Sandablagerungen am Dünenfuß. An manchen Stellen vertieft der Wind die entstandenen Kerben und formt Sandrippel wie am Strand. Das Bild, dessen Details durch farbliche Nachbearbeitung hervorgehoben sind, zeigt eine Fläche von etwa einem halben Quadratkilometer. Die dunklen »Flecken« stellen vom Gas mitgeführten und dann herabgesunkenen Staub dar. Die hellen Bereiche markieren, wo austretendes Kohlendioxidgas infolge adiabatischer Expansion gefror und sich ablagerte.

Hansen, C.J. et al.: Seasonal Erosion and Restoration of Mars Northern Polar Dunes. In: Science 331, S. 575–578, 4. Februar 2011

Monopole aus Nanomagneten

Magnetische Monopole sind hypothetische Elementarteilchen, nach denen Physiker bislang vergeblich fahndeten. Nun gelang es, sie als »Quasiteilchen« in einer Anordnung von Nanomagneten zu erzeugen und sichtbar zu machen – bei Raumtemperatur!

VON LAURA HEYDERMAN, FRITHJOF NOLTING UND HANS-BENJAMIN BRAUN

Gewöhnliche Stabmagnete enthalten einen Nord- und einen Südpol. Diese lassen sich nicht – etwa durch Zersägen in der Mitte – voneinander trennen. Versucht man es, haben auch die Teilstücke wieder zwei Pole. Es ist wie in Goethes »Zauberlehrling«, wo aus jedem zerschlagenen Besen zwei neue entstehen.

Dennoch vermuten Physiker schon lange, dass es auch magnetische Monopole gibt. Sie wären nicht untrennbar aneinander gebunden, sondern könnten sich wie elektrisch positiv und negativ geladene Teilchen unabhängig voneinander bewegen und miteinander wechselwirken. Wie sich ihre Existenz mit der Quantenmechanik und den maxwellschen Gleichungen für die Elektrodynamik in Einklang bringen lässt, hat bereits vor 80 Jahren der briti-

sche Physiker Paul Dirac (1902–1984) untersucht. Er entwickelte damals ein mathematisches Modell, in dem die Nord- und Südpole zwar noch über eine Art Faden verbunden sind, der den magnetischen Fluss zwischen ihnen transportiert; doch ist dieser »Dirac String« so elastisch, dass sich die Pole beliebig weit voneinander entfernen können.

Die Suche nach magnetischen Monopolen blieb bisher vergeblich. Oft gibt es zu Elementarteilchen allerdings Gegenstücke mit analogen Eigenschaften in Festkörpern: so genannte Quasiteilchen. So entsprechen sich zum Beispiel das Positron und die Lochladungsträger in Halbleitern. Existieren also von den bislang nicht greifbaren elementaren magnetischen Monopolen womöglich Pendant in Feststoffen?

Vor drei Jahren zeigten Claudio Castelnovo von der University of Oxford (England), Roderich Moessner vom Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden und Shivaji Sondhi von der Princeton University (New Jersey), dass in einem speziellen magnetischen Kristallsystem – einem so genannten Spineis – theoretisch Quasiteilchen auftreten können, die sich wie unabhängige Nord- und Südpole verhalten. Einigen Forschergruppen – darunter eine, mit der Castelnovo und Moessner zusammenarbeiteten – ist es inzwischen gelungen, nahe am absoluten Temperaturnullpunkt experimentelle Hinweise auf solche Monopole zu finden. Allerdings vermochten sie es nicht, die Objekte auch direkt sichtbar zu machen. Außerdem wäre es von Vorteil, magnetische Mono-

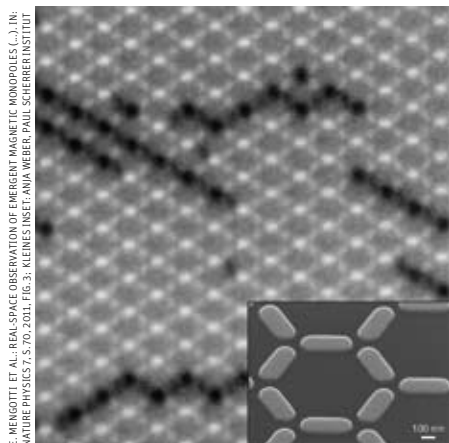
pole bei Raumtemperatur erzeugen zu können.

Das ist unserem Team nun gelungen. Statt natürliche Kristalle zu untersuchen, haben wir mit modernsten Techniken der Nanolithografie ein künstliches Spineis-System erschaffen, dessen Materialeigenschaften sich unmittelbar kontrollieren lassen. Mittels eines speziellen Mikroskops konnten wir den magnetischen Zustand zudem direkt sichtbar machen sowie durch Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und Ergebnissen von Computersimulationen bestätigen, dass tatsächlich Quasiteilchen mit den Eigenschaften magnetischer Monopole vorlagen.

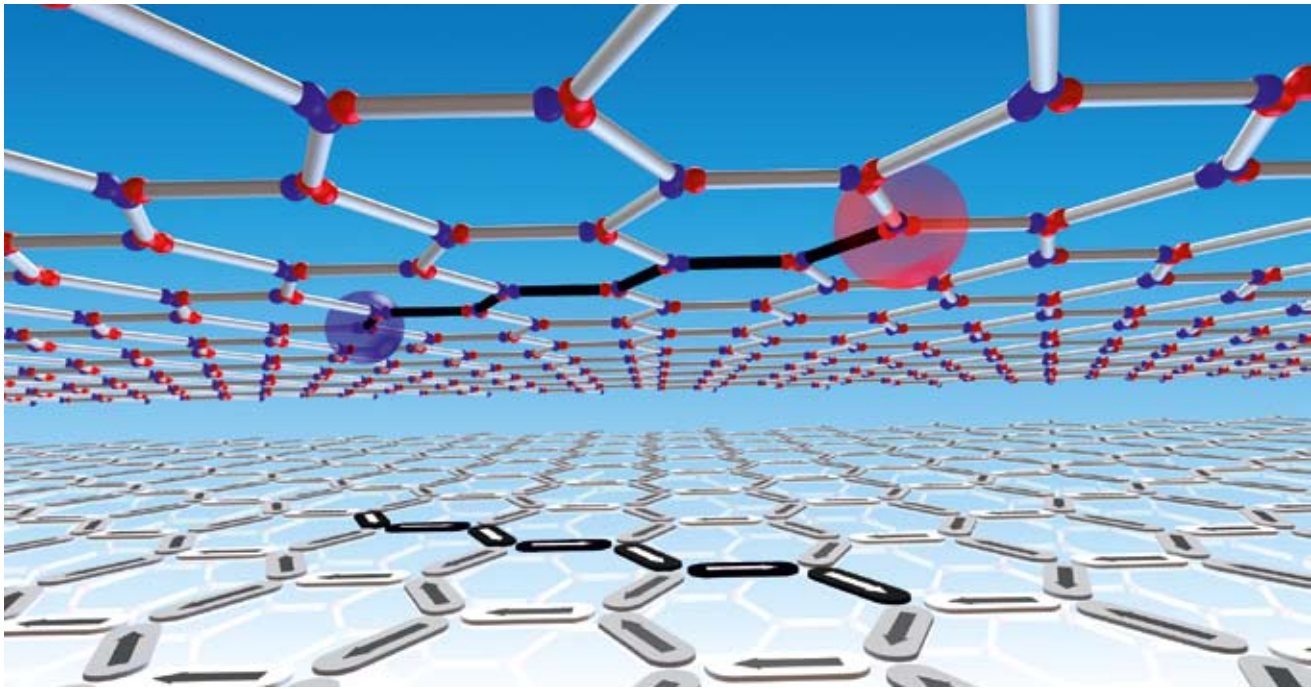
Quasiteilchen im Wabengitter

Bei unserem künstlichen Spineis-System handelt es sich um ein ebenes Gitter aus winzigen, nur einige hundert Nanometer langen Stabmagneten, die Elena Mengotti, Doktorandin am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen (Schweiz), in Form einer Honigwabengitterstruktur zusammengefügt hat. An den Kreuzungspunkten treffen drei solche Nanomagnete mit ihren Enden aufeinander. Dabei handelt es sich entweder um einen Nord- oder einen Südpol. Wegen der ungeraden Zahl der aneinanderstoßenden Nanomagnete ist eine der beiden Polsorten immer in der Überzahl. Die Kreuzungspunkte tragen deshalb eine »magnetische Nettoladung«.

Im Ausgangszustand ist an das Gitter ein Magnetfeld angelegt. Dadurch zeigen die magnetischen Momente der Nanomagnete zur selben Seite. Das Resultat ist ein geordnetes Muster aus



In dieser Röntgenaufnahme des Nanomagnetgitters erscheinen Dirac Strings (siehe Grafik S. 13) als dunkle Linien. Unten ist das rasterelektronenmikroskopische Bild einer einzelnen Wabe eingebildet.



JURI HONEGGER, PAUL SCHERRER-INSTITUT

Zum Erzeugen magnetischer Monopole diente den Autoren ein zweidimensionales Gitter aus wabenartig angeordneten Nanomagneten. Diese sind in der unteren Bildhälfte als Dipole (Pfeile) und in der oberen als Hanteln mit entgegengesetzten Ladungen (rot und blau) an den Enden dargestellt. An den Kreuzungspunkten bleibt jeweils eine Nettoladung. Im Ausgangszustand zeigen alle Nanomagnete mit ihrem Nordpol nach links. Beim Umma-

gnetisieren klappen einzelne von ihnen um und reißen dabei ihre Nachbarn wie fallende Dominosteine mit. Dadurch entstehen Stellen mit umgekehrter magnetischer Nettoladung, die sich als Monopol-Quasiteilchen (große blaue und rote Kugel) frei durch die Honigwabenstruktur bewegen können. Sie sind über eine Kette von umgeklappten Nanomagneten (schwarze Hanteln) miteinander verbunden – die so genannten Dirac Strings.

alternierenden magnetischen Ladungen – ähnlich der Oberfläche eines Kochsalzkristalls, auf der sich positive und negative Ionen abwechseln.

In diesem Zustand sind keine Monopole vorhanden; denn benachbarte Kreuzungspunkte tragen entgegengesetzte magnetische Nettoladungen und verhalten sich wie die räumlich fixierten Nord- und Südpole gewöhnlicher Magnete. Damit Monopole entstehen, muss das äußere Magnetfeld umgekehrt werden. Als Folge davon beginnen einzelne Nanomagnete umzuklappen. Dadurch treten Abweichungen vom idealen Muster der alternierenden magnetischen Ladungen auf.

Diese Störungen können sich frei durch die Honigwabenstruktur bewegen – das entscheidende Merkmal magnetischer Monopole. Sie verschwinden erst wieder, wenn alle Nanomagnete umgeklappt sind und sich erneut ein perfektes Muster gebildet hat, bei dem

das System nun in die andere Richtung magnetisiert ist.

Um zu verstehen, was bei dieser Umpolung genau passiert, muss man den Vorgang etwas näher betrachten. Sobald ein einzelner Nanomagnet umgeklappt ist, folgen die Nachbarn wie eine Reihe umfallender Dominosteine und hinterlassen dabei eine Spur, an deren Enden sich die Monopole als Quasiteilchen befinden: eine physische Realisierung des Dirac Strings. Diesen Dirac String konnten Elena Mengotti und ihre Kollegin Arantxa Fraile Rodríguez jetzt mit der Synchrotron-Lichtquelle Schweiz (SLS) am PSI sichtbar machen. Er erschien als schwarze Linie auf Mikroskopbildern, welche die Magnetisierungsrichtung der Nanomagnete mit 10000-facher Vergrößerung zeigten. Zur Abbildung diente extrem intensive, zirkular polarisierte Röntgenstrahlung, deren Absorption unter anderem von der Magnetisierungsrichtung abhängt.

Aufwändige Computersimulationen von Remo Hügli am University College Dublin (Irland) bestätigten, dass sich der Ummagnetisierungsprozess lawinenartig entlang eines eindimensionalen Pfads vollzieht. In konventionellen magnetischen Materialien, wie sie etwa in Festplatten von Computern verwendet werden, läuft er dagegen völlig anders ab: durch zweidimensionales Wachstum von magnetischen Domänen mit der neuen Orientierung.

Die Bildung der Monopole als Quasiteilchen ist nicht mit den Eigenschaften der einzelnen Nanomagnete allein erklärbar, sondern ergibt sich erst aus deren Zusammenspiel. Analog gilt etwa für eine Welle, dass sie zwar aus einzelnen Wassermolekülen besteht, ihr Verhalten aber nicht einfach aus deren Eigenschaften ableitbar ist. Deshalb beschreiben Physiker sie nicht anhand der Dynamik dieser Einzelmoleküle, sondern als ein kollektives Phänomen. Ein

solches Auftauchen einer neuen Eigenschaft beim Zusammenspiel von Komponenten, die selbst nicht über diese Eigenschaft verfügen, bezeichnen Wissenschaftler als Emergenz. Der theoretische Physiker Philip W. Anderson, Nobelpreisträger von 1977 und Experte für Magnetismus und Unordnung, fand dafür einmal die ebenso knappe wie treffende Formulierung »*More is different*«.

Quasiteilchen ermöglichen neue Einsichten in das kollektive Verhalten eines Systems, und so ist es faszinierend,

dass Diracs theoretische Vision eines Monopols in einem künstlich erschaffenen Gebilde aus Nanomagneten endlich realisiert werden konnte. Diese Monopol-Quasiteilchen lassen sich nicht nur direkt beobachten, sondern auch gezielt beeinflussen. Das eröffnet vielleicht einmal die Möglichkeit, sie als neue Bauelemente für die Speicherung und Verarbeitung von Informationen zu verwenden. Und wer weiß, womöglich finden Forscher zu diesem nun identifizierten Quasiteilchen eines Ta-

ges sogar das Gegenstück in der Welt der Teilchenphysik.

Laura Heyderman ist Leiterin der Forschungsgruppe »Magnetische Nanostrukturen« am Paul Scherrer Institut. **Frithjof Nolting** leitet dort die Forschungsgruppe »Mikroskopie und Magnetismus«. Daneben hat er eine Titularprofessur am Swiss Nanoscience Institute der Universität Basel inne. **Hans-Benjamin Braun** ist Professor für theoretische Physik am University College Dublin und leitet dort die Gruppe für theoretische Festkörperphysik.

ARCHÄOASTRONOMIE

Arithmetik aus Babylonien?

Der Mechanismus von Antikythera, ein Apparat zur Berechnung astronomischer Ereignisse, galt bislang als Inbegriff altgriechischer Wissenschaft. Doch nun stellen einige Historiker dies in Frage.

VON JO MARCHANT

Vor 2000 Jahren baute ein griechischer Handwerker ein komplexes Uhrwerk, das den Gang der Sonne, des Mondes und der Planeten mit Zeigern und Zifferblättern darstellte. Indem er eine Kurbel drehte, konnte der Erbauer ihre Positionen am Himmel vorausberechnen. Sehr wahrscheinlich vermochte dieser »antike Computer«, wie er gern titulierte, auch Sonnenfinsternisse und andere kosmische Ereignisse vorherzusagen. Der Name des genialen Erfinders ging verloren. Aber sein nach dem Fundort, der Insel Antikythera, benannter Mechanismus veränderte unsere Ansichten über das technische Knowhow der antiken Welt.

Immer wieder versuchen Forscher, die Maschine zu rekonstruieren; ihre Bewunderung für die Fertigkeiten des Erbauers wie für das Wissen der Antike ist dabei stets gewachsen (Spektrum der Wissenschaft 5/2010, S. 62). Doch vor Kurzem meldete der Historiker James Evans von der University of Puget Sound in Tacoma (US-Bundesstaat Washington) Zweifel an: Dieser Apparat entspräche nicht griechischer Astronomie, sondern babylonischer!

Die Überreste des fraglichen Mechanismus wurden 1901 aus einem Schiffswrack geborgen und werden heute im Archäologischen Nationalmuseum in Athen aufbewahrt: 82 größere und kleinere Fragmente korrodierter und ineinander verbackener Zahnräder und Anzeigeelemente aus Bronze. Sie wurden vermessen, fotografiert und geröntgt sowie vor wenigen Jahren erstmals mit einem Computertomografen durchleuchtet. Verschiedene Indizien sprechen für eine Fertigung im frühen 1. oder 2. Jahrhundert v. Chr.

Das mutmaßlich römische Schiff sank aber wohl erst zwischen 70 und 60 v. Chr. Einige Historiker wie Attilio Mas-

trocinque von der Universität in Verona glauben, der Frachter hatte Kriegsbeute geladen: Rom kämpfte damals gegen den pontischen König Mithridates VI. Dabei sei den Eroberern laut dem griechischen Chronisten Strabon auch ein mysteriöser »Globus von Billarius« in die Hände gefallen und seitdem verschollen – möglicherweise der geheimnisvolle Mechanismus.

Ein Wunderwerk aus Holz und Bronze

Einst umschloss diesen ein hölzerner Kasten, etwa 30 Zentimeter hoch und 20 breit, mit mehr als 30 bronzenen Zahnrädern. Das Gehäuse trug griechische Inschriften. Auf seiner Vorderseite befand sich ein großes, kreisrundes Zifferblatt mit zwei konzentrischen Skalen. Die eine trug Monatsnamen und Teilstriche für die 365 Tage des Jahres; die andere war eine 360-Grad-Skala mit Symbolen der zwölf Tierkreiszeichen.

Vermutlich gaben Zeiger auf diesen Zifferblättern das Datum an sowie die Positionen von Sonne, Mond und den fünf damals bekannten Planeten relativ zu den Sternbildern des Zodiakus. Au-

Antike im Video

Eine viertelstündige Filmdokumentation über den Antikythera-Mechanismus aus dem Jahr 2008 sowie einen Kurzfilm über den Nachbau des Instruments mit Lego-Bausteinen finden Sie als Onlinevideos unter:

www.spektrum.de/artikel/1061768

ßerdem repräsentierte eine drehbare Kugel – zur Hälfte schwarz, zur Hälfte silbern – die Mondphasen. Buchstaben auf der Tierkreisskala verwiesen den Benutzer auf Inschriften, die über das Erscheinen und Verschwinden wichtiger Sterne im Jahresverlauf informierten.

Auch die Gehäuserückseite war belegt. Ein spiralförmiges Zifferblatt stellte den so genannten Metonzyklus dar, einen 235-monatigen Kalender, der annähernd 19 Jahre umfasst. Nach dieser Zeit wiederholen sich die Längen der Mondphasen im Jahresverlauf. Darunter befand sich das Anzeigeblatt des 223-monatigen Saroszyklus, gleichfalls in Spiralförmigkeit. Er diente der Berechnung von Sonnen- und Mondfinsternissen. Beide Zyklen waren bereits den Babyloniern bekannt.

Original griechisch hingegen schienen andere Vorrichtungen, da sie die ureigenen geometrischen Kosmosmodelle der Griechen verkörperten. Diese basierten auf idealen Kreis- und Kugel­formen, um die Bewegungen der Planeten zu beschreiben. Solche Entwürfe waren zunächst eher qualitativ und philosophisch motiviert anstatt präzise bestimmt. Aber im 2. Jahrhundert v. Chr. versuchten Gelehrte wie Hipparch auf Rhodos die griechischen Modelle nach babylonischem Vorbild auch quantitativ zu untermauern und mit Himmelsbeobachtungen abzugleichen. Der Antikythera-Apparat gilt als State of the Art jener geometrischen Theorien.

Darauf verweisen auch Röntgenaufnahmen, die einen Mechanismus im Mechanismus sichtbar gemacht haben, der vermutlich die am Firmament sichtbare Bewegung des Mondes nachbildete. Weil dessen Umlaufbahn elliptisch ist, scheint er an bestimmten Punkten schneller voranzukommen als an anderen. Für die antiken Naturphilosophen ein Problem, war man doch überzeugt, dass alle Himmelskörper perfekt kreisförmige Bahnen beschreiben sollten. Hipparch war im 2. Jahrhundert v. Chr. der Erste, der eine Lösung fand. Die Mondbewegung entstehe durch Überlagerung zweier Kreisbahnen: zum einen einer Bahn um die Erde, auf welcher zum anderen der Mittel-



ANTIKYTERA MECHANISM RESEARCH PROJECT /
ARCHAIOLOGISCHES NATIONALMUSEUM ATHEN

Einst war er der komplexeste Apparat der Antike, heute geben die vor der Insel Antikythera geborgenen Fragmente (hier mit 18 Zentimeter Breite das größte) der Forschung Rätsel auf.

punkt einer engeren mit Umlaufe. Der Mond führte demnach eine exzentrische Bewegung aus, daher sein eigentümliches Verhalten am Himmel.

Der Mechanismus von Antikythera scheint dies in Vollendung nachzuahmen, wie der Astronom Mike Edmunds von der Cardiff University (Wales) und seine Kollegen 2006 in der Zeitschrift »Nature« darlegten: Ein Stift auf einem Zahnrad, der sich in einem Schlitz in einem anderen Zahnrad bewegen kann, wird von letzterem mitgenommen und somit in Rotation versetzt. Dabei dreht er sich aber um die eigene, leicht versetzte Achse. Edmunds und weitere Wissenschaftler nehmen an, dass der Erfinder mit einer ähnlicher Technik auch den Weg der Sonne und der damals bekannten Planeten modelliert hat. Zwar fehlen die dafür erforderlichen Zahnräder, aber die Vermutung klingt plausibel: Griechische Astronomen hätten mit exzentrischen Modellen die Planetenbewegungen mit ihren

Beobachtungen in Einklang zu bringen versucht. Die Grundidee, die von Ptolemäus im 2. Jahrhundert n. Chr. weiterentwickelt wurde, setzte jeden Planeten in einen kleinen Kreis, Epizykel genannt, dessen Zentrum um die Erde rotiert. Erst Johannes Kepler erkannte im 17. Jahrhundert, dass es sich in Wahrheit um elliptische Umlaufbahnen handelt.

Um zu veranschaulichen, wie der Antikythera-»Computer« funktioniert haben könnte, versuchte Michael Wright, Kurator am Science Museum in London, ihn nachzubauen. Mit kleineren Zahnrädern, die auf größeren laufen, konnte er die Epizykel der Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn sowie die variierende Geschwindigkeit der Sonnenbewegung darstellen. Mit dem Antikythera-Mechanismus schienen die Griechen ihre Theorie der Epizykel in Bronze gegossen zu haben.

Doch nun stellt James Evans die bisherigen Erkenntnisse auf den Kopf. Er untersuchte erneut das Zifferblatt der

das erste beziehungsweise letzte Erscheinen am nächtlichen Himmel. In diesem Fall hätte jeweils ein einfaches Zahnradgetriebe mit einer konstanten Geschwindigkeit als Zeigerantrieb genügt. Die verschiedenen, von den Babyloniern entdeckten Perioden wären dann durch die Übersetzungsverhältnisse im jeweiligen Getriebe modelliert worden – ohne epizyklische Komponenten.

Evans und Jones hoffen nun, dass die Inschriften auf der Vorderseite mehr verraten. Sie liegen im Innern der Fragmente und wurden erst durch Röntgenaufnahmen zugänglich. Agamemnin Tselikas, Direktor des Zentrums für Geschichte und Paläografie in Athen, und Yanis Bitsakis, Physiker an der dortigen Universität, versuchen sie zu rekonstruieren. Bis jetzt haben sie Erwähnungen von Mars, Merkur und Venus entziffert sowie Hinweise auf bestimmte Bahnpunkte.

Um all dem die Krone aufzusetzen, behauptet Evans sogar, dass auch der epizyklische Antrieb der Mondberech-

nung der babylonischen Arithmetik entspräche, nicht der Epizykel-Theorie Hipparchos. Denn der Stift-Schlitz-Mechanismus ergäbe eine weit größere Variation der Geschwindigkeit, als dessen Modell verlange, sie entspräche eher dem, was die Babylonier bei ihren Berechnungen verwendeten. »Vielleicht überlegte ein Handwerker, wie er die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Mondes gemäß der babylonischen Theorie mittels Zahnrädern umzusetzen könne – und kam durch Zufall auf die Idee mit dem epizyklischen Antrieb.«

Anders ausgedrückt wären Epizykel dann kein Einfall der Naturphilosophen gewesen, sondern eine Erfindung von Mechanikern. Als griechische Astronomen bemerkten, wie genau diese Apparaturen die Beobachtungen modellierten, könnten sie die Idee der einander überlagernden Kreisbewegungen übernommen haben.

Für deren Quelle gibt es tatsächlich kaum Belege. Meist gilt der griechische Astronom und Mathematiker Apolloni-

us von Perge als Urheber, der im 3. Jahrhundert v. Chr. in Alexandria wirkte. Interessanterweise scheinen auch Zahnräder in dieser Zeit aufgekommen zu sein. Der legendäre Archimedes von Syrakus soll einfache Getriebe zur Kraftübersetzung verwendet haben.

»Vielleicht sollten wir die Beziehung zwischen Handwerk und Astronomie überdenken«, schlägt Evans vor. »Meist gilt sie als Einbahnstraße, aber vielleicht war sie damals ein Zusammenspiel.« Mit anderen Worten: Als jener griechische Handwerker den Antikythera-Mechanismus austüftelte, um möglicherweise babylonische Theorie in Bronze zu gießen, inspirierte er die Gelehrten seiner Zeit zu einer neuen Sichtweise auf das Universum.

Jo Marchant ist Autor von »Decoding the Heavens«, einem Buch zum Thema.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 468, S. 496–498, 25. November 2010

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



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

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



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

- ▶ Vergünstigte Sonderhefte und das Produkt des Monats zum Spezialpreis



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

Defekte Kraftwerke in grauen Zellen

Beim Parkinsonsyndrom sterben Neurone in einer bestimmten Hirnregion ab, weil ihre Energieversorgung gestört ist. Diese neue Erkenntnis könnte Möglichkeiten zur Behandlung der Krankheit in einem frühen, noch symptomfreien Stadium eröffnen.

VON GERLINDE FELIX

Bei der Parkinsonkrankheit, umgangssprachlich auch als Schüttellähmung bezeichnet, gehen nach und nach die Nervenzellen des grau-schwarzen Mittelhirnkerns (Substantia nigra) zu Grunde. Diese Neurone produzieren den Botenstoff (Neurotransmitter) Dopamin und sind für die Feinabstimmung von Bewegungen wichtig. Innerhalb von fünf bis sieben Jahren stirbt bei Parkinsonpatienten etwa die Hälfte von ihnen ab. Dadurch reduzieren sich Spontanbeweglichkeit, Gestik und Mimik. Muskeln versteifen, und die ruhende Hand beginnt zu zittern.

Warum die Nervenzellen der Substantia nigra absterben, ist bis heute nicht geklärt. Schon seit einiger Zeit aber haben Forscher die zellinternen Mitochondrien im Visier. In ihnen läuft die so genannte Atmungskette ab. Dabei setzen diverse Enzyme Wasserstoff stufenweise mit Sauerstoff zu Wasser um und speichern die frei werdende Energie in Form des Moleküls Adenosintri-phos-

phat. Für das Gehirn sind diese zellulären Kraftwerke ganz besonders wichtig; denn das Organ macht zwar nur zwei Prozent des Körpergewichts aus, verbraucht aber 20 Prozent der verfügbaren Energie.

Wissenschaftler an der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts) haben nun festgestellt, wie die mitochondriale Atmungskette im Vorfeld der Parkinsonkrankheit Schaden nehmen kann (*Science Translational Medicine* 2/52, S. 73). Ihre Erkenntnisse sind das Ergebnis einer Metaanalyse, die 17 Studien mit Gewebeproben von insgesamt 410 Menschen umfasst und im Rahmen des internationalen GPEX-Projekts (Global PD Gene Expression) durchgeführt wurde.

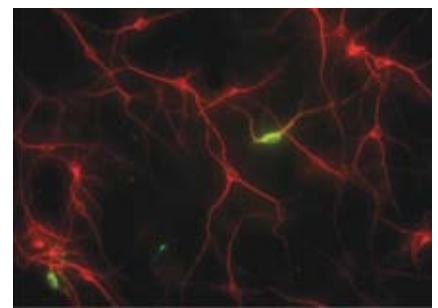
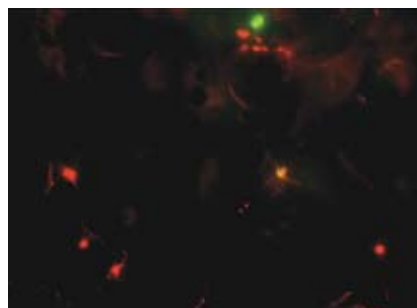
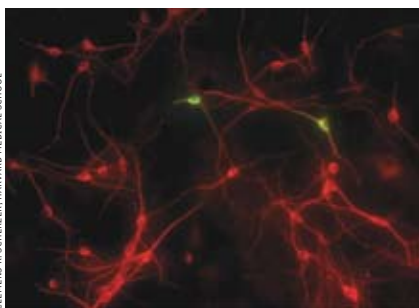
Der Harvard-Wissenschaftler Clemens Scherzer und seine Mitarbeiter analysierten sämtliche von den GPEX-Mitgliedern publizierte Daten über Gewebeproben aus der Substantia nigra verstorbener Menschen, die entwe-

der schon an Parkinsonsymptomen litten, eine noch unauffällige (subklinische) Frühform der Erkrankung aufwiesen oder aber völlig gesund waren.

Verräterisches Transkriptom

Im Mittelpunkt des Projekts stand das so genannte Transkriptom von Dopamin produzierenden Nervenzellen: die Gesamtheit der darin aktiven Gene. Abweichungen zwischen gesunden Personen und Parkinsonpatienten fanden sich bei zehn Gruppen von Genen. Auf diesen sind – so das interessante Ergebnis – ausnahmslos Proteine verschlüsselt, die für die Energieproduktion in den Mitochondrien oder deren Erhalt und Reparatur benötigt werden.

Das spricht deutlich für einen Defekt dieser zellulären Kraftwerke als Ursache der Parkinsonkrankheit: Wahrscheinlich können sie nicht mehr genügend Energie produzieren. Schäden erleiden die Nervenzellen aber wohl auch dadurch, dass hochreaktive Zwi-



Dopamin produzierende Nervenzellen, in dieser Aufnahme mit einem grünen Fluoreszenzfarbstoff markiert, sind normalerweise über viele Fortsätze, hier rot eingefärbt, miteinander verbunden (links). Diese Fortsätze verschwinden nach Injektion des Proteins Alpha-Synuclein, dessen zerstörerische Wirkung auf bestimmte Neurone bekannt ist (Mitte). Wurde zuvor jedoch das Gen *PGC-1-alpha* aktiviert, bleiben sie erhalten (rechts).

schenprodukte der Atmungskette nicht normal weiterverarbeitet oder entsorgt werden. Von beidem sind Dopamin produzierende Nervenzellen als ausgesprochene »Energiefresser« besonders stark betroffen.

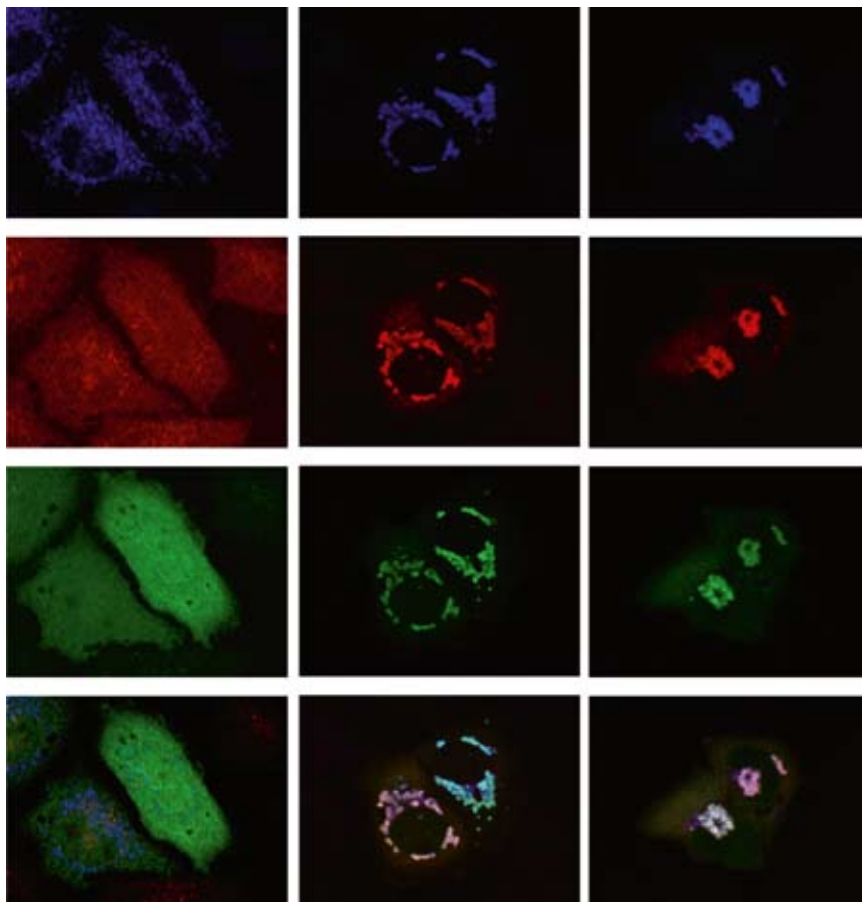
Noch etwas anderes fiel bei der Analyse der Daten auf: Alle Erbfaktoren aus den zehn Gruppen unterstehen einem »Master-Gen« namens *PGC-1alpha* (*peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator-1alpha*). Es reguliert sie ähnlich wie der Hauptschalter eines Sicherungskastens die Stromversorgung im Haus.

Könnte also ein Fehler bei dieser Regulation, der schon in einem sehr frühen, noch symptomlosen Stadium auftritt, eine Hauptursache der Parkinsonkrankheit sein? Denkbar wäre, dass *PGC-1alpha* auf Grund einer Mutation seine Aufgabe nicht mehr richtig erfüllt oder in zu geringer Konzentration gebildet wird.

In diesem Fall könnte das Protein zum Ansatzpunkt einer frühzeitigen Diagnose oder sogar Therapie der Parkinsonkrankheit werden. Das bestätigen Versuche, bei denen Jean-Christophe Rochet und seine Mitarbeiter an der Purdue University in West Lafayette (Indiana) das Gen *PGC-1alpha* in künstlich gezüchteten Dopamin produzierenden Nervenzellen aktivierten. Diese waren daraufhin sowohl gegen das Pestizid Rotenon gefeit, das parkinsonartige Symptome hervorruft, als auch gegen das Protein Alpha-Synuclein, das als hauptverantwortlich für den Untergang der Neurone in der Substantia nigra gilt.

Schon früher hatte ein Team um Bruce M. Spiegelman vom Dana-Farber Cancer Institute in Boston (Massachusetts) gezeigt, dass MPTP (Methylphenyltetrahydropyridin) bei Mäusen ohne funktionierendes *PGC-1alpha* sehr viel mehr Dopamin produzierende Neurone absterben lässt. Rauschgiftsüchtige, die sich diese Substanz in den 1980er Jahren versehentlich statt der Designerdroge MPPP (Methylphenylpropionoxypiperidin) verabreichten, waren an der Schüttellähmung erkrankt.

Bereits Anfang 2010 veröffentlichten Wissenschaftler des Hertie-Instituts



LIANE SCHÜSTER, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Die fluoreszenzmikroskopischen Aufnahmen von zwei Nervenzellen zeigen – von oben nach unten – die Mitochondrien (blau), die Proteine PINK1 (rot) und Parkin (grün) sowie alle drei Zellbestandteile zusammen. Anfangs liegen PINK1 und Parkin gleichmäßig verteilt im Zellplasma vor (links). Zwei Stunden nach einer chemischen Schädigung der Mitochondrien haben sie sich an deren Außenmembran angereichert (Mitte). Weitere zwei Stunden später erscheinen die Mitochondrien in der Nähe des Zellkerns zu einem kompakten Müllpaket verdichtet (rechts).

für klinische Hirnforschung am Universitätsklinikum Tübingen unter Leitung von Wolfdieter Springer weitere Ergebnisse zur Entstehung von Parkinson (*Nature Cell Biology* 12, S. 119–131). Dabei ging es um die beiden nicht von *PGC-1alpha* regulierten Gene *PINK1* und *Parkin*. Schon länger war bekannt, dass sie in mutierter Form die Krankheit mit verursachen; unklar blieb aber, auf welche Weise.

Nur so viel stand fest: Das von *Parkin* kodierte Enzym gleichen Namens kennzeichnet zum Abbau bestimmte Proteine. Es ähnelt somit Waldarbeitern, die zu fällende Bäume rot markieren. Sein gezieltes Ausschalten bei Mäusen stört folglich die Entsorgung

defekter Mitochondrien. Die Rolle des mitochondrialen Enzyms PINK1 und sein Zusammenwirken mit Parkin bei der Parkinsonkrankheit lag jedoch im Dunkeln. Springer und seine Mitarbeiter brachten nun Licht in dieses Dunkel.

Demnach reichert sich PINK1 in der Außenmembran defekter Mitochondrien an. Dort lockt es das frei in der Zellflüssigkeit schwimmende Parkin an. Dieses verpasst dem geschädigten Organell die Abbaumarkierung in Form des kleinen Moleküls Ubiquitin, das es an das Protein VDAC1 (*voltage-dependent anion channel 1*) an der Oberfläche des Mitochondriums heftet. Weitere Ubiquitinmoleküle lagern sich an das

Macht Sex hellseherisch?

Erotik soll Blick in die Zukunft ermöglichen.

Einer Umfrage zufolge halten zwei Drittel der amerikanischen Psychologen außersinnliche Wahrnehmung für möglich. Wie ich vermute, sind auch hier zu Lande viele Seelenforscher ähnlich aufgeschlossen für Telepathie und Präkognition. Unter ihnen dürfte ein demnächst im renommierten »Journal of Personality and Social Psychology« erscheinender Artikel nur müdes Achselzucken oder gar einverständliches Kopfnicken auslösen.

Mit aufwändigen Versuchsreihen möchte der unter Fachkollegen angesehene Psychologe Daryl Bem, Professor emeritus an der Cornell University im US-Bundesstaat New York, ein für alle Mal den strengen Nachweis führen, dass wir das naturgegebene Vermögen besitzen, mit einem sechsten Sinn in die Zukunft zu schauen. Dieser von manchen Psychologen offenbar lange gehegte Wunsch ist, wenn man Bem folgt, jetzt endlich in Erfüllung gegangen. Wie sich auch ohne Präkognition leicht vorhersehen lässt, haben sich allerdings die Nörgler und Skeptiker sofort auf die im Internet vorveröffentlichte Arbeit (<http://dbem.ws/FeelingFuture.pdf>) gestürzt und methodische Haare in der extrasensorischen Suppe gesucht.

In der wohl spektakulärsten seiner neun Versuchsreihen setzte Bem die Probanden vor einen Computerschirm, auf dem nebeneinander zwei Vorhänge zu sehen waren, und versprach ihnen, hinter einem der beiden könnten sie per Mausclick eine pornografische Szene aufdecken, während sich hinter dem anderen bloß ein neutrales Motiv verberge. Beim Auszählen der Trefferquote fand der wissensdurstige Forscher einen leichten Überhang von gelungenen Enthüllungen, den er stracks als eine naturwüchsige Fähigkeit zu erotischer Hellseherei interpretierte. Verbargen die virtuellen Vorhänge hingegen jeweils zwei ganz andere Motivgegensätze, etwa schöne Landschaft kontra eklige Spinne, so versagte die Präkognition kläglich.

Vielleicht habe sich, so mutmaßt Bem, die spezielle Gabe sexuell angeregter Präkognition im Lauf der Evolution entwickelt, weil sie Vorteile im Daseinskampf bot, insbesondere bei Gefahrenabwehr und Partnerwahl: Wie gut, wenn man schon vorher weiß, ob hinter dem Busch, auf den man neugierig zuhält, gleich ein paarungswilliger Partner hervorspringen wird!

An solchen mehr oder weniger plausiblen Geschichten habe ich durchaus meinen Spaß. Ich hätte mir den Artikel also gerne gefallen lassen, würde Bem nicht am Ende über die Physik hinter der extrasensorischen Wahrnehmung spekulieren. Wie nicht anders zu erwarten, bemüht er dafür – die Quanten. Wozu die nicht alles herhalten müssen! Bem zitiert Kraut und Rüben, wirft mit Begriffen wie Verschränkung, bellscher Ungleichung und Nichtlokalität um sich, als handle es sich um Kanonenkugeln, die den Zusammenhang von Ursache und Wirkung durchlöchern. Da der so genannte Kollaps der Wellenfunktion etwas mit dem Bewusstsein des Beobachters im Messprozess zu tun haben soll, wird die Abfolge von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft flugs zur bloßen Ansichtssache erklärt. Voilà, fertig ist sie, wenigstens in groben Umrissen, die Physik der außersinnlichen Wahrnehmung.

Und auf einmal dämmert mir auch, wie Bem auf seinen Versuchsaufbau gekommen ist. Wie ich frequentierte er früher wohl einen der inzwischen ausgestorbenen Videoshops, die für ein paar Mark oder Dollar VHS-Kassetten verliehen. Bei den meisten gab es in der Ecke einen Vorhang, hinter dem man pornografisches Material vermuten durfte – mit einer hellseherischen Trefferquote von 100 Prozent!



Michael Springer

erste an und bilden eine Kette, die sich mit denen anderer markierter Organellen vereinigt, so dass ein Knäuel (Cluster) entsteht.

Zugleich erkennt das Adapterprotein p62/SQSTM1 – gewissermaßen der Müllmann der Zelle – diese Kette als Signal zum Aufräumen. Dazu verdichtet es das Knäuel zu einem kompakten Abfallbündel und hüllt es in eine Lipid-Protein-Membran für den Transport zu den Abbaustationen, den Lysosomen. Diese enthalten saure Enzyme, die Proteine spalten und deshalb nicht in die Zellflüssigkeit gelangen dürfen. Indem ihre Membran mit der des Müllpakets verschmilzt, gelangt der Abfall ins Innere des Lysosoms, wo er – risikolos für die Zelle – zerlegt wird.

Sind PINK1 und Parkin durch eine Mutation außer Gefecht gesetzt, läuft dieser komplizierte Vorgang nicht mehr reibungslos ab. Als Folge davon bleiben defekte Mitochondrien zu lange in der Nervenzelle.

Mitochondrien im Fokus

Die beiden Untersuchungen machen deutlich, dass eine gestörte Mitochondrienfunktion und die mangelhafte Entsorgung defekter Kraftwerke eine entscheidende Rolle bei der Entstehung der Parkinsonkrankheit spielen. Damit könnten sie mittelfristig auch eine neue Therapieoption eröffnen. So sind bereits Medikamente, die den Hauptschalter *PGC-1alpha* aktivieren, für andere Erkrankungen zugelassen, zum Beispiel für Diabetes.

Wichtig wäre allerdings auch, mit einem Biomarker die noch symptomfreie Frühform der Parkinsonkrankheit entdecken zu können. Dazu läuft derzeit an der Harvard Medical School eine Untersuchung (Harvard NeuroDiscovery Center Biomarker Study), in der Scherzer und Kollegen 15 aussichtsreiche Kandidaten untersuchen. »Außerdem gibt es viel versprechende Daten zu Alpha-Synuclein als Biomarker in der Gehirn-Rückenmark-Flüssigkeit«, so der Forscher.

Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Wartenberg.

Ihr Erfolgspaket.

Lesen Sie 4 Wochen das Handelsblatt zum Preis von nur 31,50 €. Sie zahlen nur 1,50 € statt 2,10 € pro Ausgabe und sichern sich ein exklusives Dankeschön Ihrer Wahl.



... PLUS

CERRUTI Rollerball H204000CR
Rollerball aus der CERRUTI-Manufaktur mit auswechselbarer, schwarz schreibender Mine



... ODER

Troika Inukshuk H204000IK
Geduldsspiel und multifunktionales Schreibtisch-Objekt, bestehend aus 5 magnetischen Steinen (Kunstharz) und Edelstahlunterlage, grau.



... ODER

Bergmann popcube H204000CW
Retro-UKW-Radio mit Direct-Dock-in für fast alle gängigen MP3-Player, weiß. Lieferung ohne iPod.



**4 Wochen für nur
1,50 € pro Ausgabe
28% Ersparnis + Geschenk**

Bestellen Sie jetzt!

 **Online unter: www.handelsblatt.com/4wochenlesen**

 **Per Telefon: 0 180 5.99 00 10* • Code: H204000**

*0,14 €/Min. a. d. dt. Festnetz, Mobilfunkhöchstpreis 0,42 €/Min.

Handelsblatt

Substanz entscheidet.

GIFTGAS mit Heilkraft

Schwefelwasserstoff stinkt nach faulen Eiern und ist in hohen Dosen absolut tödlich. Trotzdem scheint es eine wichtige Rolle in unserem Körper zu spielen. Diese verblüffende Erkenntnis könnte neue Behandlungsstrategien für Patienten mit Herzinfarkt und anderen Leiden eröffnen.

Von Rui Wang



Gestank nach faulen Eiern in einer peinlich sauberen Notfallaufnahme? Diese widersinnig scheinende Vorstellung könnte bald Realität werden. Zwar ist Schwefelwasserstoff (H_2S), der den unangenehmen Geruch verursacht, ein giftiges Gas. Paradoxerweise aber spielt die Substanz, wie Wissenschaftler in den letzten zehn Jahren herausgefunden haben, bei zahlreichen Vorgängen im Körper eine wesentliche Rolle – etwa bei der Kontrolle des Blutdrucks und der Regulation des Stoffwechsels. Befunde meiner Forschungsgruppe deuten denn auch darauf hin, dass H_2S bei sachgemäßer Anwendung eine Reihe günstiger Wirkungen hat. So kann es die Behandlung von Herzinfarktpatienten unterstützen und eines Tages vielleicht sogar Unfallopfer bis zur lebensrettenden Operation oder Bluttransfusion am Leben halten.

Seit Jahrhunderten kennen Forscher die toxische Wirkung von H_2S auf den Menschen. Heute bildet das Gas das größte Sicherheitsrisiko bei Arbeiten an Bohrlöchern in Öl- und Gasfeldern, an Pipelines und in Raffinerien. Unsere Nase kann bereits Konzentrationen von 0,0047 ppm (*parts per million*, tausendstel Promille) wahrnehmen. Bei 500 ppm beeinträchtigt H_2S die Atmung, und 800 ppm führen nach fünf Minuten zum Tod. Andererseits braucht der Mensch das übel riechende Gas zum Überleben.

Um den Grund dafür zu verstehen, müssen wir rund 250 Millionen Jahre zurückgehen – in eine Zeit, als die Aussichten für das Leben auf der Erde ziemlich düster waren. Das Perm neigte sich dem Ende zu, und eines der verheerendsten Artensterben aller Zeiten bahnte sich an. Damals stießen Vulkane in Sibirien bei gewaltigen Ausbrüchen Unmassen an Kohlendioxid aus. Das Treibhausgas verursachte eine Serie von Klima- und Umweltveränderungen, in deren Folge der Sauerstoffgehalt der Ozeane dramatisch absank – nach gängiger Ansicht der Auslöser des massenhaften Artensterbens (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2007, S. 26).

Die geänderte Ozeanchemie war für sauerstoffatmende (aerobe) Meerestiere eine Katastrophe. Anaerobe Organismen wie grüne Schwefelbakterien blühten dagegen auf. Da sie große Mengen an Schwefelwasserstoff erzeugten, machte ihr Erfolg die Ozeane für die meisten der verbliebenen aeroben Meeresbewohner noch unwirtlicher. Schließlich – so die Theorie – gelangte das tödliche Gas aus dem Wasser in die Luft und löschte auch an Land Pflanzen und Tiere aus. Am Ende des Perms waren 95 Prozent der marinen und 70 Prozent der terrestrischen Spezies verschwunden.

Die Bedeutung des Schwefelwasserstoffs für physiologische Vorgänge beim Menschen ist wahrscheinlich ein Relikt

aus dieser längst vergangenen Zeit. Die Katastrophe überlebten wohl nur Organismen, die Schwefelwasserstoff zumindest teilweise tolerieren, in manchen Fällen sogar konsumieren konnten. Dadurch sind auch wir Menschen noch in gewissem Grad von ihm abhängig.

Immer der Nase nach

Schwefelwasserstoff ist nicht das einzige schädliche Gas, das eine physiologische Rolle spielt. Seit Anfang der 1980er Jahre fanden Wissenschaftler Hinweise, wonach der menschliche Körper Stickstoffmonoxid (NO) in geringen Konzentrationen herstellt und als Signalmolekül einsetzt. In Arbeiten, die 1998 mit dem Nobelpreis für Physiologie oder Medizin gewürdigt wurden, zeigten Robert F. Furchgott von der University of Miami (Florida), Louis J. Ignarro von der University of California in Los Angeles und Ferid Murad von der Stanford University (Kalifornien), dass Stickstoffmonoxid unter anderem Blutgefäße erweitert, das Immunsystem beeinflusst und als Botenstoff Signale zwischen Neuronen überträgt. Ähnliches gilt für das hochgiftige Kohlenmonoxid (CO), ein farb- und geruchloses Gas, das bei unvollständiger Verbrennung entsteht.

Nachdem ich mich zuvor eingehend mit CO und NO beschäftigt hatte, war ich überzeugt davon, dass der Körper weitere solcher gasförmigen Neurotransmitter produziert und

AUF EINEN BLICK

DIE ÜBERRASCHENDE SEITE VON SCHWEFELWASSERSTOFF

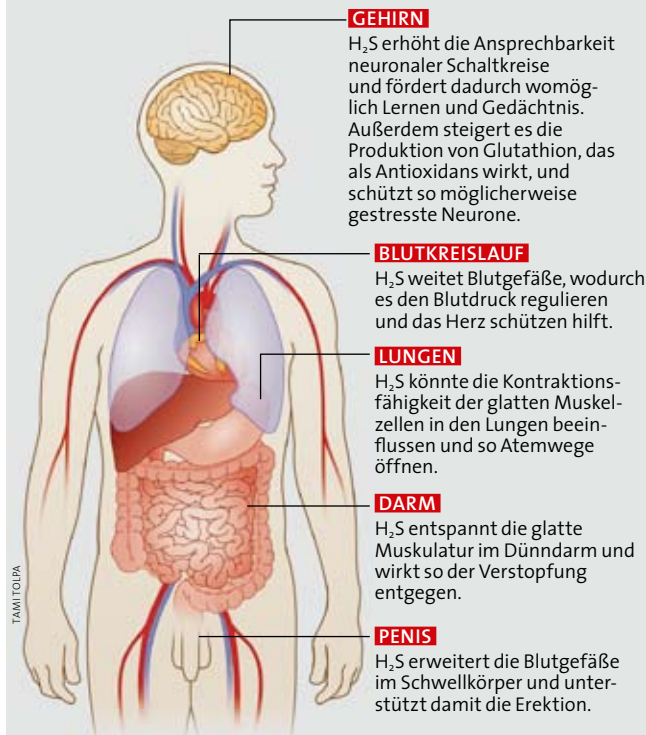
1 Nicht nur **Fäulnisbakterien im Darm** stellen das übel riechende Gas Schwefelwasserstoff (H_2S) her. Auch **Gefäßwände, Gehirn** und **Bauchspeicheldrüse** produzieren kleine Mengen der Substanz, die in hoher Konzentration tödlich wirkt.

2 Nach neuen Erkenntnissen entspannt H_2S die **glatte Muskulatur**. Dadurch erweitert es die Blutgefäße und erniedrigt den Blutdruck. Außerdem scheint es im Gehirn die Empfänglichkeit neuronaler Schaltkreise für Reize zu steigern, Nervenzellen gegen stressbedingte Schäden zu schützen und an der **Regulation des Stoffwechsels** beteiligt zu sein. So versetzt das Gas Mäuse in eine Art Winterschlaf, in dem ihre Lebensfunktionen drastisch eingeschränkt sind.

3 Diese Forschungsergebnisse wecken Hoffnungen auf neue Therapiemethoden bei bisher teils nur schlecht behandelbaren Erkrankungen wie **Herzinfarkt, Schlaganfall, Erektionsstörungen** und **Entzündungen im Magen-Darm-Trakt**. Vielleicht kann H_2S sogar Unfallopfer bis zur lebensrettenden Operation oder Bluttransfusion am Leben halten, indem es ihren Stoffwechsel vorübergehend auf ein Minimum absenkt.

Vielfacher Nutzen

Der menschliche Körper stellt täglich winzige Mengen von Schwefelwasserstoff (H_2S) her. Tatsächlich scheint das Gas in vielfältiger Weise zum Funktionieren des Organismus beizutragen. Allerdings hat es auch negative Wirkungen. So kann es in zu hoher Konzentration die Insulinproduktion behindern und vermutlich Entzündungen verstärken.



Warum Knoblauch gesund ist

Medizinischen Untersuchungen zufolge kann Knoblauch die Elastizität der Gefäßwände erhöhen, Blutplättchen am Verklumpen hindern und den Blutdruck senken. All das verringert die Gefahr eines Herzinfarkts, Schlaganfalls oder einer Nierenerkrankung. Außerdem gibt es Hinweise darauf, dass der Verzehr das Immunsystem stärkt und das Krebsrisiko vermindert.

Der gesundheitliche Nutzen von Knoblauch beruht wahrscheinlich auf seiner Fähigkeit zur Freisetzung von Schwefelwasserstoff. Wie David W. Kraus von der University of Alabama in Tuscaloosa 2007 berichtete, bauen Moleküle in der Membran roter Blutkörperchen die in Knoblauch enthaltenen Schwefelverbindungen zu H_2S ab. Im selben Jahr publizierten Yizhun Zhu und seine Kollegen von der Fudan-Universität in Schanghai (China) Befunde, wonach Knoblauch mit S-Allyl-L-cystein eine Substanz enthält, welche die Produktion und Zirkulation von H_2S im Körper ankurbelt.



GETTY IMAGES / BRAND X PICTURES

nutzt. Aber welche? Im Sommer 1998 kam mir eine Idee. Als ich nach einem arbeitsreichen Tag nach Hause zurückkehrte, empfing mich ein ekelhafter Gestank. Schließlich fand ich die Quelle in einer Vitrine, in der unsere »Familienschätze« ausgestellt waren. Der Geruch entströmte einem zerbrochenen, fauligen Osterei, das meine älteste Tochter in der Schule bemalt hatte. Damals fragte ich mich zum ersten Mal, ob vielleicht auch die Organe und Gewebe unseres Körpers dieses Gas produzieren.

Wie eine Literaturrecherche ergab, war bereits bekannt, dass H_2S nicht nur im menschlichen Verdauungsapparat vorkommt, sondern auch im Gehirn, wo es eine aktive Rolle spielt – möglicherweise als Signalmolekül oder zum Schutz vor Stressschäden. Außerdem entsteht es, wie Forscher gezeigt hatten, in Blutgefäßen. Weil sich meine früheren Untersuchungen um die Auswirkungen von CO und NO auf das Herz-Kreislauf-System gedreht hatten, konzentrierte ich mich auch jetzt auf diesen Bereich. In ersten Tests konnten meine Kollegen und ich kleine Mengen des Gases in Blutgefäßen von Ratten nachweisen und so die älteren Befunde bestätigen.

Durchbruch in der Enzymforschung

Im nächsten Schritt wollten wir herausfinden, wie der Körper das von uns aufgespurte H_2S produziert. Dazu betrachteten wir das Enzym Cystathionin-gamma-Lyase (CSE), von dem bekannt war, dass es in Bakterien an der Herstellung des Gases mitwirkt. Es war bereits in der Leber nachgewiesen worden, wo es die Synthese schwefelhaltiger Aminosäuren koordiniert. Forscher hatten auch Abschriften des CSE-Gens – so genannte Boten-RNAs – in Blutgefäßen von Ratten entdeckt. Ob dort aber ein funktionsfähiges Enzym vorkommt, das mit dem in der Leber übereinstimmt, war unbekannt. Wir konnten nun erstmals CSE aus Blutgefäßen isolieren. Es spaltet die Aminosäure Cystein in H_2S und zwei weitere Moleküle: Ammonium und Pyruvat.

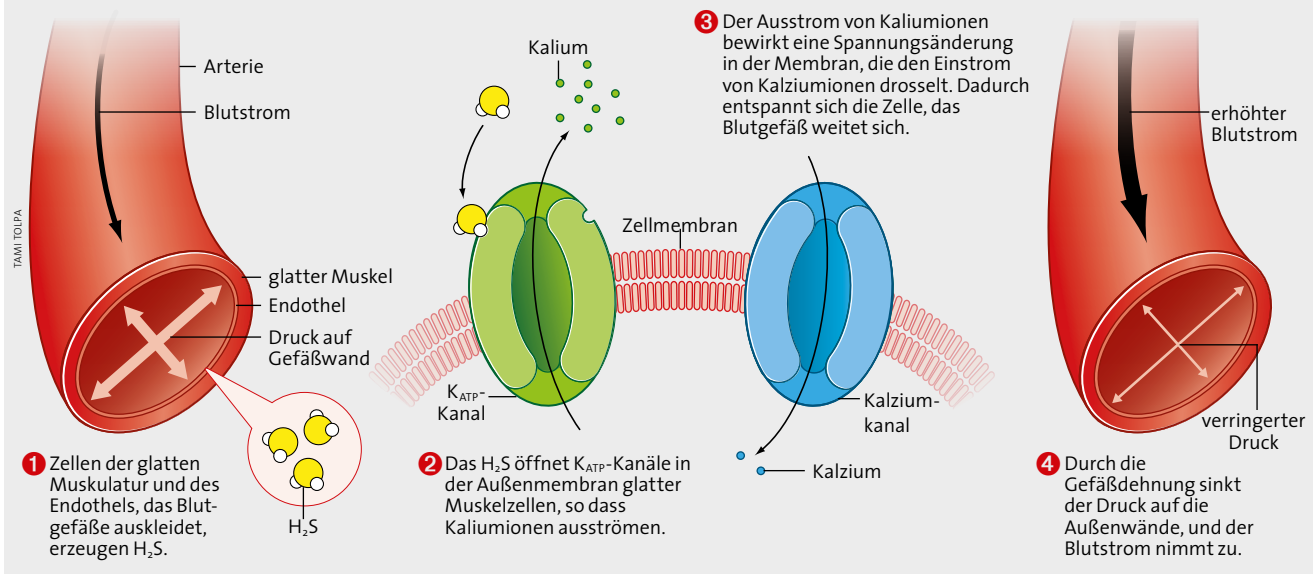
Nach diesen Vorarbeiten waren wir gespannt, welche physiologische Rolle H_2S im Kreislaufsystem spielt. Da NO Blutgefäße weitet, vermuteten wir für H_2S eine ähnliche Funktion. Unsere Experimente bestätigten das: Wenn wir Blutgefäße von Ratten in einer wässrigen Lösung von Schwefelwasserstoff badeten, weiteten sie sich.

Demnach sollte H_2S wie NO an der Regulation des Blutdrucks beteiligt sein. Aber nutzt es den gleichen molekularen Mechanismus? Unsere Untersuchungen an Zellen aus tierischen Blutgefäßen lieferten 2001 ein überraschendes Ergebnis: Während NO die Blutgefäßwände durch Aktivierung des Enzyms Guanylylzyklase weitet, das in der glatten Muskulatur vorkommt, wirkt H_2S über einen völlig anderen Reaktionsweg. Es öffnet bestimmte Kaliumkanäle, so dass mehr Kaliumionen ausströmen. Dadurch ändert sich die elektrische Spannung, die an der Außenmembran der glatten Muskelzellen anliegt. Dies wiederum drosselt den Einstrom von Kalziumionen. Die Folge: Der Muskel entspannt, und die Gefäße weiten sich.

Wie H₂S den Blutdruck reguliert

Schwefelwasserstoff spielt eine Schlüsselrolle bei der Regulation des Blutdrucks. Dabei unterstützt es ein anderes Gas: Stickstoffmonoxid (NO). Von diesem ist schon länger bekannt, dass es Blutgefäße weitet. Dazu aktiviert es das Enzym Guanylyl-

zyklase, das in den glatten Muskelzellen der Gefäße sitzt. Kürzlich stellten Wissenschaftler die gleichen gefäßerweiternden Eigenschaften bei H₂S fest. Allerdings wirkt Schwefelwasserstoff über einen völlig anderen Reaktionsweg:



Nach diesen Untersuchungen an isolierten Zellen gingen wir zu Experimenten an lebenden Tieren über und injizierten Ratten eine H₂S-Lösung. Prompt fiel deren Blutdruck – vermutlich, weil das Gas die Arterien weitete und dadurch den Blutfluss erhöhte. Auch andere Experimente legten nahe, dass Schwefelwasserstoff auf diese Weise den Blutdruck regulieren hilft. Allerdings konnten wir nicht sicher sein, ob die von uns beobachteten Effekte auch auftreten, wenn das Gas nicht künstlich zugeführt, sondern in den Blutgefäßen selbst erzeugt wird.

Deshalb schufen meine Kollegen und ich im Jahr 2003 gentechnisch Nager, die kein CSE bilden und daher auch kein H₂S produzieren konnten. Gemeinsam mit den Teams um Solomon Snyder von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) und Lingyun Wu von der University of Saskatchewan in Saskatoon (Kanada) untersuchten wir diese »Knockout«-Mäuse in den folgenden fünf Jahren. Wie wir dabei feststellten, verengten sich die Blutgefäße der modifizierten Nager mit zunehmendem Alter, so dass der Blutdruck, den wir mit winzigen Manschetten um die Schwänze maßen, deutlich über den Normalwert stieg. Dagegen sank er wieder, wenn wir den Tieren H₂S injizierten.

Diese Befunde bewiesen zweifelsfrei, dass Schwefelwasserstoff eine wichtige Rolle im kardiovaskulären System spielt. Zudem lösten sie ein langjähriges Rätsel: Obwohl die nobelpreisgekrönten Arbeiten zu NO dessen physiologische Aktivität bewiesen hatten, konnte das Gas nicht ganz allein für die Erweiterung der Blutgefäße verantwortlich sein. Das

zeigten unter anderem Tiere, die durch eine gezielte Mutation die Fähigkeit verloren hatten, in den Endothelzellen, welche die Adern auskleiden, NO zu produzieren. Trotzdem vermochten sich ihre peripheren Blutgefäße (die nicht zum Herzen hin- oder vom ihm wegführen) zu entspannen. Wie war diese Relaxation ohne NO möglich?

Unseren Untersuchungen zufolge dürfte der rätselhafte Faktor Schwefelwasserstoff sein. Zwar hatten wir das H₂S erzeugende CSE ursprünglich in der glatten Muskulatur nachgewiesen. Bei späteren Untersuchungen fand es sich aber auch in Endothelzellen von Mäusen, Kühen und Menschen. Diese enthalten sogar viel mehr davon. Wie die Aufgabenteilung zwischen NO und H₂S genau aussieht, ist noch ungeklärt. Die vorliegenden Daten lassen allerdings vermuten, dass NO hauptsächlich für die größeren Gefäße zuständig ist und H₂S für die kleineren.

Breit einsetzbares Heilmittel?

Wenn ein Gerinnsel den Blutfluss zum Herzen und damit dessen Sauerstoffversorgung behindert oder unterbricht, stirbt Herzmuskelgewebe ab, was zum Infarkt führt. Viele Forscher suchen nach Möglichkeiten, das Herz vor Schäden durch Sauerstoffmangel zu schützen. Einige von ihnen griffen die Entdeckung, dass H₂S im kardiovaskulären System entsteht und dort den Blutdruck regulieren hilft, begeistert auf. So unternahmen Gary F. Baxter, heute an der University of Cardiff in Wales, und seine Kollegen Versuche an isolierten Rattenherzen, über die sie 2006 berichteten. Sie umspülten

die Organe zunächst mit physiologischer Kochsalzlösung, um eine normale Blutversorgung vorzutauschen. Dann ahmten sie einen Herzinfarkt nach, indem sie die Lösung entfernten. Hatten sie zuvor H₂S verabreicht, wurde der Herzmuskel weniger geschädigt als ohne diese Maßnahme. Im Jahr 2007 zeigte David Lefer von der Emory University in Atlanta (Georgia), dass Mäuse, die auf Grund einer genetischen Manipulation mehr H₂S im Herzen produzierten, einen Sauerstoffmangel durch ein Gerinnsel besser verkrafteten. Außerdem erlitten sie weniger »Reperfusionsschäden«, die oft auftreten, wenn das unterversorgte Gewebe wieder durchblutet wird.

Solche Befunde legen nahe, dass sich H₂S zur Vorbeugung oder Behandlung von Bluthochdruck, Herzinfarkt und Schlaganfall beim Menschen eignet. Dank seiner gefäßerweiternden Wirkung könnte das Gas aber auch in anderen Fällen hilfreich sein – etwa bei sexuellen Störungen. Für die Erektion ist eine Erweiterung von Blutgefäßen im Penis verantwortlich. Die Wirkung von Sildenafil (Viagra) beruht darauf, dass es den Abbau von NO im Schwellkörper hemmt, wo das Gas die Gefäße entspannt und die Durchblutung fördert. Untersuchungen zufolge könnte H₂S den gleichen Effekt haben. Seine genaue Funktion im menschlichen Penisgewebe bleibt allerdings noch zu klären. (Auch CO wird im männlichen Sexualorgan produziert, fördert aber die Ejakulation, nicht die Erektion.)

Neuronale Funktionen

Schwefelwasserstoff kommt jedoch keineswegs nur im Herzkreislauf-System vor. So wird es auch im Nervensystem hergestellt, allerdings nicht von CSE, sondern von dem Enzym Cystathionin-beta-Synthetase. Welche Funktion das Gas dort hat, liegt noch im Dunkeln. Laut manchen Studien könnte es als Neuromodulator fungieren und beeinflussen, wie empfänglich neuronale Schaltkreise für Reize sind. Möglicherweise ist es aber auch an einem als Langzeitpotenzierung bezeichneten Vorgang beteiligt, der die Signalleitung zwischen einzelnen Neuronen verstärkt und damit die Grundlage für Lernen und Gedächtnis schafft. Außerdem haben Forscher gezeigt, dass das Gas die Konzentration des Antioxidans

Schlüssel für ein langes Leben?

Vorläufige Forschungsergebnisse deuten an, dass Schwefelwasserstoff das Leben verlängern könnte. Wie Mark B. Roth von der University of Washington in Seattle



RALF SOMMER UND JURGEN BERGER, MPI FÜR ENTWICKLUNGSBIOLOGIE

und seine Kollegen 2007 berichteten, leben Fadenwürmer der Art *Caenorhabditis elegans* bei Aufzucht in einer Atmosphäre mit Spuren von H₂S 1,7-mal so lang wie normal. Noch ist der Mechanismus nicht endgültig geklärt, aber das Gas könnte ein Gen namens *sir-2* aktivieren, das bei Würmern und anderen niederen Organismen mit Langlebigkeit in Verbindung steht.

Glutathion in Nervenzellen erhöht und diese dadurch vor Stress schützen könnte. Eventuell steigert es auch die Schmerzempfindung.

Überdies scheint H₂S an der Regulation des Stoffwechsels beteiligt zu sein – also in die chemischen Prozesse für die Produktion und den Verbrauch von Energie im Körper einzugreifen. In einer Serie von spektakulären Experimenten konnten Mark B. Roth von der University of Washington in Seattle und seine Kollegen die Stoffwechselaktivität von Mäusen drastisch herunterfahren und so das Fortschreiten bestimmter Krankheiten verzögern, indem sie den Tieren geringe Konzentrationen an H₂S verabreichten. Der Puls der Nager halbierte sich schlagartig. Sie verfielen in einen Zustand, in dem ein Großteil ihrer Lebensprozesse ausgesetzt war. Stoffwechsel fand kaum noch statt; der Körper der Tiere hielt nur noch einen Grundumsatz aufrecht, der lebenswichtige Organe vor Schäden bewahrte, bis die Energieversorgung wieder Normalniveau erreichte. Innerhalb von 30 Minuten nach Ende der H₂S-Inhalation kehrten die Mäuse zu ihrer üblichen Stoffwechselaktivität zurück (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 42).

Übersicht: H₂S in der medizinischen Therapie

Anwendungsgebiet	Substanzname	Firma	Entwicklungsstadium
<ul style="list-style-type: none"> Herzchirurgie Herzinfarkt Nierenverletzung 	IK-1001	Ikaria	Phase II/Wirksamkeitsstudie Phase II/Wirksamkeitsstudie Phase I/Sicherheitsstudie
entzündliche Darmerkrankung	ATB-429	Antibes	Phase I/Sicherheitsstudie
akute und chronische Gelenkschmerzen	ATB-429	Antibes	präklinisch
Reizdarmsyndrom	ATB-429	Antibes	präklinisch
Arthritis	ACS-15	CTG Pharma*	präklinisch

* DER AUTOR TESTET SUBSTANZEN FÜR CTG PHARMA



Pharmazeuten prüfen derzeit das Potenzial H₂S-haltiger Substanzen zur Behandlung verschiedener Krankheiten.

GETTY IMAGES / IMAGE SOURCE

Falls es gelänge, auch Menschen ungefährdet in einen solchen künstlichen Winterschlaf zu versetzen, wäre dies ein wahrer Segen für die Notfallmedizin. Bei Opfern eines Verkehrsunfalls oder eines akuten Herzinfarkts könnte eine H₂S-Inhalation direkt vor Ort den nötigen Zeitgewinn für den Transport zum Krankenhaus bringen. Ebenso wäre denkbar, einen Patienten in einem Zustand mit drastisch eingeschränkten Lebensfunktionen zu halten, bis das für die Transplantation benötigte Organ verfügbar ist – wobei das Gas vielleicht auch Spenderorgane länger lebensfähig hält. Dagegen könnte eine H₂S-Behandlung im Kriegs- oder Katastrophenfall Zeit gewinnen helfen, die für die Anlieferung von genügend Blutpräparaten benötigt wird. 2008 berichteten Roth und seine Kollegen, dass Ratten einen Blutverlust von 60 Prozent wesentlich besser verkrafteten, wenn sie Schwefelwasserstoff einatmeten: Nur ein Viertel von ihnen starb – gegenüber drei Vierteln der unbehandelten Tiere.

Schwefelwasserstoff und Diabetes

Aber nicht immer wirkt H₂S segensreich. Ob es Entzündungen verstärkt oder lindert, ist zum Beispiel noch unklar. Untersuchungen in meinem Labor und anderswo lassen zudem vermuten, dass das Gas eine fatale Rolle beim Typ-1-Diabetes spielt – einer Form der Zuckerkrankheit, die oft schon in der Kindheit auftritt. Auch die Insulin produzierenden Betazellen in der Bauchspeicheldrüse erzeugen nämlich H₂S. Bei Tieren mit Typ-1-Diabetes geschieht das im Übermaß – mit gleich doppelt schädlichen Folgen. Zum einen tötet zu viel Schwefelwasserstoff Betazellen ab. Dadurch bleiben zu wenige für die Produktion von Insulin übrig, das Muskel- und Fettzellen benötigen, um zur Deckung ihres Energiebedarfs beziehungsweise zur Energiespeicherung Zucker aus dem Blut aufzunehmen. Zum anderen behindert das überschüssige H₂S die Insulinfreisetzung aus den verbliebenen Betazellen. Demnach könnte Schwefelwasserstoff für den unzureichenden Insulinspiegel im Blut bei Typ-1-Diabetes mitverantwortlich sein.

Zudem ließen sich die bei Nagern entdeckten positiven Effekte des Gases bei größeren Säugetieren nicht reproduzieren. So zeigte eine Untersuchung, die ein französisches Team 2007 durchführte, dass Schafe im Gegensatz zu Nagern bei H₂S-Gabe nicht in einen winterschlafähnlichen Zustand fallen. In einer weiteren Studie kurbelte Schwefelwasserstoff bei Ferkeln den Stoffwechsel sogar an, statt ihn abzusenken.

Auch ist nicht bekannt, ob durch H₂S induzierter Winterschlaf das Hirn schädigt. Die Versuche mit Nagern ergaben zwar keine Hinweise darauf. Aber an Tieren lassen sich Beeinträchtigungen der Gehirnfunktion auch nur schlecht nachweisen. Es bleibt abzuwarten, ob wichtige mentale Fähigkeiten wie Gedächtnis und Denkvermögen beim H₂S-induzierten Schwebzustand zwischen Leben und Tod erhalten bleiben.

Dennoch hat das therapeutische Potenzial von Schwefelwasserstoff in der pharmazeutischen Industrie erhebliches Interesse geweckt. Etliche Unternehmen entwickeln bereits Produkte, die H₂S in verträglichen Dosen an den Körper abge-

ben können. Die Firma CTG Pharma in Italien hat zum Beispiel verschiedene Mischsubstanzen aus H₂S und nichtsteroidalen entzündungshemmenden Medikamenten wie Aspirin produziert. Tierexperimenten zufolge scheinen diese Stoffe bei der Behandlung von Erektionsstörungen, Herzinfarkt, pathologischen Veränderungen der Blutgefäße und Entzündungen des Nervensystems sowie des Magen-Darm-Trakts wirksam zu sein. Inzwischen hat die von Roth mitbegründete Firma Ikaria in Clinton (New Jersey) klinische Studien der Phase 2 mit einer injizierbaren Form von H₂S gestartet, die der Wirksamkeitsprüfung dienen. Teilnehmer sind Patienten, die einen Herzinfarkt hatten oder sich einer Herz- oder Lungenoperation unterziehen müssen.

Unsere Abneigung gegen das übel riechende H₂S ist verständlich – und berechtigt, wenn man dessen tödliche Wirkung in hohen Konzentrationen bedenkt. Trotzdem spielt das Gas, wie sich im letzten Jahrzehnt erwiesen hat, eine wichtige Rolle für ein gesundes Herz und vielleicht auch für die einwandfreie Funktion des Gehirns und weiterer Organe. Dies ist eine faszinierende Erkenntnis – weckt sie doch Hoffnungen auf neuartige Behandlungsmethoden für Krankheiten, die bisher schlecht oder gar nicht therapierbar waren. ☞

DER AUTOR



Rui Wang ist Biologieprofessor an der Lakehead University in Thunder Bay (Ontario) und Präsident der Canadian Physiological Society. Er beschäftigt sich mit dem Stoffwechsel und den physiologischen Funktionen so genannter Gasotransmitter: einer Gruppe kleiner Gasmoleküle wie Stickstoffmonoxid, Kohlenmonoxid und Schwefelwasserstoff, die als zelluläre Signalfstoffe dienen.

QUELLEN

- Blackstone, E. et al.:** H₂S Induces a Suspended Animation-Like State in Mice. In: *Science* 308, S. 518, 2005
- Wang, R.:** Two's Company, Three's a Crowd – Can H₂S Be the Third Endogenous Gaseous Transmitter? In: *FASEB Journal* 16, S. 1792–1798, November 2002
- Wu, L. et al.:** Pancreatic Islet Overproduction of H₂S and Suppressed Insulin Release in Zucker Diabetic Rats. In: *Laboratory Investigation* 89, S. 59–67, 2009
- Yang, G. et al.:** H₂S as a Physiologic Vasorelaxant: Hypertension in Mice with Deletion of Cystathionine Gamma-Lyase. In: *Science* 322, S. 587–590, 2008

WEBLINKS

www.springermedizin.at/fachbereiche-a-z/a-h/allgemeinmedizin/?full=19007
Allgemeine Informationen über Gasotransmitter

[http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/10459/1/IJEB%2048\(11\)%201069-1077.pdf](http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/10459/1/IJEB%2048(11)%201069-1077.pdf)
Englischer Artikel über mögliche therapeutische Anwendungen von Schwefelwasserstoff

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061741



Die Varianten im Erbgut eines Menschen erzählen viel über die Herkunft von frühen Vorfahren. Manchmal kann der Anschein auch täuschen: Viele Merkmale entstanden zu anderen Zeiten als gedacht.

ANTHROPOLOGIE

Evolution auf der Kriechspur

Viele scheinbar neue genetische Varianten in menschlichen Bevölkerungen sind erheblich älter als vermutet. Offenbar kann sich unser Erbgut an veränderte Umwelten meistens nur sehr langsam anpassen.

Von Jonathan K. Pritchard

Nach Tibet kamen Menschen wohl erstmals vor rund 20 000 Jahren. Sie fanden dort zwar ein riesiges Gebiet vor, das ihnen niemand streitig machte. Doch große Teile der weit gehend baumlosen Hochebene liegen in über 4 000 Meter Höhe. Die dünne Luft muss den Menschen arg zugesetzt haben – sicherlich litten sie unter Höhenkrankheit und hatten eine hohe Säuglingssterblichkeit.

Erst kürzlich deckten genetische Studien auf, dass bei den heutigen Tibetern eine sonst seltene Variante eines bestimmten Gens häufig vorkommt. Sie hilft, die Produktion der roten Blutzellen besser auf die extreme Höhenlage abzustimmen. Der Befund machte Schlagzeilen, zeigte er doch, dass sich eine neue biologische Anpassung an eine andere Umwelt manchmal ganz rasch in einer Bevölkerung durchsetzte. In diesem Fall hatte das genetischen Berechnungen zufolge sogar in allerjüngster Vergangenheit stattgefunden: innerhalb der letzten 3 000 Jahre. Im Evolutionsmaßstab entspricht dies einem Wimpernschlag.

Aufmerksamkeit erregte die Studie noch aus einem anderen Grund. Das Ergebnis passt bestens zu der verbreiteten Vorstellung, dass die verschiedenen Zweige unserer Spezies beträchtliche biologische Anpassungen erlebten, seit zum ersten Mal so genannte moderne Menschen Afrika verließen. Grob geschätzt geschah das in der späten Altsteinzeit vor 60 000 Jahren – vielleicht schon vor 100 000, vielleicht auch erst vor 50 000 Jahren. Dem an heiße Gras- und Strauchlandschaften Ostafrikas gewöhnten *Homo sapiens* gelang es offensichtlich, sich jeweils in relativ kurzer Zeit auf diverse für ihn völlig neue Umwelten einzustellen – nicht nur auf extreme Höhenlagen, sondern auch auf kalte Tundren, feuchtwarme Regenwälder oder glühend heiße Wüsten. Der prähistorische Mensch konnte auf diese Weise in fast allen terrestrischen Ökosystemen und Klimazonen der Erde Fuß fassen.

Sicherlich half ihm dabei auch sein technischer Verstand. Um sich vor Kälte zu schützen, wusste er zum Beispiel Kleidung zu verwenden. Doch nicht gegen alle Widrigkeiten war Technologie verfügbar. Höhenluft, Infektionskrankheiten oder überhaupt manche fremden Umwelten dürften darum auch genetische Anpassungen erzwungen haben, also biologische Evolutionsprozesse. Deshalb erwarteten die Forscher, dass sie bei Erbgutvergleichen von Menschen verschiedener Herkunft eine Menge neuerer Mutationen finden würden, die auf die jeweiligen Außenbedingungen abgestimmt sind. Diese sollten sich in den betreffenden Populationen schnell ausgebreitet haben – und das auch heute noch manchmal tun –, weil Träger vorteilhafter Mutationen mehr gesunde, also unter den jeweiligen Bedingungen lebensfähige Kinder haben müssten. Soweit zumindest die Theorie.

AUF EINEN BLICK

UNSER TRÄGES ERBGUT

1 Vor grob geschätzt 60 000 Jahren begann **die Verbreitung des *Homo sapiens***, des modernen Menschen, von Afrika aus in andere Kontinente. Mit den ihm verfügbaren Technologien allein konnte er in den fremden Umwelten nicht überleben. Er musste sich auch genetisch auf Neuland einstellen.

2 Anthropologen glaubten bisher, dass sich die Ausbreitungsgeschichte bis in die jüngsten Zweige deutlich in **genetischen Anpassungen** widerspiegeln würde – dass sich also in verschiedenen geografischen Regionen eigene neue Mutationen durchgesetzt hätten.

3 Doch die beobachteten Anpassungsmuster sehen anders aus. Die Menschengruppen schleppen in ihrem Erbgut hauptsächlich **Mutationen mit einer langen Geschichte** mit sich. Anscheinend verlief unsere eigene Evolution über lange Zeitspannen eher langsam. Nur in wenigen harten Fällen scheint die Selektion in ein paar Jahrtausenden Neuerungen bewirkt zu haben.

Vor gut sechs Jahren begannen meine Kollegen und ich nach solchen deutlichen Spuren im menschlichen Genom zu suchen. Wir wollten wissen, wie die menschliche Evolution in genetischer Hinsicht verlief, seit sich *Homo sapiens* über die Welt ausgebreitet hat. Vor allem interessierte uns, inwiefern regionale genetische Unterschiede überhaupt auf eher neueren Anpassungen beruhen und somit auf einen jüngeren Selektionsdruck in der derzeitigen Umwelt zurückgehen. Vielleicht gab es für manches ja völlig andere Erklärungen. Neuere Methoden, genetische Abweichungen (Variationen) zwischen individuellen Genomen zu bestimmen, machten unsere Untersuchungen erst möglich.

Diese Forschungen sind zwar noch nicht abgeschlossen, aber schon die vorläufigen Befunde haben uns überrascht. Denn die Genomvergleiche liefern nur wenige Beispiele für eine durchschlagende, schnelle Selektion wie im Fall der Tibeter. Die meisten Selektionsspuren deuten vielmehr auf Entwicklungen hin, die sich über mehrere zehntausend Jahre hinweg erstreckten. Viele Mutationen gehen wohl auf Auslesevorgänge in der späten Altsteinzeit – aber noch vor dem Jungpaläolithikum – zurück, bei den Europäern etwa manche für hellere Haut. Als Nachfahren jener Menschen neue Lebensräume eroberten, trugen sie solche Anpassungen in andere Weltregionen. Die alten genetischen Spuren blieben dann über all die Jahrtausende erhalten, ohne dass neue Anpassungen sie überschrieben hätten. Wenn eine natürliche Auslese aber tatsächlich oft sehr viel gemächlicher geschieht als bisher gedacht, wäre der Tibetbefund gerade kein typischer Fall.

Häufig werde ich gefragt, ob die Menschenevolution denn heute überhaupt noch weitergeht. Natürlich tut sie das. Die Frage, wie sie abläuft, lässt sich allerdings nicht so einfach beantworten. Laut unseren Ergebnissen scheint sie wirklich nur selten der klassischen Vorstellung zu gehorchen, wonach sich einzelne vorteilhafte Mutationen rasch in Populationen durchsetzen. In den letzten 60 000 Jahren geschah das ver-

mutlich nur wenige Male. Hierfür müsste wohl über einen sehr langen Zeitraum stets der gleiche Umweltdruck herrschen. Nur brachen unsere Vorfahren immer wieder in neue Weltgegenden auf. Auch erfanden sie seit einigen zehntausend Jahren zunehmend technische Neuerungen, die einige biologische Anpassungen in den Hintergrund gedrängt haben könnten. Was die Zukunft betrifft, so machen es unsere Befunde zumindest unwahrscheinlich, dass Evolutionsprozesse die Menschen rechtzeitig für Phänomene wie den Klimawandel oder manche Infektionskrankheiten rüsten können. Solchen Herausforderungen müssen wir mit Hilfe von Kultur und Technologie begegnen.

Noch vor zehn Jahren war es methodisch äußerst schwierig, im menschlichen Erbgut Reaktionen auf Umweltbedingungen aufzuspüren. Das änderte sich völlig mit der Sequenzierung des Humangenoms und im Zuge dessen mit den Anstrengungen, auch

die genetische Vielfalt der Menschen zu katalogisieren (siehe SdW 2/2011, S. 34). Zunächst ein paar genetische Fakten: Die DNA-Sequenz des menschlichen Genoms besteht aus rund drei Milliarden Nukleotidpaaren (»Buchstaben«). Sie liefern sozusagen die Anleitung für den Aufbau unseres Körpers mit seinen Funktionen (siehe Kasten rechts). Diesem Zweck dienen rund 20 000 Gene: DNA-Abschnitte, die für Proteine kodieren, also auch für vielerlei Enzyme, die in den Zellen arbeiten. Doch nur ungefähr zwei Prozent unseres Genoms enthält solche Bauanleitungen. Ein weiterer, ähnlich kleiner Anteil befasst sich offenbar mit Genregulation. Der riesige Rest des Genoms besitzt größtenteils keine bisher bekannten Funktionen.

Buchstabieren im Genom

Die Genome von zwei Menschen unterscheiden sich durchschnittlich nur in einem von ungefähr 1000 Nukleotidpaaren. Eine solche Stelle im Erbgut, an der verschiedene Nukleotide vorkommen, bezeichnet man als Einzelnukleotidpolymorphismus (*single nucleotide polymorphism* oder SNP, gesprochen »snip«). Die verschiedenen Varianten des betreffenden DNA-Abschnitts heißen Allele. Die allermeisten SNPs dürften sich für die jeweilige Person nicht merklich auswirken, weil sich dort weder Gene noch sie regulierende Elemente befinden.

Liegt ein Austausch allerdings in einem Genomabschnitt mit Kodierungs- oder Regulationsfunktion, so kann das die Struktur oder Funktionsweise eines Proteins deutlich verändern – zum Beispiel auch beeinflussen, wo wie viel von dem Protein hergestellt wird. Solche SNPs können darum vermutlich fast jedes Merkmal abwandeln, ob Körpergröße oder Augenfarbe, die Fähigkeit zur Verdauung von Milchzucker (Laktose), aber auch die Anfälligkeit für manche Krankheiten, wie Diabetes, Schizophrenie, Malaria oder Aids.

Ein von der Selektion stark begünstigtes Allel nimmt in der Population mit jeder Generation zu, während Träger der

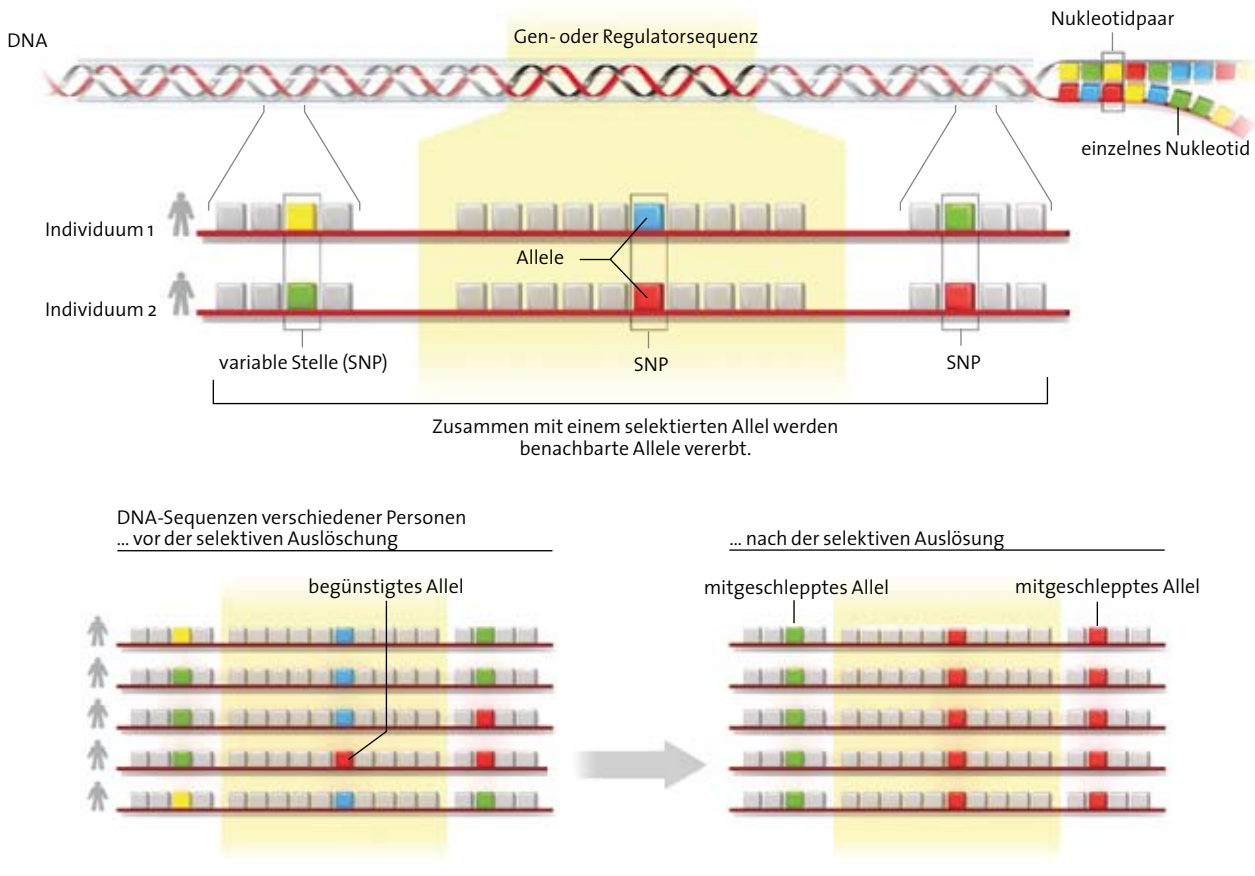
Es gibt nur wenige Beispiele für eine durchschlagende, schnelle Evolution



Selektionssignale im menschlichen Erbgut

Wenn die Individuen einer Population in einem Abschnitt ihrer Genome keine oder fast keine Variationen aufweisen, spricht das für die Selektion eines dort liegenden Gens – oder einer sonstwie günstigen Stelle. Das Erbgut zweier beliebiger Menschen unterscheidet sich ungefähr in jedem tausendsten Nukleotidpaar, den »Buchstaben« der DNA. Solche Stellen heißen

SNPs (sprich »snips«; Einzelnukleotidpolymorphismen, englisch *single nucleotide polymorphisms*). Die alternativen Versionen eines SNPs heißen Allele. Zusammen mit dem durch Selektion begünstigten Allel verbreiten sich Nachbarallele, so dass der Abschnitt immer einheitlicher wird. Genetiker nennen das selektive Auslöschung (*selective sweep*).



unvorteilhafteren Variante seltener werden. Bei gleich bleibenden Umweltbedingungen trägt dann irgendwann so gut wie jeder Einzelne die nützliche Version: Sie hat sich in der Population fixiert. Wie lange das dauert, kann man abschätzen. Angenommen, anfangs findet sich das Allel bei einem Prozent der Populationsmitglieder. Diese Personen bekommen fünf Prozent mehr Kinder, die das Erwachsenenalter erreichen, als andere – und solche, die das Allel von beiden Eltern geerbt haben, es also auf beiden zusammengehörigen Chromosomen aufweisen, sogar zehn Prozent mehr. Nach rund 200 Generationen, grob 5000 Jahren, dürften 99 Prozent der Populationsmitglieder diese Genvariante besitzen. Ein Allel, das seinen Trägern außerordentlich stark zugutekommt, könnte sich theoretisch sogar schon in ein paar hundert Jahren durchsetzen. Bei einem winzigen Vorteil mag der Prozess dagegen Tausende, vielleicht auch Zehntausende von Jahren dauern.

Es wäre wunderbar, könnten wir die jüngste Evolution direkt an der DNA der Menschen von früher nachvollziehen. Anhand der Ausstattung einer größeren Anzahl von Individuen mit bestimmten Allelen ließe sich dann über die Zeit verfolgen, wann und wie sich die Populationen veränderten. Leider erweisen sich solche Studien als nicht praktikabel. DNA zerfällt meist allzu schnell, und solche Analysen, sofern sie mit äußerst akribischen Methoden überhaupt gelingen, sind extrem aufwändig. Als Alternative entwickelten meine eigene und etliche andere Forschergruppen, die oft international kooperieren, Verfahren, mit denen wir über genetische Unterschiede zwischen heutigen Menschengruppen auf frühere Selektionsprozesse in einzelnen Populationen rückschließen.

Zum Beispiel kann man die DNA größerer Menschengruppen aus unterschiedlichen Weltregionen nach Abschnitten durchsuchen, die in einer der Populationen meist dieselben

Verblüffende Einsichten durch Populationsvergleiche

Bisher fanden Biologen nur eine Hand voll Allele, die sich offenbar schnell ausgebreitet haben, also zu einer Umweltanpassung beitragen (obere Karte).

Zwar zeigt das Erbgut heutiger Menschen Hunderte von Selektionsspuren, aber die allermeisten davon kennzeichnen nicht neuere Anpassungen (untere Karte). Vielmehr spiegeln sie in drei Fraktionen, wie sich der *Homo sapiens* einst, von Afrika kommend, in Eurasien verbreitete. Ein Teil dieser Spuren (orange) taucht in hoher Frequenz in allen eurasischen Populationen auf, nicht aber in Afrika. Ein anderer Teil (rotbraun) findet sich typischerweise in den Bevölkerungen Europas und Westasiens mitsamt Indien. Die dritte Fraktion (gelb) dominiert in Nord-, Ost- und Südostasien sowie auch in Ozeanien und Amerika.

BEISPIEL HELLE HAUT

Eine Variante des Gens *SLC24A5*, die zu Hellhäutigkeit beiträgt, entstand am Ursprung der westeurasischen Bevölkerungsgruppen. Diese sehr alte Variante tritt in allen anderen Regionen viel seltener auf. Die kleinen Kästen zeigen die Vielfalt von SNPs im betreffenden genetischen Abschnitt: Viel rote Fläche bedeutet wenig Variation.

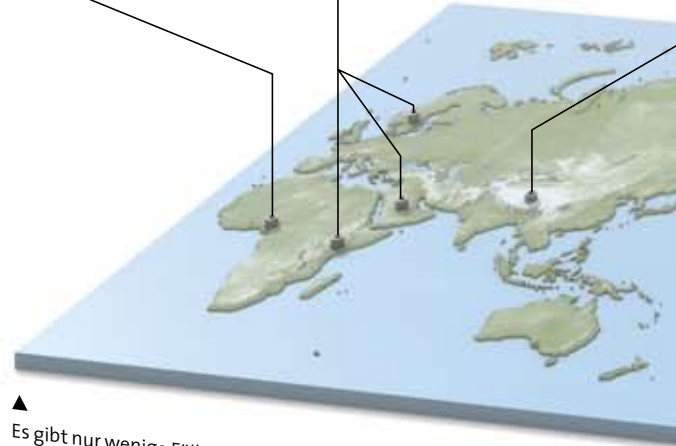
- »Out of Africa«-Auslöschung
- westeurasische Auslöschung
- ostasiatische Auslöschung

BEISPIEL LASSAFIEBER

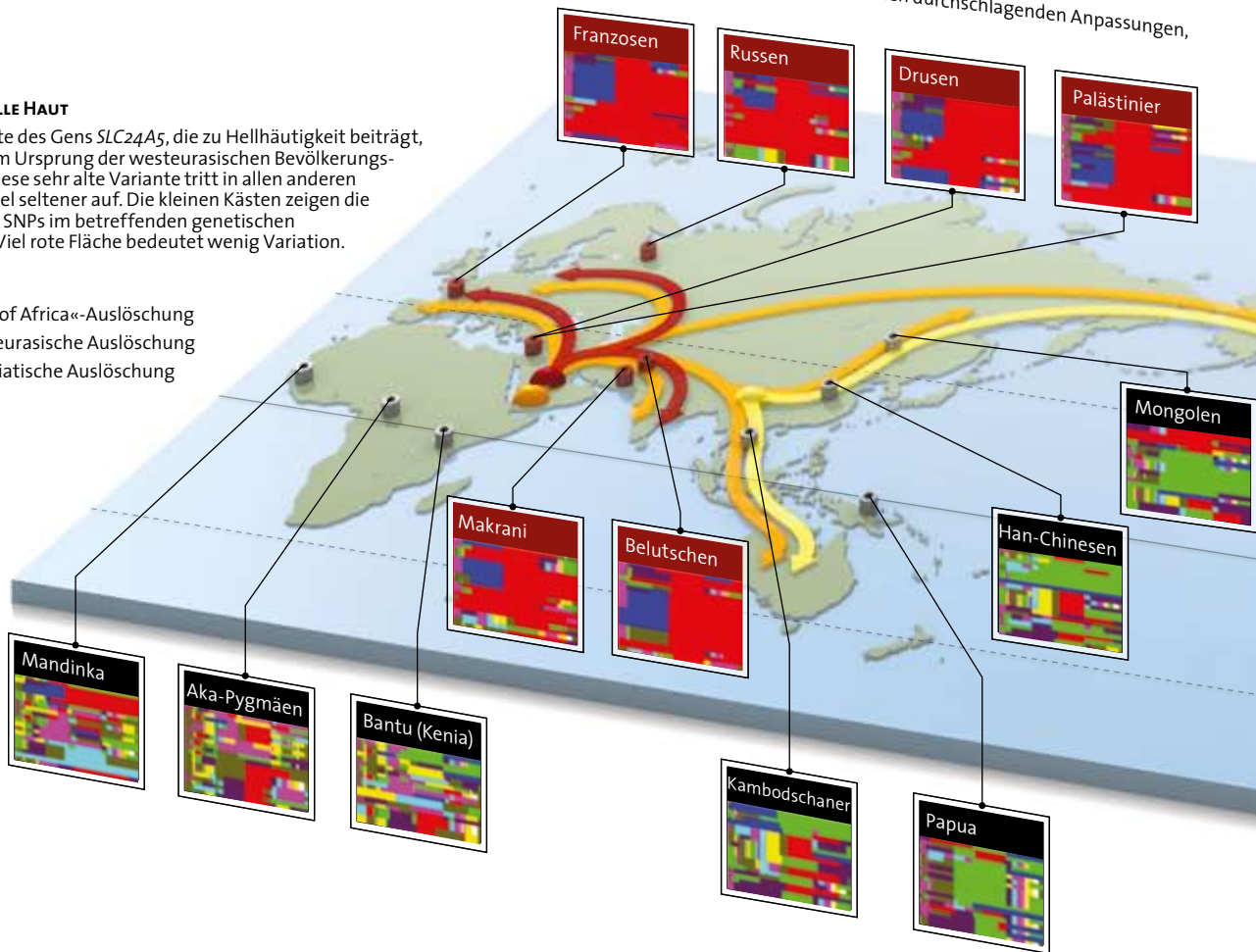
Bei den Yoruba in Nigeria scheint sich in jüngerer Zeit eine Variante des Gens *LARGE* stark vermehrt zu haben – wohl als Reaktion auf das dort häufige Lassavirus.

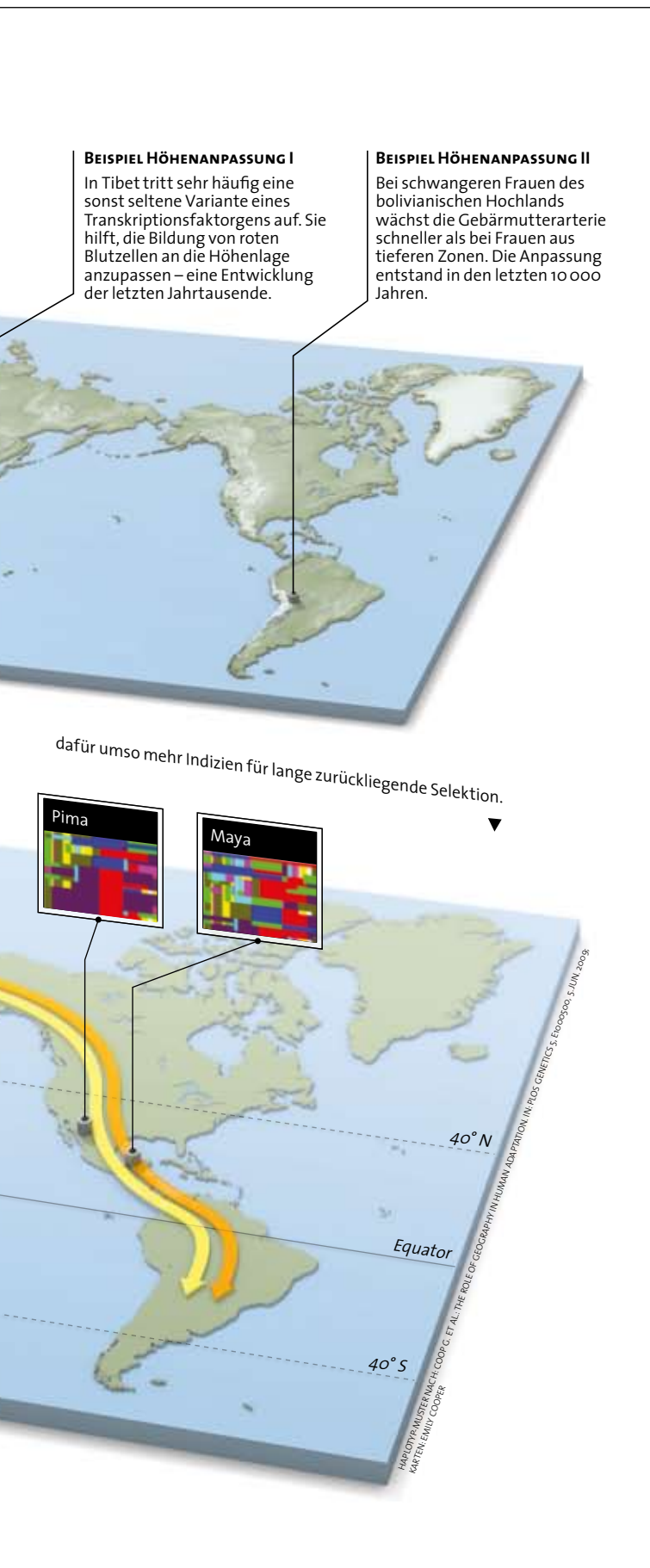
BEISPIEL MILCHZUCKERVERDAUUNG

Bei Milchbauernpopulationen hat sich das Gen für das Enzym Laktase in den der letzten 5000 bis 10 000 Jahren stark verändert.



▲ Es gibt nur wenige Fälle von neuen durchschlagenden Anpassungen,





SNP-Allele aufweisen – ein Zeichen für eine geringe SNP-Allel-Vielfalt an dieser Stelle. In bestimmten Fällen spricht das für einen jüngeren Selektionsdruck auf ein in dem Bereich lokalisiertes Gen: Wenn sich eine neue, nützliche Mutation in einer Gruppe rasch verbreitet, werden angrenzende Erbgutabschnitte bevorzugt mitgenommen – und die SNP-Allele an der Stelle einheitlicher. Dieser so genannte Huckepackeffekt kommt zu Stande, weil die paarigen Chromosomen beider Eltern bei der Fortpflanzung öfter Teile tauschen, wobei sich kürzere Abschnitte auch über umfangreiche Evolutionszeiträume meist als Einheit erhalten. Und nach solchen vorherrschenden Einheiten kann man suchen. Genetiker bezeichnen das Phänomen, dass andere SNP-Varianten aus diesen Gründen verschwinden oder seltener werden, als selektive Auslöschung (englisch *selective sweep*, sozusagen Selektionsausputz; siehe Kasten S. 31).

Solch ein Mitnahmesignal tritt aber nicht immer auf. Wenn eine Population plötzlich mit neuen Lebensumständen zurechtkommen muss, kann es vorkommen, dass sich ein bereits vorhandenes Allel nun als besonders nützlich erweist und seine Häufigkeit darum jetzt schnell anwächst. Das kann andere charakteristische SNP-Muster erzeugen – auch ohne Huckepackeffekt. In den letzten Jahren entdeckten eine Reihe von Forschergruppen – darunter meine – im Humanenom mehrere hundert Hinweise der einen oder anderen Sorte darauf, dass an solchen Stellen Selektion am Werk gewesen sein muss, nachdem *Homo sapiens* Afrika verlassen hatte.

Selten: Klare Auslese vorteilhafter Varianten

Anzeichen für eine lebhafte Evolution von einzelnen Merkmalen in den letzten rund 60 000 Jahren gibt es allerdings nicht allzu viele. Von diesen Fällen lassen sich einige recht gut erklären. So herrschte in jenen Bevölkerungsgruppen Europas, des Nahen Ostens und Ostafrikas, die Milchwirtschaft betrieben, offenbar ein hoher Selektionsdruck auf der Genomregion mit dem Gen für Laktase. Dieses Enzym baut bei Säuglingen Milchzucker (Laktose) ab und verschwindet normalerweise in der frühen Kindheit wieder. Deswegen vertragen die Erwachsenen der meisten Menschengruppen keine Milch. In den genannten Bevölkerungen bilden viele das Enzym dagegen weiterhin. Forscher des Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge schätzten in einer 2004 veröffentlichten Studie, dass sich bei den betroffenen Europäern in nur 5 000 bis 10 000 Jahren Varianten des Laktasegens durchsetzten, die auch noch im Erwachsenenalter eine hohe Aktivität aufweisen.

Für Milchtierzüchter in Ostafrika fand wenig später ein Forscherteam um Sarah Tishkoff, die heute an der University of Pennsylvania in Philadelphia arbeitet, ebenfalls Hinweise auf eine schnelle Evolution dieses Gens, die unabhängig von der in Eurasien verlief. Somit passten sich jene Bevölkerungen der neuen Wirtschaftsform rasch durch Veränderung eines einzelnen Gens an.

Des Weiteren fanden sich bei mindestens einem halben Dutzend Genen, die über die Haut-, Haar- und Augenfarbe

mitbestimmen, ausgeprägte Selektionssignale unter Nichtafrikanern. Unser Organismus benötigt eine gewisse Menge an UV-Strahlung, um über die Haut ausreichend Vitamin D zu bilden. In Äquatornähe ist die ultraviolette Sonnenstrahlung stärker als weiter im Norden, und unsere dunkel pigmentierten afrikanischen Vorfahren waren an die UV-Intensität in tropischen Breiten angepasst: Ihre Haut nahm dort genügend von der Strahlung auf. Im Norden war die Intensität aber für dunkle Haut zu schwach. Mit ziemlicher Sicherheit wurden die Menschen dort deswegen bald heller, wie es auch die genetischen Befunde erkennen lassen.

Ebenso zeichnet sich für verschiedene Gene, deren Träger besser gegen bestimmte Infektionskrankheiten gefeit sind, eine Selektion im Genom einzelner Bevölkerungen deutlich ab. Zum Beispiel stießen Pardis Sabeti von der Harvard University in Cambridge und ihre Kollegen kürzlich auf eine Mutation in einem *LARGE* genannten Gen, die sich bei den Yoruba in Nigeria anscheinend erst in jüngerer Zeit stark verbreitet hat. Den hohen Selektionsdruck erzeugte wahrscheinlich das Lassafieber, eine lebensgefährliche Virusinfektion mit inneren Blutungen, die in dieser Region in neuerer Zeit häufig auftritt. Die Mutation verändert einen zellulären Rezeptor für den Erreger.



Eine Genvariante, die stark zu heller Haut beiträgt, verbreitete sich schon unter den gemeinsamen Vorfahren der Europäer und Westeurasier – aber nicht unter den Ahnen der Ostasiaten.

Es gibt zwar noch mehr Beispiele für schnelle Selektion beim modernen Menschen – doch die meisten genetischen Indizien, die auf eine Vermehrung von Allelen vor kurzer Zeit hinweisen, passen überhaupt nicht in dieses klare Schema. Mehr noch: Von der Mehrzahl der Verdachtsfälle ist noch nicht einmal klar, welche Umstände die Ausbreitung des Allels förderten und wieso es seinen Trägern nützt. Viele Forscher glaubten bisher, die große Zahl an Befunden würde bedeuten, dass in den letzten 15 000 Jahren mindestens ein paar hundert rapide selektive Auslöschungen stattfanden. Neuere Analysen könnten aber auf etwas anderes hinweisen: Die meisten der Selektionssignale im Erbgut stammen vielleicht gar nicht wirklich aus jüngerer Zeit und würden dann auch keine neuere schnelle Anpassung bezeugen.

Die großen Out-of-Afrika-Sweeps

Wichtigen Aufschluss brachten hierbei geografische Vergleiche zur Verbreitung von Allelen. Zusammen mit Kollegen von der Stanford University (Kalifornien) analysierten wir einen großen SNP-Datensatz, gewonnen aus DNA-Proben von rund 1000 Menschen aus verschiedensten Weltregionen. Die deutlichsten Selektionssignale, die wir fanden, betrafen oft Allele, die zu jeweils einem von drei großen geografischen Mustern gehörten (siehe Kasten S. 32/33). Anders gesagt: Es zeichnen sich drei Hauptgruppen von selektiven Auslöschungen (*selective sweeps*) ab.

Erstens gibt es die so genannten Out-of-Africa-Auslöschungen: Hierdurch begünstigte Allele und deren »Mitreisende« kommen in allen nichtafrikanischen Bevölkerungen häufig vor. Jene genetischen Varianten dürften folglich noch aus der Zeit stammen, als moderne Menschen Afrika eben verlassen hatten, und sie müssen sich schon im Nahen Osten in der Bevölkerung verbreitet haben, bevor einige Nachfahren weiter nach Norden oder Osten zogen. Diese Allele erschienen somit vor schätzungsweise 60 000 Jahren.

Die beiden anderen Verbreitungsmuster sind geografisch enger begrenzt. Von den westeurasischen Auslöschungen sprechen wir, wenn bestimmte Allele ausschließlich bei Bevölkerungen Europas, des Nahen Ostens sowie Zentral- und Südasiens oft vorhanden sind.

Die so genannten ostasiatischen Auslöschungen förderten Allele, die besonders häufig in Ostasien auftreten, in der Regel aber auch bei amerikanischen Ureinwohnern, Melanesiern und den Einwohnern Papua-Neuguineas erscheinen.

Die Verteilung spiegelt wahrscheinlich Auslöschungen von Allelen in einigen Genomabschnitten wider, die kurz nach der Trennung der Menschen in einen westeurasischen und einen ostasiatischen Ast einsetzten. Vermutlich spielte sich das vor 20 000 bis 30 000 Jahren ab, ein genauer Zeitpunkt ist nicht bekannt.

Das Besondere an diesen Befunden: Die heutige geografische Verbreitung von begünstigten Allelen entspricht weiterhin stark den frühen vorzeitlichen Ausbreitungsbewegungen der Menschen in Europa und Asien. Denn die Muster im Genom, die damals entstanden, haben sich deutlich er-



Nur selten bestimmen einzelne Gene ein Merkmal. Meistens wirken sehr viele Erbanlagen zusammen – jede mit einem geringen Einfluss.

halten. Später kamen nur erstaunlich wenige Feinanpassungen an lokale Gegebenheiten und heutige Umwelten hinzu.

Frappant zeigt das die Anpassung der Hautfarbe an nördliche Breiten. Für Hellhäutigkeit spielt eine bestimmte Variante des Gens *SLC24A5* eine große Rolle. Diese Variante tritt allerdings keineswegs generell umso häufiger auf, je weiter nördlich eine Population lebt. Denn hier handelt es sich um einen typischen Fall von westeurasischer Auslöschung. In Ostasien fehlt jene Genvariante so gut wie völlig – sogar in hohen Breiten. Von Pakistan bis Frankreich ist sie dagegen stark vertreten (siehe Kasten S. 32/33). Offenbar kam jene spezielle Variante nur bei den Vorfahren der Westeurasier auf, die sich schon von den Uroasiaten abgespalten hatten. Die westlichen Linien verbreiteten das veränderte Gen mitsamt seiner DNA-Umgebung über ganz Europa und Westasien. Bei Ostasiaten sind andere Gene für Hellhäutigkeit verantwortlich.

Unsere Datensätze von solchen Selektionssignalen im Genom wie auch jene anderer Forscher zeigen bei genauerem Hinsehen noch etwas Auffälliges. Betrachtet man die drastischsten Häufigkeitsunterschiede – beispielsweise Allele, die

fast jeder Asiate besitzt, aber kein Afrikaner –, dann wird man den beschriebenen Huckepackeffekt für begleitende SNP-Allele kaum finden. Er müsste eigentlich sichtbar sein, wenn sich die betreffenden neuen Merkmale schnell verbreitet hätten. Doch offensichtlich war das nicht der Fall. Es sieht im Gegenteil so aus, als ob sich ausgerechnet jene Allele in den letzten 60 000 Jahren ziemlich langsam vermehrt haben.

5000 oder 50 000 Jahre Selektionsdruck?

Deswegen nehmen meine Mitarbeiter und ich heute an, dass sich vorteilhafte neue Mutationen nur selten schnell durchgesetzt haben, seit *Homo sapiens* andere Kontinente zu besiedeln begann. Unseres Erachtens wirken sich Selektionskräfte ohnehin auf einzelne Allele gewöhnlich eher schwach aus. Falls diese Vermutung zutrifft, würden sich die meisten in einer neuen Umwelt günstigen genetischen Varianten nur dann stark ausbreiten können, wenn derselbe Selektionsdruck einige 10 000 Jahre lang anhält.

Das mag widersinnig klingen. Denn wie hätten sich Menschengruppen jemals rasch genug an eine ungewohnte Um-

welt anpassen können, wenn es oft nicht 5000, sondern eher 50 000 Jahre dauerte, bis hilfreiche Merkmale eine größere Verbreitung erreichten? Vielleicht stehen hinter solchen Anpassungsprozessen meist nicht einzelne veränderte Gene allein – auch wenn Wissenschaftler solche Fälle bisher am besten verstehen. Manches spräche dafür, dass an vielen Anpassungen hunderte oder tausende Gene beteiligt sind, wobei jedes nur einen sehr geringen Beitrag leistet. Fachlich spricht man von polygenen Merkmalen.

Zum Beispiel haben Forscher schon über 50 Gene ausgemacht, die mit ihren Allelen auf die menschliche Körpergröße Einfluss nehmen, und es dürften noch wesentlich mehr sein. Die Durchschnittsgröße ändert sich durch ein einzelnes Allel jeweils nur um drei bis fünf Millimeter. Die Bewohner der tropischen Regenwälder Afrikas, Südamerikas und Südostasiens sind recht klein. Vielleicht ist das bei dem begrenzten Nahrungsangebot dort von Vorteil. Damit sich in einer Population die Durchschnittsgröße auffallend ändert, könnte es schon genügen, dass sich die Allelfrequenzen von jedem beteiligten Gen insgesamt nur wenig verschieben. Würden bei sämtlichen Genen die Versionen für kleineren Wuchs lediglich um zehn Prozent häufiger, könnte das zusammen schon für eine überwiegend geringere Körperhöhe sorgen. In diesem Beispiel herrscht zwar insgesamt eine starke Selektion auf Kleinwuchs, aber der Druck auf die einzelnen Gene ist schwach. Solche polygenen Anpassungen liefern darum bei den üblichen Genomvergleichen kein auffallendes Signal. Möglicherweise erfuhren deshalb aber auch menschliche Genome in jüngerer Zeit mehr Anpassungszwänge und Veränderungen, als Forscher bisher erkannt haben.

Selektion durch Malaria und Aids

Aktuelle Evolution beim Menschen ist schwer zu erkennen, schon weil die Selektion in einer Population meist nur sehr unauffällig wirkt. Doch es gibt Ausnahmen. In Entwicklungsländern dürften Infektionskrankheiten wie Malaria oder Aids weiterhin stark selektieren. Träger der wenigen bisher bekannten Genvarianten, die vor solchen Krankheiten einen gewissen Schutz bieten, leben im Durchschnitt nicht nur länger, sondern haben deswegen vermutlich auch wesentlich mehr Kinder. Tatsächlich ist in Afrika südlich der Sahara in vielen Bevölkerungsgruppen eine Genvariante nahezu allgegenwärtig, die vor Malariaerregern des Typs *vivax* schützt. Innerhalb weniger hundert Jahre werden sich in dieser Region vielleicht auch die bisher seltenen gegen Aids günstigen Genvarianten verbreiten, sollte das HI-Virus dort weiterhin wüten und den Resistenzmechanismus nicht unterlaufen können. Allerdings evolviert der trickreiche Erreger sehr viel schneller als der Mensch. Daher wird man ihn wohl eher mit technischen Mitteln besiegen, zum Beispiel mit einem Impfstoff.

In den Industrieländern herrscht heute eine geringe Kinder- und Jugensterblichkeit. Deswegen müssten mit die

stärksten Selektionskräfte an Genen angreifen, die auf die Kinderzahl wirken. Das könnte im Prinzip alles rund um Fruchtbarkeit und Fortpflanzungsverhalten betreffen, sofern es je nach genetischer Ausstattung variiert.

In einer 2009 publizierten Studie fanden Stephen C. Stearns von der Yale University in New Haven (Connecticut) und seine Kollegen bei Frauen sechs Merkmale, die mit einer höheren Kinderzahl assoziiert und alle in mittlerem bis hohem Grad erblich sind. Demnach sind kinderreichere Frauen oft etwas kleiner und kräftiger gebaut als der Durchschnitt, und sie kommen später in die Wechseljahre. In einer gleich bleibenden Umwelt müssten diese Merkmale mit der Zeit häufiger werden. Laut Stearns und seinen Kollegen würde die Menopause in zehn Generationen oder 200 Jahren durchschnittlich etwa ein Jahr später eintreten als heute. Zumindest plausibel erscheint, dass genetische Unterschiede, die sich auf das Sexualverhalten auswirken – vielleicht sogar auf den Gebrauch von Verhütungsmitteln –, ebenfalls unter hohem Selektionsdruck stehen. Es ist aber offen, wie stark Gene überhaupt ein so komplexes Verhalten steuern.

Im Vergleich zum kulturellen und technologischen Wandel verläuft die menschliche Evolution geradezu träge. Den gegenwärtigen globalen Umweltveränderungen kann sie nur weit hinterherhinken. Größere deutliche Erbgutanpassungen benötigen gleich bleibende Außenbedingungen über Jahrtausende. In 5000 Jahren dürfte zwar die Welt um uns herum nicht wiederzuerkennen sein. Doch die Menschen – falls man ihre Genome nicht manipuliert – werden im Wesentlichen die Gleichen bleiben. ~

Frauen mit mehr Kindern sind oft kleiner und kräftiger gebaut

DER AUTOR



Jonathan K. Pritchard ist Professor für Humangenetik an der University of Chicago (Illinois). Er forscht ebenfalls am Howard Hughes Medical Institute in Chevy Chase (Maryland).

QUELLEN

- Coop, G. et al.:** The Role of Geography in Human Adaptation. In: PLoS Genetics 5, e1000500, 5. Juni 2009
- Sabeti, P.C. et al.:** Positive Natural Selection in the Human Lineage. In: Science 312, S. 1614–1620, 16. Juni 2006
- Stearns, S.C. et al.:** Measuring Selection in Contemporary Human Populations. In: Nature Reviews Genetics 11, S. 611–622, 10. August 2010
- Xin Yi et al.:** Sequencing of 50 Human Exomes Reveals Adaptation to High Altitude. In: Science 329, S. 75–78, 2. Juli 2010

WEBLINK

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061747

Eiszapfen, die gen Himmel wachsen

Aufwärtsstrebende Eiszapfen sind extrem selten. Kein Wunder – denn für ihre Entstehung müssen zahlreiche Voraussetzungen erfüllt sein.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Eiszapfen gelten nicht gerade als überraschendes physikalisches Phänomen, schon gar nicht jetzt im Winter. Auch dass eine wassergefüllte Vogeltränke über Nacht zufrieren kann, ist völlig alltäglich. Wenn aber aus der Eisschicht in der Tränke unerwartet ein langer, dünner Eiszapfen herausragt, wird die physikalische Intuition auf

eine harte Probe gestellt. Selbst der Dichter des einleitenden Verses kann sich offenbar nicht vorstellen, dass ein Eiszapfen anders als von oben, »aus des Himmels Feld«, nach unten wächst.

Auf alle Fälle hat man es mit einem in freier Natur nur selten zu beobachtenden Phänomen zu tun. Wesentliche Voraussetzung ist ein nicht zu großes Gefäß mit Wasser, das zunächst wärmer als vier Grad Celsius ist. Kommt es anschließend zu einem kräftigen Temperaturabfall, kühlt das Oberflächenwasser ab und sinkt, sobald es vier Grad erreicht hat, nach unten. Denn bei dieser Temperatur besitzt es, das ist die so genannte Dichteanomalie des Wassers, seine größte Dichte. Wird es noch kälter, nimmt die Dichte wieder ab.

Beim Übergang vom flüssigen in den festen Zustand muss das Wasser

nun Kristallisationswärme an die Umgebung abgeben. Das ist dort am einfachsten, wo es in direktem Kontakt mit der kalten Außenwelt steht. Ist der Gefrierpunkt erreicht, bildet sich Eis darum zunächst an der Oberfläche – dank der wieder abnehmenden Dichte des Wassers sinkt dieses nicht mehr nach unten – und an den Gefäßwänden.

Die Dichte der eingeschlossenen Flüssigkeit nimmt aber ebenfalls ab, so dass diese ein größeres Volumen einzunehmen versucht. Das in das Gefäß hineinwachsende Eis beansprucht ebenfalls mehr Platz, als das verschwindende Wasser hinterlässt. Die Flüssigkeit gerät daher unter wachsenden Druck. Zu beobachten ist dies vor allem bei eher kleinen Gefäßen. Denn hier ist die Oberfläche der Flüssigkeit relativ groß im Verhältnis zu ihrem Volumen, so dass der Wärmeaustausch sehr effizient abläuft – das Wasser kühlt also schneller ab als in größeren Behältnissen.

Als Folge des zunehmenden Drucks »sucht« das eingeschlossene Wasser einen Ausgang: die schwächste Stelle der meist ungleichmäßig zufrierenden Oberfläche. Durch dieses Loch wird es langsam hinausgedrückt und gefriert zunächst an dessen Rand, wo es die Wärme schnell nach außen abgeben kann. Solange die Eisschicht von oben und den Seiten in das Wasser hineinwächst, bleibt der Druck hoch und erhält auch den Flüssigkeitsstrom aufrecht.

Weil das Wasser bis zu den jeweils oberen Rändern fließt und dort sofort gefriert, wachsen die Eistränder immer

Ich wachse lang und dünn, doch
niemals aus der Erden: /
Kann auch dergleichen Stamm bei
uns gefunden werden? /
Hab' keine Wurzel nicht,
spross' aus des Himmels Feld, /
Mich kennt ein jedes Kind und
kauft mich ohne Geld.

Georg Philipp Harsdörffer
(1607–1658)



TANJASENE

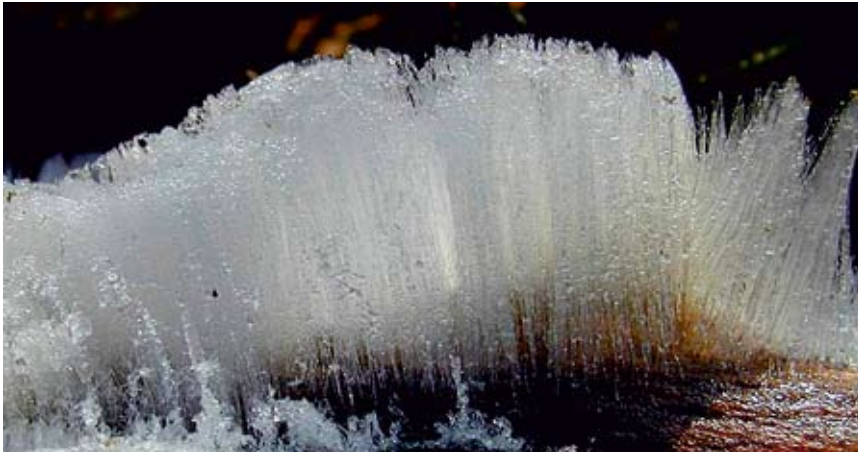


ANDRE GERICK, INSTITUT FÜR DIDAKTIK DER PHYSIK, UNIVERSITÄT MÜNSTER



MIT FRED. GEN. VON H. J. SCHLICHTING

»Stehende« Eiszapfen (oben) sind in der Natur rar. Im Eiswürfelbehälter lassen sie sich aber züchten (Mitte). Die eingefrorenen Luftblasen in dem bei minus zwölf Grad Celsius in der Kältekammer gewachsenen Exemplar markieren den »Kanal«, wo zuletzt noch flüssiges Wasser nach oben stieg. Auch eine Variante aufwärtsstrebender Zapfen lässt sich mit etwas Glück beobachten (unten): Feuchter Boden in Kombination mit heftigem und plötzlichem Frost kann dazu führen, dass durch Öffnungen in der entstehenden Eiskruste ein schnell erstarrendes Gemisch aus Wasser und Erde gedrückt wird.



Bergwanderern und Geomorphologen dürfte das Phänomen stehender Eiszapfen noch am vertrautesten sein. Ihnen begegnen zuweilen ganze Bündel von Eisnadeln, die fast senkrecht aus dem Boden wachsen. Zu den Voraussetzungen für die Entstehung dieses so genannten Kammeises gehören feuchte Böden, die plötzlichem starkem Frost ausgesetzt sind.

höher, und allmählich entsteht ein hohler Eiszapfen. Das Wachstum kommt erst dann zum Erliegen, wenn das meiste Wasser im Gefäß gefroren ist und nicht mehr nachströmen kann. Dann erstarrt auch die flüssige »Seele« des Zapfens. Darin eingeschlossene Luftbläschen erinnern aber auch später noch an sie: Die Bläschen bestehen aus im Wasser gelösten, dann aber beim Gefrieren frei gewordenen Luftmolekülen, die vom Zufrieren des Hohlraums gewissermaßen überrascht wurden.

Auf jedes Detail kommt es an

Das Wachstum aufwärtsstrebender Eiszapfen lässt sich auch experimentell untersuchen. Ausgangspunkt ist eine Tiefkühltruhe – besser eine Kältekammer mit regelbarer Temperatur – sowie ein Eiswürfelbehälter, den man mit Leitungswasser füllt. Die Wahrscheinlichkeit für stehende Zapfen erweist sich allerdings als sehr gering, denn Verunreinigungen im Leitungswasser können dessen Kristallisationsverhalten nachhaltig stören. Dann fließt es einfach aus dem Loch heraus. Versuche mit destilliertem Wasser sind hingegen häufiger von Erfolg gekrönt.

Zunächst wachsen die Eiszapfen sehr langsam. Später nimmt das Tempo immer mehr zu, was die spitz auslaufende Form des Zapfens erklärt, und fällt schließlich abrupt auf null zurück. Eine konstante Temperatur von etwa minus zwölf Grad erweist sich dabei als optimal.

Warum aber ist die Züchtung stehender Eiszapfen überhaupt eine solch

diffizile Angelegenheit? Vor allem deshalb, weil die Geschwindigkeit des Eiskristallwachstums ziemlich genau jener des nachströmenden Wassers entsprechen muss. Das obere Ende des Zapfens bildet idealerweise eine fast perfekte Halbkugel aus Wasser. Strömt aber mehr Wasser nach, als gefriert, läuft es einfach über. Dann wachsen die Zapfen in die Breite und sorgen lediglich für eine kleine Erhöhung der Eisfläche. Strömt zu wenig Wasser nach, friert der Zapfen zu.

Selbst auf das »richtige« Loch im Eis kommt es an. Wenn Wasser gefriert, geschieht dies vorwiegend in den durch die Symmetrie des Eiskristalls vorgegebenen Richtungen. Dabei spielt zwar der Zufall eine wichtige Rolle. Sind allerdings die Kristalle am Loch parallel zur Eisoberfläche orientiert, ist die Wahrscheinlichkeit dennoch gering, dass ein Zapfen in die Höhe wächst.

Kein Wunder angesichts so zahlreicher Voraussetzungen, dass stehende Eiszapfen selten anzutreffen sind. Nicht ganz so selten sind aber Varianten des Phänomens: »Eisfasern«, die geradezu wie Pflanzen aus dem Boden herausdrängen (und an die der Dichter in seinem Vers ebenfalls nicht gedacht hat). Entstehen können sie, wenn der Boden sehr feucht ist und plötzlich starker Frost auftritt. Dünne Bereiche in der entstehenden Eiskruste sorgen dann wieder dafür, dass das noch flüssige Wasser-Erde-Gemisch wie durch die Düse eines Tortengussbeutels herausgepresst wird und erstarrt. Doch es gibt einen entscheidenden Unterschied.

Anders als die Eisfläche in der Vogeltränke führt die unebene Oberfläche der feuchten Erde offenbar zu lokal unterschiedlichen Druckverhältnissen und damit zu mehreren Löchern im Eis – und vielen dicht an dicht stehenden Eisfasern.

Ein ähnliches Phänomen kennen Geomorphologen übrigens als Kammeis (Foto oben): An schneefreien, aber feuchten Berghängen können Bündel von bis zu 30 Zentimeter langen Eisnadeln aus dem gefrierenden Boden wachsen – ein Naturschauspiel, in dem sich überraschende Physik auf eindrucksvolle Weise mit ästhetischer Wirkung verbindet. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

Hill, L. et al.: Experiments on Ice Spikes and a Simple Growth Model. In: Journal of Glaciology 50, S. 375–381, 2004

Libbrecht, K. G., Lui, K.: An Investigation of Laboratory-Grown Ice Spikes. In: Journal of Glaciology 50, S. 371–374, 2004

Kostenfreier Download unter:
www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/icespikes/icespikes.pdf

Reise ins Innere des Neutrons

Dank ihrer positiven Ladung halten Protonen die Elektronen auf ihrer Bahn um den Atomkern. Die ungeladenen Neutronen hingegen erscheinen bei diesem atomaren Tanz wie unbeteiligte Zuschauer. Doch auch sie haben es in sich! Denn ihre Anatomie stellt unser Anschauungsvermögen auf eine harte Probe.

Von Timothy Paul Smith

Auf den ersten Blick geht es in einem Atom recht übersichtlich zu, denn es setzt sich aus gerade einmal drei Arten von Teilchen zusammen. Die negativ geladenen Elektronen rasen mit bis zu einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit um den Atomkern herum. Dieser selbst enthält massereiche Protonen, die dank ihrer positiven elektrischen Ladung die negativen Elektronen auf ihren Bahnen halten. Protonen und Elektronen bestimmen die Form des Atoms, seine chemischen Eigenschaften und seine Dynamik. Und doch gibt es da noch die Neutronen.

An dem atomaren Tanz der Protonen mit ihren Elektronenpartnern nehmen sie lediglich über ihr magnetisches Moment teil – schließlich sind sie ungeladen. Doch an ihrer Oberfläche brodelt es vor entstehenden und wieder vergehenden Teilchen, im Inneren tummeln sich quicklebendige und noch kleinere Teilchen wie Quarks und Gluonen. Um dies zu erkennen, müssen wir das Neutron allerdings auf einer Größenskala von gerade einmal einem Hunderttausendstel eines Atomdurchmessers betrachten, die unseren Instrumenten noch nicht lange zugänglich ist: auf der Skala

eines Femtometers, das sind 10^{-15} oder ein milliardstel Meter. Kern- und Teilchenphysiker nennen diese Längeneinheit Fermi, nach dem berühmten Physiker Enrico Fermi (1901–1954), der unter anderem an der Entwicklung des ersten Kernreaktors mitgewirkt hat.

Wer den Atomkern so betrachtet, entdeckt eine fremdartige Welt. Neutronen und Protonen sitzen hier dicht an dicht. Forscher fassen sie unter dem Begriff Nukleonen zusammen, also »Kernteilchen«, weil beide Teilchenarten viele ähnliche physikalische Eigenschaften besitzen, darunter die Größe – Nukleonen besitzen einen Durchmesser von 1,7 Fermi – und die Masse. Wasserstoff, das einfachste Atom, besteht aus einem einzelnen Proton, um das ein einzelnes Elektron schwirrt. Zu dem Proton des Wasserstoffs können sich ein oder zwei Neutronen gesellen, müssen es aber nicht. Dagegen sind in den Atomkernen aller anderen Elemente stets Neutronen zu finden. Beispielsweise im Kern von Helium-3, dem nach Wasserstoff einfachsten Atom. Dieser besteht aus drei Nukleonen, nämlich zwei Protonen und einem Neutron. Versuchte man, das Neutron zu entfernen, zerfiel das Atom, denn die elektrostatische Abstoßung zwischen den positiv geladenen Protonen ist zu stark, als dass Helium-2-Atome dauerhaft existieren könnten. Schwerere Elemente benötigen die Neutronen also gewissermaßen als Pufferzone im Kern.

Im Verlauf der vergangenen 60 Jahre untersuchten Wissenschaftler Neutronen und Protonen zunächst, um ihre Größe zu messen und um die so genannte starke Kernkraft oder starke Wechselwirkung zu erforschen, welche die Nukleonen zusammenhält. Vor etwa 45 Jahren begannen sie, Nukleonen als zusammengesetzte Systeme zu betrachten, die aus noch kleineren Teilchen aufgebaut sind, nämlich aus Quarks und Gluonen. Heute lauten ihre Fragen: In welchen Konfigurationen treten diese Quarks auf? Bewegen sie sich auf Orbits um ein Zentrum, so wie die Planeten um die Sonne kreisen? Oder ist das Innere der Nukleonen von einem amorphen Quark-Gluon-»Pudding« erfüllt?

Untersuchungen auf diesen winzigen Längenskalen sind schwierig. Hinzu kommt, dass wir wohl nie ein einzelnes Quark sehen werden. Denn die Anziehungskraft zwischen

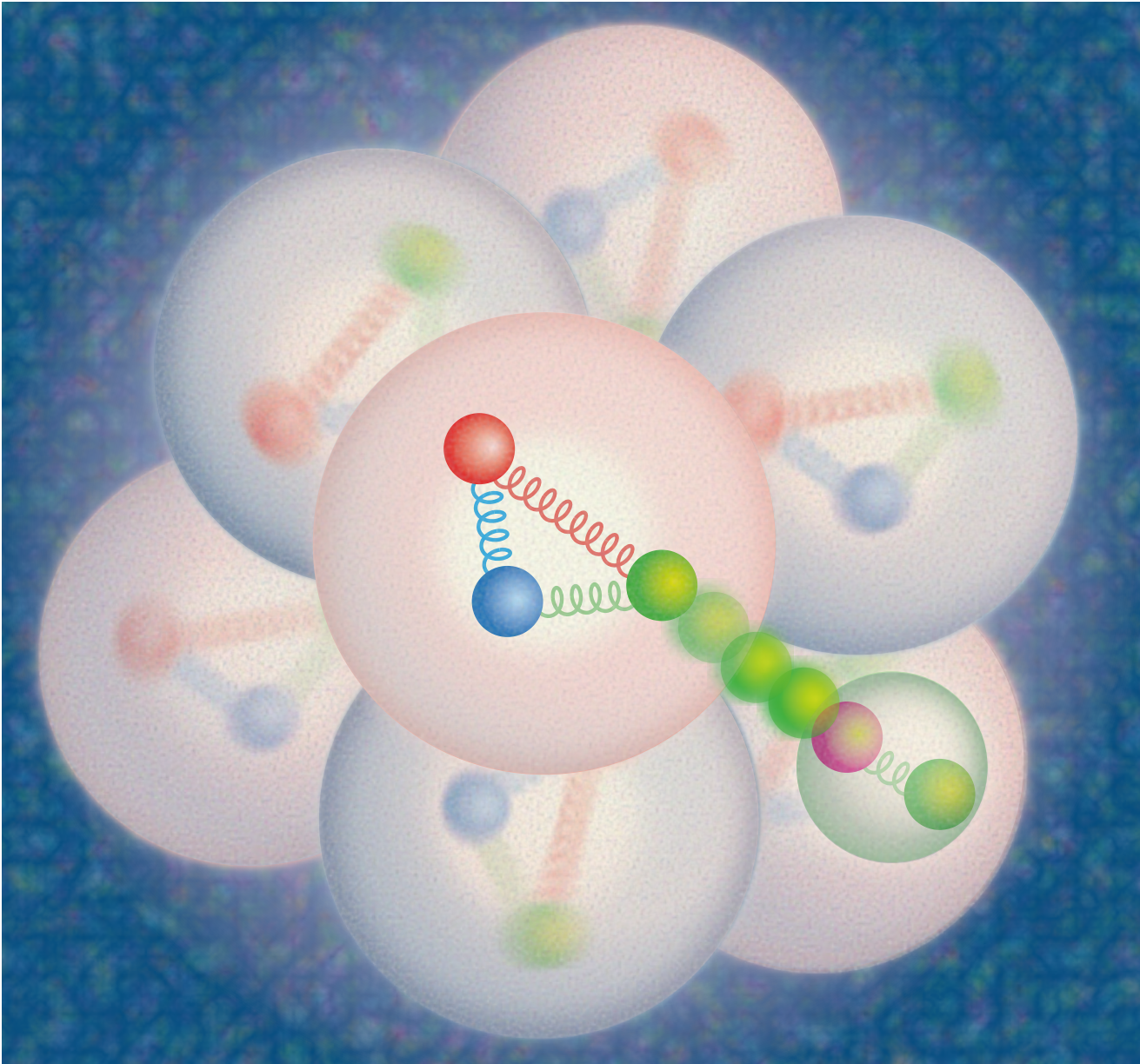
AUF EINEN BLICK

ALLES ANDERE ALS LANGWEILIG

1 Neutronen sind wie Protonen Bestandteile des Atomkerns. Das Innenleben dieser Teilchen erschließt sich Forschern freilich nur langsam. Fest steht immerhin, dass sie aus drei Quarks sowie aus den Austauschteilchen der starken Wechselwirkung, den Gluonen, bestehen.

2 In den letzten zwei Jahrzehnten wurden weltweit neue Techniken und mathematische Verfahren entwickelt, um Neutronen aus noch größerer »Nähe« zu studieren. Die Experimente belegen: Betrachtet man die nach außen hin ungeladenen Teilchen genauer, findet man darin sowohl positiv als auch negativ geladene Regionen.

3 Allerdings handelt es sich dabei um Neutronen, die gerade mit Elektronen kollidieren. Wie aber sieht ein Neutron »in Ruhe« aus? Dies wollen Wissenschaftler jetzt mit Hilfe neuer Verfahren herausfinden.



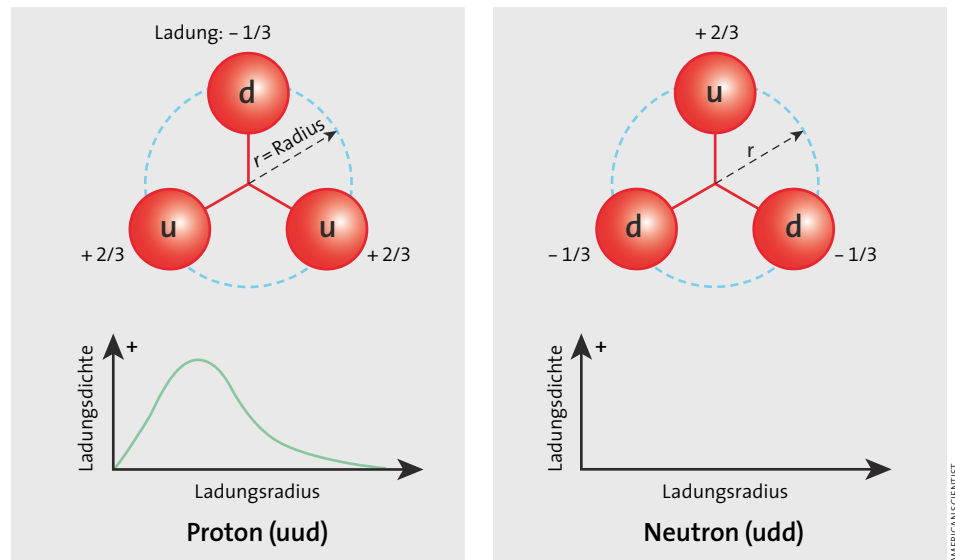
AMERICAN SCIENTIST

diesen Teilchen nimmt zu, je weiter man sie auseinanderzuziehen versucht. Um sie völlig voneinander zu befreien, müsste man praktisch unendlich viel Energie aufbringen. Trotzdem gibt es Wege, den Neutronen Informationen über ihren Aufbau zu entlocken.

Das Wort »Neutron« selbst wurde erstmals 1899 verwendet. Damals bezeichnete es eine hypothetische Kombination aus einem positiven und einem negativen Elektron, die nur in einem den Raum erfüllenden »Äther« überhaupt möglich wäre. 1920 war die Forschung schon weiter. Damals hielt der legendäre britische Physiker Ernest Rutherford (1871–1937) die Baker-Vorlesung, die bedeutendste Vorlesungsreihe der Londoner Royal Society zu physikalischen Themen, und fasste in ihr den damaligen Stand der Kernphysik zusammen. Bereits 1896 hatte man das Elektron erstmals isoliert und beschrieben. Das Proton, der Kern des Wasserstoffatoms,

Der Blick in den Atomkern offenbart eine fremdartige Welt: In den Neutronen (große, pinkfarbene Kugeln) und Protonen (große, blaue Kugeln) kreisen je drei Quarks (durch Spirallinien verbundene, kleine Kugeln). Während die Protonen die den Kern umkreisenden Elektronen (nicht im Bild) auf ihren Bahnen halten, wirken die ungeladenen Neutronen wenig dynamisch. Doch nur auf den ersten Blick, denn ihr Innenleben ist äußerst komplex. Die Spirallinien in der Darstellung symbolisieren die Gluonen, von denen die Quarks zusammengehalten werden. Versucht ein Quark auszubrechen, sendet es ein Meson aus (große, grüne Kugel unten rechts), das aus einem Quark (grün) und einem Antiquark (pink) besteht.

Im einfachsten Quarkmodell addieren sich die Ladungen der up-Quarks (u) und der down-Quarks (d) in einem Proton zu +1. Das Teilchen besitzt einen Ladungsradius von $0,8 \cdot 10^{-15}$ Meter oder 0,8 Fermi. Die Ladungsdichte verändert sich abhängig vom Abstand zum Mittelpunkt (linkes Bild unten). Im Neutron dagegen summieren sich die Ladungen der Quarks zum Wert null, so dass auch die Ladungsdichte stets null beträgt.



war ebenfalls bekannt: Rutherford selbst hatte ihm seinen Namen gegeben (der ungefähr »erstes Teilchen« bedeutet). Er hatte zudem gezeigt, dass man das Proton in allen anderen Atomen ebenfalls findet. Aber es gab noch ein Problem. So besitzt beispielsweise der Kern von Kohlenstoff die elektrische Ladung von sechs, aber die Masse von zwölf Protonen. Das Dilemma wollte Rutherford lösen, indem er annahm, dass im Kern auch Elektronen eingebettet seien. Deren Ladung könnte dann diejenige von sechs Protonen neutralisieren. Er schlug also ein eng gebundenes Proton-Elektron-System vor, für das sich erneut der Begriff Neutron einbürgerte. Die radikalere Lösung – nämlich eine neue Teilchenart einzuführen – vermied Rutherford jedoch, weil er sein Modell vom Atomkern möglichst einfach halten wollte.

Noch nicht das Ende der Geschichte

In den frühen 1930er Jahren stießen dann mehrere Physiker auf eine neue Art von Strahlung: Sie trat beim Beschuss von Atomen mit Alphateilchen auf (die man später als Heliumkerne identifizierte). Offenbar löste dieses Bombardement etwas aus dem Atomkern heraus. 1932 zeigte der Brite James Chadwick (1891–1974), dass es sich bei der neuen Strahlung statt um Photonen oder Röntgenemissionen eher um Teilchen mit der Masse eines Protons handeln dürfte.

Zunächst dachte er, er habe das von Rutherford vorgeschlagene System aus Proton und Elektron gefunden. Doch als er 1935 für die Entdeckung des Neutrons den Nobelpreis erhalten hatte, erklärte er in seiner Preisrede die Proton-Elektron-Theorie für tot. Denn erstens weist die Quantenmechanik darauf hin, dass ein Proton-Elektron-System immer wie ein Wasserstoffatom aussieht und auch dessen Durchmesser von 10^{-10} Metern besitzt – und nicht fünf Größenordnungen kleiner sein kann. Zweitens zerfällt das neue Teilchen nicht, wenn man es mit Energie bombardiert. Das wäre aber für die rutherfordische Kombination aus Proton und Elektron zu erwarten. Und drittens ließ sich sein Spin (das quantenmecha-

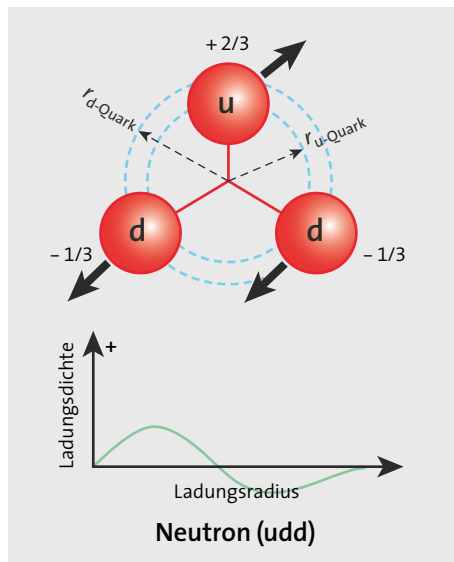
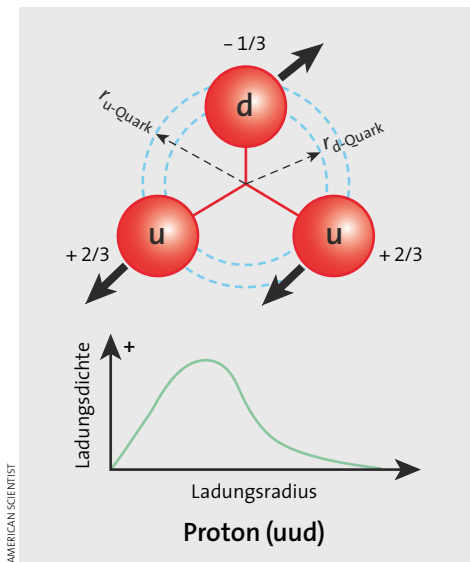
nische Gegenstück zum Drehimpuls) nicht mit einer Kombination aus Protonen und Elektronen erklären.

Das Neutron ist also ebenso ein Teilchen wie das Proton. Die meisten von uns wissen aber kaum mehr als das, was Chadwick schon 1935 berichtete: Es ist elektrisch neutral und tritt mit anderen Neutronen und Protonen über die starke Kernkraft in Wechselwirkung. Doch das ist natürlich noch lange nicht das Ende der Geschichte. Schon im selben Jahr kam eine weitere Einsicht hinzu. Der Physiker Hideki Yukawa von der Universität von Osaka hatte sich mit der Frage befasst, was die Nukleonen im Kern zusammenhält. Die dafür verantwortliche starke Kernkraft unterscheidet sich grundlegend etwa von der Schwerkraft oder der elektromagnetischen Wechselwirkung, die noch über ganze Galaxien hinweg ihre Wirkung entfalten, während ihre eigene Reichweite mit nur zwei Fermi extrem kurz ausfällt. Um dies zu erklären, schlug der Japaner die Existenz einer neuen Art von Teilchen vor: So genannte Mesonen sollten zwischen den Nukleonen ausgetauscht werden und sie so aneinander binden. Und tatsächlich wurde zwölf Jahre später das erste Meson entdeckt, ein Pion. Yukawas Argumentation war indessen so überzeugend gewesen, dass prominente Physiker wie Werner Heisenberg, Enrico Fermi und andere schon lange zuvor eine komplette Feldtheorie der Mesonen entwickelt hatten.

In den 1950er Jahren herrschte bereits weit gehender Konsens darüber, dass Nukleonen von einer Pionenwolke umgeben sind, weil an ihrer Oberfläche ständig Pionen erzeugt und absorbiert werden. Weil sich die Pionen aber Energie aus dem Vakuum »borgen« müssen, um existieren zu können, unterliegen sie quantenmechanischen Gesetzen, insbesondere der heisenbergschen Unschärferelation; ihre Lebensdauer und Reichweite sind daher nur gering.

Zu weiteren Erkenntnissen verhalf eine neue Technik. Rutherford und Chadwick hatten noch radioaktive Quellen wie etwa Radium genutzt, um Atome zu durchleuchten. Auch Pionen hatte man erstmals in einer natürlichen Strahlungs-

Berücksichtigen die Forscher in ihrem Modell zusätzlich die Spins (schwarze Pfeile) der jeweiligen Teilchen, kommt es im Fall paralleler Spins zweier Quarks zu einer Abstoßung. Dies verändert die Bahnen der Quarks. Im Proton ist der Einfluss dieser Störung auf den Ladungsradius kaum von Bedeutung. Im Neutron dagegen kreisen die down-Quarks jetzt weiter außen als das up-Quark. Das führt zu einer leicht negativ geladenen »Oberfläche« und einem leicht positiv geladenen Zentrum.



quelle, nämlich in der kosmischen Strahlung, entdeckt. Nach dem Zweiten Weltkrieg aber entwickelten Forscher den Teilchenbeschleuniger. Ein solches Gerät bringt Teilchen mittels elektromagnetischer Felder auf hohe Geschwindigkeiten und bündelt sie zugleich zu einem engen Strahl. Die Energie dieses Strahls messen Physiker in Elektronvolt. Ein Elektronvolt entspricht der Bewegungsenergie, die ein freies Elektron durch eine elektrische Spannung der Stärke ein Volt gewinnt. Je höher die Energie eines Teilchenstrahls, desto kleinere Details vermag er aufzulösen. Ein Beschleuniger etwa, der den Teilchen eine Energie von einer Million Elektronvolt überträgt – ein Megaelektronvolt –, macht Einzelheiten sichtbar, die tausendmal kleiner sind als ein Atom. Ein tausendfach stärkerer Gigaelektronvolt-Beschleuniger zeigt sogar fermi-große Details.

Wie rückt man einem Neutron zu Leibe?

Ein Neutron wirklich sehen kann man allerdings selbst mit einem Beschleuniger nicht. Vielmehr messen die Forscher nur den so genannten Wirkungsquerschnitt. Diese Größe ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron des Beschleunigerstrahls, das eine bestimmte Energie besitzt, unter einem bestimmten Winkel von den beschossenen Atomen, dem Target, gestreut wird. Indem man die Größe einerseits misst und andererseits theoretisch bestimmt, kann man schließlich jene Theorie auswählen, die am besten mit den Daten in Einklang steht.

Die mathematischen Gleichungen für den Wirkungsquerschnitt enthalten Terme, die jeweils die elektrische sowie die magnetische Streuung beschreiben. Denn wegen ihrer Ladung werden die Elektronen elektrisch gestreut, wegen ihres Spins aber auch magnetisch. Bestandteil der Terme ist der elektrische Formfaktor, aus dem sich über eine so genannte Fouriertransformation die elektrische Ladungsverteilung der beschossenen Atombausteine ermitteln lässt, sowie der magnetische Formfaktor. Kombinieren die Forscher ge-

schiebt die experimentellen Parameter wie Strahlenergie und Detektorwinkel und messen sie jeweils den Formfaktor, können sie dessen elektrische und magnetische Anteile extrahieren und so die Struktur der Nukleonen enträtseln.

Mitte der 1950er Jahre lenkte Robert Hofstadter von der kalifornischen Stanford University den Elektronenstrahl des dortigen Beschleunigers auf Wasserstoffatome. Auf Grund der verwendeten Strahlenergie kam es zu fast keiner Wechselwirkung zwischen den Elektronen des Strahls und den wenigen Elektronen der Wasserstoffatome. Im Wesentlichen maß der spätere Nobelpreisträger also den Formfaktor des Protons. Daraus konnte er den Ladungsradius sowie den magnetischen Radius des Teilchens zu je etwa 0,8 Fermi ermitteln. Nukleonen sind natürlich keine Kugeln mit einer klar definierten Oberfläche. Ihre Ladungsverteilung zum Beispiel fällt exponentiell nach außen hin ab. Diese vermeintlichen Radien bezeichnen also lediglich die Abstände, bei denen die elektrische oder die magnetische Wechselwirkung eine bestimmte Stärke erreicht.

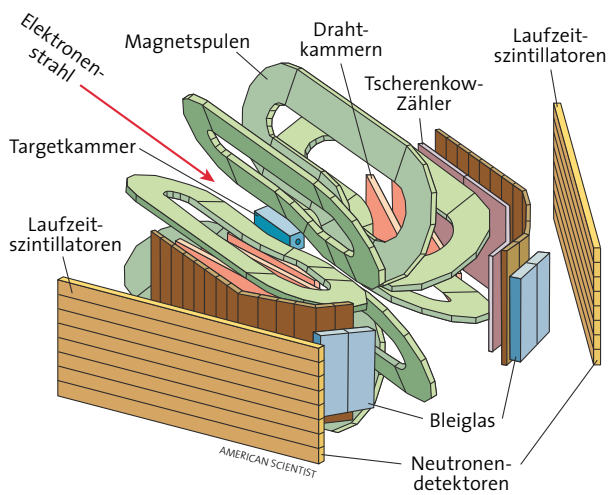
Messungen an Neutronen sind schwieriger als solche an Protonen, da freie Neutronen schnell zerfallen. Ersatzweise maß Hofstadter daher den Wirkungsquerschnitt der Kerne von Deuteriumatomen. Deuterium ist ein Isotop des Wasser-



stoffs mit einem Neutron im Kern, welches nur locker an das Proton gebunden ist. Misst man den Wirkungsquerschnitt des Deuteriumkerns und zieht davon jenen des Protons ab, erhält man also – annähernd – den Wert für das Neutron. Auf diese Weise bestimmte Hofstadter für das Neutron den magnetischen Radius mit 0,8 Fermi – praktisch derselbe Wert wie beim Proton. Der Ladungsradius hingegen betrug im Rahmen der Messgenauigkeit wie erwartet null.

Detektor für gestreute Teilchen

Das Spektrometer BLAST (Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid) besteht aus mehreren Detektorschichten, die rund um das zentral positionierte Target angeordnet sind. Grafik und Foto zeigen das Instrument aus ähnlicher Perspektive. Auf dem Foto sind im Vordergrund des eigentlichen Geräts unter anderem die Neutronendetektoren zu erkennen. Mit den Magnetspulen wird der Impuls der bei der Kollision hinausgestreuten Teilchen bestimmt; Drahtkammern messen Positionen und Bewegungen der Teilchen; Tscherenkow-Zähler unterscheiden Pionen von Elektronen. Laufzeit-szintillatoren, die auf hindurchtretende Teilchen mit Ausenden von Licht reagieren, messen präzise die Zeitpunkte, zu denen dies geschieht. Wird ein Teilchen im Szintillator ganz gestoppt, lässt sich zudem seine Energie bestimmen.



Unsere Sichtweise der Vorgänge im Inneren von Neutronen, Protonen und Pionen änderte sich allerdings radikal, als Murray Gell-Mann vom California Institute of Technology und George Zweig vom Europäischen Teilchenforschungslabor (CERN) 1964 unabhängig voneinander das Quarkmodell entwarfen. Ihre Theorien besagten, dass schwere Teilchen wie Neutronen, Protonen sowie einige exotischere Exemplare zur Gruppe der Baryonen zählen, die aus jeweils drei Quarks bestehen. Mesonen dagegen – Teilchen mittlerer Masse wie das Pion – enthalten demzufolge zwei Quarks, genauer: ein Quark und ein Antiquark. Quarks und ihre Antiteilchen unterscheiden sich dadurch, dass manche ihrer Eigenschaften denselben Betrag, aber unterschiedliche Vorzeichen besitzen. Nur Elektronen und andere leichte Teilchen – die Leptonen – setzen sich nicht aus anderen, kleineren Teilchen zusammen.

Quarks spielen eine zentrale Rolle in der Quantenchromodynamik, der erfolgreichsten Theorie zur Beschreibung von Teilchen auf der nuklearen und subnuklearen Größenskala (ihr Name spielt auf eine der Quarkeigenschaften an, auf die »Farbe« oder griechisch *chroma*). Quarks existieren in sechs so genannten *flavours* (englisch für »Geschmacksrichtungen«). Die beiden leichtesten von ihnen sind das up- und das down-Quark, aus ihnen bestehen auch das Proton und das Neutron. Darüber hinaus lassen sich die sechs *flavours* aber zu einer Fülle weiterer Teilchen kombinieren. Unter anderem dieser Umstand hatte das Quarkmodell für die Physiker so attraktiv gemacht, weil sie damals eine Vielzahl neu entdeckter Teilchen erklären mussten.

Endloser Nachschub an virtuellen Teilchen

Protonen setzen sich aus zwei up-Quarks und einem down-Quark zusammen, kurz als uud bezeichnet. Neutronen bestehen dagegen aus einem up- und zwei down-Quarks (udd). Diese Quarks heißen auch Valenzquarks, weil sie den Teilchen ihre äußerlichen Eigenschaften wie Teilchenart und Ladung verleihen. Aneinandergebunden sind die Quarks durch Gluonen, die zwischen ihnen hin- und herfliegen, ganz ähnlich, wie die einzelnen Nukleonen im Atomkern von Pionen zusammengehalten werden. Der Name »Gluon« leitet sich von *glue* ab, englisch für Klebstoff. Im Inneren eines Nukleons schwappt zudem noch der so genannte Quarksee. Er liefert endlosen Nachschub an virtuellen Quark-Antiquark-Paaren, die für einen flüchtigen Moment existieren und gleich wieder verschwinden und nicht zu den Valenzquarks zählen.

Will man das komplette quantenchromodynamische Bild der Geschehnisse im Inneren eines Nukleons zeichnen, erweist sich die Komplexität allerdings als überwältigend. Rechnerisch beschreibt man Nukleonen darum im Rahmen des Konstituenten-Quark-Modells (*constituent quark model*, CQM). Darin betrachtet man keine »nackten« Quarks, sondern fasst die Quarks mit den zusätzlichen Einflüssen von virtuellen Gluonen und Quarks zusammen und bezeichnet sie dann als Konstituentenquarks.

Setzt man im CQM die Gesamtladung eines Protons (uud) gleich +1 und die eines Elektrons gleich –1, so ergibt sich für

ein up-Quark die Ladung $+2/3$ und für ein down-Quark die Ladung $-1/3$. Dem Modell zufolge umkreisen die drei Quarks das Zentrum der Gruppe in jeweils etwa demselben Abstand. Im Fall des Protons hängen Ladungsradius und magnetischer Radius von der Lage der Quarkbahnen und von ihren Spins ab. Beim Neutron ist die Situation ein wenig anders. Sein magnetischer Radius ist zwar ebenfalls durch die Position der Quarks gegeben. Die Ladungen der Quarks heben sich jedoch exakt auf – und zwar für alle Abstände vom Zentrum. Das Neutron besitzt also nicht nur eine Gesamtladung von null, tatsächlich scheint auch sein Ladungsradius null zu sein. Doch trifft dies wirklich zu?

Wir können Quarks vereinfacht als Kugeln betrachten, die einen Spin oder Drall besitzen, also um ihre Achsen rotieren. Mathematisch lassen sich ihre Streuwechselwirkungen beschreiben wie die von rotierenden Kugeln, die von der Bande eines Billardtischs abprallen und abhängig von ihrem Drall bestimmte Richtungen einschlagen. Insbesondere die Orientierung des Spins erweist sich als wichtig: Die Wechselwirkung zwischen Teilchen hängt davon ab, ob ihre Spins in die gleiche oder in die entgegengesetzte Richtung zeigen.

Quarks besitzen außerdem eine so genannte Farbladung. Sie ist um zwei Größenordnungen stärker als die elektrische Ladung, existiert in drei verschiedenen »Farben« (die nichts mit optischen Farben zu tun haben) und ist dafür verantwortlich, dass die Teilchen mittels der starken Wechselwirkung aneinander gebunden sind.

Das quantenmechanische Pauli-Prinzip besagt nun über die beiden up-Quarks Folgendes: Weil sie symmetrisch bezüglich ihres Flavours (up) und ihrer Bahnen sind (sie besitzen denselben Orbit), aber antisymmetrisch hinsichtlich ihrer Farbe (sie besitzen unterschiedliche Farben), müssen ihre Spins symmetrisch sein. Sie zeigen also in dieselbe Richtung, weshalb sich die beiden up-Quarks wie zwei kleine Magnete gegenseitig abstoßen.

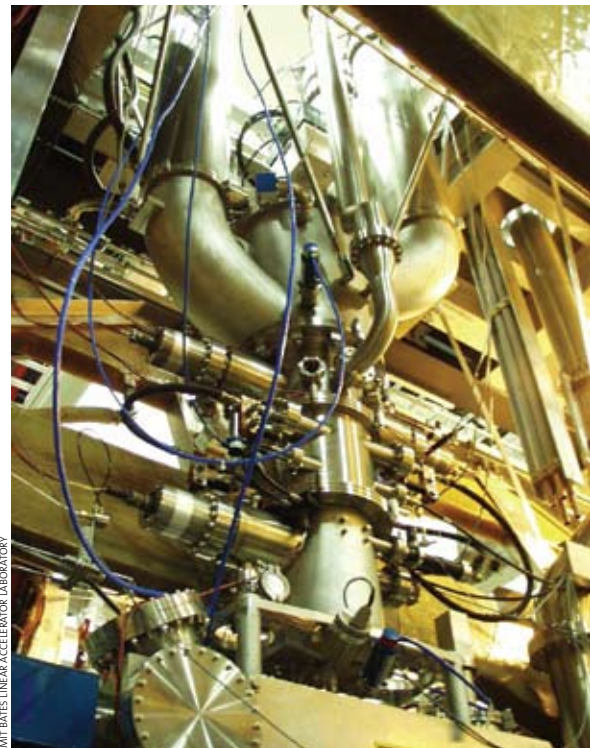
Warum das Neutron einzigartig ist

Im Proton verändert diese kleine Störung der Quarkbahnen kaum merklich die Ladungsverteilung. Doch bei einem Neutron ist der Effekt gravierender: Dessen down-Quarks sind nun ein wenig weiter vom Zentrum entfernt als das up-Quark, weshalb sich die Ladungen nicht mehr für jeden Abstand vom Zentrum exakt aufheben. Ist dieses Modell korrekt, müsste das Neutron an seiner Außenseite leicht negativ und in der Mitte leicht positiv geladen sein. Genau diese örtlichen Abweichungen von einer Ladungsdichte, die überall exakt gleich null ist, macht das Neutron so einzigartig und interessant – vor allem auch im Vergleich zum Proton, an dem wir solche Zusammenhänge zwischen Spineffekten und quantenchromodynamischen Effekten gar nicht erst untersuchen können.

In den vergangenen Jahren haben die Physiker Geräte gebaut, die immer präzisere Messungen des elektrischen Formfaktors erlauben. Als Ziele, auf die sie den Elektronenstrahl richten, verwenden sie weiterhin Deuterium oder Helium-3.

Zielen auf strömendes Deuteriumgas

Ein Teilchenbeschleuniger liefert einen gebündelten Strahl von Elektronen für das BLAST-Experiment. Diese Teilchen treffen dann auf einen gasförmigen Strom von Deuteriumatomen, der von der vier Meter hohen Atomic Beam Source (Bild) erzeugt wird. Zuvor müssen die Deuteriumatome allerdings durch eine komplexe Apparatur geleitet werden. Kontrolliert durch ferngesteuerte Ventile, strömen sie durch eine Reihe von Vakuumkammern, in denen ein zeitlich variables Sextapol-Magnetfeld herrscht. Auf diese Weise lässt sich die Polarisation der Gasatome einstellen, bevor die Elektronen mit ihnen kollidieren.



MIT BATES LINEAR ACCELERATOR LABORATORY

Wird ein Elektron etwa an Deuterium gestreut, weiß man: Es ist entweder auf das Neutron oder auf das Proton getroffen. Heute werden darum nicht nur die Elektronen aus dem Strahl des Beschleunigers nachgewiesen, sondern auch die von ihnen bei der Kollision getroffenen, wegfliegenden Nukleonen. Anders als noch Hofstadter können die Forscher die Wirkungsquerschnitte nun also direkt messen.

Eine weitere neuere Methode betrifft die Separierung der unterschiedlichen Anteile des Formfaktors. Das Grundverfahren bleibt gleich: Forscher führen Messungen des Wirkungsquerschnitts bei verschiedenen Winkeln und Energien durch. Vergleichen sie dann die Ergebnisse, können sie daraus mathematisch die Formfaktoren extrahieren. Doch der Vergleich von Wirkungsquerschnitten ist schwierig; unter anderem

weil die Empfindlichkeit der Detektoren von Energie und Winkel abhängt und weil die Unterschiede zwischen den Wirkungsquerschnitten gering sind. Darum nutzt man heute auch die Tatsache, dass die Spinorientierungen von Elektron und Neutron die Wirkungsquerschnitte beeinflussen. Je nachdem, wie die Spins von Elektron und Neutron zueinander orientiert sind, tragen allein die magnetischen Formfaktoren oder aber eine Kombination von magnetischem und elektrischem Formfaktor zum Wirkungsquerschnitt bei. Heutige Experimente werden also auch mit unterschiedlichen Spinkombinationen durchgeführt – was vielleicht einfach klingt, aber große experimentelle Herausforderungen mit sich bringt.

In den frühen 1990er Jahren wurden angesichts solcher neuen Verfahren und Techniken zahlreiche Experimente zur genaueren Messung des elektrischen Formfaktors des Neutrons in Angriff genommen. Jedes Institut und jedes Experiment bringt dabei seine Stärken ein. Einige Labore können besonders stark polarisierte Strahlen erzeugen, andere besonders dichte Targets herstellen. Wieder andere sind mit Detektoren ausgestattet, die einen weiten Bereich von Winkeln und Energien abdecken, oder aber die Geräte erfassen nur einen kleinen Bereich, diesen jedoch mit sehr hoher Präzision.

Auch Protonen warten mit neuen Rätseln auf

Bis hinab zu einer Auflösung von 0,1 Fermi besitzen die Forscher mittlerweile ein recht gutes Bild der Nukleonen. Doch es sind neue Fragen aufgetaucht. Am SLAC-Beschleuniger der kalifornischen Stanford University und am Jefferson-Lab-Beschleuniger im US-Bundesstaat Virginia etwa wurden Protonen bei immer höheren Energien untersucht. Überraschenderweise zeigte sich dabei: Messungen der Formfaktoren auf Basis der experimentellen Parameter Streuwinkel und Energie liefern andere Ergebnisse als Messungen, bei denen der Elektronenstrahl oder das Target spinpolarisiert ist.

Die Ursache des Effekts ist bislang unbekannt. Eine der möglichen Erklärungen: Das Elektron aus dem Strahl tritt gleich mehrfach mit den Quarks und Gluonen im Proton in Wechselwirkung. Überprüfen ließe sich diese Hypothese mit einem Strahl aus Positronen (positiv geladenen Elektronen) und einem Detektor wie BLAST. Allerdings müsste der Positronenstrahl doppelt so energiereich sein wie der Strahl, der für BLAST verwendet wurde. Genau diese Voraussetzung bietet das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY). Schon 2010 war BLAST darum abgebaut und nach Hamburg verschifft worden. Ab 2012 wird es als Teil des dortigen Olympus-Experiments seine Messungen wieder aufnehmen.

Die Struktur der Nukleonen wird nach wie vor aber auch an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz untersucht. Als Beschleuniger dient das Mainzer Mikrotron (MAMI). In dessen aktueller Ausbaustufe erreicht der Elektronenstrahl eine Energie von bis zu 1,6 Gigaelektronvolt. Als Ziele dienen Wasserstoff, Deuterium oder Helium-3 sowohl in flüssigem als auch in gasförmigem Zustand. Weil MAMI als Dauerstrichbeschleuniger arbeitet, entspricht der Elektronenstrahl praktisch einem kontinuierlichen Gleichstrom – im Vergleich zu gepulsten Strahlen erhöht dies die Präzision so genannter Koinzidenzmessungen. Sowohl der Strahl als auch einige Targettypen können zudem spinpolarisiert werden. Als Detektoren dienen unter anderem drei magnetische Spektrometer, deren Länge rund 15 Meter beträgt und die jeweils 200 Tonnen wiegen. Im Jahr 2010 wurde mit diesem Aufbau der bisher genaueste Wert des Protonradius in einem Elektron-Proton-Streuxperiment gemessen.

Millionen Anläufe bis zum Treffer

Ich selbst war in den vergangenen zwei Jahrzehnten am Experiment BLAST beteiligt, dem »Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid«. Errichtet war die Anlage am Bates Linear Accelerator Center rund 30 Kilometer nördlich von Boston, das zum Massachusetts Institute of Technology gehört. Mehr als 50 Wissenschaftler, Studenten und Ingenieure von über einem Dutzend Forschungsinstituten waren an ihrer Entwicklung und dann an ihrem Betrieb in den Jahren 2002 bis 2005 beteiligt. Das Bates Center verfügt über zwei Stärken: Erstens erzeugt sein Beschleuniger einen Elektronenstrahl, der zu 66 Prozent polarisiert ist. Das bedeutet: Der Spin von 83 Prozent der Elektronen im Strahl zeigt in dieselbe Richtung, was ein hoher Wert für einen Beschleuniger dieses Typs ist. Und zweitens ist der Beschleuniger an einen Speicherring gekoppelt. In diese 180 Meter lange Ringbahn werden die Strahlelektronen eingespeist und können dort so lange kreisen, bis sie mit einem Deuteriumkern kollidieren.

Als Target benutzten wir einen Strahl aus polarisiertem Deuteriumgas. Damit die Spins seiner Atome in ein und dieselbe Richtung ausgerichtet waren, wurde es zuvor durch eine Reihe von Magneten und Hohlraumresonatoren geschickt. Der Strahl selbst enthielt rund 70 Billionen Atome pro Kubikzentimeter. Das klingt nach viel, doch diese Dichte entspricht weniger als einem Tausendstel des normalen Luftdrucks – praktisch einem Vakuum. Doch BLAST erlaubte es den einzelnen Elektronen, den Gasstrahl zwei Millionen Mal pro Sekunde zu durchqueren – und das bis zu 20 Minuten lang –, um schließlich eben doch an einem Kern gestreut zu werden.

Im Normalbetrieb des Detektors wurden am Targetstrahl wenige tausend Elektronen pro Sekunde gestreut und flogen dann durch die umgebenden Detektorschichten. Energie beziehungsweise Impuls maß BLAST dank eines starken Magnetfelds, das die Teilchen durchquerten. Geladene Teilchen mit geringem Impuls geben sich darin durch stark gekrümmte Bahnen zu erkennen, während sich geladene Teilchen mit hohem Impuls nahezu geradlinig bewegen.

BLASTs Elektronenstrahl besitzt eine Energie von 850 Millionen Elektronvolt. Dies mag für einen Beschleuniger nicht viel sein, aber die Intensität – in diesem Fall ist damit die Zahl der Elektronen gemeint, die pro Sekunde durch das Target fliegen – ist eindrucksvoll. Sie übertrifft jene, die vom Fermi-

lab-Beschleuniger erreicht wird (dem bis vor Kurzem leistungsstärksten Instrument seiner Art) und ist vergleichbar mit der am nun weltgrößten Beschleuniger LHC.

Trifft ein Elektron auf einen Deuteriumkern, wird es daran gestreut; außerdem setzt die Kollision ein Proton oder Neutron und manchmal auch ein Pion frei. Diese Teilchen durchqueren zunächst eine so genannte Drahtkammer. In ihr sind zahlreiche Drähte gespannt, an denen eine Hochspannung liegt; zudem ist die Kammer mit Gas gefüllt und in ein Magnetfeld eingebettet. Dort, wo die hindurchfliegenden Teilchen das Gas ionisieren, fließt zwischen den Drähten und Gegenelektroden ein kleiner Strom – die Drähte »spüren« also, wenn ein Teilchen nahe vorbeifliegt. Nun muss man nur noch die Signale der nacheinander reagierenden Drahtsensoren richtig interpretieren, um Bahn und Impuls des Teilchens zu bestimmen.

Schließlich fliegen die Teilchen auch durch einen Plastik- oder Laufzeitszintillator. Dieser reagiert auf die ionisierende Strahlung der Teilchen, indem er Licht aussendet. So können wir den Zeitpunkt, zu dem sie eintreffen, auf 300 billionstel Sekunden genau bestimmen. Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung zwischen einem Neutron und dem Szintillator liegt im Fall von BLAST bei rund zehn Prozent; viele dieser wechselwirkenden Neutronen werden komplett im Szintillator abgestoppt, so dass sich zusätzlich auch ihre Energie bestimmen lässt.

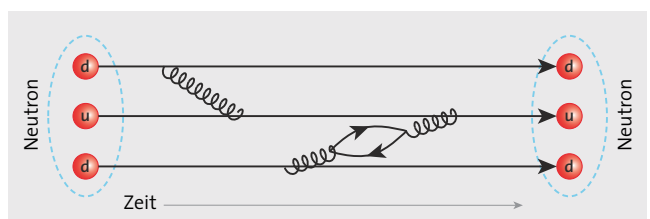
Meine eigene Aufgabe bei BLAST war zunächst die Computersimulation der unterschiedlichen Detektorentwürfe. Später schrieb ich die Software, die aus den Dutzenden von Messwerten, die jedes einzelne Teilchen liefert – wie etwa die Zeitpunkte, zu denen die Signale der Drahtkammer eintreffen, oder die Helligkeiten der Lichtblitze in den Szintillatoren –, seinen Impuls, seine Richtung und seinen Typ bestimmt.

Von wegen neutral!

Die Ergebnisse des Experiments zählen zu den weltweit besten Messungen, beschränken sich allerdings auf einen bestimmten Impulsbereich. Wollen wir Neutronen wirklich verstehen, müssen wir Daten anderer Laboratorien hinzunehmen, insbesondere die des Mikrotrons MAMI an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz (siehe auch Kasten links) sowie die der Thomas Jefferson National Accelerator Facility (Jefferson Lab) im US-Bundesstaat Virginia.

Die wichtigste Erkenntnis aus der neuen Generation von Experimenten: Der elektrische Formfaktor des Neutrons ist nicht gleich null. Diese Größe hängt mit der Wahrscheinlichkeit zusammen, dass ein Neutron einen bestimmten Anteil des Impulses eines auftreffenden Elektrons aufnehmen kann, ohne dabei seine Identität als Neutron zu verlieren. Wird es mit genügend hoher Energie getroffen, verwandelt es sich hingegen in eine andere Art von Teilchen, häufig in ein so genanntes Deltateilchen.

Tragen wir den elektrischen Formfaktor nun gegen den auf das gestreute Elektron übertragenen Impuls auf, erhalten wir eine Kurve mit einigen Merkmalen, die bereits bekannt



Die Aktivität von Valenzquarks (rot) stellen Physiker häufig in so genannten Feynman-Diagrammen dar. Sie lassen sich von links nach rechts als zeitliche Abfolge lesen: Eines der down-Quarks eines Neutrons erzeugt ein Gluon (spiralförmige Linie), das dann vom up-Quark absorbiert wird. Später emittiert das andere down-Quark ein Gluon. Es spaltet sich zunächst in ein Quark-Antiquark-Paar auf, rekombiniert dann und wird vom up-Quark absorbiert.

waren (linke Grafik auf S. 48). Am linken Ende, wo der Impuls niedrig ist, »sieht« das Elektron das Neutron mit niedriger Auflösung – gewissermaßen aus der Ferne – und tritt mit ihm als Ganzem in Wechselwirkung. Und da das Neutron als Ganzes neutral ist, kommt es nicht zu elektrischer Streuung. Am anderen Ende der Skala ist der Impuls des Elektrons hoch und damit der Zeitraum, in dem eine Wechselwirkung stattfindet, sehr klein. Ist diese Zeitspanne kurz genug, spielt der elektrische Formfaktor keine große Rolle mehr, und das Elektron kann das Neutron ungestört durchqueren.

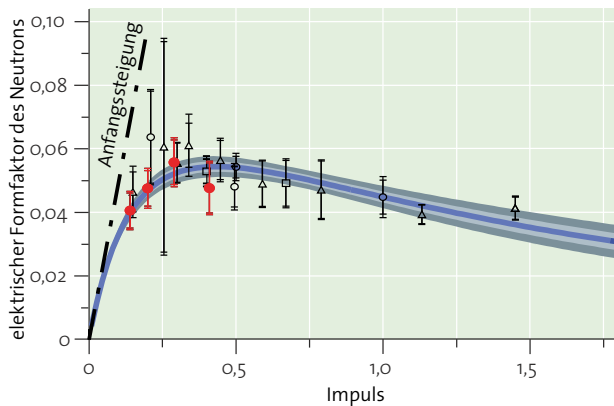
Hochinteressant ist nun die Form des Buckels in der Mitte. Beispielsweise steht die Anfangssteigung der Kurve in Beziehung zum so genannten quadratischen Mittelwert des Ladungsradius des Neutrons. Der Radius beträgt $-0,11$ Fermi, wobei das Minuszeichen lediglich bedeutet, dass die Außenseite des Neutrons negativ geladen ist. Konvertiert man nun die Kurve, welche den elektrischen Formfaktor beschreibt, mittels einer mathematischen Transformation in die Ladungsverteilung, erhält man das rechte Diagramm auf S. 48. Dabei zeigt sich, dass das Zentrum des Neutrons positiv und die Außenseite negativ geladen sind.

Um dieses Ergebnis korrekt zu interpretieren, genügt es allerdings nicht, nur die Valenzelektronen zu betrachten, sondern man muss auch die Gluonen und Quark-Antiquark-Paare berücksichtigen. Üblicherweise beschreibt man das Verhalten der Teilchen im Neutron mit Hilfe von Diagrammen wie dem oben gezeigten. Man kann es von links nach rechts lesen: In diesem Beispiel sendet das down-Quark eines Neutrons (dud) nach einiger Zeit ein Gluon aus (Spirallinie), das vom up-Quark wieder absorbiert wird. Später emittiert das andere down-Quark ein Gluon, das sich vorübergehend in ein Quark-Antiquark-Paar aufspaltet. Schließlich, kaum dass das Paar wieder zu einem Gluon rekombiniert, wird dieses vom up-Quark absorbiert.

Das nur für einen flüchtigen Moment existierende Quark-Antiquark-Paar stammt aus dem Quarksee. Diese Seequarks sind allerdings genauso real wie die Valenzquarks. Beispielsweise könnte sich ein Antiquark aus einem solchen Paar mit einem Valenzquark zusammenschließen. Aus einem Quark-

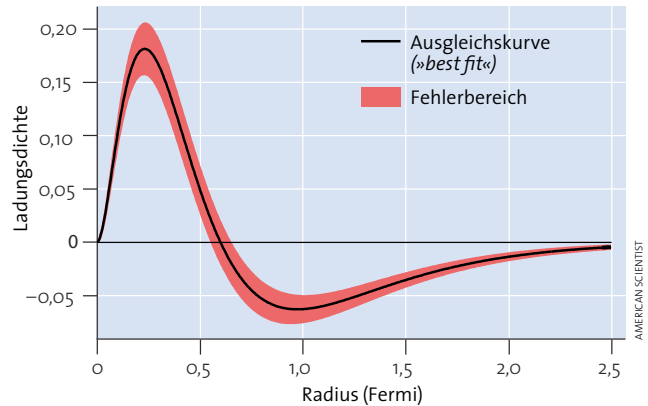
Das gegenwärtig beste »Bild« des Neutrons

Aus Daten von Experimenten in aller Welt zeichnen Forscher schließlich dieses »Bild« vom elektrischen Formfaktor des Neutrons (links). Der Formfaktor ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Elektron aus einem Beschleunigerstrahl durch elektrische Wechselwirkung an einem Targetteilchen gestreut wird. Besitzt das Elektron sehr geringen Impuls, »sieht« es ein ungeladenes Neutron und wird nicht abgelenkt. Auch bei sehr großen Impulsen kann das Elektron ein Neutron nahezu unge-



hindert durchqueren. Die Daten im mittleren Bereich interpretieren die Forscher so, dass Neutronen außen eine kleine negative Ladung besitzen.

Eine andere mathematische Darstellung des elektrischen Formfaktors führt zur Ladungsdichteverteilung (rechts). Das Zentrum von Neutronen ist demzufolge positiv, ihre Außenseite negativ geladen. Im Bild findet der Wechsel von positiver zu negativer Ladung bei einem Radius von etwa 0,6 Fermi statt.



Antiquark-Paar kann auch ein neues Teilchen entstehen wie etwa ein Pion. Dieses instabile Teilchen würde dann entweder Teil der Pionenwolke des Neutrons und absorbiert oder im Rahmen der starken Wechselwirkung mit einem benachbarten Nukleon ausgetauscht werden. So können wir aus der Aktivität der Pionenwolke auch ein wenig über die Aktivität der Gluonen und über den Quarksee erfahren.

Werfen wir nun nochmal einen Blick auf die Ladungsverteilung des Neutrons (Diagramm oben rechts). Der nach rechts weisende lange »Schwanz« der Kurve zeigt unter anderem, dass das Neutron keine scharf begrenzte Oberfläche besitzt. Masse- und Energiebetrachtungen verraten uns zudem, dass wir offenbar ein Nukleon plus Pionen oder andere Mesonen vor uns haben. Zwar lassen sich ein Quark und ein Antiquark am einfachsten zu einem Pion kombinieren. Zeigen aber die Spins des Paares in die gleiche Richtung, bilden sie ein massereicherer Teilchen, entweder ein rho- oder ein omega-Meson, oder auch ein weniger häufiges wie das phi-Meson. Neben dem Pion sind hier also auch andere Mesonen zu finden. Tatsächlich sollten wir eher von einer (von Pionen dominierten) Mesonenwolke reden, welche das Nukleon umgibt, statt von einer Pionenwolke.

Nicht die Antwort, nach der alle suchen

Wie sieht es nun aber im Inneren der Wolke aus, bei Radien von weniger als einem Fermi, wie sie üblicherweise als ungefähre Grenze des Nukleons angesehen werden? Mittlerweile können wir definitiv sagen, dass sich Quarks auf einem Orbit bewegen. Es scheint, dass sich das up-Quark etwa 0,35 Fermi

vom Mittelpunkt des Nukleons entfernt befindet, während die down-Quarks weiter außen bei 0,5 Fermi zu suchen sind.

Manche Physiker sehen in dieser Beschreibung das beste Bild, das wir vom Neutron besitzen. Es umfasst die Mesonenwolke, die down-Quark-»Oberfläche« und den up-Quark-»Kern« und ist aus der Fouriertransformation des experimentell ermittelten elektrischen Formfaktors abgeleitet. Doch dieses Bild, so lehrreich und attraktiv es ist, weist einige Probleme auf. Eigentlich möchten wir ja wissen: Wie sieht das Neutron im Ruhezustand aus? Doch nun haben wir ein Mittelding zwischen dem ursprünglich ruhenden Neutron und dem Neutron nach dem Zusammenstoß gemessen. Unser Bild zeigt ein Neutron, das gerade untersucht wird – wie ein fotografiertes Mensch, den das Blitzlicht erschreckt in die Kamera schauen lässt.

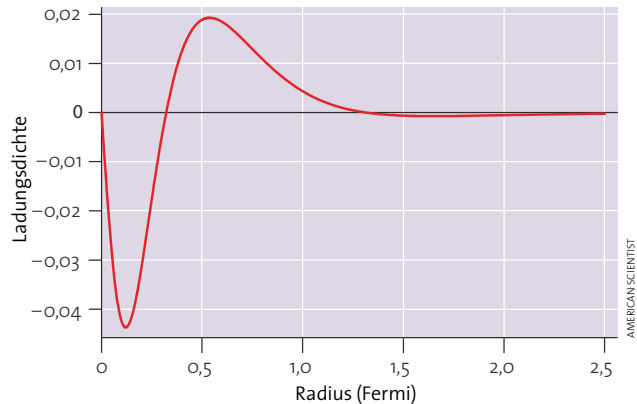
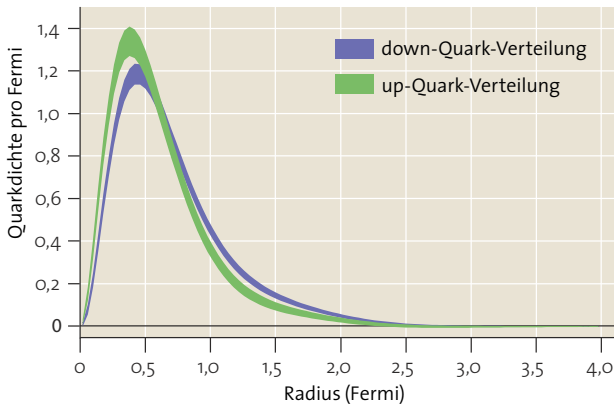
In den vergangenen Jahren haben Forscher deshalb ein neues Verfahren entwickelt. Damit transformiert man das Neutron auf mathematischem Weg in ein System mit unendlichem Impuls (*Infinite Momentum Frame, IMF*). Anders ausgedrückt: Wir betrachten es, als würde es sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Mathematisch ist dies ein völlig korrektes Verfahren. Die Ladungsverteilung weist aber dann eine sehr überraschende Form auf. Plötzlich zeigt sich das Zentrum des Neutrons negativ geladen.

Ursprünglich haben wir uns vorgestellt, der Mittelpunkt des Neutrons liege dort, wo sich das Massezentrum der drei Quarks befindet. Alle drei Teilchen umkreisen diesen Punkt, der irgendwo im Inneren des aus ihnen gebildeten Dreiecks liegt. Im IMF jedoch wird das Neutron durch die relativisti-

Wie sieht das Neutron im Ruhezustand aus?

Die Daten zeigen: Das up-Quark befindet sich näher am Zentrum des Neutrons, während die down-Quarks weiter außen liegen (links). Diese Betrachtung zeigt allerdings ein Neutron, das gerade mit einem Elektron kollidiert. Wie aber sieht das Teilchen im Ruhezustand aus? Auf diese Frage gibt es keine einfache Antwort. Um trotzdem weiterzukommen, transformieren Physiker das Neutron mathematisch in ein Bezugssystem, in

dem es sich fast mit Lichtgeschwindigkeit bewegt. Dieses IMF-Verfahren verschiebt das »Zentrum« des Neutrons jedoch von der Region der höchsten Massendichte in die Region seines größten Impulses. Die auffälligste Folge: Das Zentrum des Neutrons erweist sich nun als negativ geladen (rechts)! Das Ergebnis ist korrekt, aber unbefriedigend: Es war nicht *dieses* »Zentrum«, nach dessen Eigenschaften die Forscher gefragt hatten.



sche Geschwindigkeit platt gedrückt wie ein Pfannkuchen, dessen dünner Rand in Bewegungsrichtung zeigt. In dieser Situation spielt weniger die Masse eine Rolle als der Impuls (= Masse mal Geschwindigkeit). Entsprechend kommt der Impuls auch bei der Definition des Mittelpunkts zum Einsatz. Dieser liegt dort, wo der Impuls am größten ist – und den größten Impuls besitzen die down-Quarks. Die wiederum sind negativ geladen, und folglich ist auch das Zentrum des Neutrons im IMF negativ.

Unser Dilemma ist jetzt ganz offensichtlich. Wir haben eine Antwort auf eine Frage erhalten, die wir so nicht gestellt haben. Wir haben ein »Zentrum« ermittelt, das schlicht nicht identisch ist mit dem Zentrum eines Neutrons im Ruhezustand. Dieses müssen wir nach wie vor suchen.

Wie also sieht ein Neutron nach dem Stand der Dinge aus? In jedem Fall hochdynamisch: Kontinuierlich emittiert und absorbiert es Mesonen jeder Art. Seine Oberfläche dominieren negativ geladene down-Quarks. Das Innere besitzt eine Region, in der sich das positiv geladene up-Quark aufhält. Und sein Zentrum? Diese Region starker relativistischer Effekte scheint ebenfalls von down-Quarks beherrscht zu werden. Dass wir diese Quarks eigentlich nahe der Oberfläche vermuten, ist nur eine weitere der Schwierigkeiten, die uns das IMF bereitet, wenn wir mit seiner Hilfe ein anschauliches Bild des Neutrons gewinnen wollen.

Worüber wir überhaupt reden, wenn wir vom Zentrum eines Neutrons sprechen, wird sich in den kommenden Jahren aber hoffentlich noch zeigen. Auf eine simple Antwort brauchen wir indessen nicht zu hoffen. ~

DER AUTOR



Timothy Paul Smith forscht am Dartmouth College in Hanover im US-Bundesstaat New Hampshire. Er leitete unter anderem die Softwareentwicklung für den »Bates Large Acceptance Spectrometer Toroid« (BLAST) am Massachusetts Institute of Technology (MIT) und arbeitet weiterhin an dem Projekt, gemeinsam mit Kollegen an der Thomas Jefferson National Accelerator Facility im US-Bundesstaat Virginia.

QUELLEN

- Bernauer, J. C. et al.:** High-Precision Determination of the Electric and Magnetic Form Factors of the Proton. In: Physical Review Letters 105, S. 242001, 2010
- Chadwick, J.:** The Existence of a Neutron. In: Proceedings of the Royal Society A 136, S. 692–708, 1932
- Rutherford, E.:** Bakerian Lecture: Nuclear Constitution of Atoms. In: Proceedings of the Royal Society A 97, S. 374–400, 1920
- Smith, T. P.:** Hidden Worlds: Hunting for Quarks in Ordinary Matter. Princeton University Press, Princeton, New Jersey 2002

WEBLINKS

www.guardian.co.uk/science/video/2010/oct/22/murray-gell-mann-quarks
Nobelpreisträger Murray Gell-Mann spricht über die Entdeckung, dass Protonen und Neutronen aus Quarks bestehen. Englischsprachiges Video der britischen Tageszeitung »The Guardian«

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061749

STRAHLENOPTIK

Bezaubernde Bildnisse II

Rätselhaft verzerrte Bilder gewinnen im Zylinderspiegel ihre richtige Gestalt zurück. Und mit Hilfe einer speziellen Drehscheibe sieht man anstelle eines echten Objekts nur dessen negatives Nachbild.

VON NORBERT TREITZ

Wir haben im letzten Heft (Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 56) reelle und virtuelle Bilder aus der Strahlenoptik betrachtet, die ihren Gegenstand vergrößert, verkleinert oder umgekehrt, aber richtig proportioniert wiedergeben. Das entspricht dem umgangssprachlichen Begriff »Abbildung«.

Unter demselben Wort verstehen die Mathematiker etwas viel Allgemeineres. Da sind geradezu unglaubliche Aktionen erlaubt, etwa ein Rechteck in beliebig feine Streifen zu schneiden und diese dann hintereinander auf einem endlichen Geradenstück unterzubringen.

Nun gut, denkt man, das hat halt nichts mehr mit Physik zu tun – aber Vorsicht! Das Verfahren, ein Bild zeilenweise aufzunehmen, das Aufgenommene als eindimensionalen Datenstrom zu transportieren und daraus wieder ein Bild zusammensetzen, besser bekannt unter dem Namen Fernsehen, ist

dieser exotischen mathematischen Abbildung nicht unähnlich.

Aber auch das, was man mit einfachen physikalischen Mitteln realisieren kann, geht über die schlichte, Proportionen erhaltende Ähnlichkeitsabbildung weit hinaus. Schon wenn der abgebildete Gegenstand nicht einfach eine ebene Fläche rechtwinklig zur Blickrichtung ist, sondern Tiefe hat, ist sein Abbild auf der Netzhaut unserer Augen ihm nicht geometrisch ähnlich, sondern perspektivisch verzerrt. Wie man diesen Vorgang rechnerisch nachbilden kann, und das für zwei Augen (-Standorte) getrennt, habe ich im Januarheft 2010 gezeigt.

Schöne Täuschungen ergeben sich, wenn man Gegenstände so zeichnet, dass sie lokal Teile von echten Objekten darstellen können, als Ganzes aber Widersprüche liefern. Ein Beispiel dafür ist die Grafik »Belvedere« von M. C. Escher,

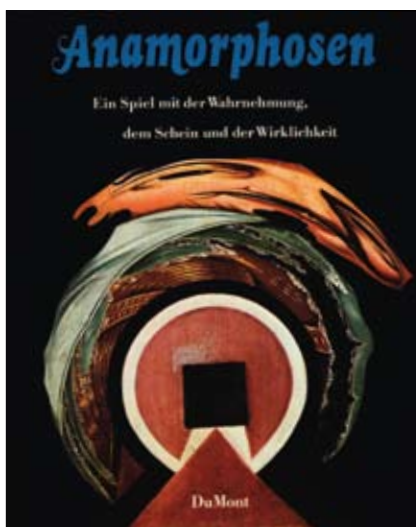
und darin noch einmal extra der »unmögliche Würfel«, den ein Junge darin mit ratlosem Blick in der Hand hält.

Als man in der Renaissance das perspektivische Zeichnen erfand und im Manierismus auf die Spitze trieb, wurden Augentäuschungen (»trompe l'oeil«) modern, bei denen der Standort des Betrachters einkalkuliert wurde. Manche Bilder erkennt man erst, wenn man extreme Blickrichtungen annimmt (Bild rechts). Manche Künstler nutzten diese Technik, um nicht jugendfreie Inhalte vor den Augen des uneingeweihten Betrachters zu verstecken.

Zylinderspiegel-Anamorphosen

Besonders reizvoll sind ebene Bilder, die mit einem (Außen-)Zylinderspiegel sehr weit gehend entzerrt werden können.

In guter Näherung für einen weiten Bereich von Betrachterpositionen geht das so: Fertigen Sie zuerst einen Zylinderspiegel an, indem Sie ein zylindrisches Gefäß (Konservendose, Kölschglas, Würstchenglas) mit biegsamer Spiegelfolie aus dem Bastelgeschäft umgeben oder indem Sie im Baumarkt ein außen spiegelndes Rohrstück kaufen. Dann zeichnen Sie mitten auf ein Blatt Papier einen Kreis mit dessen Durchmesser und markieren darin einen Punkt, der einen seiner Radien halbiert. Um diesen Punkt herum (also nicht um den Kreismittelpunkt) zeichnen Sie nun mit Zirkel und feinem Bleistift ein Polarkoordinatennetz mit linearer radialer Skalierung. Die Winkelschritte wählen Sie so, dass in der Mitte zwischen Zylinderstandort und Bildrand die Rasterfelder annähernd $\sqrt{2}$ -mal so breit wie hoch sind.



Das Zerrbild auf dem Titel des Buchs »Anamorphosen« zeigt seine »wahre« Gestalt im Zylinderspiegel – abgebildet auf der Buchrückseite.





Übertragen Sie nun ein beliebiges Bild, zum Beispiel seitenverkehrte Schrift, einen Hammer oder ein Haus mit Fenstern, aus gewöhnlichen (kartesischen) Koordinaten in dieses Polarnetz und stellen Sie den Spiegel auf den markierten Kreis, also um seinen halben Radius versetzt exzentrisch auf das Netz. Im Spiegel erscheint das Urbild (Kasten S. 52)!

Ein reichhaltiges Sortiment derartiger Zerrbilder bietet das Buch »Anamorphosen« von Fred Leeman, Joost Elffers und Mike Schuyt (Bilder links).

Nicht fotografierbare Bilder

Im Absatz 20 des didaktischen Teils der »Farbenlehre« schreibt Johann Wolfgang von Goethe:

Wer auf ein Fensterkreuz, das einen dämmernden Himmel zum Hintergrund hat, morgens beim Erwachen, wenn das Auge besonders empfänglich ist, scharf hinblickt und sodann die Augen schließt, oder gegen einen ganz dunklen Ort hinsieht, wird ein schwarzes Kreuz auf hellem Grunde noch eine Weile vor sich sehen.

Sehr eindrucksvoll ist es auch, wenn man nach dem Aufwachen im Dunkeln und vor dem Einschalten des Lichts beide Augen mit einer Hand vollständig verdeckt, dann das Licht einschaltet und die andere Hand mit ausgestreckten Fingern vor sich hält, sodann mit der ersten Hand die Augen ganz kurz freigibt und sofort wieder zudeckt. Wenn man nun den Kopf dreht, wandert das positive Nachbild mit den dunklen Fingern vor dem hellen Hintergrund mit. Das Schließen der Augen mit den Lidern reicht hierbei nicht, und die Gewöhnung an die Dunkelheit sollte schon viele Minuten gedauert haben.

Hier senden also die Sehzellen noch Signale ans Gehirn, nachdem die Exposition bereits vorüber ist. Der Effekt tritt aber nur unter den beschriebenen extremen Bedingungen auf.

Geradezu alltäglich ist dagegen das negative Nachbild: Bei starkem Licht werden die Sehzellen vorübergehend unempfindlicher. Goethe hat auch dieses Nachbild entdeckt:

Als ich gegen Abend in ein Wirtshaus eintrat und ein wohlgewachsenes Mäd-

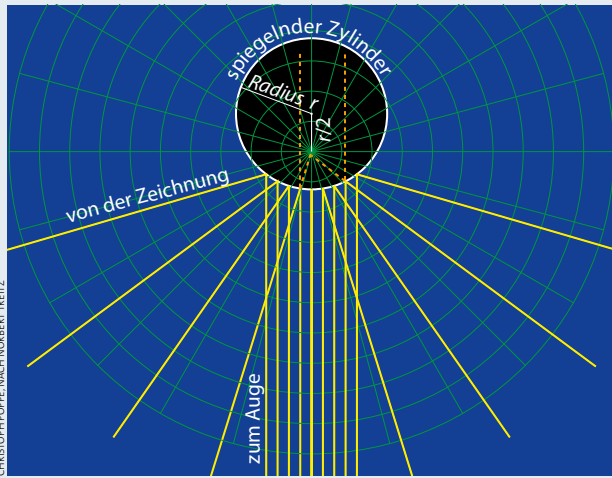


FOTO DES GEMÄLDES: PUBLIC DOMAIN; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ein zunächst rätselhafter Bildteil zu Füßen der »Gesandten« von Hans Holbein dem Jüngeren (1498–1543) erweist sich bei streifendem Blick von schräg links unten (Abbildung rechts) als Totenschädel.

chen mit blendendweißem Gesicht, schwarzen Haaren und einem scharlachroten Mieder zu mir ins Zimmer trat, blickte ich sie, die in einiger Entfernung vor mir stand, in der Halbdämmerung scharf an. Indem sie sich nun darauf hinwegbewegte, sah ich auf der mir entgegenstehenden Wand ein schwarzes Gesicht, mit einem hellen Schein umgeben, und die übrige Bekleidung der völ-

Zylindrische Zerstreungsspiegel



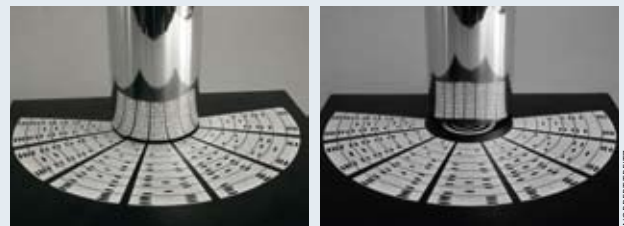
Professionelle Anwender der Strahlenoptik, zum Beispiel Astronomen, denken statt über Christbaumkugeln und spiegelnde Badarmaturen lieber über innen verspiegelte gekrümmte Objekte nach, vor allem über (sphärische oder zylindrische) Hohlspiegel, deren Querschnitt ein Kreisbogen ist. Deswegen ist ihr optisches Verhalten wohl bekannt und sogar Gegenstand des Physikunterrichts: Sie bilden Licht, das parallel zur optischen Achse einfällt, annähernd, aber nicht exakt in den Brennpunkt ab; der wiederum liegt genau auf halbem Weg zwischen Spiegeloberfläche und Kreismittelpunkt.

Diese Schulweisheit kann man sich bequem zu Nutze machen, wenn es um die Reflexionseigenschaften eines konvexen Spiegels mit kreisförmigem Querschnitt geht. Da das Reflexions-

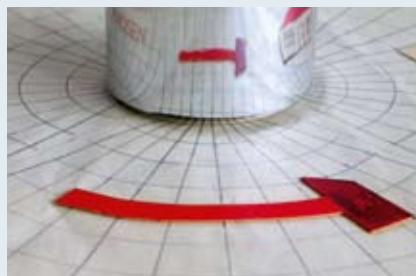
gesetz »Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel« an der Außenseite ebenso wie an der Innenseite gilt, kann man den einfallenden und den im Hohlspiegel reflektierten Lichtstrahl (orangefarbene, gestrichelte Linien im Bild links) einfach nach außen verlängern und erhält einen korrekten Strahlengang im Außenbereich (gelbe Linien). Das Ergebnis: Der Spiegel reflektiert parallel einfallendes Licht annähernd so, als käme es von einem Brennpunkt im Abstand des halben Radius. Oder, mit Umkehrung des Strahlengangs: Ein Gitternetz aus konzentrischen Kreisen und zugehörigen Radien mit Mittelpunkt in diesem Brennpunkt erscheint dem Betrachter als regelmäßiges Rechteckgitter – vorausgesetzt, in sein Auge fällt ein paralleles Strahlenbündel. Diese Bedingung ist in guter Näherung erfüllt, wenn der Betrachter hinreichend weit vom Spiegel entfernt ist; im üblichen Betrachtungsabstand ist das Bild bereits akzeptabel.

Schauen Sie schräg von oben unter einem Winkel von etwa 45 Grad zum Fuß eines außen spiegelnden Zylinders, der auf einem Anamorphosebild steht – zum Beispiel einem, das nach dem im Artikel beschriebenen Rezept in das Polarkoordinatengitter hineinkonstruiert worden ist! Dann verlaufen die Lichtstrahlen vom Zeichenblatt über den Spiegel bis in Ihr Auge zwar schräg von unten nach oben. Das Reflexionsgesetz gilt jedoch auch in der Projektion auf die Papierebene.

Zum Betrachten muss man den Zylinderspiegel so stellen, dass der »Brennpunkt« (eigentlich gibt es eine ganze »Brenngerade« parallel zur Zylinderachse) den Mittelpunkt des Polarkoordinatensystems trifft und nicht die Mittelachse des Zylinders selbst (links die falsche Position, rechts die richtige). Wenn

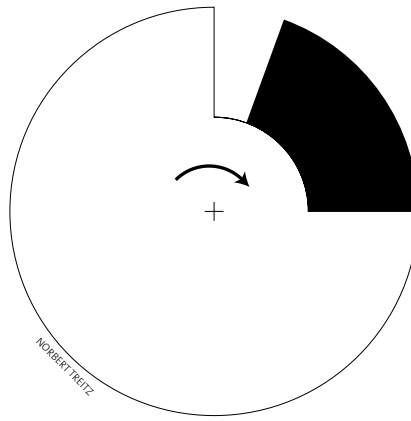


Sie also auf ein Blatt Papier mehrere Bilder für die Betrachtung von mehreren Richtungen aus (zum Beispiel in einer Rundumvitrine) zeichnen wollen, müssen Sie für jedes einzelne Bild ein entsprechend anders verschobenes Polarnetz verwenden (Bilder links und unten).



lig deutlichen Figur erschien in einem schönen Meergrün. (Didaktischer Teil der Farbenlehre, Absatz 52)

Das rote Mieder hatte Goethes rot-empfindliche Zapfenzellen an den zugehörigen Stellen der Retina erschöpft. Als er dann zur weißen Wand blickte, die alle drei Zapfensorten etwa gleichermaßen mit Photonen belieferte, waren nur noch die blau- und die grün-empfindlichen voll aktiv und zeigten das Mieder blaugrün (Bild unten). So schön kann Naturforschung sein.



Die Bidwell-Scheibe zum Selbstbau:
Vergrößern Sie dieses Bild mit dem Kopierer auf etwa 30 Zentimeter Durchmesser (oder laden Sie sich die zugehörige PDF-Datei von www.spektrum.de/artikel/1061774 zum Ausdrucken herunter). Kleben Sie es auf eine entsprechend zugeschnittene Pappscheibe, und stecken Sie einen Bleistift oder Ähnliches durch den eingezeichneten Mittelpunkt. Versetzen Sie die Scheibe mit einer Hand in Drehung, und schauen Sie durch den zeitweise offenen Sektor auf ein Objekt hinter der Scheibe.

Famoses Farbspektakel

Der Gegenstand ist einfach zu fertigen (Bild rechts oben) und der Effekt umwerfend; er funktioniert allerdings nicht bei allen Menschen. Diese Kombination macht die Bidwell-Scheibe zu einem der wirkungsvollsten Freihandversuche. Kennengelernt habe ich sie in dem ufoförmigen Wissenschaftsmuseum »Evoluon« in Eindhoven (Niederlande), dem ich – und nicht nur ich – heute noch, 22 Jahre nach seiner Schließung, nachtrauere. Ein ähnliches Exponat steht unter dem Namen »Farbentausch« im Science Center »Spectrum«, das zum Deutschen Technikmuseum Berlin gehört. Hinter einer rotierenden Scheibe mit einem kleineren schwarzen und einem größeren weißen Sektor sowie einer schmalen sektorförmigen Öffnung befinden sich eine rote und eine grüne

Lampe. Wenn man die Drehgeschwindigkeit der Scheibe und eine zusätzliche weiße Beleuchtung von der Betrachterseite geeignet einstellt, sieht man die Lampen in der jeweils anderen Farbe leuchten!

Wer das Experiment selbst durchführen will, braucht zwei Lichtquellen in verschiedenen Entfernungen oder – im Freien – indirektes und direktes Sonnenlicht. Die stärkere Lichtquelle muss an der Scheibe vorbei oder hinter ihr auf das Objekt scheinen, die schwächere die Scheibe beleuchten. Damit man überhaupt merkt, dass die Farben umgekehrt sind, empfehlen sich Objekte mit typischen Farben: die reife Zitrone sieht blau aus, die reife Tomate grün.

Der britische Physiker Shelford Bidwell (1848–1909), der das Experiment

zum ersten Mal beschrieb, gab für den verblüffenden Effekt eine Erklärung, die heute noch als korrekt gilt: Das helle Licht vom Objekt scheint nur für einen Sekundenbruchteil aufs Auge – zu kurz, um ein bewusstes Bild zu erzeugen, aber lang genug, um die Sehzellen zu schwächen. Das negative Nachbild hält dann zeitlich länger vor und ist erstaunlicherweise das einzige, das ins Bewusstsein kommt. ~

DER AUTOR



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

QUELLEN

- Bidwell, S.:** On Subjective Colour Phenomena Attending Sudden Changes of Illumination. In: Proceedings of the Royal Society of London 60, S. 368–377, 1896
- Bidwell, S.:** On the Negative After-Images Following Brief Retinal Excitation. In: Proceedings of the Royal Society of London 61, S. 268–271, 1897
- Leeman, F. et al.:** Anamorphosen. Ein Spiel mit der Wahrnehmung, dem Schein und der Wirklichkeit. DuMont Schauberg, Köln 1975
- Treitz, N.:** Farben. Klett-Cotta, Stuttgart 1997
- Treitz, N.:** Spiele mit Physik! Ein Buch zum Basteln, Probieren und Verstehen. Harri Deutsch, Thun 1996

WEBLINK

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061774

BILD EINES MÄDCHENS IN UMGEGEHEN FARBEN. AQUARELL MIT BLEISTIFT UMRISSSEN. IM KORPUS DER GOETHELEHRUNGEN BID.S.1, URL: DOK. NR. 53



NORBERT TREITZ

Das linke dieser beiden Bilder hat Goethe als farbnegatives Aquarell gemalt, das rechte erhält man aus ihm mit einem Grafikverarbeitungsprogramm als (Farb-)Negativ. Mit bloßem Nervensystem (bloße Augen reichen nicht) kann man das zweite aus dem ersten bekommen – und umgekehrt –, indem man minutenlang einen Punkt in der Bildmitte fixiert und dann eine weiße Wand ansieht.

Auszug aus dem Elfenbeinturm

Von Reinhard Breuer

Es ist nicht eben häufig, dass sich »Spektrum« mit dem Thema Philosophie beschäftigt, und das nun gleich mit einer zwölfteiligen Serie samt großem einleitendem Interview. Warum der Aufwand? Es liegt wohl am Fach Philosophie selbst. Wenn nicht alle Zeichen trügen, so durchläuft diese älteste akademische Disziplin des Abendlandes derzeit buchstäblich einen Denkwandel.

Das wird offenkundig, wenn man sich die Situation noch vor wenigen Jahren vor Augen führt. Philosophie – das galt vielen als eine Disziplin, die sich in historische Fragen ihrer eigenen Themen vergrub; und unter Naturwissenschaftlern hörte man nicht selten den Kommentar: »Die Philosophie, die wir brauchen, machen wir uns selbst.«

Doch offenbar haben sich die Zeiten geändert. Das hat auch mit der Tatsache zu tun, dass inzwischen eine jüngere Generation Philosophen herangewachsen ist, die sich und die Welt neu unter die Lupe nehmen. Und es liegt an zwei Umwälzungen: am Siegeszug der Analytischen Philosophie und an der damit einhergehenden Internationalisierung des Fachs sowie an einem Schulterchluss mit den Naturwissenschaften.

Immer, wenn ich mich in jüngster Zeit unter Philosophen begab, begegnete mir dieser erfrischend neue Geist. Die Grundfragen bleiben dabei häufig die gleichen, die schon Sokrates und Aristoteles in der Antike beschäftigt hatten: Was ist der Mensch? Was kann

er wissen? Was ist Gerechtigkeit? Zugleich wird hier aber nunmehr eine Philosophie betrieben, die bestrebt ist, »stets auf der Höhe der Naturwissenschaften« zu agieren.

So formulierte es mir gegenüber Albert Newen, Philosophieprofessor an der Ruhr-Universität Bochum. Nicht nur konzipierte und koordinierte er, der sich mit Hirnforschung ebenso auseinandersetzt wie etwa mit Psychiatrie, die Themen dieser Serie. Newen sprach auch seine Kollegen im Lande an, die sogleich ihre Teilnahme zusagten – nach meinem Eindruck versammelt sich hier ein Gutteil der Elite unter den aufstrebenden deutschen Philosophen.

Was also ist das Neue, das die Philosophie endlich von einer Beschäftigung mit der Historie in die Moderne des 21. Jahrhunderts katapultiert? Albert Newen positioniert die Philosophie nicht mehr (wie früher) über, sondern neben den anderen Forschungsdisziplinen – mit denen es zu kooperieren gilt. Außerdem habe die Analytische Philosophie »den argumentativen Standard« des Fachs deutlich gehoben und eine einheitliche Form etabliert. Es könne zwar verschiedene Annahmen geben, »aber nur eine Form der Argumentation«.

Schließlich gehe es darum, so Newen, »andere Fächer als wesentliche Kontrolle und Quelle philosophischer Theoriebildung« einzubeziehen, zumal die empirischen Wissenschaften. Newen fordert, in diesem Punkt aus dem Schatten des Übervaters Kant herauszutreten, mit dessen überholtem Selbstverständnis, »dass Philosophie sich keinen Deut um die Empirie zu kümmern brauche und auch nicht kümmern soll«.

Glücklicherweise scheint unter Philosophen eine solche Haltung heute nicht mehr mehrheitsfähig: Die Denker verlassen den Elfenbeinturm. Auch Julian Nida-Rümelin, derzeit Präsident der Deutschen Philosophischen Gesellschaft, ist dieser Ansicht (siehe nebenstehendes Interview): »Die Philosophie als Disziplin ist heute weniger im Elfenbeinturm als je zuvor.«

NEUE SERIE

DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER PHILOSOPHIE

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



Reinhard Breuer



ALLE FOTOS DIESES ARTIKELS: STEPHAN SAHM

JULIAN NIDA-RÜMELIN ist Inhaber des Lehrstuhls für Philosophie und Politische Theorie an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Er entstammt einer Künstlerfamilie, promovierte in München bei dem Wissenschaftstheoretiker Wolfgang Stegmüller und hielt Professuren in Tübingen, Göttingen und in München am Geschwister-Scholl-Institut. 2001 bis 2002 war er Kulturstatsminister in der Regierung Schröder. Seit 2008 ist er Präsident der Deutschen Gesellschaft für Philosophie.

SERIE PHILOSOPHIE | INTERVIEW

»Uns bleiben die unlösbaren Probleme«

Der Münchener Philosoph Julian Nida-Rümelin über das Wesen der Philosophie, die Fortschritte der Ideen sowie die wiedergewonnene Relevanz der Disziplin für Wissenschaft und Gesellschaft.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Nida-Rümelin, was für eine Wissenschaft ist Philosophie?

PROF. DR. JULIAN NIDA-RÜMELIN: Dreierlei: Residual-, Integrations- und Orientierungswissenschaft. Aber der Reihe nach. Etwas ironisch gesprochen ist sie zuerst eine Residualwissenschaft. Residual – also das, was an Fragen übrig bleibt, die nicht in eigene Wissenschaften ausgewandert sind. Damit bleiben der Philosophie die unlösbaren Fragen.

Das klingt nach intellektueller Resteverwertung.

Man kann es auch positiver sehen. Es gibt Grundfragen, die sich nicht in das methodische Korsett einer Einzeldisziplin zwängen lassen. Also zum Beispiel die Frage nach praktischer oder theoretischer Vernunft: Was ist ein gutes Argument für etwas? Das kann kein Thema sein für eine Einzelwissenschaft, und deshalb bleibt sie der Philosophie erhalten. Dasselbe gilt für metaphysische und ontologische Fragen.

Beschäftigt sich die Philosophie immer mit denselben Fragen? Gibt es denn überhaupt Fortschritte in der Philosophie?

Sie sind Physiker. Ist Physik kein Fortschritt? Physik ist ein Kind der Philosophie. Dort, wo die Philosophie sehr erfolgreich ist, löst sich meistens eine Einzeldisziplin ab, etabliert sich und entwickelt diese Fragen in einem eigenen methodischen Rahmen.

Haben solche Bewegungen nicht umgekehrt die Philosophie aus großen Bereichen vor allem der Naturwissenschaft hinausgeworfen? Steckt die Philosophie also in einem Elfenbeinturm? Manche Physiker sagen ja: Die Philosophie, die wir brauchen, machen wir lieber selbst.

Die meisten bedeutenden Physiker des 19. und 20. Jahrhunderts wie Heisenberg oder Weizsäcker, Helmholtz oder Einstein haben zur Philosophie wichtige Beiträge geleistet. Und so sehe ich es als sehr erfreulich an, wenn sich Fragen, mit denen sich die Philosophie über Jahrhunderte beschäftigt hat, in einer Einzelwissenschaft sauber traktieren und möglicherweise mit neuen Theorien sogar lösen lassen. Es ist allerdings in der Regel eine Illusion zu meinen, dass damit die philosophischen Probleme erledigt sind. Denken Sie an die

gegenwärtige Grundlagenkrise der Ökonomie, wo die alte Frage aufgeworfen wird: Was ist eigentlich Rationalität? Ökonomie ist eine Theorie, die auf einem bestimmten Rationalitätsmodell beruht, ganz zentral auf Basis der Spieltheorie ...

Das ist Mathematik. Was hat das mit Philosophie zu tun?

Die Mathematik ist da nur Hilfsmittel. Es geht darum, verschiedene Interaktionen zwischen den Menschen sauber zu charakterisieren – über so genannte Formate. Der Zweck dieser Übung ist nicht Mathematik an sich, sondern die Prognose darüber, wie Menschen sich verhalten. Interessant ist, dass sich ein Gutteil dieser Prognosen in der Realität als falsch herausstellt. Es sind die Prämissen und Postulate dahinter, die häufig, hier hat die experimentelle Spieltheorie viel beigetragen, im krassen Widerspruch stehen zu den empirischen Befunden. Da stellt sich die Frage: Sind die Leute irrational? Oder haben wir die falsche Rationalitätstheorie? So kommt wieder die Philosophie ins Spiel.

In der Laborforschung entsteht eher eine Aversion bei dem Gedanken: Wir machen hier mit unseren Experimenten die empirische Arbeit, und dann kommt ein Oberphilosoph als Lehrmeister und erklärt mir, was wir hier machen.

Das ist gerade nicht meine Auffassung. Ich war zum Beispiel über einige Jahre in Berlin Sprecher des interdisziplinären Humanprojekts. Wir haben versucht, die neueren Befunde etwa aus den Neurowissenschaften und der Soziobiologie danach abzuklopfen, ob sich unser Menschenbild fundamental verändern muss. Es gibt eine Reihe von Fachleuten, die genau das sagen: Unser Menschenbild ist völlig falsch, nicht mehr gestützt durch die Empirie. Und dabei habe ich übrigens gerade die Physiker als Bundesgenossen erlebt.

Wieso das?

Den Physikern ist, anders als anderen Forschern, offenbar klar, dass zum Beispiel der Kausalitätsbegriff nicht so einfach ist, wie man sich das in weniger theorieorientierten Naturwissenschaften vorstellt. Was ist eigentlich Kausalität? Dazu gibt es eine aktuelle Debatte in der Philosophie, zu der gerade die Physiker ihre Beiträge leisten.

Wollen Philosophen denn die besseren Fachleute auf einzelnen Gebieten sein?

Das habe ich ja nicht behauptet. Ich sagte, die Philosophie ist eine Residualwissenschaft, bei der bestimmte, querschnittshafte Fragen bleiben. Zweitens ist Philosophie in meinen Augen aber auch Integrationswissenschaft. Sie sollte dazu beitragen, die verschiedenen Befunde aus den Einzelwissenschaften zu einem kohärenten wissenschaftlichen Weltbild zusammenzuführen. Ich glaube nicht, dass die wissenschaftlichen Disziplinen jeweils ihr eigenes Weltbild haben können, sondern nur alle Gebiete zusammen eines.



»Unser Menschenbild ist völlig falsch, nicht mehr gestützt durch die Empirie«

Wie in Carl Friedrich von Weizsäckers »Die Einheit der Natur«?

Vielleicht nicht in der überzogenen Form, wonach sich alles aus einer einzigen Formel ableiten lässt. Wir sind ja im wissenschaftlichen Prozess meistens Realisten und daher der Meinung, dass wir unsere Theorien nicht bloß als Instrumente für Prognosen entwickeln, sondern damit beschreiben, was der Fall ist. Die Naturwissenschaftler interpretieren so ihr Tun. Und daher kann es nicht sein, dass sich die Welt, wie sie ist, von Theorie zu Theorie fundamental gegensätzlich darstellt – bis hin zur Inkompatibilität.

Sie sehen die Philosophie also nicht im Elfenbeinturm.

Manche Philosophen bewohnen den Elfenbeinturm, aber die Philosophie als Disziplin ist heute weniger darin als je zuvor.

Wo interagiert sie mit Wissenschaft oder Gesellschaft?

Etwa in der Philosophie der internationalen Beziehungen. Erstes Beispiel: Der Wirtschaftswissenschaftler Amartya Sen begann schon vor vielen Jahren in Princeton in den USA zusammen mit der Philosophin Martha Nussbaum, neue Kriterien für die Beurteilung des Entwicklungsstandes der weniger entwickelten Länder zu etablieren. Denn, so sagten die beiden, die ökonomischen Größen sind da allein nicht wirklich aussagekräftig.

Wohin führte das?

Diese Denkansätze sind heute so einflussreich geworden, dass ganze Forscherstäbe in Deutschland und Frankreich dabei sind, sie in konkrete Entwicklungsprogramme umzusetzen. Zweites Beispiel: Lange Jahre dominierte in den internationalen Beziehungen die so genannte realistische Schule: Jeder Staat optimiert sein nationales Interesse und nutzt die Spieltheorie, um seine Strategien zu analysieren und zu optimieren. Und auf einmal kommt jetzt wieder, fast durch die Hintertür, die ethische Dimension der internationalen Politik ins Spiel.

Das klingt ungewöhnlich.

Ist es auch. Denn plötzlich sind fast alle Akteure davon überzeugt, dass es Werte und Normen gibt, die unser außenpolitisches Handeln prägen und die Identität eines Staats ausmachen. Wie gehen wir mit Menschheitsaufgaben um wie Klimaentwicklung oder Ressourcenverbrauch? Rat suchend wenden sich politische Praktiker heute wieder an Philosophen. Um einen zu nennen: Thomas Pogge von der Yale University hat die Idee eines World Health Fund entwickelt. Pogge stellt sich einen zweiten Markt vor, der nicht durch Nachfrage gesteuert wird, sondern durch einen so genannten Impact: Welche Wirkung hat welches Medikament oder eine bestimmte Krankheit wie Malaria auf den »Gesundheitszustand« der Welt? Staaten und Stiftungen sollen den Fund ausstatten, um einen zweiten medizinischen Markt zu etablieren. Das ist schon ziemlich weit gediehen.

Ist das noch Philosophie? Das ist doch Politikberatung.
Erst muss theoretische Arbeit geleistet werden wie von Nussbaum und Sen. Daraus werden konkrete Kriterien für die Praxis entwickelt, für die sich viele Staaten interessieren. Das ist anders als noch vor Jahrzehnten, als sich Philosophen zu fein dafür waren, sich in die Niederungen der Praxis zu begeben.

Entwickeln sich philosophische Konzepte über die Zeit?
Auf jeden Fall. Ich habe einmal untersucht, auf welchen normativen Grundlagen Demokratie eigentlich beruht. Viele meinen ja, da gehe es lediglich um das Spiel der Interessen mit Lobbygruppen, Gewerkschaften oder Verbänden. Natürlich beruht sie auch darauf. Aber ich wollte deutlich machen, dass sie auf fundamentalen Werten und Normen fußt, die mit einem Wahrheitsanspruch vorgebracht werden. Was im Grundgesetz zur Würde des Menschen gesagt wird oder zu den Freiheitsrechten – das beansprucht Ewigkeitgeltung. Kein Parlament kann das je aufheben.

Sind das nicht lediglich Meinungen?
Keineswegs. Die Grundlagen sind nur sinnvoll, wenn eine Demokratie auf einer normativen Ordnung beruht mit Werten, von denen die Menschen nicht nur meinen, dass sie sich danach verhalten sollten, sondern davon überzeugt sind, dass diese Werte auch gelten. Das nennt man in der Philosophie den ethischen Realismus. Ohne einen solchen Anspruch auf Wahrheit kann keine Demokratie funktionieren.

Sie sind Mitglied zahlreicher Gremien zur Bio- und Medizinethik. Ist Ethik eine zentrale Aufgabe der Philosophie? Wenn ja, setzt sich wohl trotz guter Ratschläge in der Gesetzgebung oft der schlechteste Kompromiss durch.

Es wäre gut, wenn das hohe Niveau, das es da in der philosophischen Debatte gibt, in den Ethik- und Medizinkommissionen eine größere Rolle spielen würde. Wir haben in Deutschland eine ungute Tradition, die diese ethische Kompetenz in erster Linie Theologen, Vertretern von Kirchen oder Umwelt- und Tierschutzverbänden zuweist. Ich habe mich 2001 dafür eingesetzt, dass der Nationale Ethikrat vorrangig mit Fachleuten besetzt wird, um eine sachliche Diskussion zu ermöglichen, also mit medizinischen Praktikern, Juristen und Philosophen.

Wie rational kann man mit Normen umgehen? Das sind ja letztlich willkürliche Setzungen.

Da bin ich ganz anderer Meinung. Unsere gesamte Rechtsordnung beruht auf fundamentalen Annahmen etwa zur Gleichheit von Individuen unabhängig von Stand, Rasse, Geschlecht. Würde man sagen, das können wir so oder auch ganz anders festlegen, dann führte das völlig in die Irre. So gilt das in der Moralphilosophie – ganz ähnlich wie in den Naturwissenschaften. Auch hier verlässt man sich darauf, dass man in der Regel seinen Sinnen trauen kann, dass Kollegen ähnlich beobachten können – alles Annahmen, die sich bewährt haben. Ganz ähnlich ist es in der Ethik, wir haben auch da sehr harte Fakten.

Muss man sich moralisch verhalten?
Wir haben alle bestimmte moralische Überzeugungen. Sie sind sicher mit mir einig, dass es falsch wäre, jemanden zu

erschlagen, weil er den eigenen Interessen im Weg steht. Wir haben also harte Fakten in der Moralphilosophie, vergleichbar hart wie in den empirischen Disziplinen.

Muss das nicht religiös motiviert sein?
Keineswegs. Wir leben in einer Gesellschaft, die davon ausgeht, dass die verschiedenen Religionsgemeinschaften einen hinreichend großen überlappenden Bereich normativer und moralischer Überzeugungen haben, so dass man human miteinander umgehen kann.

Was trägt die Philosophie zur Rechtsprechung bei?
Man darf ihre Rolle nicht unterschätzen. Ich war ja auch in politischen Ämtern. Damals wurde die Frage beraten, ob Tierschutz ins Grundgesetz aufgenommen werden soll. Es gab viele Stellungnahmen von unterschiedlichen Seiten. Seinerzeit hatte ich das Gefühl, dass es bei so einem ideologisch vorbelasteten Konflikt eher um eristische Dialoge ging, wie Plato das nannte, also darum, zu streiten und Recht zu behalten. Da können die philosophischen, distanzierteren Formen des Dialogs hilfreich sein.

Noch mal zur Ethik – verstehe ich Ethik richtig als Regeln für gutes Handeln?

Es gibt noch ein paar andere Fragen, aber das ist es im Kern. Die Philosophie kann die Rolle des Priesterstands früherer Zeiten jedoch nicht ersetzen. Mit so einem Anspruch würde sie sich übernehmen. Manche hätten das zwar gerne: Wenn es schon keine allseits anerkannten, religiös gestützten Autoritäten mehr gibt, die über gut und schlecht befinden, dann eben die Philosophie. Sie ist eben nicht nur Residual- und Integrationswissenschaft, sondern – und das ist ihre dritte Qualität – auch Orientierungswissenschaft.

Philosophische Beratung?
Ja, denn die Philosophie kann einen Beitrag leisten zur Handlungs-, aber auch zur Weltorientierung. Aber sie darf das



Julian Nida-Rümelin im Gespräch mit Reinhard Breuer

nicht überziehen. Ich plädiere für einen Pragmatismus in dem Sinn, dass die philosophische Theoriebildung nicht losgelöst abläuft von der Alltagswelt und der Weise, wie wir uns verständigen. Es sollte also einen Zusammenhang geben, der durch eine philosophische Praxis gestiftet wird.

Was ist denn das Ziel menschlichen Handelns?

Viele Menschen suchen offenkundig Rat, der häufig von zweifelhafter Beratungsliteratur befriedigt wird, ob zur Esoterik oder zum Selbstmanagement. Das zeigt eigentlich, dass die Philosophie in den letzten Jahrhunderten einen Bereich leichtfertig aufgegeben hat, nämlich die philosophische Praxis.

Also wie wenn ich in eine Zahnarztpraxis gehe?

Ganz genau! Es gibt sogar eine Zeitschrift für philosophische Praxis, bei der ich mitwirke. Viele Psychologen sprechen eigentlich über Lebenskunst. Hier kann die Philosophie etwas leisten: Widersprüche aufdecken in Beurteilungen oder Werten, die Menschen haben, Kohärenz prüfen: Sind die Dinge durchdacht? Nach welchen Kriterien entscheidet jemand? Das ersetzt nicht Psychologen oder Berater, aber hier hat die Philosophie eine Zukunft auch in der Beratung.

Offenbar gibt es einen Bedarf an Populärphilosophie – etwa mit Jostein Gaarders »Sofies Welt« oder neuerdings Richard David Prechts »Wer bin ich – und wenn ja, wie viele?«.

Die moderne Philosophie hat sich zeitweise ganz zurückgezogen. Der französische Philosoph und Historiker Pierre Hadot (1922–2010) hat einmal gesagt, wir verstehen die gesamte antike und mittelalterliche Philosophie nicht, wenn wir sie nicht in erster Linie als Anleitung zum richtigen Leben lesen. Die moderne Philosophie hat ab Descartes einen Schnitt gemacht, mit den Mitteln der Mathematik More geometrico. Das war äußerst erfolgreich, es hat die moderne Naturwissenschaft in Gang gesetzt. Aber es wurde damit etwas weggeschnitten vom Körper der Philosophie. Zum Beispiel ihre Rolle im Dialog, etwa in der Medizinethik. Da hat die Philosophie auf Verschiedenes hingewiesen, und, wie ich, auch Kritik geerntet. Im Bereich Gentechnik etwa: Wie kann es sein, dass die Gesellschaft die Verhütung mit der Spirale zulässt, was die befruchtete Eizelle an der Einnistung hindert, was nichts anderes ist als eine Frühabtreibung, hunderttausendfach praktiziert. Und gleichzeitig darf bei uns niemand an solchen wenigen Tagen alten befruchteten Eizellen forschen. Diese Praktiken widersprechen sich.

Dieser Konflikt blieb ja seinerzeit ungeklärt und hat in schlechten Gesetzen gemündet.

So sehe ich das auch. Das war nicht hinreichend durchdacht und wurde erst später wieder mühselig verbessert. Da gab es einen zu großen Einfluss diverser Interessen- und Weltanschauungsgruppen.

Kommen wir zu den Neurowissenschaften. Hat die Philosophie vielleicht auch hier einen Zug verpasst? Und haben die, die als Neurophilosophen auftreten, auch genug Ahnung von ihrem Thema?

Ich glaube, das schätzen Sie falsch ein. Diejenigen, die hier forschen, kommen zum Teil aus den Neurowissenschaften oder führen selbst eigene Experimente durch. Das ist ein bisschen das Klischeebild der Philosophen, die abgehoben vor sich hinreden. Das mag es auch geben, ist aber heute längst nicht mehr typisch.

Aber warum gibt es zum Beispiel den Streit um Wolf Singer und Gerhard Roth mit ihrer Determinismusthese als Absage an den freien Willen?

Diesen Streit habe ich mit beiden sehr freundschaftlich geführt. Der betrifft ja nicht so sehr die Neurowissenschaft, sondern bestimmte philosophische Thesen. Polemisch gesagt, haben sich beide weit außerhalb der Grenzen ihres Fachs bewegt, als sie sagten: Unser Selbstbild, das auf Freiheit und Verantwortlichkeit beruht, ist auf Grund der neurowissenschaftlichen Befunde im Grunde eine Illusion.

Wenn auch eine hartnäckige ...

Ja, hartnäckig und sogar nützlich. Da darf der Philosoph schon mal fragen: Was für ein Begriff von Freiheit wird dem hier vorausgesetzt? Hier geht es um Grundlegendes: Ohne zuschreibbare Verantwortung und Schuld würde unser Strafrecht nicht funktionieren. Oft werde ich bei den Befunden auf die Experimente von Benjamin Libet von 1979 hingewiesen. Nun, die stützen dessen These aber mit Sicherheit nicht! Welche denn sonst? Und dann kommt doch relativ wenig von den Neuroforschern. Es war also vor allem ein Streit nicht zwischen Naturwissenschaft und Philosophie, sondern innerhalb der Philosophie.

Wie steht es also mit unserer Entscheidungsfreiheit?

Die Frage ist doch: Wie kann es sein, dass unsere Deliberationen, also unsere Gründe, etwas zu tun, dass diese kausal relevant sind in einer Welt, die als materielle Welt in der Physik, Chemie und den Neurowissenschaften beschrieben wird.

Eine tief reichende Frage.

Unser Gespräch leitet die neue »Spektrum«-Serie »Die größten Rätsel der Philosophie« ein. Was sind die großen Fragen?

Die Strömung der Philosophie, der ich zugehöre, der Analytischen, war in ihren frühen Jahren etwas präpotent – nämlich der Meinung, dass die alten Fragen entweder Unsinn sind oder Scheinprobleme oder bereits gelöst. Dann stellte sich heraus, dass viele dieser vermeintlich entsorgten oder als unsinnig betrachteten Fragen quasi durch die Hintertür der Analytischen Philosophie in aktueller Form wieder auftreten.

Nämlich welche?

Hier ist eines, das mich selbst beschäftigt hat: Spätestens mit Wittgenstein schien vielen Philosophen das Problem der Introspektion gelöst zu sein. Es geht um die nach innen gerichtete Selbstbeobachtung, um die Analyse des eigenen Erlebens und Verhaltens, um Subjekt und Objekt und die Möglichkeit der Selbsttäuschung. Also schauen wir – so war seinerzeit die Antwort – einfach auf das Verhalten der Menschen, achten auf bestimmte Regularitäten, die sich beschrei-

»Ohne zuschreibbare Verantwortung und Schuld würde unser Strafrecht nicht funktionieren«



»Es gibt schon einen philosophischen Erkenntnisfortschritt«

ben lassen, das genügt. Das Meinen, das Intendieren, die Probleme des deutschen Idealismus im 19. Jahrhundert: Alles erledigt. Unterdessen ist den allermeisten aber klar, so geht es auf keinen Fall. Wir haben eine Rückkehr von Debatten. Welche Rolle haben Vorstellungen? Der britische Philosoph Colin McGinn hat einmal gesagt: Ich dachte, ich brauche keine Bücher mehr zu schreiben. Doch dann kam er zum Thema Vorstellung. Und Colin schrieb das Buch »Das geistige Auge – Von der Macht der Vorstellungskraft«.

Was hat Sie daran interessiert?

Ich habe argumentiert, dass Bedeutungen ohne Absichten und Intentionen nicht verständlich sind.

Manche Probleme haben sich durchaus erledigt, so dass man auch von Fortschritt sprechen könnte.

Sicher. Aber die präpotente Geste, mit einer neuen Methode kann ich mal alles kurz abräumen, die ist obsolet. 1930 schreibt Moritz Schlick (1882–1936), einer der Mitbegründer des Wiener Kreises im Logischen Empirismus: Willensfreiheit sei eine Verwirrung des Geistes, es gehe doch um die Steuerung über Sanktionen. So etwas würde heute niemand mehr unterschreiben. Also gibt es schon einen philosophischen Erkenntnisfortschritt. Oft wird er dann erst in den neu entstandenen Einzeldisziplinen zu Ende gebracht, den Kindern der Philosophie der letzten 200 Jahre. Einige Fragen wurden auch innerhalb der Philosophie gelöst, aber es bleiben genügend andere.

Dann noch einmal die Frage von eben: Was sind für Sie die wichtigsten Fragen der Philosophie heute?

Zum einen die Frage: »Was ist eine Erkenntnis?« Was ist Erkenntnisfortschritt? Woher weiß ich, dass etwas der Fall ist? Die zweite Frage: »Was macht eine vernünftige menschliche Praxis aus?«

Geht es da um Gerechtigkeit, über die Sie ja selbst in Teil 10 unserer Serie schreiben werden. Ist das die Grundlage?

Ich würde das so sehen, im Gegensatz zu einigen anderen. Die oberste Tugend, meinten schon Platon, aber auch der amerikanische Philosoph John Rawls (1921–2002), ist Gerechtigkeit (Rawls publizierte 1971 das Buch »A Theory of Justice«). Gleichheit, Freiheit, Solidarität sind, so wie es die Fran-

zösische Revolution propagierte, Aspekte der Gerechtigkeit. Die Kriterien einer vernünftigen politischen Praxis haben etwas mit Gerechtigkeit zu tun.

Das ist die Basis von Demokratie.

Ja, aber nicht nur. Denken Sie an Gerechtigkeit in der Familie. Kinder sind besonders empfindlich, wenn sie ungerecht behandelt werden. Da geht es nicht um Demokratie.

Hängt Gerechtigkeit mit Glück zusammen?

Schwierige Frage. Es gibt ja Glücksforschung, wo Glück, Zufriedenheit und Wohlstand empirisch untersucht werden. Glück erfährt ab einem gewissen Reichtum eine Sättigung, dagegen wächst die Zufriedenheit auch bei höherem Wohlstand noch. Die Beziehung zur Gerechtigkeit sehe ich so: Damit eine gesellschaftliche Verteilung von Lebenschancen gerecht ist, müsste ihr jede Person, wenn sie hinreichend unparteiisch urteilt, idealiter zustimmen können.

Das klingt extrem.

Ja, ist es auch. Was legen die Befürworter zu Grunde? Egozentriker werden nur an ihren eigenen Vorteil denken. Aber andere werden auch auf Dritte Rücksicht nehmen. Solche Menschen sehen, dass das, was ich für richtig halte, auch davon abhängt, wie es anderen geht.

Ist nicht der Utilitarist der größte Glücksvermehrter, weil er die Gesamtmenge des Glücks aller Beteiligten maximiert?

Der Utilitarismus macht die moralische Beurteilung von den empirischen Randbedingungen abhängig. Er sagt: Richtig ist das, was die Nutzensumme maximiert. Nur, was ist das? Im Einzelfall müssten individuelle Rechte verletzt werden.

Wie ist die Rolle der Philosophie in der Zukunft? Ist sie aus der Falle der Selbsthistorisierung entkommen?

Die Philosophie hat sich in den letzten Jahrzehnten deutlich verändert. Die historische Forschung, die Beschäftigung mit klassischen Texten ist dabei völlig legitim. Aber der Trend in Richtung systematische Fragen hat massiv zugenommen, nicht mehr nur in der Analytischen Philosophie – sondern auch im Hegelianismus, im Kantianismus der Gegenwart, in der Phänomenologie.

Das systematische Denken hat sich also durchgesetzt.

Ja, dadurch ist die Relevanz für andere Disziplinen sowie für eine intellektuell interessierte Öffentlichkeit größer geworden. Die Philosophie versteht sich nicht mehr nur als eine besondere Disziplin, die über den anderen steht. Es gibt leider auch eine problematische Entwicklung, etwa beim Umbau der deutschen Universitäten in Richtung Berufsverwertbares. Das setzt die Geisteswissenschaften generell und die Philosophie im Besonderen unter Druck. Hier sinken die Einschreibezahlen.

Wieso?

Wenn einem 18-Jährigen vermittelt wird, achte bei deiner Fachwahl in erster Linie auf die berufliche Verwendbarkeit, dann werden die wenigsten sagen, jetzt studiere ich Philosophie. Das ist eine gefährliche Botschaft, da man sich künftig in seinem Berufsleben ohnehin mehrfach umorientieren muss. ~

Die Fragen stellte »Spektrum«-Redakteur Reinhard Breuer.

Wer bin ich ?

Auf diese klassische Frage der Philosophie gaben große Denker die unterschiedlichsten Antworten. Erst heute rückt eine allgemein akzeptierte Erklärung des Selbst in greifbare Nähe – nicht zuletzt dank neuer Impulse aus der Neuropsychologie.

Von Albert Newen

Wohl jeder Mensch fragt sich irgendwann in seinem Leben, was er eigentlich ist. Ein Wesen mit unsterblicher Seele? Nur eine Ansammlung von Molekülen? Oder sogar bloß eine Einbildung? Viele meinen, es gebe darauf keine allgemein verbindlichen Antworten: Wie man darüber denke, sei Sache der Weltanschauung, die sich weder beweisen noch widerlegen lasse. Doch das ist ein Irrtum. Systematische philosophische Überlegungen und neuere psychologische Forschungen bringen uns einer allgemein gültigen Antwort sehr wohl näher.

Der Philosoph René Descartes (1596–1650) vertrat bekanntlich die These, dass wir im Kern rein geistige Wesen seien, die nur zufällig während unseres irdischen Daseins in einem Körper stecken. Dazu formulierte er sein berühmtes gewordenes »Cogito«-Argument:

1. Ich denke (lateinisch: *cogito*).
 2. Wenn ich denke, dann existiert der Träger dieses Gedankens.
 3. Ich bin der Träger dieses Gedankens.
- Also existiere ich (*ergo sum*).

Damit stellte Descartes zunächst fest, dass es uns gibt, wenn wir einen Denkvorgang bemerken. Unklar bleibt jedoch, welcher Art das denkende Ich ist. Deshalb führt Descartes das Argument weiter:

- (A) Ich kann mir nicht widerspruchsfrei vorstellen, dass ich nicht existiere, solange ich denke.
- (B) Ich kann mir jedoch widerspruchsfrei vorstellen, dass ich auch ohne alle körperlichen Eigenschaften existiere.

Also bin ich kein Körper, sondern ein reiner Geist.

Im ersten Satz formuliert Descartes die »Cogito«-Überlegung bloß um (»Wenn ich denke, dann existiere ich«). Die Annahme B dagegen ist falsch. Zwar kann ich mir logisch widerspruchsfrei vorstellen, auch dann noch zu existieren, wenn ich Arme, Beine, Teile des Rumpfes und immer so weiter verlieren würde. Dennoch bleibt das ein nutzloses Gedankenspiel, weil es von den Gesetzen der Natur ausgeschlossen wird. Logisch widerspruchsfreie Vorstellungen können sich sehr wohl als naturgesetzliche Unmöglichkeiten erweisen. Ein Beispiel dafür liefert die Physik: Ein Perpetuum mobile galt unter Wissenschaftlern lange als realistische Idee; denn die Existenz einer solchen Maschine, die sich ohne Energiezufuhr unendlich immer weiterbewegt, führt auf keinen logischen Widerspruch und scheint intuitiv plausibel. Als Physiker jedoch die Gesetze von Energieerhaltung und Reibungsverlusten entdeckten, erwies sich das Perpetuum mobile als nicht realisierbar: Jede Bewegung geht mit Reibungsverlusten einher, was die Zufuhr von Energie erfordert, um sie aufrechtzuerhalten.

Descartes bleibt uns also den Beweis für seine Behauptung schuldig, dass Geist und Welt voneinander getrennt seien. Er setzt diesen Dualismus vielmehr schlicht voraus.

AUF EINEN BLICK

ERKENNTNISSE ÜBER DAS WESEN DES ICH

1 Dem Menschen genügt es nicht zu existieren, er möchte auch wissen, was die **Urgründe seines Daseins** sind. Antworten darauf gab bis heute eine Reihe von Philosophen.

2 René Descartes erkannte im **Denken** den Beweis für die eigene Existenz und definierte den Menschen folglich als geistiges Wesen, das nur zufällig und vorübergehend in einem Körper steckt – ein vorschneller Schluss.

3 Ludwig Wittgenstein sah im Ich lediglich ein **sprachliches Konstrukt**, das jeder realen Basis entbehrt; doch von der Natur der Sprache lässt sich nicht ohne Weiteres auf die Natur der Welt und des Menschen schließen.

4 Gestützt auf Erkenntnisse aus Neurowissenschaft und Psychologie, betrachtet die moderne Philosophie den Menschen als biologisches Wesen mit geistigen Fähigkeiten, die auf natürlichen Eigenschaften beruhen; **Ich-Gefühl** und **Selbstbild** erwachsen aus der Abgrenzung der eigenen Person von der Außenwelt und ihrer Spiegelung im anderen.



ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

Ein klares Zeichen für eine einfache Vorstellung vom Ich ist, dass man sich im Spiegel erkennt. Kleinkinder können das ab etwa dem 18. Monat. Im Tierreich wurde diese Fähigkeit inzwischen bei Menschenaffen, Delfinen, Elefanten und Elstern nachgewiesen.

Im Übrigen wirft die Annahme, Geist und Materie hätten nichts miteinander zu tun, viele Probleme auf. Und es gibt eine Reihe von Gegenargumenten. Nur zwei seien an dieser Stelle genannt:

1. Wie kann der reine Geist auf den Körper einwirken? Denn genau das müsste geschehen, wenn wir auf Grund des Wunsches, etwas Warmes zu trinken, in die Küche gehen und einen Kaffee kochen. Wir wissen, dass Motoneurone im Gehirn unsere Körperbewegungen steuern. Diese Neurone erhalten – so eine gut begründete Annahme – Signale von Nervenzellen in anderen Hirnarealen, die wiederum von externen Sinnesreizen aktiviert werden. In der Neurowissenschaft spricht nichts für eine Aktivierung durch einen reinen Geist. Auch gäbe es prinzipiell kein wissenschaftliches Konzept für eine solche Spekulation. Wenn Wünsche wirken, dann tun sie dies nur, weil sie selbst als Hirnzustände realisiert sind.

2. Gegen einen reinen Geist sprechen auch neurowissenschaftliche Beobachtungen. Demnach können körperliche Störungen die Psyche systematisch verändern. So führt die

Die biografische Entwicklung des Ich

Bei der normalen Entwicklung eines Kindes lassen sich mindestens die folgenden Schritte des Aufbaus von Ich-Vorstellungen unterscheiden:

- ▶ Ein Ich-Gefühl auf Grund der Selbstwahrnehmung des eigenen Körpers (spätestens bei der Geburt)
- ▶ Ein Ich-Gefühl, weil sich das Baby als Urheber seines zielgerichteten Handelns erlebt (beim Erlernen des Greifens im 3. Lebensmonat)
- ▶ Das Ich als Komponente von geteilter Aufmerksamkeit und als Zentrum der eigenen räumlichen Perspektive (entsteht zwischen dem 9. und 14. Lebensmonat)
- ▶ Das Ich als ein besonderes, handlungsfähiges Objekt neben anderen (wird beispielsweise deutlich, wenn ein Subjekt sich ab dem 18. Lebensmonat selbst im Spiegel erkennen kann)
- ▶ Das Ich als Subjekt mit begrifflichem Selbstbild, das sich wesentlich durch seine Wünsche, Überzeugungen, Hoffnungen und so weiter definiert und in der Lage ist, anderen Menschen andere Wünsche und Überzeugungen zuzuordnen. (Diese »Theory of Mind«-Fähigkeit wird zwischen dem 2. und 4. Lebensjahr erlernt und ist mit dem »False Belief«-Test überprüfbar.)

Auflösung der Hirnstrukturen im Fall der Alzheimerkrankheit zu dramatischem Gedächtnisverlust und starker Demenz. Ferner lassen sich mit Psychopharmaka Menschen aus tiefer Depression wieder in einen Zustand versetzen, in dem eine kognitive Therapie überhaupt erst möglich wird. Desgleichen verhilft das Medikament Ritalin Kindern, die unter dem Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom (ADS) leiden, wieder zu normalem Konzentrationsvermögen. Ebenso belegen die Folgen lokaler Zerstörungen im Gehirn – etwa durch einen Unfall oder Schlaganfall – den Zusammenhang zwischen geistigen Fähigkeiten und mentalen Zuständen. Bei defektem Areal V4 im visuellen Kortex erscheint die Welt den Betroffenen nur noch schwarz-weiß. Menschen mit zerstörtem

Broca-Areal können nicht mehr sprechen – es sei denn, eine andere Hirnregion wird darauf trainiert, diese Aufgabe zu übernehmen, was aber nur sehr eingeschränkt gelingt.

Der Geist ist also untrennbar an Materie gebunden und seine Existenz unabhängig vom Körper eine pure Fiktion. Wenn wir das akzeptieren, stellt sich allerdings immer noch die Frage, ob das Ich vielleicht auch nur eine Fiktion ist. Der Philosoph Ludwig Wittgenstein (1889–1951) zumindest sah darin lediglich ein sprachliches Konstrukt: einen Zug im Sprachspiel. Wenn der Ausdruck »ich« in Äußerungen wie »Ich habe Schmerzen« verwendet werde, bezeichne er nichts; denn der Satz bedeute genau dasselbe wie »Aua!«: Er drücke nur eine Empfindung aus.

Doch diese Argumentation vermag nicht wirklich zu überzeugen. Zum einen deutet auch der Empfindungsausdruck »Aua« darauf hin, dass es ein Ich gibt; nämlich eines, das Hilfe oder Trost sucht. Zum anderen existiert eine solche Entsprechung zwischen Ausrufen und Ich-Äußerungen nur in ganz wenigen Ausnahmefällen.

Wittgenstein begeht den Fehler, von der Struktur der Sprache (»Aua« spricht nicht explizit über ein Ich) auf die Struktur der Welt und des Geistes zu schließen (Es gibt kein Ich). Doch dies ist ein Fehlschluss. Unsere Alltagssprache spiegelt unser Alltagswissen wider. Dieses ist, was den Geist betrifft, aber heute oftmals noch genauso falsch oder irreführend, wie das die landläufigen Vorstellungen über physikalische Phänomene am Anfang der Neuzeit waren. Damals begann die experimentelle Erforschung der Natur mit dem Ziel einer umfassenden Theoriebildung, die von den keplerschen Gesetzen über die newtonsche Mechanik bis hin zu Einsteins Relativitätstheorie und zur Quantenphysik führte.

Der »False Belief«-Test

Die abgebildete Geschichte dient als Test, ob eine Person die eigenen Überzeugungen von denen eines anderen Menschen unterscheiden kann. Sally legt den Ball in den Korb und geht anschließend spazieren. Nun nimmt Anne den Ball und legt ihn in die Schachtel. Sally kommt zurück. Frage an die Versuchsperson: Wo sucht Sally den Ball? Zweijährige antworten »In der Schachtel!«; denn da ist er ja. Erst Vierjährige antworten »Im Korb, weil sie ihn dort hineingelegt hat«. Auch die meisten Autisten geben die falsche Antwort.



Ist das Ich eine Fiktion des eigenen Gehirns?

Seit etwa 100 Jahren gibt es nun auch eine wissenschaftliche Psychologie, die den Geist experimentell zu erforschen sucht. Zwar kann sie bisher noch keine umfassende Erklärung geistiger Phänomene bieten, aber immerhin Theorien, die sich auf Teilaspekte der menschlichen Psyche beziehen. Die Hirnforschung hat das Gebiet seit einigen Jahrzehnten nun schon erheblich befruchtet; wertvolle Beiträge kommen zunehmend auch von der molekularen Neurobiologie und der Genforschung. Die Philosophie ist dabei eine wichtige Disziplin neben den anderen. Sie hat vor allem die Aufgabe, eine umfassende systematische Theorie des Geistes mitzugestalten.

Wenn wir also anerkennen, dass das Ich kein übernatürliches Phänomen und keine bloße sprachliche Fiktion, sondern wesentlich durch das Gehirn eines Menschen realisiert ist, so bleibt immer noch die Frage: Bin ich vielleicht eine Fiktion, die mein eigenes Denkorgan produziert? Das behauptet der Philosoph Thomas Metzinger von der Universität Mainz in neueren Veröffentlichungen wie dem Buch »Being No One« von 2003.

Eine interdisziplinär orientierte Philosophie muss nicht nur Personen, sondern auch eine Außenwelt voraussetzen. Letztere in Frage zu stellen ist ein skeptisches Gedankenspiel,

Die Gummihand-Illusion

Die Versuchsperson (rechts) legt eine Hand hinter einen Schirm und betrachtet eine täuschend echte Gummihand. Deren hypothetische Verbindung zum Körper wird, anders als in dieser Zeichnung, mit einem Tuch überdeckt. Stimuliert dann eine andere Person (links) das Imitat genau synchron mit der echten Hand, entsteht bei dem Probanden der Eindruck, die Gummihand sei die eigene Hand.



das eine fachinterne methodisch-didaktische Rolle spielen kann. Es hindert die Philosophie jedoch daran, im Konzert der anderen Wissenschaften mitzuspielen. Moderne Vertreter der Disziplin stimmen deshalb darin überein, dass der Mensch ein biologisches Wesen ist, dessen geistige Fähigkeiten auf natürlichen Eigenschaften beruhen. Heftig debattiert wird allerdings darüber, ob dem Ich-Gefühl eines Menschen auch ein Ich in der Realität entspricht oder ob es nichts anderes ist als eine Konstruktion des Gehirns.

Für Letzteres gibt es zumindest starke experimentelle Belege. So können Wissenschaftler bei gesunden Menschen die Illusion erzeugen, eine Gummihand gehöre zum eigenen Körper (siehe Kasten oben). Den Status, vom Gehirn konstruiert zu sein, hat allerdings auch eine Katze, die wir im Nachbargarten wahrnehmen. Trotzdem ist das Tier keine Fiktion, sondern Teil der Wirklichkeit, von der unser Gehirn eine mentale Repräsentation erzeugt. Entsprechend gilt: Auch wenn die Ich-Vorstellung vom Gehirn konstruiert ist (was Wissenschaftler gemeinhin annehmen), so bleibt doch das, was sie repräsentiert, real. Das Ich ist dabei der Mensch als biologisches Wesen, das Vorstellungen von sich selbst hat – und somit die Fähigkeit zur Selbsterfahrung.

Diese Fähigkeit ist allerdings in unterschiedlicher Weise ausgeprägt und entwickelt sich von einfachen zu komplexeren Formen. Schon ein neugeborenes Kind unterscheidet auf der Grundlage von Sinneswahrnehmungen gefühlsmäßig zwischen Ich und Umwelt. Sobald es mit einem Vierteljahr zielgerichtetes Greifen gelernt hat, erlebt es sich auch als Urheber seines eigenen Handelns.

Einen weiteren wichtigen Fortschritt verkörpert im Alter von etwa einem Jahr die Fähigkeit, sich selbst als Teil einer Dreierkonstellation zu verstehen: Das Ich und ein weiteres Subjekt richten beide ihre Aufmerksamkeit auf ein drittes Objekt und sind sich dabei bewusst, dass der andere jeweils dasselbe tut. Eng verknüpft mit dieser Fähigkeit ist das Vermögen zu erkennen, dass jeder Mensch eine eigene räumliche Perspektive einnimmt und meinem Gegenüber dadurch teilweise Dinge verborgen bleiben, die ich sehe.

Nach 18 Monaten können Kinder sich dann im Spiegel erkennen. Zwischen dem zweiten und vierten Lebensjahr lernen sie schließlich, ihre eigenen Wünsche und Überzeugun-

gen von denen anderer Personen zu unterscheiden. Von da an ordnen sie Menschen ein Personenmodell zu – mit jeweils eigenen Gefühlen, Wünschen, Überzeugungen, Hoffnungen und Befürchtungen. Auf die weitere Entwicklung des Ich, die vor allem auch in der Pubertät stattfindet, kann ich hier aus Platzgründen nicht weiter eingehen.

Kenne ich mich selbst am besten?

Festzuhalten bleibt jedenfalls, dass zum Ich die folgenden wesentlichen Merkmale gehören:

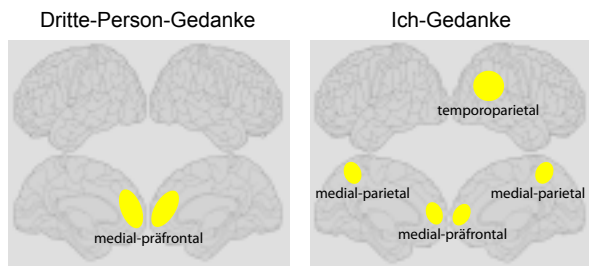
1. die Selbsterfahrung der eigenen Körperteile als zu mir gehörig,
2. das Gefühl, Urheber der eigenen Handlungen zu sein,
3. die Erfahrung einer räumlichen Perspektive mit dem Ich als Zentrum,
4. das Sich-selbst-Erkennen als Objekt im Spiegel sowie
5. die kognitive Perspektive mit der Fähigkeit, eigenes Wissen von dem anderer Personen zu unterscheiden und sich in andere hineinzusetzen.

Letzteres nennen Kognitionspsychologen auch die »Theory of Mind«-Fähigkeit. Sie ist die entscheidende Basis für unser explizites, begriffliches Selbstbild. In Kooperation mit dem Neurowissenschaftler und Psychiater Kai Vogeley von der Universität Köln konnte meine Arbeitsgruppe erstmals die neuronalen Grundlagen der Selbstzuschreibung von Überzeugungen messen und so die Suche nach der empirischen Basis des Ich wesentlich befruchten. Unsere Ergebnisse untermauern die Annahme, dass das Ich ein reales Phänomen ist.

Im Alltag gehen wir davon aus, dass niemand die eigene Person genauer kennt als man selbst: »Ich bin meine Welt«, sagt Wittgenstein im »Tractatus logico-philosophicus«. Wie soll jemand anderes besser wissen, welche mentalen Zustände ich habe? Doch auch wenn wir die eigenen mentalen Zustände unmittelbar innerlich erfassen können, schätzen wir sie doch oft falsch ein. Während jemand zum Beispiel meint, sich nur in berechtigten Fällen aufzuregen, beurteilt ihn die Umwelt vielleicht einmütig als jähzornigen Menschen, der schon bei nichtigen Anlässen aufbraust.

Überdies lehrt die Alltagspsychologie, dass wir uns zum Schutz eines positiven Selbstbilds systematisch Selbsttäuschungen hingeben. Das ist weder stets unvernünftig noch

»Ich« und »er« im Gehirn



Beim Denken an Dritte und an sich selbst spielen unterschiedliche Hirnregionen eine Rolle. Grob vereinfacht dargestellt, sind im ersten Fall Regionen im Stirnlappen (medial-präfrontal) aktiv, im zweiten zusätzlich Bereiche im medial-parietalen Kortex und am Übergang zwischen Schläfen- und Scheitellappen (temporoparietal) in der rechten Hirnhälfte. Das zeigt sich in Aufnahmen der Hirndurchblutung mittels funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT).

grundsätzlich nachteilig für die betreffende Person. Systematische Fehlbewertungen der eigenen Eigenschaften und Fehler sind bis zu einem gewissen Grad normal. Problematisch werden sie nur in übertriebener Form – oder wenn sie krankhafte Zustände annehmen.

Eine pathologische Ich-Störung ist zum Beispiel das so genannte »Alien Hand«-Syndrom. Nach einem Schlaganfall kommt es manchmal vor, dass ein Mensch seine eigene Hand als nicht mehr zu ihm gehörig empfindet. Das kann so weit gehen, dass er sie als selbstständigen Akteur erlebt, den er nicht mehr kontrollieren kann. Die Hand macht dann, was sie will; unter Umständen würgt sie sogar ihren Träger! In diesem Fall geht zugleich das Gefühl der Urheberschaft verloren.

Die große Bedeutung des Einfühlungsvermögens

Unter einer anderen Ich-Störung leiden Menschen, die nicht fähig sind, die Wünsche und Überzeugungen ihres Gegenübers zu erraten. Folglich können sie auch nicht darauf eingehen. Damit fehlt ihnen die Grundlage für soziale Interaktionen. Genau das trifft in hohem Maße beim Autismus zu: Während Kinder den so genannten »False Belief«-Test (siehe Kasten auf S. 64) gemeinhin ab dem vierten Lebensjahr bestehen, bewältigen Autisten die Aufgabe erst sehr viel später oder sogar nie. Wegen ihrer Schwierigkeiten im sozialen Umgang leben sie oft abgesondert von anderen und in sich zurückgezogen.

Selbst intelligente Autisten, die unter dem Asperger-Syndrom leiden, können soziale Regeln und Hinweise auf mentale Zustände nur auswendig lernen und in konkreten Situationen einüben. Unter leicht veränderten oder neuen Umständen sind sie dann wieder völlig verloren, weil sie nicht intuitiv einzuschätzen vermögen, was andere Menschen denken und fühlen und wie sie reagieren werden.

Mittlerweile gibt es auch Hinweise auf die neuronalen Grundlagen dieser Defizite. Demnach ist die »Theory of Mind«-Fähigkeit in bestimmten Hirnstrukturen verankert. Dabei liegt sie nicht nur dem Einfühlungsvermögen in andere zu Grunde, sondern auch der Konstruktion eines Selbstbilds mit Wünschen und Überzeugungen. Ein besseres Verständnis ihrer neuronalen Basis eröffnet folglich einerseits neue Behandlungsperspektiven für Ich-Störungen; andererseits gewährt sie tiefere Einblicke in die mentalen Ursprünge unseres Selbstbilds.

Wer bin ich also? Nach dem heutigen Stand des Wissens lautet die Antwort: Ich bin ein Mensch (als biologisches Wesen), der ein Ich-Gefühl und ein begriffliches Selbstbild entwickelt. Dieses Ich-Gefühl entsteht aus der Erfahrung heraus, dass ich einen eigenen Körper habe, die Welt aus einer eigenen Perspektive sehe und der Urheber des eigenen Handelns bin. Das begriffliche Selbstbild entwickelt sich erst in Verbindung mit der Fähigkeit, die eigenen Überzeugungen, Wünsche, Hoffnungen und so weiter von denen anderer Personen abzugrenzen. Der Aufbau von Ich-Gefühl und Selbstbild kann durch Umwelteinflüsse, aber auch durch Fehlfunktionen des Gehirns systematisch gestört werden. Wer ich bin, vermag ich auch keineswegs immer selbst am besten einzuschätzen. Andere Menschen haben die wichtige Funktion, mein Selbstbild zu spiegeln und meine Selbsteinschätzung zu korrigieren. ~

DER AUTOR



Albert Newen leitet an der Ruhr-Universität Bochum das Institut für Philosophie II mit Schwerpunkt in systematischer Gegenwartsphilosophie und baut dort gerade ein Zentrum für »Mind, Brain and Cognitive Evolution« auf. Er hat an den Universitäten Freiburg und Bielefeld Philosophie, Psychologie und Geschichte studiert und 1994 in Philosophie promoviert. Von

2003 bis 2007 war er Professor für Philosophie mit Schwerpunkt Sprachphilosophie und Philosophie des Geistes an der Universität Tübingen. Von 2000 bis 2004 gehörte er dem Vorstand der Europäischen Gesellschaft für Philosophie und Psychologie (ESPP) an und hat die 18. Jahrestagung dieser interdisziplinären Gesellschaft 2010 zum ersten Mal für Deutschland leitend organisiert.

QUELLEN

- Metzinger, T.:** Being No One. MIT Press, Cambridge 2003
Newen, A., Vogeley, K.: Menschliches Selbstbewusstsein und die Fähigkeit zur Zuschreibung von Einstellungen (Theory of Mind). In: Förstl, H. (Hg.): Theory of Mind. Springer, Berlin 2006 (Neuaufgabe 2011)
Newen, A., Vosgerau, G.: Irren ist ... sinnvoll! In: Gehirn&Geist 12/2010, S. 60–63
Vogeley, K. et al.: Mind Reading: Neural Mechanisms of Theory of Mind and Self-Perspective. In: Neuroimage 14, S. 170–181, 2001

WEBLINK

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061753

Eine Frage der Selbstbestimmung

Willensfreiheit ist die Fähigkeit, ohne Zwang zwischen verschiedenen Möglichkeiten auszuwählen. Doch wie frei sind unsere Entscheidungen wirklich? Ist Willensfreiheit vielleicht nur eine Illusion?

Von Michael Pauen

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Wege, sich dem Problem der Willensfreiheit zu nähern. Im einen Fall geht man davon aus, dass es sich hierbei um ein fundamentales metaphysisches Problem handelt, dessen Lösung davon abhängt, wie unsere Welt beschaffen ist – zum Beispiel ob es Lücken im Kausalzusammenhang gibt.

Die andere, wesentlich moderatere Sichtweise nimmt an, dass es offensichtliche Unterschiede bei der Zurechenbarkeit von Handlungen gibt: Kleine Kinder und psychisch Kranke sind offenbar in einem wesentlich geringeren Maß verantwortlich für ihr Tun als gesunde Erwachsene. Hier stellt sich dann die Frage, ob diese Unterscheidung gerechtfertigt ist und worin sie genau besteht.

Der erste Ansatz unterstellt, dass Freiheit davon abhängt, ob menschliches Handeln durch die Natur oder durch das handelnde Ich bestimmt wird. Letzteres sei nur möglich, wenn es Lücken im naturgesetzlichen Kausalzusammenhang gibt, die das »Ich« dann ausnutzen kann, um die Dinge in seinem Sinn zu lenken – etwa indem es neuronale Prozesse im Gehirn beeinflusst. In der philosophischen Tradition wird diese Auffassung oft Kant zugeschrieben; systematisch ausformuliert worden ist sie unter anderem von dem amerikanischen Philosophen Roderick Chisholm, der in die-

sem Zusammenhang den Begriff der Akteurskausalität entwickelt hat.

Ein solches Verständnis von Freiheit stößt auf vielfältige Kritik, vor allem von Seiten der Naturwissenschaften. Zum einen ist es sehr unwahrscheinlich, dass wir tatsächlich in einer Welt mit solchen Kausalücken leben. So haben Hirnforscher gegen die Vorstellung eines autonomen Ichs, das Vorgänge im Gehirn völlig selbstständig beeinflusst, immer wieder gut begründete Einwände erhoben. Außerdem wäre ein solches Verständnis von Freiheit ungeeignet, die offensichtlichen Unterschiede in den Freiheitsspielräumen etwa von gesunden Erwachsenen einerseits und psychisch oder physisch Abhängigen andererseits zu erklären – es spricht ja wenig dafür, dass man durch eine psychische oder physische Abhängigkeit sein Ich oder seine Seele verlieren würde.

Wenn Normen verletzt werden, müssen wir uns fragen, ob jemand dafür verantwortlich ist

Doch selbst wenn alle Voraussetzungen erfüllt wären, bliebe nach dieser ersten Sicht weiterhin unklar, was damit erreicht wäre. Ein den Naturgesetzen gegenüber autonomes Ich oder gar eine immaterielle Seele, was auch immer man sich darunter vorstellen mag, wirft die Frage auf, woher sie kommt und wie ihre Wünsche und Überzeugungen eigentlich entstanden sind. Lassen sich diese auf äußere Umstände, etwa auf Umwelt, Anlagen oder gar einen göttlichen Schöpfungsakt zurückführen, dann könnten sie der Person nicht zugeschrieben werden. Aber selbst wenn sie spontan entstanden wären, sähe es kaum besser aus.

Mit anderen Worten: Freiheit würde in einer solchen Sicht nicht nur auf völlig unrealistischen Voraussetzungen basieren. Sie würde stattdessen zu einem fundamentalen und unlösbaren Rätsel. Die Diskussion über die Willensfreiheit wäre in diesem Szenario eine Angelegenheit, von der wir tunlichst die Finger lassen sollten, weil sie zu nichts führen würde.

AUF EINEN BLICK

FREIER WILLE UND VERANTWORTUNG

1 **Freier Wille** und **Determinismus** werden von manchen Hirnforschern für inkompatibel gehalten. Es gibt jedoch einen Begriff von Freiheit, der diesen Widerspruch als scheinbar aufhebt.

2 Freie Handlungen können nicht zufällig entstehen. Denn **Zufälle** sind von niemandem abhängig und nicht kontrollierbar.

3 Nur wenn Handlungen selbstbestimmt sowie frei von inneren und äußeren Zwängen erfolgen, sind sie frei. Dann aber trägt der Urheber dafür auch die **Verantwortung**.



Frei wie ein Vogel – oder gefangen in deterministischen Prozessen? Die Frage nach unserer Selbstbestimmung wird im Zeitalter der Neurobiologie neu aufgerollt.

ALEXANDER JUNG ILLUSTRATION

Es gibt aber noch einen anderen Zugang zum Problem der Willensfreiheit – und dies ist der zweite Ansatz. Er geht von bestimmten Problemen in menschlichen Gesellschaften aus. Wenn Normen verletzt oder besondere Verdienste erworben werden, dann müssen wir uns schließlich fragen, ob dafür jemand verantwortlich gemacht werden kann – entweder um Sanktionen zu erlassen oder um Belohnungen zu verteilen. Die Diskussion um die Willensfreiheit kann man unter diesen Voraussetzungen als einen äußerst differenzierten, zuweilen sogar haarspalterischen Versuch sehen, eine Antwort auf unsere Frage zu liefern. In der Geschichte finden sich solche Versuche bereits bei Augustinus (354–430), später auch bei Thomas Hobbes (1588–1679) und David Hume (1711–1776).

Zweifellos wurde diese Diskussion in der Geschichte jeweils mit dem zeitgenössischen Vokabular geführt, oft vor dem Hintergrund von Annahmen, die wir kaum noch teilen. Doch viele der Thesen, die damals diskutiert wurden,

sind trotzdem interessant: So finden sich etwa bei Augustinus oder den Stoikern Antworten, die – ein wenig umformuliert – noch heute Gültigkeit besitzen.

Ich möchte daher im Folgenden zeigen, dass sich ein Freiheitsbegriff entwickeln lässt, der keineswegs rätselhaft ist wie etwa das erste Szenario. Er genügt nicht nur allen wissenschaftlichen Prinzipien, sondern ist auch pragmatisch sinnvoll. Denn er führt zu einem aus Sicht der Gesellschaft wie auch der beteiligten Individuen sinnvollen Umgang mit Freiheit und Verantwortung. Stimmt meine Argumentation, dann wäre Freiheit kein metaphysisches Rätsel, sondern eine sowohl pragmatisch wie systematisch begründete Notwendigkeit.

Freiheits skeptiker wie etwa der deutsche Psychologe Wolfgang Prinz vom Max-Planck-Institut für Kognitions- und Neurowissenschaften in Leipzig (»Wir tun nicht, was wir wollen, sondern wir wollen, was wir tun«) behaupten oft, dass die Idee der Willensfreiheit zwar der Sache nach unhaltbar

sei, wir aber dennoch aus praktischen Gründen an ihr festhalten müssten. Denn sonst könnten wir ja niemanden mehr für sein Tun verantwortlich machen. Das aber würde zu einem Zusammenbruch unseres Rechtssystems führen und außerdem unsere persönlichen Beziehungen in Mitleidenschaft ziehen.

Unterstellt wird in dieser Kritik ein Gegensatz zwischen den philosophischen und wissenschaftlichen Erkenntnissen über das Problem der Willensfreiheit einerseits und den pragmatischen Anforderungen an eine funktionierende Gesellschaft andererseits. Ich möchte jedoch zeigen, dass ein solcher Gegensatz gar nicht existiert.

Schauen wir uns dazu an, unter welchen Bedingungen es für eine Gesellschaft sinnvoll ist, einer Person ihr Handeln vorzuwerfen beziehungsweise sie dafür zu belobigen.

Pragmatisch sinnvoll ist so etwas vor allem dann, wenn der Betreffende damit zu guten Handlungen motiviert oder von schlechten abgehalten wird. Letzteres hängt offenbar von zwei Bedingungen ab: Zum einen muss man mit Lob oder Tadel die wirklichen Verursacher einer Handlung erreichen, also genau diejenigen, die entscheiden, ob die Handlung wiederholt wird oder nicht. Zum anderen sollten Lob und Tadel deren Verhalten auch tatsächlich beeinflussen können.

Wie Sie einem Bankräuber raten, von seinem Tun abzulassen

Betrachten wir zunächst die erste dieser Bedingungen. Will man mit den eigenen Reaktionen auf eine Handlung Normverletzungen verhindern und verdienstvolles Tun fördern, dann hat es wenig Sinn, sich an eine Person zu wenden, die keinen oder nur beschränkten Einfluss auf das Zustandekommen der Handlung hatte. Vielmehr muss man sich an den tatsächlichen Verantwortlichen halten. Banküberfälle lassen sich schlecht dadurch verhindern, dass man die Schalterangestellten unter Druck setzt. Einen wirklichen Effekt kann man nur erzielen, wenn man potenzielle Bankräuber dazu bringt, sich andere Einnahmequellen zu suchen. Dies bedeutet übrigens auch, dass die Handlung nicht zufällig zu Stande gekommen sein darf – Zufälle sind wenig empfänglich für Lob oder Tadel.

Schon aus solchen rein pragmatischen Gründen also, völlig unabhängig von allen systematischen Überlegungen über den Freiheitsbegriff und erst recht von metaphysischen Spekulationen, ist es geboten, den Urheber einer Handlung anzusprechen. (Ich werde weiter unten zeigen, dass eine systematische Analyse des Freiheitsbegriffs zu einem ganz ähnlichen Resultat führt.) Das allein reicht jedoch nicht. Selbst wenn man sich mit Lob und Tadel oder gar mit Belohnung und Strafe an den wirklichen Urheber einer Tat wendet: Erreichen lässt sich nur dann etwas, wenn der Urheber auch dafür empfänglich ist – wenn er sein Verhalten also tatsächlich verändern kann. Nur weil man ihn ermahnt, wird ein Alkoholiker vermutlich nicht von seiner Sucht lassen; ebenso wenig

wird man mit einem bloßen Appell eine Person beeinflussen können, die an einer Zwangsstörung leidet.

Schon deshalb müssen Freiheit und Verantwortung daher an ein zweites Merkmal gebunden werden, nämlich an die Abwesenheit innerer und äußerer Zwänge. Ich bezeichne das hier als Autonomieprinzip. Nur dann, wenn eine Handlung diesem Prinzip genügt, lässt sich erwarten, dass Lob und Tadel auch die erwünschte Wirkung erzielen. Nur dann ist es pragmatisch sinnvoll, eine Person für etwas verantwortlich zu machen, im Positiven wie im Negativen.

Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass es nur sinnvoll ist, jemanden für sein Tun zur Rechenschaft zu ziehen, wenn er erstens der Urheber seines Tuns ist und zweitens autonom gehandelt hat. Nun möchte ich demonstrieren, dass eine systematische Analyse des Freiheitsbegriffs zu ganz ähnlichen Ergebnissen kommt. Ausgangspunkt einer solchen Analyse kann nur unser Alltagsgebrauch des Begriffs Freiheit sein. Dieser sollte dann in einer kohärenten und nach Möglichkeit mit wissenschaftlichen Prinzipien vereinbaren Konzeption zusammengefasst werden.

Was ist also gemeint, wenn wir von Freiheit sprechen? Auch hier spielen die beiden genannten Kriterien eine zentrale Rolle. Zum einen würden wir immer nur solche Handlungen als frei bezeichnen, die nicht unter Zwang zu Stande gekommen sind. Anders gesagt: Von Freiheit sprechen wir nur, wenn eine Handlung autonom ist. Zweitens würden wir aber auch zufällige Handlungen nicht als frei bezeichnen. Zufälle sind von niemandem abhängig und durch niemanden kontrollierbar. Freie Handlungen müssen sich daher auf ihren Urheber zurückführen lassen. Andernfalls könnte man freie Handlungen nicht einer Person zuschreiben – und man

Zufällige Handlungen würden wir nicht als frei bezeichnen



hätte kaum einen Grund, die Person für ihr Handeln verantwortlich zu machen.

Auch die systematische Analyse zeigt also die zentrale Bedeutung von Autonomie und Urheberschaft. Beiden kann man dadurch gerecht werden, dass Freiheit mit Selbstbestimmung übersetzt wird. Dieses Verständnis ist gebräuchlich – so werden politische Freiheitsbewegungen oft auch als Bewegungen von Gruppen bezeichnet, die um ihre Selbstbestimmung kämpfen. Außerdem genügt diese Übersetzung den Prinzipien von Autonomie und Urheberschaft. Der Autonomie entspricht sie, weil eine unter äußerem oder innerem Zwang zu Stande gekommene Handlung nicht selbst-, sondern fremdbestimmt wäre. Und der Urheberschaft entspricht Selbstbestimmung, weil eine zufällige Handlung nicht nur das Prinzip der Urheberschaft, sondern auch die Forderung nach Selbstbestimmung verletzt: Sie wäre nicht selbst-, sondern einfach unbestimmt.

Selbstbestimmung lässt sich prinzipiell auch wissenschaftlich untersuchen – etwa zur Klärung der Frage, wie die Fähigkeit zu freiem Handeln entsteht, aber auch, wie sie eingeschränkt wird. Ebenso wäre für die Allgemeinheit von Interesse, wenn wir genauer wüssten, was unsere Fähigkeit zu selbstbestimmtem Handeln gefährdet oder wie wir sie weiterentwickeln können.

Innere Zwänge verletzen die Selbstbestimmtheit

Es ist leicht zu erkennen, dass die systematischen Kriterien für den Freiheitsbegriff mit den oben skizzierten Forderungen übereinstimmen – es waren ja gerade Autonomie und Urheberschaft, die sich aus pragmatischen Gründen als notwendig erwiesen hatten. Wenn eine Handlung nach den hier beschriebenen Kriterien selbstbestimmt ist, dann wird mögliches Lob oder Tadel auch den wirklichen Verursacher einer Tat treffen, also die sich selbst bestimmende Person. Wenn eine Handlung in Wirklichkeit von einer anderen Person ausging oder unter innerem Zwang entstand, dann wäre auch die Selbstbestimmtheit verletzt.

Mindestens genauso wichtig ist die Forderung, dass jede Konzeption von Freiheit mit wissenschaftlichen Prinzipien, vor allem mit der naturgesetzlichen Determination vereinbar ist. Zugegebenermaßen ist nicht klar, ob unsere Welt in all ihren Prozessen determiniert ist oder nicht – insbesondere wenn es um die Ebene von Synapsen und Nervenzellen im Gehirn geht, die für den Ablauf von Entscheidungsprozessen relevant ist. Es mag sein, dass auf dieser Ebene keine Determination herrscht. Doch selbst wenn das so wäre, dann würde daraus noch kein Gewinn einer Freiheit folgen, sondern allenfalls ein Verlust an Kontrolle. Eine in ihren Ursachen unbestimmte Handlung kann eben auch nicht durch ihren vermeintlichen Urheber bestimmt sein. Umgekehrt folgt daraus, dass eine freie Handlung sehr wohl determiniert sein darf, sofern die Determination vom Urheber ausgeht – genauer: von dessen Wünschen und Überzeugungen.

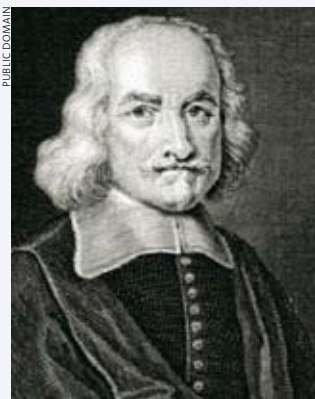


Anfang der 1980er Jahre führte der amerikanische Physiologe Benjamin Libet (1916–2007) seine Experimente zur zeitlichen Abfolge bewusster Handlungsentscheidungen durch. Seinen mittlerweile klassischen Experimenten zufolge scheint es, als würde das Gehirn »entscheiden«, noch bevor sich die agierende Person dessen bewusst wird.

Sind bewusste Willensakte nur ein wirkungsloses Nachspiel?

Spätestens hier verschwindet auch der vermeintliche Gegensatz von Willensfreiheit und Naturwissenschaft. Wenn freie Handlungen von den Wünschen und Überzeugungen ihres Urhebers abhängig sein sollen, dann lässt sich diese Abhängigkeit wissenschaftlich untersuchen. Und wenn wir in einer Welt leben, in der geistige Prozesse durch neuronale Aktivitäten im Gehirn einer Person realisiert werden – und vieles spricht dafür, dass dies so ist –, dann muss eine freie Handlung auch genau durch diejenigen neuronalen Prozesse bestimmt sein, welche die Wünsche und Überzeugungen des Urhebers realisieren. Dieser Zusammenhang lässt sich ebenfalls analysieren; ein Beispiel hierfür sind die Experimente des Hirnforschers John-Dylan Haynes vom Bernstein Center for Computational Neuroscience in Berlin. In seinen Experimenten sollten Versuchspersonen eine Entscheidung zwischen zwei Optionen fällen. Auf Basis der dabei registrierten neuronalen Aktivitäten versuchten die Forscher dann vorherzusagen, wie sich die Person entscheiden wird – mit beachtlichem Erfolg.

Doch hat es in der Vergangenheit nicht auch Experimente gegeben, die die Existenz von Freiheit fundamental in Frage stellen? Tatsächlich sind einige Versuche ursprünglich so interpretiert worden. Berühmt geworden sind die Untersuchungen, die der amerikanische Physiologe Benjamin Libet (1916–2007) bereits vor 30 Jahren an der University of California in San Francisco durchgeführt hat. Libets Versuchspersonen mussten 40-mal eine einfache Handbewegung wiederholen. Dabei wurde der Zeitpunkt des bewussten Entschlusses mit dem Einsetzen einer bestimmten Hirnaktivität verglichen, des so genannten Bereitschaftspotenzials. Zur Verblüffung der Forscher stellte sich dabei heraus, dass das Bereitschaftspotenzial den bewussten Entschlüssen um 350 Millisekunden vorauseilte. Dieser Befund löste beträchtliche Diskussionen aus: Bedeuteten die Ergebnisse womöglich, dass die eigentlichen Entscheidungen durch das Gehirn vorab getroffen werden? Und sind die bewussten Willensakte dann womöglich nur ein wirkungsloses Nachspiel, das mit der eigentlichen Entscheidung nichts mehr zu tun hat?



Der englische Philosoph Thomas Hobbes (1588–1679) lehnte die Freiheit des Willens ab und vertrat stattdessen den Determinismus. Seiner Überzeugung nach seien alle Inhalte des menschlichen Bewusstseins letztlich nur eine Folge von außen kommender Bewegungen.

Diese Interpretation wird heute kaum noch vertreten. Es hat sich nämlich gezeigt, dass sie aus einer ganzen Reihe von Gründen völlig überzogen ist. Zum einen sollten vor allem Naturwissenschaftler nicht überrascht sein, wenn sich vor bewussten Entscheidungen im Gehirn bereits etwas abspielt. Andernfalls könnte die Handlung auch nicht durch die Wünsche und Überzeugungen der Person gesteuert und selbstbestimmt sein – es sei denn, man wollte wieder auf den oben skizzierten metaphysischen Freiheitsbegriff zurückgreifen.

Zweitens spricht gegen die obige Interpretation, dass es in den Libet-Experimenten gar keine wirkliche Entscheidung gab – zumindest nicht innerhalb der Versuchsanordnung selbst. Die Probanden mussten ein und dieselbe Handbewegung 40-mal wiederholen. Wenn es hier eine Entscheidung gegeben hat, dann fand sie bereits ganz am Anfang, also vor Beginn des eigentlichen Experiments, statt. Sie dürfte der Frage gegolten haben, ob man sich überhaupt an dem Labortest beteiligt oder nicht. War diese Entscheidung jedoch einmal gefallen, dann »wusste« das Gehirn, es hatte 40 Handbewegungen vorzubereiten. Auch deshalb ist es nicht weiter verwunderlich, dass sich schon vor der tatsächlichen Fingerbewegung neuronale Prozesse registrieren lassen, die den Vorgang vorbereiten.

Freiheit bedeutet nicht das Fehlen von Determination

Die Libet-Experimente widerlegen also nicht die Handlungsfreiheit. Genauso wenig beweisen sie, dass unser Handeln nicht von unseren bewussten Absichten, sondern von unbewussten und unserer Kontrolle entzogenen neuronalen Prozessen gesteuert wird. Mittlerweile haben neurowissenschaftliche Experimente weitere Belege für die Wirksamkeit menschlicher Intentionen erbracht. So konnte der britische Kognitionsforscher Patrick Haggard vom Institute of Cognitive Neuroscience in London zeigen: Versuchspersonen können ziemlich gut zwischen absichtlichen und nichtabsichtlichen Handlungen unterscheiden. Warum sollten wir uns dann stets irren, wenn wir meinen, absichtlich und willentlich gehandelt zu haben – so wie es viele Skeptiker der Willensfreiheit meinen? Zudem wiesen John-Dylan Haynes und seine Kollegen in dem oben erwähnten Experiment nach, dass bewusste Absichten, genauer: deren neuronale Grundlagen, eine Vorhersage der beabsichtigten Handlung erlau-

ben. Wenn dies so ist, dann müssen bewusste Absichten auch wirksam sein – andernfalls wäre der Erfolg solcher Prognosen völlig schleierhaft.

Halten wir also fest: Es gibt eine traditionelle Konzeption von Willensfreiheit, die aus einer Reihe von Gründen zu Problemen führt. Zum einen setzt sie Freiheit gleich mit dem Fehlen von Determination. Sie untergräbt damit die Kontrolle, die der Handelnde doch gerade über seine freien Handlungen benötigt, wenn er für sie zur Verantwortung gezogen werden soll. Zum anderen ist diese Vorstellung problematisch, weil sie die Merkmale, die eine freie Handlung auszeichnen, einer wissenschaftlichen Untersuchung entzieht.

Die alternative Konzeption überwindet hingegen nicht nur den Gegensatz zu wissenschaftlichen Prinzipien, sondern wird auch unseren intuitiven vorwissenschaftlichen Vorstellungen besser gerecht. Dieser Interpretation zufolge lässt sich Willensfreiheit als Selbstbestimmung verstehen. Das bedeutet, dass eine freie Handlung von ihrem Urheber abhängig ist, nicht aber von inneren oder äußeren Zwängen. Gestützt wird dieses Konzept nicht nur durch unsere Alltagsvorstellungen von Freiheit, sondern auch durch pragmatische Überlegungen. Es ist also nicht allein gerecht, die Zuweisung von Schuld und Verdienst an Selbstbestimmung zu binden, vielmehr ist es auch nützlich und hilfreich für unser gesellschaftliches Zusammenleben. Nur so lässt sich nämlich gewährleisten, dass durch Belohnung und Strafe Einfluss auf die eigentlichen Urheber von guten oder verwerflichen Taten genommen wird. ∞

DER AUTOR



Michael Pauen ist Professor für Philosophie des Geistes an der Humboldt-Universität Berlin. Außerdem ist er Sprecher der Berlin School of Mind and Brain sowie des Center for Integrative Life Sciences.

QUELLEN

- Haggard, P.:** Conscious Intention and Motor Cognition. In: Trends in Cognitive Science 5, S. 290–295, 2005
Haynes, J.-D. et al.: Reading Hidden Intentions in the Human Brain. In: Current Biology 17, S. 1–6, 2007
Libet, B.: Do We Have Free Will? In: Journal of Consciousness Studies VI, S. 47–57, 1999
Pauen, M.: Illusion Freiheit? Mögliche und unmögliche Konsequenzen der Hirnforschung. Fischer, Frankfurt/M. 2004
Wegner, D. M.: The Illusion of Conscious Will. MIT Press, Cambridge 2004

WEBLINKS

www.michael-pauen.de
Webseite des Autors mit verschiedenen Aufsätzen zum freien Download

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061754

Oasen der Tiefsee

Überraschung auf dem Meeresgrund: Walkadaver liefern die Grundlage für reichhaltige Ökosysteme, denn sie ernähren jahrzehntlang eine Vielfalt von Lebewesen.

Von Crispin T.S. Little



Der Wal war sicher schon vor Jahren verendet. Doch in seinem Kadaver auf dem Meeresgrund wimmelte es von Leben: von Würmern, Venusmuscheln, vielerlei Schnecken, dazwischen sah man Flecken von weißen Bakterienrasen. Die Besatzung des Tauchboots »Alvin« entdeckte das Skelett 1987 vor der Südküste Kaliforniens bei einer Tiefsee-Expedition im Santa Catalina Basin. Eigentlich wollten die Forscher hier nur den öden, nährstoffarmen Meeresboden kartieren. Doch plötzlich ortete das Sonargerät ein großes Objekt in 1240 Meter Tiefe. Die Scheinwerfer der Alvin enthüllten ein 20 Meter langes, teils von Sedimenten bedecktes Gerippe. Bei der späteren Auswertung der Videoaufnahmen kamen die Forscher zu dem Schluss, es handle sich um die Überreste eines Blau- oder Finnwals.

Im folgenden Jahr kehrte Expeditionsleiter Craig Smith, Meereskundler an der University of Hawaii in Manoa, mit seinem Team an die Fundstelle zurück, um das Skelett und seine Bewohner genauer zu untersuchen. Dabei entdeckten die Mitarbeiter nicht nur mehrere neue Tierarten, sondern

stießen auch auf Organismen, die bis dahin nur von sehr speziellen, extremen Umwelten bekannt waren. Beispielsweise von hydrothermalen Tiefseequellen: Dort tritt aus Bodenspalten heißes, mineralreiches Wasser aus – Lebensgrundlage für viele höchst eigenartige Organismen.

Solche Lebensgemeinschaften an Walkadavern haben Wissenschaftler seitdem dutzendfach beschrieben. Im näheren Umkreis der toten Säuger fanden sie über 400 verschiedene Tierarten. Mindestens 30 davon scheinen nur in diesem speziellen Typ Ökosystem vorzukommen. Langsam klärt sich nun, wie die wunderlichen Tierwelten funktionieren und wie sie vermutlich entstanden.

Auch früher schon gab es immer wieder Hinweise darauf, dass tote Wale besondere Lebensgemeinschaften ernähren. Im Jahr 1854 fand ein Zoologe in Walspeck, der beim Kap der Guten Hoffnung vor Südafrika im Meer trieb, eine zentimetergroße unbekannte Muschelart, die Gänge in das Gewebe gefressen hatte. Dass dergleichen beileibe nichts Absonderliches ist, zeigte im 20. Jahrhundert die Schleppnetzfisherei. Von den 1960er Jahren an holten Seeleute mit dieser Fangmethode Schädel und andere Knochen von Walen vom Meeresgrund, an denen bislang unbekannte Muscheln haften. Wichtige Fundorte lagen bei Schottland, Irland und Island, vor allem aber an der Chatham-Schwelle östlich von Neuseeland. 1965 tauchte eine neue Art der Napfschnecken auf – sie bilden eher Kegel als gedrehte Gehäuse. Weitere Arten folgten bald. Forscher prägten für diese Tiere den Gattungsnamen *Osteopelta* (nach griechisch *osteon* für »Knochen« und lateinisch *pelta* für »Schild«).

Aber erst der Skelettfund von 1987 bei Kalifornien machte deutlich, dass die Ökosysteme an toten Walen etwas Besonderes darstellen. So gehören die von Smiths Mitarbeitern entdeckten Muscheln zu Gruppen, die Chemosynthese be-

AUF EINEN BLICK

TOTE WALE ALS LEBENSSPENDER

- 1 Am Grund der Tiefsee kann ein abgesunkener toter Wal über Jahrzehnte ein **eigenes Ökosystem** ernähren.
- 2 Diese verstreuten Oasen stehen womöglich mit **anderen Lebensräumen der Tiefsee** im Austausch, etwa mit den exotischen Artengemeinschaften an Hydrothermalquellen.
- 3 Vielleicht bildeten sich ähnliche Ökosysteme schon lange vor der Zeit der Wale an verendeten **Riesenmeeresreptilien**. Dann bestanden zwischen beiden Systemen möglicherweise auch evolutionäre Beziehungen.



treibende Bakterien beherbergen – also Mikroben, die aus anorganischen Verbindungen Energie gewinnen. Auf jenen Prozessen, auf denen wohl auch das frühe Leben in der Erdgeschichte beruhte, basieren in der Tiefsee manche uns exotisch anmutenden Ökosysteme.

Tatsächlich kannten Biologen die meisten Schnecken und Muscheln, die sie bei Walkadavern fanden, vorher nur von solchen Lebensgemeinschaften der Tiefsee, welche die benötigte Energie nicht aus Foto-, sondern aus Chemosynthese durch bestimmte Bakterien beziehen. Einige der Muscheln finden sich an versunkenem Holz oder bei Hydrothermalquellen. Andere, Angehörige der Vesicomiden, leben nur bei Hydrothermal- und Methanquellen (so genannten kalten Quellen) und Vertreter der Luciniden bei Methanquellen und in sauerstofffreien Sedimenten. Eine Schneckenart kommt sonst nur noch in Ablagerungen vor, in denen Sauerstoff zum Atmen fehlt.

Angesichts dieses auffälligen Verbreitungsmusters postulierten Smith und seine Kollegen 1989: Die Tiefseeorganismen könnten Walskelette quasi wie Trittsteine zwischen anderen auf Chemosynthese basierenden Biotopen benutzen, über die sie von einem zum nächsten gelangen. Allerdings ist noch nicht geklärt, ob sich jede neue Generation über diese Distanzen ausbreiten kann oder ob der Prozess viel länger dauert.

Smiths Team wollte nun untersuchen, wie ein Walkadaver-Ökosystem am Meeresboden funktioniert und wie lange es besteht. Darum begannen die Forscher 1992 mit einem logistisch aufwändigen, für die Nase nicht gerade angenehmen Forschungsprojekt: Sie fahndeten an Küsten nach Walkadavern, um sie ins tiefere Meer zu verfrachten und dort dann langfristig beobachten zu können. Weil die meisten toten Wale gleich versinken, gelangen sie selten in Küstennähe. Doch im Verlauf von sechs Jahren konnten die Forscher drei verendete Grauwale verwenden, die in Kalifornien angeschwemmt worden waren. Diese Kolosse versenkten sie im tieferen Ozean mit schweren Gewichten. Gegen den Auftrieb durch Verwesungsgase benötigten sie bis zu 2700 Kilogramm Ballast. Jene drei Wale, das anfangs erwähnte so-

wie ein weiteres, 1995 entdecktes Skelett suchten sie anschließend regelmäßig entweder mit der Alvin oder mit ferngesteuerten Tauchbooten auf.

Im Lauf ihrer Arbeit bestimmten Smith und seine Leute drei verschiedene ökologische Phasen, die sich teils überlappen (siehe Kasten S. 76/77). Die erste Phase bezeichnen sie als Stadium der mobilen Aasfresser. Es setzt ein, sobald der Kadaver am Meeresboden ankommt. Schon nach kurzer Zeit graben sich Unmengen von Schleimaalen durch das Fleisch, und Haie reißen Fetzen heraus. Zusammen vertilgen

Von den Resten eines großen Wals leben vielerlei exotische Organismen jahrzehntelang.



solche Aasfresser am Tag 40 bis 60 Kilogramm an Weichteilen, also Fett, Muskeln und Innereien. Trotzdem kann dieses Stadium bei einem riesigen Wal zwei Jahre dauern. Danach liegt das Skelett großteils frei.

Bis zu zwei Jahre währt auch die zweite Phase, das Stadium der Opportunisten. Nun finden sich vor allem Bartwürmer (Ringelwürmer, die zu den Vielborstern zählen) und Krebse ein – und zwar in Unmengen, aber geringer Artenzahl. Sie besiedeln die Walreste und die nächste Umgebung und machen sich über alle Weichgewebe her, welche die Aasfresser vor ihnen übrig gelassen haben.

Die dritte und bei Weitem längste Phase, das Stadium der Schwefel liebenden Organismen, beginnt, wenn die Weichteile verschwunden sind (im Kasten unten ganz rechts). Spezielle Bakterien bauen nun die in den Walknochen enthaltenen Fette ab. Diese Mikroben leben anaerob, das heißt, zur Energiegewinnung nutzen sie nicht den Sauerstoff (O₂), der im Wasser gelöst ist. Als Sauerstoffquelle dient ihnen vielmehr im Wasser gelöstes Sulfat (SO₄), und sie scheiden Schwefelwasserstoff (H₂S) ab. Tiere können die für die meisten Organismen giftige Verbindung nicht als Energiequelle nutzen. Stattdessen springen andere chemosynthetische Mikroben ein – diesmal aerobe: Mit Hilfe von im Wasser gelöstem Sau-

erstoff gewinnt jene zweite Bakteriensorte aus dem Schwefelwasserstoff Energie für den eigenen Stoffwechsel. Von solchen Bakterien ernähren sich wiederum etliche Tiere: Bestimmte Muscheln bilden mit den Bakterien regelrechte Symbiosen – das heißt, die Mikroorganismen leben in den Weichtieren, und beide versorgen sich gegenseitig mit einigen wichtigen Stoffen. Außerdem weiden verschiedene Schnecken die Bakterienrasen ab.

50 bis 100 Jahre Schwerstarbeit

Walknochen enthalten extrem viel Fett – warum, verstehen wir noch nicht genau. Bei einem 40 Tonnen schweren Gerippe kann das drei oder vier Tonnen ausmachen. Die Schwefelbakterien benötigen bei einem großen Tier 50, vielleicht auch 100 Jahre, bis sie ihr Werk vollendet haben.

Nach Schätzungen von Smith und seinen Mitarbeitern verenden weltweit jedes Jahr vielleicht an die 70 000 große Wale. Ihren Hochrechnungen zufolge dürften allein von den neun größten Arten stets etwa 700 000 Skelette in verschiedenen Verrottungsstadien auf dem Meeresboden liegen. Vor den Zeiten des industriellen Walfangs war die Anzahl mit Sicherheit wesentlich höher. Noch vor 200 Jahren mag sie das Sechsfache betragen haben, legt man die früheren Popula-

Die drei Phasen des Zerfalls

Ein toter Wal lockt Leben in die Wüstenei am Grund der Tiefsee. Forscher unterscheiden drei ökologische Stadien, die sich zwar teils überlappen, zu denen aber jeweils eigene Organismen und Nahrungsnetze gehören.

MOBILE AASFRESSER

Schleimaale, kieferlose, blinde, sehr urtümliche Fische, vertilgen große Mengen des Walspecks und Muskelgewebes. **Schlafhaie** und einige **Krebse** beteiligen sich.

DAUER: BIS ZU ZWEI JAHRE

OPPORTUNISTEN

Danach machen sich andere Tiere über die Fleisch- und Speckreste her, auch über den Tran im umgebenden Sediment. **Knochenwürmer** der Gattung **Osedax** beginnen schon, ihre »Wurzeln« in die Knochen zu bohren und deren Fett aufzunehmen.

DAUER: BIS ZU ZWEI JAHRE



GROSSE ILLUSTRATION: JEN CHRISTIANSEN; KLEINE RUNDE ILLUSTRATIONEN: CATHERINE WILSON

tionsgrößen zu Grunde. Heute könnte die Entfernung von einem Walkadaver zum nächsten durchschnittlich etwa zwölf Kilometer betragen, entlang der Wanderrouten der Grauwale vielleicht sogar nur fünf. Solche Distanzen sollten die Larven von Würmern, Muscheln oder Krebsen im Prinzip überwinden können. Die Organismen, die an den verschiedenen heißen und kalten Quellen am Meeresgrund vorkommen, könnten also die Walüberreste gewissermaßen als Zwischenstation zur nächsten Quelle benutzen.

Drei weitere Forschergruppen haben inzwischen verendete Wale im tiefen Meer versenkt und anschließend beobachtet: ein Team aus Schweden, eines aus Japan und eines aus Monterey in Kalifornien. Zudem wurden wiederum durch Zufall einige neue Walkadaver gefunden, so in der Monterey Bay und südlich von Japan beim Tiefseevulkan Torishima. Diese Studien bestätigen, dass tote Wale überall in den Meeren gleichartige, vermutlich zusammenhängende Organismengemeinschaften unterhalten. Die ökologischen Stadien, die bei den Skeletten im Santa Catalina Basin auffallen, zeichnen sich an den anderen Orten allerdings weniger deutlich ab.

Ein Grund dafür könnte die größere Sauerstoffarmut sein, die speziell in diesem Becken an den für die Experimente

ausgewählten Stellen herrscht – und damit verbunden eine geringere Abbaugeschwindigkeit der Kadaver. Aber vielleicht beschleunigt den Prozess andernorts auch der »Zombie-wurm« *Osedax*, ein maximal einen Zentimeter langer, Knochen fressender Vielborster (siehe Foto S. 79). Zum ersten Mal entdeckt wurde der eigenartige Ringelwurm 2004 an einem Walkadaver in der Monterey Bay, später auch an anderen vor Schweden und Japan. Dass dieses Tier, von dem es mehrere Arten gibt, ebenfalls an Walen im Santa Catalina Basin vor Südkalifornien lebt, bemerkten die Forscher erst danach – denn er erscheint dort nicht so zahlreich wie andernorts.

Der Wurm sitzt in einer Schleimröhre und atmet mit fedrigen Kiemen, die er ins Wasser streckt, aber bei Gefahr auch einziehen kann. Er wirkt dann wie ein am Knochen klebender Schleimtropfen. Wie manche Innenparasiten verzichtet *Osedax* im Erwachsenenstadium auf einen Verdauungstrakt – er hat keinen Magen und weder Mund noch After. Stattdessen bohrt er grüne, fleischige »Wurzeln« in frei liegende Walknochen. Wahrscheinlich versorgt er so symbiotische Bakterien – die in seinen Anhängen leben und seine eigentliche Nahrungsquelle darstellen – mit Fetten oder Proteinen aus den Knochen. Alle Würmer, die man sieht, sind Weibchen. Doch jedes beherbergt in seinem Innern Dutzende winziger

SCHWEFEL LIEBENDE BAKTERIEN

Anaerobe Bakterien bilden Schwefelwasserstoff (H_2S), den andere, Schwefel liebende Bakterien zur Energiegewinnung nutzen. Von denen wiederum leben letztlich die übrigen hier angetroffenen Organismen. Die **Muscheln** und **Röhrenwürmer** bilden mit ihnen Symbiosen, die **Bartwürmer** und **Napfschnecken** weiden die Bakterienrasen ab. Auch **Krebse** tauchen auf: Sie erbeuten Tiere.

DAUER: BIS ZU 50 JAHRE

Muscheln

Röhrenwurm

Muscheln

Napfschnecken

Lebensgrundlage

In den Knochen leben anaerobe Bakterien (grüne Zone), die Sauerstoff (O_2) aus Sulfat (SO_4) im Meerwasser extrahieren (1) und damit Knochenfett verdauen. Schwefelwasserstoff (H_2S) produzieren sie als Abfall (2). Daraus gewinnen Schwefel liebende, Sauerstoff atmende Bakterien Energie (3). Sie bilden oft Rasen (orange).

Männchen, die nie über das Larvenstadium hinauskommen und anscheinend einzig dazu da sind, Sperma zu liefern.

Diese Knochenwürmer sind nahe Verwandte der teils bis zu drei Meter langen Riesenröhrenwürmer, die bei hydrothermalen und kalten Quellen der Tiefsee leben. Laut genetischen Befunden könnten sie seit rund 40 Millionen Jahren existieren, etwa so lange wie die Wale und die Muschelfamilie der Vesicomymiden.

Suche nach den urzeitlichen Verbreitungswegen

Osedax zerstört die Knochenmasse ziemlich rasch, was das Werk der Schwefelbakterien beschleunigen und ihre Verweildauer verkürzen dürfte. Vielleicht bestehen jene Ökosysteme deswegen oft gar nicht so lange wie zunächst angenommen. Falls daher aber tatsächlich nicht so viele Wale auf dem Meeresboden liegen sollten wie anfangs geglaubt, es also wesentlich weniger der ökologischen Inseln gibt, wäre auch zu überdenken, wie die besondere Tierwelt an all den abgeschiedenen Orten der Tiefsee wohl den Weg über die oft recht weiten Distanzen findet.

Auch die Ursprünge der Tiefseeoasen faszinieren Forscher. Hydrothermale und kalte Quellen gab es schon in der Frühzeit der Erde. Wale hingegen entstanden erdgeschichtlich gesehen erst vor kurzer Zeit, vor rund 40 Millionen Jahren. Wann und wie kamen die Ökosysteme an den Tiefseequellen auf, für deren Organismen heute Walkadaver vermutlich als unverzichtbare Verbreitungshilfe dienen? An heißen Quellen im Meer könnte das Leben sogar überhaupt seinen Anfang genommen haben. Schon deswegen möchten wir die heutigen und früheren Verbindungen zwischen solchen Habitaten verstehen. Dabei können Fossilstudien helfen. Zwar fanden Paläontologen in den letzten 150 Jahren in Gesteinen eine Menge Walfossilien, doch erst 1992 entdeckten sie im US-Bundesstaat Washington zum ersten Mal

Versteinerungen von Ökosystemen mit toten Walen – und zwar aus dem Oligozän, der Epoche vor rund 34 bis 23 Millionen Jahren. Eine gezielte Suche brachte inzwischen mehr solcher Funde zu Tage. Darunter sind einige Fossilien aus dem Miozän, der Phase vor 23 bis 5 Millionen Jahren, unter anderem aus Kalifornien und Japan. Bei zwei der drei japanischen Fundstätten habe ich zusammen mit Kazutaka Amano von der Universität von Joetsu mitgearbeitet.

Die einstigen Walökosysteme lassen sich an versteinerten Muscheln oder Schnecken erkennen, deren heutige Verwandtschaft chemosynthetische Bakterien beherbergt oder abweidet. Noch gibt es keine Zeugnisse von Organismen ohne harte Schalen, weil diese sich fossil kaum erhalten. Deshalb wissen wir bisher nicht, ob zum Beispiel der Zombiewurm *Osedax* tote Wale schon damals besiedelte.

Offenbar waren bei den frühesten Walkadaver-Ökosystemen noch Muscheln in der Überzahl, die auch unabhängig von Chemosynthese leben können. Das beschrieben 2006 Steffen Kiel, heute an der Universität Göttingen, und Jim Goedert vom Burke Museum of Natural History and Culture in Seattle (US-Bundesstaat Washington). Die Funde stammen aus dem Oligozän sowie der Zeit davor, dem späten Eozän. Erst im Miozän erscheinen in diesem Zusammenhang jene Weichtiere, die heute das Stadium der Schwefelbakterien kennzeichnen. Zuerst glaubten die Forscher, dass die frühen Wale für solche Lebensgemeinschaften einfach noch nicht groß genug waren. Doch unlängst fand sich in den Klippen einer kalifornischen Insel ein ziemlich kleines Walskelett aus dem Miozän mit genau solchen Muschelfossilien – aus der Familie der Vesicomymiden. Für die chemosynthetischen und die von ihnen lebenden Organismen waren somit wohl weniger die Ausmaße eines Kadavers entscheidend als der relative Fettgehalt der Walknochen. Denn der scheint über die letzten rund 20 Millionen Jahre zugenommen zu haben.

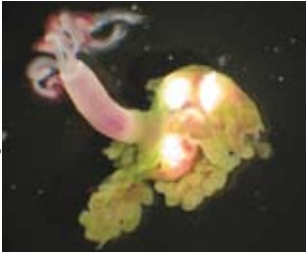
Schnappschuss aus der Tiefsee

An den Überresten eines zehn Meter langen Grauwals wimmelt es von Leben: Im Vordergrund krabbeln Seegurken der Art *Scotoplanes globosa*; sie gehören zu den Stachelhäutern. Am Skelett siedelt der Knochenwurm *Osedax rubiplumus*

und vieles mehr. Der Kadaver liegt in der Monterey Bay vor Kalifornien in fast 3000 Meter Tiefe. Das aus drei Fotos montierte Bild entstand 2002. Inzwischen sind einige der Knochen völlig zersetzt.

MONTEREY BAY AQUARIUM RESEARCH INSTITUTE (MBARI)





***Osedax frankpressi*, ein Zombiewurm, der aus einem Walknochen herauspräpariert wurde (grün die »Wurzeln« des Tiers, weiß die Ovarien). Normalerweise ragt nur der rötliche Teil mit den fedrigen Kiemen hervor.**

Möglicherweise erleichterten fettere Knochen den Walen die Eroberung des offenen Meers (siehe SdW 7/2002, S. 26).

Seit der Entdeckung der ersten Walkadaver-Oasen spekulieren Forscher, dass ähnliche Lebensgemeinschaften schon im Erdmittelalter (Mesozoikum) existiert haben könnten, dem Zeitalter der Dinosaurier. Die Ära endete vor 65 Millionen Jahren. Vielleicht bildeten sich ähnliche Habitate wie später bei toten Walen einst an verendeten großen Meeresreptilien, darunter Plesiosaurier (Ruderechsen), Ichthyosaurier (Fischechsen) und Mosasaurier (Meereswarane). Diese Gruppen gehörten in ihrer Zeit zu den dominanten Raubtieren im Meer.

Erbe aus der Dinosaurierzeit?

Die These wurde wieder diskutiert, als 1994 in Neuseeland an einem Schildkrötenknochen ein fossiles Exemplar der Napfschnecke *Osteopelta* entdeckt wurde – in Sedimenten des Eozäns. Zwar gehört das Eozän nicht ins Erdmittelalter, sondern in eine jüngere Zeit. Aber der Fund zeigte zumindest, dass solche Schnecken auch auf Reptilienskeletten leben konnten.

2008 gab dann eine japanisch-polnische Forschergruppe bekannt, sie hätte an Knochen von zwei Plesiosauriern aus Japan Schnecken der Familie Provannidae gefunden. Die beiden zehn Meter langen Reptilien hatten in der oberen Kreidezeit gelebt, im späten Erdmittelalter. Solche Schnecken kennen wir bisher nur von Lebensgemeinschaften, die auf Chemosynthese basieren. Somit liegt der Schluss nahe, dass tote, große Meeresreptilien schon damals zu inselartigen Ökosystemen am Boden der Ozeane beitrugen, die aus Schwefelverbindungen Energie gewannen. Allerdings starben die Plesiosaurier wie die Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren aus, und erst mehr als 20 Millionen Jahre danach entstanden Wale. Entwickelten sich derartige Ökosysteme an verendeten Riesentieren vielleicht mehrmals neu? Oder bestanden zwischen ihnen doch Verbindungen?

Noch ist diese Frage nicht gelöst. Allerdings zeigte sich, dass die Plesiosaurierknochen im Aufbau durchaus denen heutiger Wale ähnelten. Auch sie boten Raum für viel potenziell fettreiches Knochenmark. Ob die Knochen aber tatsächlich besonders fetthaltig waren, ist schwierig festzustellen. Ein Indiz dafür könnte sein, dass viele der an Walkadavern lebenden Tiergruppen, die auf Schwefelverbindungen als Energiequelle angewiesen sind, anscheinend schon vor der Evolution der Wale existierten – nämlich als Artengemeinschaften von kalten Quellen, verrottendem Holz und wahrscheinlich auch von Hydrothermalquellen. Vorstellbar wäre, dass dort

schon lange lebende Organismen sich bei der ersten Gelegenheit über die großen Meeressäuger hermachten.

Leider sind Fossilien von Walökosystemen immer noch selten. Auch stammen die bisherigen Funde mit wenigen Ausnahmen aus Japan und von der US-Westküste. Besonders wünschenswert wäre es, Hinweise auf den Zombiewurm *Osedax* zu entdecken, weil dieser Knochenfresser die hier besprochenen Lebensgemeinschaften stark beeinflusst. Versteinerungen des skelettlosen Tiers dürfte es kaum geben, dafür aber vielleicht Fraßspuren, also die von ihm angelegten Kanäle und Tunnel in Walknochen. Kürzlich fand ein Forscherteam um Steffen Kiel mutmaßliche *Osedax*-Gänge in 30 Millionen Jahre alten fossilen Knochen von Vögeln, die unter Wasser jagten. Demnach mussten sich auch diese Würmer wohl nicht auf Säugerknochen beschränken und hätten damit womöglich in Reptilienkadavern leben können. Vielleicht bestand also tatsächlich eine Brücke von den ausgestorbenen Sauriern zu den jüngeren Walen.

Aber auch die Zeugnisse von heutigen Walkadavern am Meeresgrund sind noch allzu sporadisch. Von vielen Gebieten liegen bisher gar keine Funde vor, besonders nicht von der südlichen Halbkugel und vom Südpolarmeer mit deren großen Walpopulationen. Erst wenn wir zu all diesen Fragen mehr wissen, lässt sich klären, welche Rolle versunkene Walkadaver für die Verbreitung von Organismen spielen, ob es vor ihrer Zeit schon ähnliche Oasen gab – und wie das alles mit den Tiefseequellen zusammenhängt. ~

DER AUTOR



Crispin T.S. Little lehrt Paläontologie an der University of Leeds (England). Seit vielen Jahren erforscht er die Makroevolution von Tiergemeinschaften an Hydrothermal- und Kohlenwasserstoffquellen der Tiefsee sowie an Walkadavern.

QUELLEN

Kiel, S. et al.: *Osedax* Borings in Fossil Marine Bird Bones. In: *Naturwissenschaften* 98, S. 51–55, 2011
Smith, C.R., Baco, A.R.: Ecology of Whale Falls at the Deep-Sea Floor. In: *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review* 41, S. 311–354, 2003

LITERATURTIPPS

Crist, D.T. et al.: *Schatzkammer Ozean. Volkszählung in den Weltmeeren.* Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010
Erste zusammenfassende, allgemein verständliche Darstellung des internationalen Großprojekts »Census of Marine Life«
Russell, M.: Der heiße Ursprung des Lebens. In: *Spektrum der Wissenschaft* 1/2007, S. 74–81
Die Anfänge des Lebens an Hydrothermalquellen in der Tiefsee

WEBLINK

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061756



Die knollenartig verdickte Wurzel des Manioks kann roh oder gekocht verzehrt werden. Vielfach wird sie auch zu Mehl oder Paste verarbeitet.



WELTERNÄHRUNG

Wurzel der Hoffnung

Maniok ist schon heute eines der wichtigsten Nahrungsmittel in der Dritten Welt. Allein durch Kreuzung mit Wildpflanzen ließe sich daraus sogar eine noch viel ertragreichere und hochwertigere Kulturpflanze züchten. Das wäre ein bedeutender Schritt, um die Mangelernährung in vielen Entwicklungsländern zu bekämpfen.

Von Nagib Nassar und Rodomiro Ortiz

Für mehr als 800 Millionen Menschen ist die Hauptnahrungsquelle weder Weizen noch Mais oder Reis. Stattdessen lebt ein Großteil der Bevölkerung in vielen Ländern vor allem von der stärkehaltigen Wurzel einer Pflanze, die je nach Region Maniok, Kassava, Tapioka oder Yuca heißt (nicht zu verwechseln mit der Yuccapalme). Nach Reis und Weizen ist Maniok weltweit die dritt wichtigste Kalorienquelle. Das macht die Knolle unersetzlich im Kampf gegen den Hunger. Überall in den Tropen pflanzen Familien Maniok traditionell auf kleinen Parzellen zum Eigenverbrauch an; in Asien und Teilen Lateinamerikas wird die Feldfrucht auch kommerziell als Tierfutter und zur Stärkegewinnung angebaut. Der Nährwert der Wurzel ist jedoch gering: Sie enthält fast ausschließlich Kohlenhydrate und nur weni-

ge Proteine, Vitamine und Mineralstoffe wie Eisen. Verbesserte Varianten könnten deshalb entscheidend zum Kampf gegen die Mangelernährung in weiten Teilen der Entwicklungsländer beitragen.

Zusammen mit Kollegen von der Universität Brasília arbeiten wir daher daran, widerstandsfähigere, ertragreichere und nahrhaftere Manioksorten zu erzeugen und sie Bauern in der Dritten Welt zugänglich zu machen. Der Schwerpunkt unserer Forschung liegt auf traditionellen Zuchtmethoden: Wir kreuzen Maniok mit seinen wilden Verwandten, um deren vorteilhafte Merkmale zu nutzen, die sich in Jahrmillionen entwickelt haben. Dieses Verfahren ist nicht nur kostengünstiger als die Gentechnik, sondern trägt auch den Vorbehalten mancher Menschen gegenüber transgenen Pflanzen



GETTY IMAGES / ANDY CRAWFORD

Rechnung. In den Industrienationen haben Forscher und gemeinnützige Organisationen inzwischen gleichfalls – allerdings mit gentechnischen Methoden – verbesserte Maniokarten geschaffen. Die kürzlich abgeschlossene Sequenzierung des Maniokgenoms dürfte den Weg für weitere Fortschritte bahnen.

Der Ursprung des Maniokss (*Manihot esculenta*) und seiner wilden Verwandten liegt in Brasilien. Portugiesische Seefahrer brachten die strauchartige Pflanze im 16. Jahrhundert nach Afrika. Von dort verbreitete sie sich ins tropische Asien bis nach Indonesien. Heute erzeugt Afrika mehr als die Hälfte der Welternte von gut 200 Millionen Tonnen; Asien trägt 34 Prozent bei, Lateinamerika 15.

Die Wurzelknolle sieht aus wie eine längliche Süßkartoffel und kann sowohl direkt – roh oder gekocht – verzehrt als auch zu Körnchen, Paste oder Mehl verarbeitet werden. In Afrika und einigen Teilen Asiens isst man die Blätter zugleich als Gemüse, da sie Proteine – die Trockenmasse eines Maniokblatts besteht zu 32 Prozent aus Eiweißstoffen – sowie die Vitamine A und B enthalten.

Maniok lässt sich ohne großen Aufwand anbauen. Die Pflanze gedeiht auch auf sauren oder unfruchtbaren Böden, verträgt Wassermangel ziemlich gut und erholt sich rasch von Schädlingsbefall oder Krankheiten. Überdies wandelt sie die Sonnenenergie besonders effektiv in Kohlenhydrate um: Während der essbare Anteil von Getreidepflanzen bestenfalls 35 Prozent ihrer Trockenmasse ausmacht, erreicht er beim Maniok etwa 80 Prozent. Außerdem lässt sich der Strauch zu jeder Jahreszeit anpflanzen und die Ernte notfalls um bis zu ein Jahr aufschieben. Dadurch können die Bauern einfach einige Büsche auf dem Feld stehen lassen – als Reser-

ve für unvorhergesehene Notzeiten. Kein Wunder also, dass Maniok bei Selbstversorgern in fast allen für seinen Anbau geeigneten Regionen sehr beliebt ist und einen festen Bestandteil des Speiseplans bildet.

Den vielen Vorzügen stehen aber auch einige Nachteile gegenüber. So verdirbt die Knolle im unverarbeiteten Zustand für gewöhnlich schon nach einem Tag. Zudem sind Manioksträucher innerhalb einer Region meist genetisch sehr gleichförmig ausgestattet, was sie anfällig für Seuchen

AUF EINEN BLICK

KLASSIKER MIT GROSSER ZUKUNFT

1 Mehr als 800 Millionen Menschen leben in den Entwicklungsländern hauptsächlich von Maniok. Die anspruchslose Pflanze hat eine **kalorienreiche Wurzel** – die aber arm an Proteinen, Vitaminen und Mineralstoffen ist. Ihr hauptsächlichlicher Verzehr kann deshalb zu **Mangelernährung** führen.

2 Durch **Kreuzung** von Maniok mit Wildsorten ist es bereits gelungen, den Gehalt der Wurzel an Proteinen und β -Carotin, einer Quelle für **Vitamin A**, stark zu erhöhen. Auf die gleiche Weise konnten Forscher die **Trockenheitstoleranz** der Pflanze und ihre **Widerstandskraft gegen Krankheiten und Parasiten** steigern.

3 Durch das **Aufpfropfen von Wildsorten** oder das **Erzeugen von Chimären**, die Gewebe von Maniok und seinen wilden Verwandten in sich vereinen, lässt sich zudem der **Ertrag vervielfachen** und die **Dürre-resistenz** weiter verbessern. Gentechnisch konnten Wissenschaftler Maniok auch mit **Eisen, Zink** und **Vitamin E** anreichern.

4 Derzeit werden all diese neuen Varianten auf **Versuchsfeldern** getestet. Ihre großflächige Einführung könnte die Ernährungssituation in der Dritten Welt entscheidend verbessern.

macht. Das größte Problem allerdings ist, dass die Knolle fast ausschließlich Kohlenhydrate enthält und so zu Mangelernährung führen kann, wenn sie als Hauptlebensmittel dient.

Anfang der 1970er Jahre, als Hungersnöte im tropischen Afrika wüteten, begann sich einer von uns (Nassar) für Maniok zu interessieren. Deshalb reiste der damals noch junge Agrarwissenschaftler aus seinem Heimatland Ägypten nach Brasilien, um die Pflanze an ihrem Ursprungsort zu erforschen. Dort blieb er schließlich und nahm die brasilianische Staatsangehörigkeit an. Mit Hilfe eines kleinen Forschungsstipendiums des kanadischen International Development Research begann er 1975 an der Universität Brasília eine Sammlung lebender wilder *Manihot*-Arten anzulegen – als Reservoir nützlicher Eigenschaften, die auf die Kulturpflanze übertragen werden könnten. Dazu reiste er durch das Land, oft zu Fuß oder mit dem Fahrrad. Er und seine Mitarbeiter trugen so schließlich 35 verschiedene Wildformen zusammen.

Dieser Biodiversitätspool erwies sich als Schlüssel für die Entwicklung neuer Sorten – an der Universität selbst wie anderswo. Ein erster Erfolg war 1982 die Züchtung einer Hybridform mit erhöhtem Proteingehalt. Die Maniokwurzel enthält normalerweise nur 1,5 Prozent Eiweiß, Weizen hingegen sieben Prozent und mehr. Den Knollen fehlen insbesondere schwefelhaltige essenzielle Aminosäuren wie Methionin, Lysin und Cystein. Die neue Hybride hat dagegen einen Proteingehalt von bis zu fünf Prozent. Sie könnte also die Eiweißversorgung von Millionen Brasilianern verbessern – zumal die brasilianische Regierung durch Beimischung von Maniok zum Weizenmehl die Abhängigkeit des Landes von importiertem Weizen verringern will.



Ein Maniokbauer in Huila in den kolumbianischen Anden prüft seine Kulturen.

Auch andere wichtige Nährstoffe lassen sich möglicherweise durch Kreuzung mit wilden Verwandten oder zwischen verschiedenen Sorten in die Kulturpflanze einbauen. Wie Nassars Team herausfand, enthalten bestimmte *Manihot*-Wildformen reichlich essenzielle Aminosäuren, Eisen, Zink und Karotinoide wie Lutein, β -Carotin und Lykopen. Vor allem das β -Carotin ist eine wichtige Quelle für Vitamin A, dessen Mangel eine fortschreitende Augenschädigung hervorruft – ein ernstes, weit verbreitetes Problem in den Tropen. In den letzten drei Jahren hat die Forschergruppe ertragreiche Maniokvarianten gezüchtet, die bis zu 50-mal so viel β -Carotin enthalten wie die Standardsorten. Bauern in der Umgebung von Brasília testen die Pflanzen derzeit auf ihren Feldern.

Steigerung von Ertrag, Trockenheitstoleranz und Resistenz gegen Schädlinge

In einem weiteren bedeutenden Forschungsprojekt geht es um die Vermehrung von Maniok. Bei der natürlichen Bestäubung entstehen Sämlinge, die nicht mit der Mutterpflanze identisch sind und oft weniger Ertrag bringen. Aus diesem Grund pflanzen die Bauern gemeinhin Stecklinge der Sträucher, anstatt Samen auszusäen. Durch den Schnitt können jedoch Viren und Bakterien eindringen und die Pflanze infizieren. Mit jeder neuen Generation kommen neue Mikroorganismen hinzu, was schließlich wiederum den Ertrag mindert.

Wie viele andere Blütenpflanzen vermögen sich allerdings manche wilden *Manihot*-Arten, darunter der baumartige *M. glaziovii*, sowohl geschlechtlich als auch ungeschlechtlich zu vermehren; aus den asexuell entstandenen Samen entwickeln sich Klone der Mutterpflanze. Nach mehr als zehn Jahren intensiver Forschung gelang den brasilianischen Wissenschaftlern vor Kurzem die Züchtung einer Manioksorte mit derselben Fähigkeit. Wie ihre wilden Verwandten bildet sie zweierlei Samen, die einen geschlechtlich und die anderen ungeschlechtlich. Nach Abschluss weiterer Untersuchungen werden Bauern die neue Sorte zum Testen erhalten.

Kreuzungen mit *M. glaziovii* könnten auch die Trockenheitstoleranz von Maniok erhöhen. So ließ sich eine Hybride erzeugen, die zwei verschiedene Arten von Wurzeln bildet: Die einen verdicken sich zu stärkehaltigen Knollen wie beim Maniok und sind essbar; die anderen dringen dagegen weiter in den Boden vor, wo sie tief liegendes Grundwasser erreichen können. Dadurch eignen sich diese Mischformen besonders gut für semiaride Gebiete wie den Nordosten Brasiliens oder bestimmte Savannenregionen südlich der Sahara. Bei Tests durch Bauern gediehen sie teils sogar rund um Petrolina, einer der trockensten Gegenden Brasiliens. Nassars Gruppe versucht nun, durch Rückkreuzung dieser Sorten mit einem besonders ergiebigen Maniokstamm Dürresistenz und Ertragreichtum zu kombinieren.

Auch mit der altbewährten Methode der Veredelung lässt sich die Ausbeute an Knollen verbessern. Indonesische Bauern entdeckten das schon in den 1950er Jahren. Auf Versuchsfeldern gelang es Nassars Gruppe, durch das Aufpfropfen ei-

Der tropische Maniokgürtel der Erde

Maniok ist die bevorzugte Feldfrucht von Bauern in den Tropen, die primär für den Eigenbedarf produzieren. Das gilt vor allem für Afrika, wo mehr als die Hälfte der Welternte erzeugt wird. Die Pflanze lässt sich leicht aus kleinen Stecklingen ziehen, verträgt Dürre und gedeiht auch auf kargen

Böden. Die Wurzelknolle kann das ganze Jahr über ausgegraben werden, wann immer Nahrung benötigt wird. Wie Nudeln, Brot oder Reis dient Maniok als Beilage für die verschiedensten Gerichte der jeweiligen Regionalküche. In manchen Ländern wird er auch kommerziell angebaut.



nes Zweigs von Sorten wie *M. glaziovii* oder *M. pseudoglaziovii* (oder Hybriden aus beiden) auf einen Maniokstumpf die Wurzelproduktion auf das Siebenfache zu steigern. Das Verfahren ist bisher jedoch nur begrenzt einsetzbar, weil diese Wildformen nur in wenigen Ländern vorkommen.

Die selektive Züchtung und Kreuzung mit natürlich auftretenden Arten kann indes nicht nur Nährwert und Ertrag, sondern auch die Resistenz gegen Schädlinge und Pflanzenkrankheiten steigern. In den 1920er Jahren löste das Maniok-Mosaikvirus im heutigen Tansania in Ostafrika eine Hungersnot aus. Damals gelang es zwei englischen Wissenschaftlern in siebenjähriger Forschungsarbeit, die Feldfrucht durch Kreuzen mit *M. glaziovii* zu retten.

Ein halbes Jahrhundert später bedrohte das Virus erneut Anbauregionen in Nigeria und Zaire (der heutigen Demokratischen Republik Kongo). Diesmal nutzten Forscher des International Institute of Tropical Agriculture (IITA) in Nigeria Exemplare von *M. glaziovii* und seiner Hybride aus der Sammlung der Universität von Brasília zur Züchtung eines resistenten Maniokstamms. Aus ihm ging eine ganze Familie von widerstandsfähigen Sorten hervor, die heute auf mehr als vier Millionen Hektar in den afrikanischen Tropen angepflanzt werden. Inzwischen ist Nigeria zum weltgrößten Ma-

niokproduzenten aufgestiegen. Da Viren ihr Erbgut stetig ändern, dürfte auch die neue Resistenz allerdings nicht von Dauer sein. Es kommt deshalb darauf an, der Krankheit durch neue Züchtungen immer einen Schritt voraus zu bleiben.

Zu den gefährlichsten Schädlingen von Maniok im tropischen Afrika zählt die Maniokschmierlaus (*Phenacoccus manihoti*). Das Pflanzensaft saugende Insekt richtete in den 1970er und frühen 1980er Jahren verheerende Schäden an Plantagen und Pflanzschulen an und brachte die Maniokproduktion damit praktisch zum Erliegen. Zu seiner Bekämpfung führten Wissenschaftler des IITA zusammen mit afrikanischen und südamerikanischen Kollegen Ende der 1970er Jahre eine räuberische Wespe aus Südamerika ein. Sie legt ihre Eier im Körper der Schmierlaus ab, und die daraus schlüpfenden Larven fressen den Schädling von innen auf.

Mit dieser Maßnahme ließ sich die Maniokschmierlaus im Großteil der afrikanischen Anbauggebiete während der 1980er und 1990er Jahre weit gehend in Schach halten. Nur in wenigen, kleinen Regionen Zaires blieb der gewünschte Erfolg aus: Fressfeinde der parasitischen Wespe gewannen hier die Oberhand. Mitte des vergangenen Jahrzehnts suchte das brasilianische Team bei wilden *Manihot*-Varianten nach einer besseren Lösung des Problems und fand – wiederum bei

M. glaziovii – tatsächlich Eigenschaften, die einen Parasitenbefall verhindern. Heute pflanzen Kleinbauern rund um Brasília schmierlausresistente Manioksorten an, die bei einem neuerlichen Ausbruch der Plage in andere Länder exportiert werden können.

Für die Zukunft hoffen wir auf weitere vorteilhafte Merkmale durch die Zucht von Chimären: Organismen, die aus zwei oder mehr genetisch unterschiedlichen Geweben bestehen. Davon gibt es zwei Haupttypen in der Botanik. Bei Sektorialchimären verlaufen die unterschiedlichen Gewebe im Spross und in den Organen in Längsrichtung nebeneinander. In diesem Fall kann eine Gewebeart, wenn sie schneller wächst als die andere, diese allerdings überwuchern. In Periklinal- oder Mantelchimären unterscheiden sich dagegen

der äußere und der innere Bereich des Triebes in der genetischen Ausstattung. Sie sind deshalb stabiler. Nassars Gruppe in Brasília arbeitet derzeit an einer Propfmethode, die beständige Periklinalchimären aus dem Gewebe von Maniok und *M. glaziovii* hervorbringt. Solche Mischpflanzen haben sich bereits als besonders ertragreich erwiesen. Außerdem scheinen sie sich gut an trockene Verhältnisse anzupassen.

Fatale Vernachlässigung

Wegen seiner großen Bedeutung für die Welternährung sollte die Agrarforschung dem Maniok eine hohe Priorität einräumen. Doch nur eine Hand voll Laboratorien interessieren sich bisher für die Pflanze. Das könnte daran liegen, dass sie in den Tropen angebaut wird – weit weg vom Arbeitsplatz

Tradition trifft Moderne: Maniokzucht mit Genmarkern

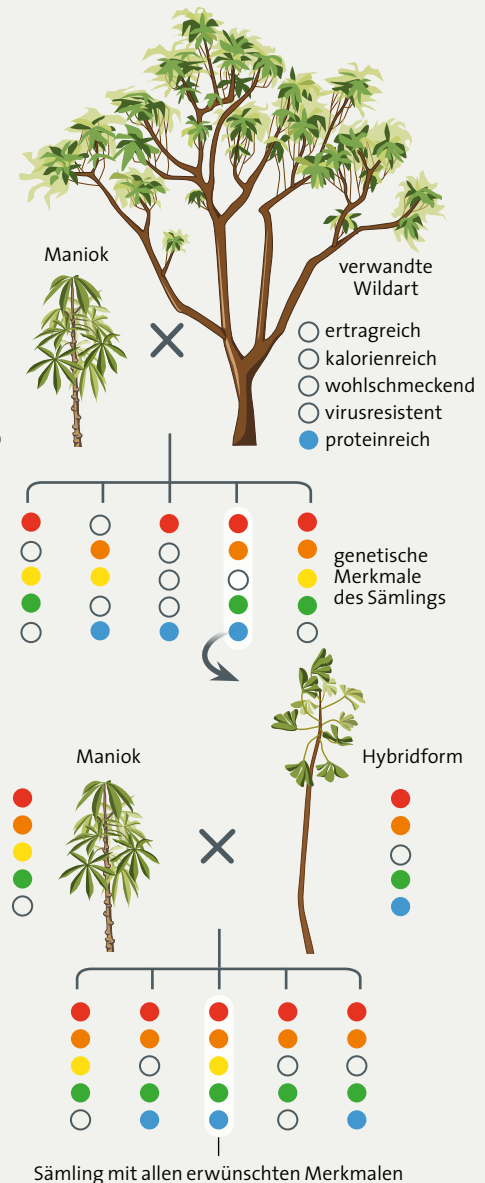


MIT FROL GEN VON FOREST & KIM STARR (WWW.HEAR.ORG/STARR)

Manche wilden Verwandten des Manioks, darunter der baumartige *Manihot glaziovii* (oben), besitzen Merkmale, die auch der Ackerfrucht zugutekämen. Andererseits fehlen ihnen entscheidende Eigenschaften der Kulturpflanze – etwa der hohe Stärkegehalt. Bei der altbewährten Methode der Rückkreuzung erhält der Züchter eine gewünschte Merkmalkombination, indem er viele Generationen von Hybriden herstellt. Dabei können ihm moderne Hilfsmittel die Arbeit erleichtern. Beispielsweise zeigen genetische Marker an, ob ein Samenkorn ein bestimmtes Merkmal enthält, ohne dass es erst zu einer Pflanze heranwachsen muss.

IN VIER SCHRITTEN ZUM ZIEL

- 1 Identifizierung von genetischen Markern für die erwünschten Merkmale, sowohl beim kultivierten Maniok als auch bei einer Wildform (ein farbiger Punkt bedeutet, dass der Marker vorhanden ist)
- 2 Kreuzung und anschließende genetische Untersuchung der Sämlinge auf die entsprechenden Merkmale. Jede der Jungpflanzen weist eine zufällige Merkmalkombination auf.
- 3 Der Hybridsämling mit der günstigsten Merkmalkombination wird zur Pflanze herangezogen und erneut mit Maniok gekreuzt.
- 4 Genetische Untersuchung der resultierenden Sämlinge; einige könnten alle gewünschten Merkmale aufweisen. Meist aber muss über mehrere Generationen rückgekreuzt werden, bis sich die gewünschte Merkmalkombination einstellt.



JESSICA HUPPI

Grüne Gentechnik – nicht zwangsläufig schneller

Die Gentechnik, in der US-Landwirtschaft heute schon weit verbreitet, macht auch vor Maniok nicht Halt. Nennenswerte Fortschritte erzielte hier der internationale Forschungsverbund BioCassava Plus. Durch das Einschleusen von Genen aus fremden Organismen – darunter Algen, Bakterien und andere Pflanzenarten – entstanden neue Maniokvarianten mit einem hohen Gehalt an Zink, Eisen, Proteinen, β -Carotin (eine Vitamin-A-Quelle) und Vitamin E.

»Wir haben unser Ziel erreicht«, sagt Richard Sayre vom Donald Danforth Plant Science Center in St. Louis (Missouri), leitender Forscher bei BioCassava Plus. Alle neuen transgenen Varianten werden derzeit auf Versuchsfeldern in Puerto Rico getestet; auch für Freilandversuche in Nigeria gibt es bereits grünes Licht. Durch traditionelle Zuchtmethoden könne man vielleicht den β -Carotin-Gehalt im Maniok erhöhen, argumentiert Sayre, doch bei Eisen und Zink helfe bisher nur die Gentechnik weiter. Derzeit arbeiten er und sein Team daran, alle neuen Merkmale in einer einzigen Sorte zu vereinen.

Finanziert wird das Projekt von der Bill & Melinda Gates Foundation sowie von Monsanto, einem der weltweit größten Saatguthersteller. Dessen Gelder sind allerdings an Bedingungen geknüpft: Wenn ein Bauer mehr als 10 000 Dollar Brutto-



SHANTHA J. R. PIERIS, BIOCASAVAPLUS.ORG

verdiest im Jahr erzielt, muss er für die transgene Variante bezahlen.

Der Biologe Peter Beyer von der Universität Freiburg bezeichnet die Ergebnisse von BioCassava Plus als Durchbruch. »Trotzdem ist es noch ein weiter Weg bis zum marktreifen Produkt«, schränkt er ein. Beyer muss es wissen: Der mit β -Carotin angereicherte »goldene

Reis«, dessen gentechnische Herstellung er und seine Kollegen im Jahr 2000 verkündeten, zierte zwar damals das Titelblatt des Magazins »Time«, steht aber erst jetzt in einigen wenigen Ländern vor der Zulassung. Auch wenn es schnell gehe, neue Organismen gentechnisch zu erzeugen, erklärt der Forscher, brauche es viel Zeit, ihre Sicherheit für Umwelt und Verbraucher nachzuweisen und Varianten zu züchten, die den geschmacklichen Vorlieben in der jeweiligen Region entsprechen: zehn bis zwölf Jahre seien die Norm. »Die Behörden stellen einfach höhere Anforderungen als bei konventionell gezüchteten Sorten«, sagt Beyer.

Die Gentechnik kommt also nicht zwangsläufig schneller zum Ziel als konventionelle Zuchtmethoden. Außerdem ist sie viel kostenintensiver, und manchmal stellt sich heraus, dass verpflanzte Gene im neuen Organismus nicht so gut funktionieren wie an ihrem Ursprungsort.

Daide Castelvecchi, Redakteur bei »Scientific American«

der meisten Agrarwissenschaftler aus den entwickelten Ländern. Auf Grund dieser stiefmütterlichen Behandlung liegt der jährliche Durchschnittsertrag in Afrika, Süd- und Mittelamerika heute bei lediglich 14 Tonnen pro Hektar. Dabei wären, wie Feldversuche zeigen, bereits geringfügig verbesserte Manioksorten viermal so produktiv und könnten damit viel mehr Menschen ernähren – sowohl in den bisherigen als auch in neu zu erschließenden Anbaugebieten.

Immerhin steigt neuerdings auch in den Industrieländern das Interesse an der Maniokforschung. So stehen Wissenschaftler am Donald Danforth Plant Science Center in St. Louis (USA) an der Spitze eines internationalen Projekts mit dem Ziel, durch Einschleusen artfremder Gene, die von anderen Pflanzen oder gar Bakterien stammen, Nährwert und Haltbarkeit der Pflanze zu verbessern (siehe Kasten oben).

Die Sequenzierung des Maniokgenoms, von dem jetzt eine erste, vorläufige Version vorliegt, sollte diesen Arbeiten einen kräftigen Schub geben. Aber auch konventionelle Zuchtprogramme dürften davon profitieren. Bei der »markerunterstützten Selektion« dienen Erkenntnisse aus der Genomanalyse als Leitfaden zum Herauszüchten erwünschter Merkmale. Ideal wäre der Aufbau eines globalen Netzwerks zur Koordination der Arbeit sämtlicher Institutionen, die über Maniok forschen. Damit sollte es am besten gelingen, das Potenzial der unscheinbaren Knolle voll auszuschöpfen – zum Wohl der Menschen in der Dritten Welt. ~

DIE AUTOREN



Nagib Nassar (links), geboren in Kairo, promovierte an der Universität Alexandria (Ägypten) in Genetik. Seit 1975 erforscht er Maniok an der Universität Brasília. Die von ihm entwickelten Manioksorten wurden von brasilianischen Bauern übernommen sowie für Zuchtzwecke nach Afrika exportiert.

Rodomiro Ortiz stammt aus Lima und hat an der University of Wisconsin in Madison in Pflanzenzucht und -genetik promoviert. Bis vor Kurzem arbeitete er in leitender Position am Internationalen Zentrum für Mais- und Weizenforschung in Texcoco (Mexiko).

QUELLEN

- Nassar, N. M. A., Ortiz, R.:** Cassava Genetic Resources: Manipulation for Crop Improvement. In: Plant Breeding Reviews 31, S. 1–50, 2008
- Nassar, N. M. A. et al.:** Molecular Analysis of Apomixis in Cassava. In: Genetics and Molecular Research 5, S. 487–492, 2006
- Nassar, N. M. A. et al.:** Potentiality of Cassava Cultivars as a Source of Carotenoids. In: Journal of Food Agriculture and Environment 3, S. 33–35, 2005

WEBLINK

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet unter: www.spektrum.de/artikel/1061755

Roboter als Naturforscher

Mittels künstlicher Intelligenz können Maschinen Hypothesen aufstellen, sie experimentell testen und die Resultate bewerten – alles ohne menschliches Zutun. Zwei Prototypen führen bereits vor, wie Automaten wissenschaftlich arbeiten.

Von Ross D. King



ALLE ILLUSTRATIONEN DIESES ARTIKELS: DAVID JOHNSON

Das hier skizzierte »Innenleben« eines Roboterwissenschaftlers umfasst elektronische Steuerelemente, Greifarme und Apparate für das Ausführen von Experimenten. Damit testet der Automat Hypothesen, die er zuvor selbst aufgestellt hat.

Lässt sich wissenschaftliches Forschen automatisieren? Damit meine ich nicht, dass von Menschen erdachte Experimente maschinell ablaufen wie etwa heute bei der DNA-Analyse. Ich frage vielmehr: Ist es möglich, einen Roboterwissenschaftler zu bauen, der selbstständig neue Tatsachen zu entdecken vermag? Meine Kollegen und ich verfolgen seit zehn Jahren dieses Ziel.

Wir haben dabei vor allem zwei Motive. Erstens möchten wir das Wesen der Naturwissenschaft besser verstehen. Um es mit den Worten des berühmten Physikers Richard Feynman auszudrücken: »Was ich nicht erschaffen kann, verstehe ich nicht.«

Unser zweites Motiv ist praktischer Art. Ein funktionierender Roboterwissenschaftler würde produktivere und kostengünstigere Forschung ermöglichen. Manche Probleme sind so komplex, dass sie ungeheuer viel Arbeit erfordern, und dafür gibt es einfach nicht genügend Wissenschaftler. Automation kann hier entscheidend weiterhelfen.

Die Computertechnik für wissenschaftliche Anwendungen wird ständig verbessert, insbesondere die Laborautomation mit hoher Durchsatzleistung für DNA-Sequenzierung und Drogentests. Weniger im Rampenlicht stehen Rechner, welche die Datenanalyse automatisieren und beginnen, eigene wissenschaftliche Hypothesen aufzustellen. In der pharmazeutisch-chemischen Industrie zum Beispiel wirken Programme für maschinelles Lernen bei der Entwicklung von Medikamenten mit. Ein Wissenschaftsroboter muss all diese Techniken kombinieren, um den gesamten Forschungsprozess zu automatisieren: Er bildet Hypothesen, testet sie durch eigenständig entworfene und durchgeführte Experimente, interpretiert die Resultate und wiederholt diesen Zyklus, bis er auf neues Wissen stößt.

Die entscheidende Frage ist natürlich, ob wir solch einen Wissenschaftsautomaten überhaupt zu konstruieren vermögen. Die Fähigkeiten von zwei in unseren Labors entwickelten Geräten sprechen dafür.

In den 1960er und 1970er Jahren setzten Forscher an der Stanford University erstmals künstliche Intelligenz für wissenschaftliche Entdeckungen ein. Ein Computerprogramm namens DENDRAL sollte Massenspektrometerdaten analysieren, und das verwandte Programm Meta-DENDRAL war eines der ersten Systeme für maschinelles Lernen. Die Forscher versuchten Automaten herzustellen, die während der Viking-Mission der amerikanischen Weltraumbehörde NASA im Jahr 1975 auf dem Mars nach Lebensspuren fahnden sollten. Leider überstieg das die damaligen technischen Möglichkeiten. Seither haben Programme wie »Prospector« für Geologie, aber auch »Bacon« für allgemeine Forschung das Aufstellen und experimentelle Testen von Hypothesen automatisiert. Doch meist fehlt die entscheidende Fähigkeit, eigene Experimente selbstständig auszuführen.

Unser Wissenschaftsroboter Adam sieht nicht wie ein Mensch aus, sondern bildet ein komplexes automatisches Labor von der Größe eines kleinen Büroraums (siehe Kasten

S. 91). Die Ausrüstung umfasst unter anderem einen Kühlschrank, drei Vorrichtungen zum Manipulieren von Flüssigkeiten, drei Roboterarme, drei Inkubatoren und eine Zentrifuge – alles automatisiert. Natürlich besitzt Adam auch ein leistungsstarkes Computergehirn, das Schlüsse zieht und die Einzelrechner für die Hardwaresteuerung kontrolliert.

Adam untersucht, wie einzellige Kleinstlebewesen wachsen, indem er bestimmte Mikrobenstämme und Nährstoffe auswählt und dann mehrere Tage lang beobachtet, wie die Kulturen gedeihen. Der Roboter kann pro Tag rund tausend Stamm/Medium-Kombinationen starten. Auf diese Weise erforscht Adam ein wichtiges und gut automatisierbares Gebiet der Biologie, die funktionelle Genomik. Sie untersucht den Zusammenhang zwischen Genen und ihrer Funktion.

An die Arbeit, Adam!

Die erste Testreihe widmete sich der Backhefe *Saccharomyces cerevisiae*, die üblicherweise zur Herstellung von Brot, Bier, Wein und Whisky dient. Biologen nutzen sie als Modellorganismus, um Vorgänge in menschlichen Zellen zu erforschen, denn Hefezellen haben viel weniger Gene und wachsen bereitwillig und schnell. Zwar existierte der letzte gemeinsame Vorfahr von Hefe und Mensch vermutlich vor etwa einer Milliarde Jahre, doch da die Evolution sehr konservativ ist, haben beide Arten von Zellen immer noch viel gemeinsam.

Adam konzentrierte sich auf das ungelöste Problem, wie die Hefe ihre Enzyme – Proteine, die biochemische Reaktionen katalysieren – dazu nutzt, aus dem Nährmedium neue Hefezellen und Abfallprodukte zu machen. Diesen Vorgang verstehen die Wissenschaftler auch nach 150 Jahren Forschung noch nicht ganz. Sie kennen viele Enzyme der Hefe, aber nicht alle für sie kodierenden Gene. Adam sollte diese Wissenslücken schließen.

Um in Neuland vorzustoßen, muss Adam genügend etabliertes Wissen besitzen. Wir programmierten ihm breite Kenntnisse über den Stoffwechsel und die funktionelle Genomik der Hefe ein. Ob Adam damit wirklich über »Wissen« verfügt statt über bloße Information, ist letztlich eine philosophische Frage. Unserer Ansicht nach handelt es sich um

AUF EINEN BLICK

AUTOMATISCHE WISSENSCHAFT

1 Manche Forschungsvorhaben sind so komplex, dass die Experimente untragbar viel menschlichen Arbeitsaufwand erfordern. Hier können **Wissenschaftsroboter** einspringen.

2 Ein Prototyp stellt **Hypothesen über Hefegene** und deren Funktion auf und testet diese experimentell. Mittels **künstlicher Intelligenz** entdeckte der Roboter schon drei Gene, die für ein bestimmtes Hefeenzym kodieren.

3 Skeptiker wenden ein, der Roboter sei kein Wissenschaftler, denn er benötige **menschlichen Input** und gelegentliche Hilfe. Doch auf jeden Fall können Mensch und Roboter gemeinsam mehr erreichen als jeder für sich allein.

Wissen, denn Adam nutzt es, um Schlüsse zu ziehen und mit der materiellen Welt in Wechselwirkung zu treten.

Adams Wissen äußert sich in Form logischer Aussagen. Da die moderne Logik auch als Programmiersprache dienen kann, lässt sich Adams Wissenshintergrund als Computerprogramm interpretieren.

Wir fütterten Adams Programm mit unzähligen Fakten. Ein beliebig herausgegriffenes Beispiel: In der Backhefe kodiert das Gen *ARO3* für ein Enzym namens 3-Desoxy-D-Arabin-Heptulose-7-Phosphat. Dieses Enzym katalysiert eine chemische Reaktion, bei der die Verbindungen Phosphoenolpyruvat und D-Erythrose-4-Phosphat zu 2-Dehydro-3-Desoxy-D-Arabin-Hepton-7-Phosphat plus Phosphat reagieren.

In ihrer Kombination bilden solche Fakten ein Modell des Hefestoffwechsels, das unser Wissen über Gene, Enzyme und Stoffwechselprodukte zusammenfasst. Der Unterschied zwischen einem Modell und einer Enzyklopädie ist, dass ein Modell in ein Computerprogramm umgewandelt werden kann, das aus Daten Vorhersagen ableitet. Wenn ein Forscher methodisch vorgeht, stellt er Hypothesen auf, zieht daraus Schlüsse und überprüft diese im Experiment. Auf gleiche Weise postuliert Adam neue Fakten über Hefebiologie und leitet aus ihnen mit Hilfe seines Stoffwechselmodells Konsequenzen ab. Diese prüft Adam dann im Experiment, um festzustellen, ob seine Prognosen mit den Beobachtungen übereinstimmen.

Zunächst bildet Adam Hypothesen darüber, welche Gene für Enzyme kodieren könnten (siehe Kasten S. 91). Um sich auf die wahrscheinlichsten Vermutungen zu konzentrieren, nutzt Adam seine Wissensdatenbank. Zum Beispiel weiß er, dass das Gen für die 2-Aminoacidipat-Transaminase noch unbekannt ist. Das Enzym katalysiert folgende Reaktion: 2-Oxoacidipat plus L-Glutamat ergibt L-2-Aminoacidipat plus 2-Oxoglutarat. Diese Reaktion – die auch in umgekehrter Richtung abläuft – ist wichtig, da sie ein mögliches Ziel für Medikamente gegen Pilzbefall darstellt. Welches Hefegen könnte nun für das Enzym kodieren? Adam befragte zuerst seine Wissensbasis, ob irgendwelche Gene anderer Orga-

nismen für das Enzym kodieren. Diese Suche ergab einen Treffer: Bei der Wanderratte *Rattus norvegicus* erfüllt ein Gen namens *Aadat* diese Funktion.

Der Roboter untersuchte nun, ob im Hefegenom Proteinsequenzen kodiert sind, die dem Rattenenzym ähneln. Adam weiß: Wenn Sequenzen einander genügend entsprechen, sind sie vermutlich homolog – das heißt, sie stammen von einem gemeinsamen Vorfahren ab. Adam weiß auch, dass bei solchen Proteinsequenzen die Funktion des gemeinsamen Vorfahren wahrscheinlich erhalten geblieben ist. Somit darf Adam aus ähnlichen Sequenzen folgern, dass die für sie kodierenden Gene dieselbe Aufgabe haben.

Der Automat erinnert Hypothesen

Adam fand drei Hefegene, deren Sequenzen *Aadat* ähnelten: *YER152c*, *YJL060w* und *YJL202w*. Er vermutete nun, dass jedes dieser Gene für das Enzym 2-Aminoacidipat-Transaminase kodiert. Um diese Hypothese zu prüfen, führte Adam zahlreiche Laborexperimente durch. Er züchtete bestimmte Hefekulturen aus einer umfangreichen Sammlung in seinem Kühlschrank, bei der jedem Stamm ein bestimmtes Gen fehlt. Der Roboter untersuchte das Wachstum von drei Hefestämmen, denen jeweils eines der Gene *YER152c*, *YJL060w* und *YJL202w* fehlte, und zwar unter Beimengung von Chemikalien wie L-2-Aminoacidipat, die an der vom Enzym katalysierten Reaktion teilnehmen.

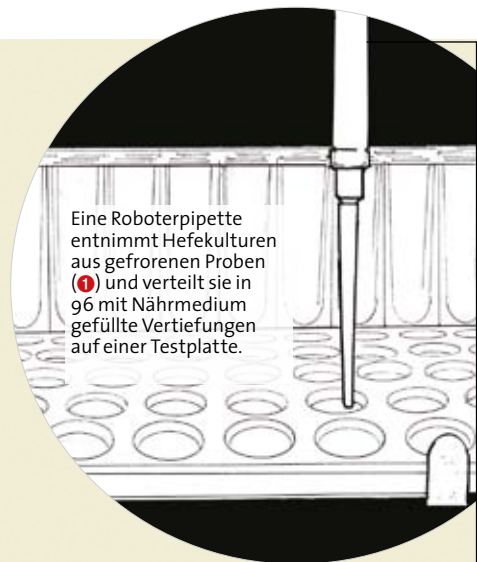
Nun galt es, mit den Kulturen zu experimentieren. Forschungsgelder sind immer knapp, und Wissenschaftler wetteifern darum, wer als Erster ein Problem löst. Darum programmierten wir Adam darauf, effiziente Experimente auszuhecken, welche die Hypothesen billig und schnell testen. Hierzu nimmt Adam an, dass jede Hypothese mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit wahr ist. Diese Annahme ist umstritten; Karl Popper und andere Philosophen negieren, dass man einer Hypothese eine Wahrscheinlichkeit zuordnen kann. Doch in der Praxis unterstellen die meisten Forscher stillschweigend, dass bestimmte Typen von Hypothesen eher zutreffen als andere. Zum Beispiel befolgen sie meist das Prinzip von Ockhams Rasiermesser: Unter gleichen Umständen ist eine einfache Erklärung eines Phänomens wahrscheinlicher als eine komplizierte. Adam betrachtet auch die Kosten eines möglichen Experiments – vorläufig nur den Preis der verwendeten Chemikalien. Ein präziserer Ansatz würde auch den Zeitaufwand berücksichtigen.

Wenn dann mehrere Hypothesen mit zugeordneten Wahrscheinlichkeiten sowie eine Liste möglicher Experimente mit entsprechenden Kosten vorliegen, soll Adam jene Versuche auswählen, die zu minimalen Kosten alle Hypothesen bis auf eine eliminieren. Diese Aufgabe optimal zu lösen, ist rechnerisch äußerst schwierig. Doch unseren Analysen zufolge wählt Adams angenäherte Strategie immerhin Experimente aus, welche die Probleme preiswerter und rascher lösen als andere Vorgehensweisen, etwa als die simple Wahl des billigsten Experiments. Manchmal vermag Adam sogar ein Experiment zu entwerfen, das Licht auf viele Hypothesen



Ein Roboter für die Biologie

Adam, ein Wissenschaftsroboter an der Aberystwyth University in Wales, untersucht den Zusammenhang zwischen Genen und ihren Funktionen. Zunächst stellt er mittels künstlicher Intelligenz 20 Hypothesen auf, welche Gene für Enzyme kodieren, die zum Wachstum von Hefe nötig sind. Dann führt Adam Tausende von Experimenten durch, um herauszufinden, ob seine Hypothesen richtig oder falsch sind. Sein Vorgehen umfasst insgesamt sieben Phasen:



Eine Roboterpipette entnimmt Hefekulturen aus gefrorenen Proben (1) und verteilt sie in 96 mit Nährmedium gefüllte Vertiefungen auf einer Testplatte.

1 PROBENVORBEREITUNG
Ein Roboterarm entnimmt gefrorene Hefeproben und mischt auf Testplatten spezifische Kulturen mit Nährmedium (Teilbild oben rechts).

2 HEFEWACHSTUM
Ein Inkubator wärmt die Platten 24 Stunden lang. Alle 40 Minuten schiebt ein Roboterarm jede Platte in ein Kontrollgerät, welches das Wachstum optisch überwacht (Teilbild unten links).

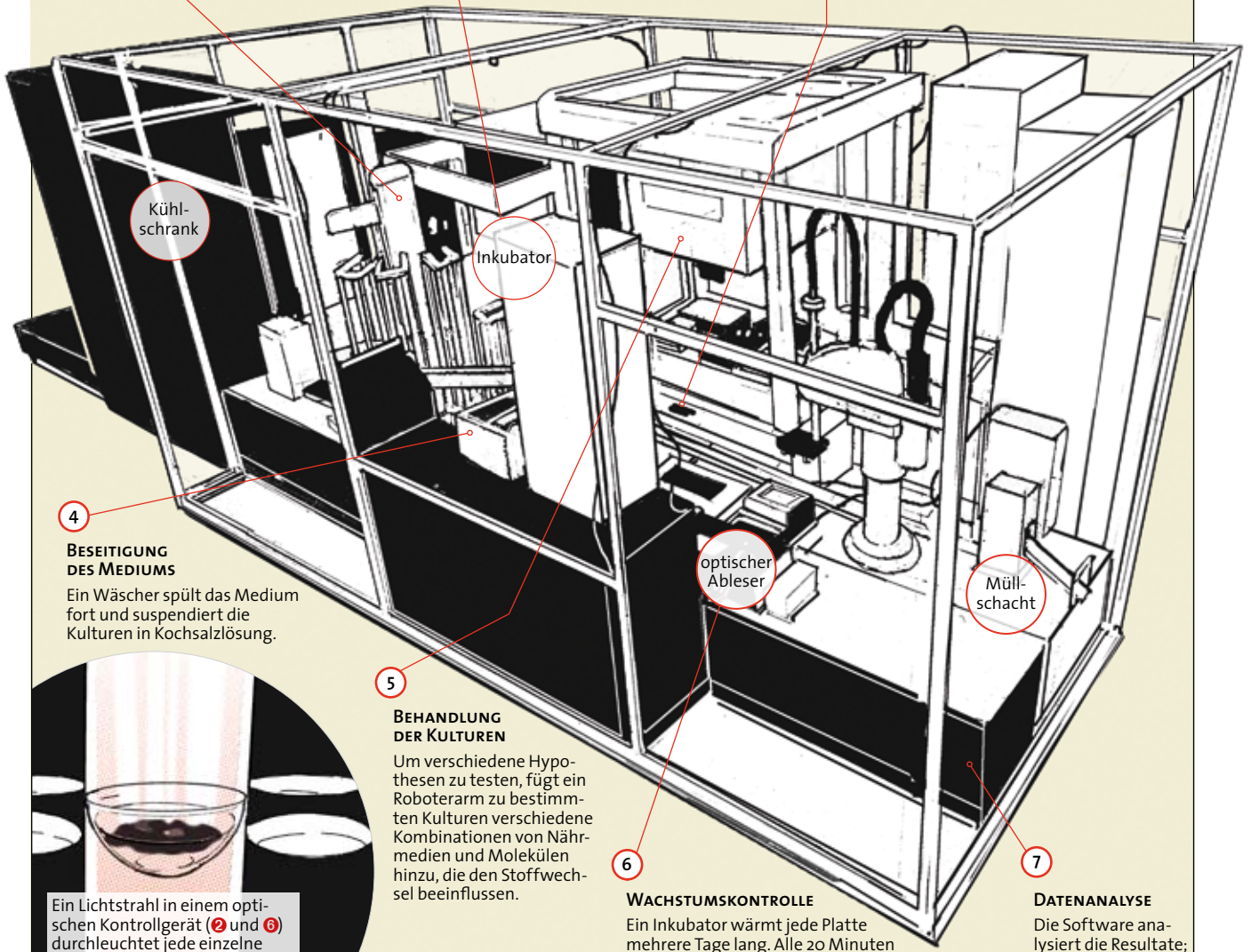
3 ABTRENnung DER ZELLEN
Eine Zentrifuge trennt die Hefe vom übrigen Medium.

4 BESEITIGUNG DES MEDIUMS
Ein Wäscher spült das Medium fort und suspendiert die Kulturen in Kochsalzlösung.

5 BEHANDLUNG DER KULTUREN
Um verschiedene Hypothesen zu testen, fügt ein Roboterarm zu bestimmten Kulturen verschiedene Kombinationen von Nährmedien und Molekülen hinzu, die den Stoffwechsel beeinflussen.

6 WACHSTUMSKONTROLLE
Ein Inkubator wärmt jede Platte mehrere Tage lang. Alle 20 Minuten schiebt ein Roboterarm die Platten in ein Kontrollgerät, das die Wachstumsdaten an einen Computer sendet.

7 DATENANALYSE
Die Software analysiert die Resultate, das kann mehrere Stunden dauern.



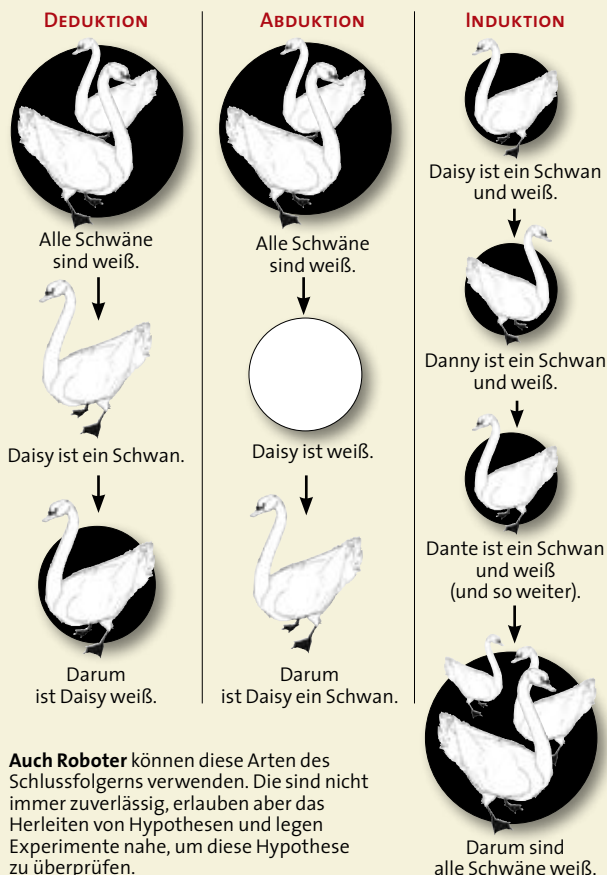
Ein Lichtstrahl in einem optischen Kontrollgerät (2) und (6) durchleuchtet jede einzelne Testkultur. Die durchgelassene Lichtmenge zeigt an, wie viel Hefe entstanden ist.

Wie räsonieren Roboter?

Wie zieht ein Wissenschaftsroboter Schlüsse? Wie ein Mensch hat er dazu drei Möglichkeiten. Die erste ist die *Deduktion*, auf der Mathematik und Informatik beruhen. Sie ist zuverlässig: Aus einer wahren Aussage können nur wieder wahre Aussagen folgen. Leider vermag die Deduktion nur Folgerungen aus bereits bekannten Sätzen zu ziehen.

Die zweite Option, die *Abduktion*, ist nicht zuverlässig: Aus »Alle Schwäne sind weiß« folgt nicht zwingend, dass jeder weiße Gegenstand auch ein Schwan ist. Immerhin lassen sich per Abduktion Hypothesen erzeugen, die wahr sein könnten. Wenn Roboter Adam mutmaßt, Daisy sei ein Schwan, dann wird er die Wahrheit dieser Behauptung empirisch entscheiden, indem er Daisy einfängt und nachprüft, ob sie ein Schwan, ein Tischtennisball oder etwas anderes ist.

Auch die *Induktion* liefert neue Hypothesen. Wenn jeder Schwan, den wir sehen, weiß ist, dann liegt es nahe, daraus zu folgern, dass alle Schwäne weiß sind. Aber die Induktion ist nicht zuverlässig, wie die Entdeckung schwarzer Schwäne in Australien zeigte. Im Alltag verwenden wir die Induktion ständig. Sie versichert uns, dass morgen die Sonne aufgehen und unser Frühstück uns nicht vergiften wird. Doch die Rolle der Induktion in der Wissenschaft ist umstritten, denn ihre Hauptrechtfertigung ist, dass sie meist funktioniert – und das ist selbst eine Induktion.



wirft. Menschliche Forscher haben damit Mühe; sie neigen dazu, eine Hypothese nach der anderen zu betrachten.

Sobald Adams künstliche Intelligenz die günstigsten Experimente ausgesucht hat, führt er sie mit Hilfe seiner robotischen Bestandteile aus und registriert die Resultate. Er kann allerdings Gene oder Enzyme nicht direkt beobachten, sondern nur, wie viel Licht die Hefekulturen durchlassen. Aus diesen Daten schließt Adam mittels komplizierter logischer Folgerungen, ob der Befund mit Hypothesen über Gene und Enzyme übereinstimmt oder nicht. Solche Verfahren sind für Wissenschaftler typisch; beispielsweise schließen Astronomen aus der Strahlung, die sie mit ihren Instrumenten beobachten, auf Vorgänge in fernen Galaxien.

Auch ein Roboter lernt dazu

Den Wert der Hypothesen einzuschätzen fiel Adam besonders schwer, denn Forscher hatten bereits all jene Gene entdeckt, deren Stilllegung das Hefewachstum deutlich verändert. Das Entfernen anderer Gene erzeugt meist nur geringe Wachstumsunterschiede. Um zu entscheiden, ob eine dieser kleinen Abweichungen signifikant ist, verwendet der Roboter raffinierte Verfahren maschinellen Lernens.

Adam generierte 20 Hypothesen darüber, welche Hefegene für spezifische Enzyme kodieren, und bestätigte sie danach experimentell. Da wir unserem Forschungsroboter nicht trauten, überprüften wir seine Schlussfolgerungen anhand anderer Informationsquellen und eigenhändig durchgeführter Experimente. Wie wir feststellten, waren sieben von Adams Schlüssen schon bekannt, einer schien falsch zu sein – und zwölf erbrachten tatsächlich neue Erkenntnisse.

Unsere manuellen Experimente bestätigten zudem, dass die drei Gene *YER152c*, *YJL060w* und *YJL202w* in der Tat für das Enzym 2-Aminoacidat-Transaminase kodieren. Wahrscheinlich wurde die Rolle dieser Gene nicht früher entdeckt, weil sie den Bauplan für dasselbe Enzym enthalten und das Enzym eine Serie verwandter Reaktionen auszulösen vermag; darum war die sonst übliche einfache Zuordnung eines Gens zu einem Enzym hier nicht möglich. Erst Adams sorgfältiges Experimentieren und seine statistischen Analysen konnten die Komplikationen beseitigen.

Doch darf man Adam tatsächlich als Wissenschaftler bezeichnen? Letztlich geht es dabei um die Frage, ob er autonom neues Wissen entdeckt hat. Gewiss, wir können Adam nicht einfach in Gang setzen und ein paar Wochen später wiederkommen, um seine Schlussfolgerungen zu untersuchen. Die Maschine ist ein Prototyp, und immer wieder muss ein Techniker eingreifen, um Fehler in der Hardware und Software zu beheben. Auch arbeiten die Softwaremodule ohne menschliche Hilfestellung noch nicht problemlos zusammen. Trotzdem: Wenn Adam Hypothesen bildet und neues Wissen experimentell bestätigt, benötigt er keine intellektuelle oder körperliche Anstrengung seitens des Menschen. In diesem Sinn arbeitet er autonom.

Die Frage, ob man bei einem Roboter von »entdecken« sprechen darf, erinnert an ein Argument aus dem England

des 19. Jahrhunderts: Lady Ada Lovelace (1815–1852), Tochter des romantischen Poeten Lord Byron, arbeitete damals eng mit Charles Babbage (1791–1871) bei der Programmierung der »Analytical Engine« zusammen, eines mechanischen Vorläufers heutiger Computer. Sie schrieb, die Rechenmaschine habe »keinen Anspruch, etwas zu *schaffen*. Sie kann *tun, was immer wir ihr zu befehlen wissen*« (ihre Hervorhebungen). 100 Jahre später widersprach der berühmte Computerwissenschaftler Alan M. Turing (1912–1954) diesem Argument, indem er Rechner mit Kindern verglich. Da auch Lehrer nicht das gesamte Verdienst für Entdeckungen ihrer Schüler einheimen könnten, sei es unfair, wenn wir Menschen uns das Verdienst für die Ideen unserer Maschinen zuschreiben. Demnach könnte man wohl auch bei Adam den Begriff »entdecken« verwenden. Solche Argumente sind kommerziell folgenreich; zum Beispiel kann im herrschenden Patentrecht nur eine »Person« etwas »erfinden«.

Ist Adam ein Wissenschaftler?

Wie innovativ ist Adams Wissenschaft? Einige Bezüge zwischen Genen und Enzymfunktionen bei der Backhefe, die Adam vermutete und experimentell bestätigte, sind gewiss neu. Dieses Wissen ist zwar bescheiden, aber nicht trivial. Natürlich könnten sich einige von Adams Schlüssen später einmal doch als falsch herausstellen – wissenschaftliche Erkenntnisse sind nun einmal vorläufig –, doch wahrscheinlich nicht alle. Adams Resultate wurden 2009 veröffentlicht, und seither hat niemand darin einen Fehler entdeckt. Soweit ich weiß, haben allerdings noch keine Forscher außerhalb meiner Gruppe versucht, Adams Ergebnisse zu reproduzieren.

Um festzustellen, ob Adam ein Wissenschaftler ist, könnte man auch seine Methode der Hypothesenbildung verallgemeinern. Daher begannen wir einen zweiten Roboter zu bauen. Eva wendet dieselben automatisierten Forschungszyklen wie Adam auf das Entwickeln und Testen von Medikamenten an – eine medizinisch wie kommerziell wichtige Aufgabe. Ihre Forschungen konzentrieren sich auf die Tropenkrankheiten Malaria, Schistosomiasis, Schlafkrankheit und Chagas-Krankheit. Wir arbeiten noch an Evas Software; dennoch hat der Roboter bereits einige interessante Verbindungen gefunden, die gegen Malaria zu wirken scheinen.

Manche Forscher verfolgen ähnliche Ansätze wie wir. Hod Lipson von der Cornell University in Ithaca, US-Bundesstaat New York, verwendet automatisiertes Experimentieren, um die Konstruktion mobiler Roboter zu verbessern und dynamische Systeme zu verstehen. Andere versuchen, Wissenschaftsroboter für Chemie, Biologie und Ingenieurtechnik zu entwickeln. Mehrere Gruppen, darunter auch wir, wollen quantenphysikalische Forschungen automatisieren, insbesondere die Steuerung von Quantenprozessen. Herschel A. Rabitz von der Princeton University in New Jersey setzt dabei Laserpulse von nur 10^{-15} Sekunden Dauer ein, um gezielt chemische Bindungen herzustellen oder aufzubrechen.

Falls wir akzeptieren, dass Roboter Wissenschaftler sein können, wüssten wir gern, wo ihre Grenzen liegen. Dafür ist

ein Vergleich mit Computerschach aufschlussreich. Computer können mit den besten menschlichen Spielern konkurrieren. Das ist möglich, weil Schach eine begrenzte, abstrakte Welt aus 64 Feldern und 32 Figuren bildet. Wissenschaft zu automatisieren ist viel schwieriger, weil das Experimentieren in der materiellen Welt stattfindet. Dennoch vermute ich, dass es einfacher sein wird, qualitativ hoch stehende Wissenschaftsroboter zu entwickeln als Systeme mit künstlicher Intelligenz, die mit Menschen sozial interagieren können. In der Naturwissenschaft darf man davon ausgehen, dass die materielle Welt einen nicht absichtlich zu täuschen versucht – in der Gesellschaft gilt das nicht.

Mit fortschreitender Computertechnik und künstlicher Intelligenz werden immer gewieftere Roboterwissenschaftler entstehen. Ob sie jemals zu umwälzenden Erkenntnissen oder immer nur zur Routineforschung fähig sein werden, ist eine Grundfrage über die Zukunft der Naturwissenschaft. Einige führende Forscher wie der Physik-Nobelpreisträger Philip Anderson meinen, durch Automatisierung sei keine wissenschaftliche Revolution zu erreichen. Doch Frank Wilczek, ebenfalls Physik-Nobelpreisträger, behauptet, in 100 Jahren würde der beste Physiker eine Maschine sein. Die Zukunft wird zeigen, wer Recht behält.

So oder so dürften künftig Netze von Menschen und Robotern wissenschaftlich zusammenarbeiten. Sie werden Erkenntnisse logisch beschreiben und durch das Internet verbreiten. Allmählich werden Roboter eine immer größere Rolle für den wissenschaftlichen Fortschritt spielen. ~

DER AUTOR



Ross D. King ist Informatikprofessor an der Aberystwyth University in Wales. Er beschäftigt sich mit Wissenschaftstheorie und entwickelt Methoden zur Anwendung der Informatik in Chemie und Biologie.

QUELLEN

Carnap, R.: An Introduction to the Philosophy of Science. Von Gardner, M. (Hg.). Dover, New York 1995

King, R. D. et al.: The Automation of Science. In: Science 324, S. 85–89, 2009

Rose, S.: The Chemistry of Life. Penguin, London, 4. Auflage 1999

WEBLINKS

<http://loebner.net/Prize/TuringArticle.html>

Alan Turlings klassischer Artikel: Turing, A.M.: Computing Machinery and Intelligence. In: Mind 59, S. 433–460, Oktober 1950

http://profiles.nlm.nih.gov/BB/A/L/Y/P/_bbalyp.pdf

Artikel über das erste Computerprogramm, das mittels künstlicher Intelligenz Forschung trieb

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1061757



Darlene Trew Crist, Gail Scowcroft,
James M. Harding
Schatzkammer Ozean
Volkszählung in den Weltmeeren
Aus dem Englischen von Claudia Huber.
Spektrum Akademischer Verlag,
Heidelberg 2010. 256 S., € 39,95

MEERESBIOLOGIE

Zählt die Fische, solange es sie noch gibt!

Der groß angelegte Census of Marine Life hat eine Fülle von Neuentdeckungen erbracht – und unsere Sorgen um die Zukunft des Lebens im Meer noch verstärkt.

Das Volumen der Weltmeere umfasst zwar 99 Prozent der Biosphäre, aber nur fünf Prozent dieses gigantischen Lebensraums sind auch nur einigermaßen bekannt. Solche unerforschten Weiten rufen geradezu nach einem US-amerikanischen Großprojekt – wie einst der Weltraum.

So begab es sich, dass sich auf amerikanische Initiative hin 2700 Forscher aus 82 Nationen in einem bislang einzigartigen Netzwerk zusammenschlossen: dem Census of Marine Life, einer ersten großen »Volkszählung« der Lebensformen in den Weltmeeren. Nicht alle eingebundenen Projekte sind neu, wohl aber die internationale Vernet-

zung sowie die Veröffentlichung der Daten samt Fotos auf einer in Teilen allgemein zugänglichen Onlinedatenbank (www.coml.org; <http://iobis.org/home>).

Die auf zehn Jahre angelegte Datensammlung sollte herausfinden, welche Spezies die Meere bevölkern – und das, soweit möglich, auch für die Vergangenheit und die Zukunft. Die Beantwortung dieser Fragen eilt: Es gilt einen Zustand festzuhalten, der voraussichtlich schon in naher Zukunft der Vergangenheit angehören wird. Ölkatastrophen, Übersäuerung, Überfischung, pazifische Müllstrudel, Todeszonen und Korallenbleichen sind nur einige der beängstigendsten Stichwörter.



Röhrenwürmer (*Lamellibrachia luymesii*) tragen rote Federkiemen; sie leben in buschähnlichen Ansammlungen in der Nähe von Öl- und Gasquellen.

Im vergangenen Jahr ist das Projekt zu Ende gegangen. Eine zuverlässige Schätzung für die Anzahl der Arten und der Individuen, die im Meer leben, ist dabei nicht herausgekommen – aber eine geradezu überwältigende Vielfalt an Entdeckungen: Seit Beginn der Feldarbeiten wurden 28 Millionen Nachwuchs mariner Lebensformen gesammelt, 6000 von wahrscheinlich neuen Arten. Mehr als 2000 Publikationen sind bereits aus dem Projekt hervorgegangen. Kein Zweifel: Der Census of Marine Life schreibt derzeit Geschichte in der Entdeckung der Meere.

Das vorliegende Buch bietet einen Einstieg in die Census-Forschung und viele spektakuläre Fotos von den Forschungsarbeiten und den Meeresbewohnern. Bei manchen neu entdeckten Arten sind es die ersten Bilder, die überhaupt veröffentlicht wurden. Für die Wissenschaftsjournalistin Darlene Trew Crist sowie die Meereskundler Gail Scowcroft und James M. Harding dürfte die größte Herausforderung darin bestanden haben, aus der Flut der Daten eine sinnvolle Vorabzusammenfassung herauszufiltern.

Entsprechend den drei Fragen des Census-Projekts ist ihr Buch in drei Teile gegliedert. Der Text des ersten Teils »Was lebte im Meer?« erörtert zunächst Entstehung und Hintergründe des Projekts sowie die Schwierigkeiten bei der Erforschung des Lebensraums Meer, bevor er zum Thema kommt: Wie sah das Meer aus, bevor es wirtschaftlich genutzt wurde? Historische Referenzlinien für das, was als natürlich gelten kann, sind wichtig sowohl für die Forschung als auch für das Fischereimanagement. Wie will man sonst die seit her eingetretene Änderung in Zahl und Vorkommen von Arten einschätzen oder beurteilen, ob ein Fischbestand sich tatsächlich erholt hat? Besonders schwierig war dabei die Beschaffung auswertbarer Daten aus ferner Vergangenheit. Die Forscher griffen hierzu auf Fangstatistiken, Logbücher und sogar Speisekarten zurück.

Die ersten Ergebnisse der ausgewerteten Fallstudien zwingen uns, das, was derzeit als »natürlich« gilt, zu überden-

ken. Das Wattenmeer, so fanden die Forscher heraus, ist bereits 1000 Jahre länger als bislang angenommen vom Menschen geprägt. Die großen Flussästuare (von den Gezeiten beeinflusste Mündungsbereiche) haben 90 Prozent ihres Artenreichtums eingebüßt. Wirtschaftlich genutzte Spezies haben in Größe und Zahl stärker abgenommen als vermutet. Der Niedergang der Kabeljau- und Tunfischbestände in den letzten Jahrzehnten ist nur ein Beispiel für das Schicksal, das wahrscheinlich auch weniger bekannte Arten bereits ereilt hat.

Im zweiten und umfangreichsten Teil »Was lebt im Meer?« stellen die Autoren zunächst die in der Censuforschung eingesetzte Technik vor. Verschiedene Unterwasserfahrzeuge, neue Anwendungen der Sonartechnik, Rekorder, die das durch sie hindurchgespülte Plankton ablichten, während sie durchs Wasser gezogen werden, Biologger, die, einmal an einem Tier angebracht, nicht nur dessen Position, sondern ständig Daten über das umgebende Milieu an einen Satelliten übermitteln – von all dem konnten Forscher vor einigen Jahren nur träumen. Kein Wunder, dass sie heute zu neuen Ergebnissen kommen. So stellte sich unter anderem heraus, dass die Überlebensrate für flussabwärts wandernde Junglachse in hindernisreichen Flüssen genauso hoch ist wie in frei fließenden Flusssystemen. Dagegen scheint der Zustand angrenzender Meeresabschnitte viel kritischer zu sein.

In den Polarregionen, wo sich der Klimawandel besonders dramatisch auswirkt, waren 50 bis 95 Prozent aller Arten, die unterhalb 3000 Meter gefunden wurden, zuvor unbekannt. Vor allem gilt das für die antarktischen Gewässer: In den letzten Jahren erbrachten gerade mal drei Expeditionen mehr als 700 potenziell neue Arten. Moderne molekularbiologische Techniken wie die DNA-Etikettierung erlauben zwar eine schnelle Abgrenzung von bereits bekannten Spezies. Die wissenschaftliche Beschreibung neuer Arten ist aber ein zeit- und arbeitsaufwändiger Prozess – und so werden manche der Funde unbeschrieben bleiben. Zu Beginn der Zählung waren 230 000 im Ozean lebende

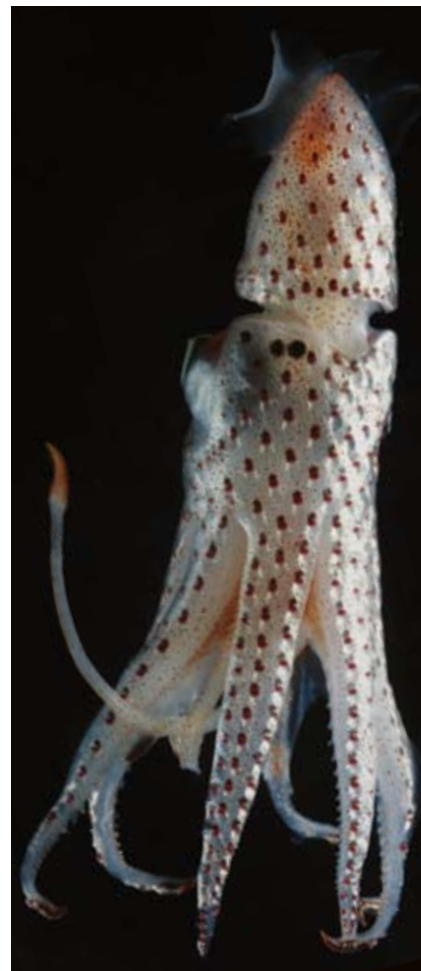


Oben ein Federstern aus dem Kanadischen Becken; rechts ein Tintenfisch (*Histioteuthis bonelli*) aus der Tiefe des Nordatlantiks

Tierarten bekannt. Nun sind sich die Forscher sicher, dass es mindestens 250 000 sind; und verschiedenen Schätzungen zufolge warten noch zwischen 200 000 und zwei Millionen weitere Spezies von Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen auf ihre Entdeckung. Allein deren Beschreibung dürfte etwa fünf Jahrhunderte in Anspruch nehmen, meint einer der beteiligten Forscher. Wenn sie denn rechtzeitig gefunden werden.

Der Census beschreibt die regional unterschiedliche Verteilung verschiedener Arten und modelliert die Auswirkungen von Fischerei, Klimawandel und anderen Schlüsselfaktoren für die Zukunft. Der Bildband greift im letzten Teil »Was wird im Meer leben?« einzelne dieser Auswirkungen heraus. Forscher gehen davon aus, dass wir derzeit Zeugen des bislang größten Massenaussterbens der Erdgeschichte sind und möglicherweise die Hälfte aller vorkommenden Arten in den nächsten 100 Jahren verschwinden wird.

Der industrielle Fischfang führt zunächst zur »kommerziellen Ausrottung« gewisser Arten: Die Restbestände schrumpfen auf eine wirtschaftlich uninteressante Größe. Darüber hinaus können sie ihre ökologische Nische nicht mehr ausfüllen, und es kommt zu Verschiebungen im gesamten Nahrungsnetz. Eine der Fallstudien dokumentiert den Niedergang der großen Haie. Durch die Ausrottung dieser *top predators*, Räuber an der Spitze der



Nahrungskette, nahm die Zahl ihrer Beutetiere, vor allem Rochen, explosionsartig zu. Das dezimierte deren Lieblingsspeise, die Muscheln, so stark, dass die Muschelfischerei in mehreren Gegenden bereits zum Erliegen kam. Es zeichnet sich auch ab, wer in Zukunft von sauerstoffarmen und wärmeren Meeren profitieren könnte: Schon ist in einigen Meeresabschnitten eine »Verquallung« zu beobachten.

Die große Stärke des Buchs sind die fantastischen Fotos. Auch enthalten die Bildunterschriften oft interessante Details zur abgebildeten Art. Der Text folgt leider nur sehr grob der Einteilung in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft; stattdessen zerfällt er stellenweise in eine Aneinanderreihung von Forschungsansätzen und Ergebnissen. Angesichts der Vielzahl der Entdeckungen überrascht eine gewisse Dichte nicht. Es kommt jedoch auch relativ häufig zu Wiederholungen, was vorteilhaft ist, wenn der Leser sich nur einzelne Kapi-

tel vornimmt, am Stück gelesen jedoch eher langweilt. Außerdem schimmern noch Amerikanismen und um Aufmerksamkeit werbende Floskeln durch, die eher in eine Pressemeldung passen. Vermutlich hätte hier eine Straffung dem Inhalt gutgetan.

Abgeschlossene Sachverhalte wie Meeresströmungen, das Leben in ver-

schiedenen Lebensräumen wie kalten Quellen oder Tiefseebergen und der mühsame Prozess der Beschreibung neuer Arten sind dagegen interessant und gut verständlich geschildert.

Für Meermenschen ist die Beschäftigung mit den Ergebnissen des Mammutprojekts Census of Marine Life ein Muss. Das Buch bietet einen inspirie-

renden Einstieg. Doch macht es auch klar: Auf dem Gipfel der Erkenntnis sind die Census-Forscher noch lange nicht. Aber sie haben bereits mehr gefunden, als sie zu hoffen wagten.



Hans-Heinrich Körle

Die phantastische Geschichte der Analysis

Ihre Probleme und Methoden seit Demokrit und Archimedes. Dazu die Grundbegriffe von heute

Oldenbourg, München 2009.

217 S., € 24,80

MATHEMATIK

Von Trompeten und Enveloppen

Hans-Heinrich Körle unternimmt eine anspruchsvolle Zeitreise zurück zu den Wurzeln der Analysis.

Beim ersten Aufschlagen überka-
men mich nostalgische Gefühle: Die »Phantastische Geschichte der Analysis« versprüht mit ihrem mathematischen Minimalismus den Charme meiner Lehrbücher aus alten Studententagen. Welch ein Kontrast zu den heute üblichen bunten populärwissenschaftlichen Darstellungen des Fachs!

Hans-Heinrich Körle, Professor für Mathematik in Marburg, schreibt für ein Publikum, das nicht erst für das Fach begeistert werden will, sondern weit in inhaltliche Tiefen vordringen möchte. Und das mit großem Erfolg: Noch kein anderes Buch hat mir so viele neue und spannende Fassetten der Mathematik vermittelt. Aber »ganz ohne Mühe gibt es sie nicht, die Freude am Erkennen und Entdecken!«, schickt der Autor gleichsam entschuldigend voraus – und lässt dann die Formeln auf den Leser einprasseln.

Besonderen Wert legt er darauf, die wissenschaftlichen Entwicklungen in den historisch-gesellschaftlichen Kon-

text einzuordnen. Dies komme im Lehrbetrieb viel zu kurz, und so möchte er insbesondere Studienanfängern seinen Text als Ergänzung ans Herz legen.

Das Buch besteht aus zwei annähernd gleich großen Teilen: einer Geschichte der Analysis sowie einer Sammlung von »Arbeitsproben« berühmter Forscherpersönlichkeiten. Beide Teile lassen sich problemlos unabhängig voneinander lesen. Im geschichtlichen Teil beschreibt der Autor zumeist auch das Leben der bedeutendsten Fachvertreter. Der Schwerpunkt liegt jedoch eindeutig auf der Erklärung fachlich-mathematischer Hintergründe.

Die Wurzeln der Analysis sucht Körle bei den Griechen der Antike, auch wenn diese sich seinerzeit von den Gelehrten Ägyptens und Babylons inspirieren ließen. Nach dem Niedergang ihrer Mathematik verstrichen einige Jahrhunderte. Erst in der Renaissance nahm das Fach einen neuen Aufschwung, der sich nach der kopernikanischen Wende gewaltig beschleunigte. Nach etlichen

Meilensteinen wie dem Prioritätenstreit zwischen Leibniz und Newton endet die Darstellung um 1900 mit der arithmetischen Begründung der Irrationalzahlen.

Unter der Überschrift »Aus Schatztruhe und Trickkiste« versammelt Körle im zweiten Teil des Buchs, wieder chronologisch angeordnet, bedeutende Sätze und Beweise aus allen Epochen der Analysis. Archimedes (287–212 v. Chr.) ist mit mehreren Kunststücken vertreten. Kuriositäten sind darunter wie Torricellis Trompete, jener Körper, der zwar eine unendliche Oberfläche, aber nur ein endliches Volumen hat. Und wo sonst erfährt der interessierte Leser wohl etwas über Enveloppen?

Beide Teile zusammengenommen bieten ein sehr detailliertes Bild von der Entwicklung der Analysis. Oberstufenkenntnisse sollten für die Lektüre eigentlich ausreichen, doch wichtiger sind Interesse und Spaß am Wesen der Mathematik. Die zahlreichen Skizzen unternehmen nicht den geringsten Versuch, das Auge des Betrachters zu erfreuen, sind aber ausgesprochen hilfreich. Ein ausführliches Literaturverzeichnis, eine Zeittafel mit Lebensdaten entscheidender Wegbereiter sowie ein erschöpfender Index runden dieses durchweg gelungene Buch ab.

»Die phantastische Geschichte der Analysis« eignet sich nicht als Lektüre während der Bahnfahrt. Wer aber bereit ist, etwas Zeit und Muße zu investieren, dem sei das Buch aus vollem Herzen empfohlen!

Christoph Marty

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Bonn.

UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



GEHIRN&GEIST 3/2011

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

- >> Der Wert der Spiritualität: Wie Sinnsuche die Psyche stärkt
- >> Produkt-Design: Was Autos und Möbel attraktiv macht
- >> Lernen: So bleiben Schüler konzentriert
- >> Optogenetik: Forscher steuern Neurone per Licht
- >> Hirntumoren: Stammzellen können Krebs auslösen

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



G&G-DOSSIER 1/2011 »KONZENTRATION UND GEDÄCHTNIS«

Vermutlich kennt jeder Situationen, in denen ein Fitmacher für die mentale Leistungsfähigkeit genau das Richtige wäre. Die **G&G**-Redaktion verfolgt die Entwicklungen auf diesem Gebiet seit Jahren und bat Experten, über den aktuellen Stand der Forschung zu berichten: Was wissen wir über Wirkung von Substanzen wie Donepezil, Methylphenidat oder Modafinil, wenn sie nicht zur Bekämpfung von Krankheiten wie Demenz oder ADHS eingenommen werden, sondern das Gehirn auf Trab bringen sollen? Welche Folgen hätte es für jeden Einzelnen und die Gesellschaft, wenn Hirndopingmittel in jeder Drogerie frei erhältlich wären? Und natürlich kann man seinen Geist auch auf natürliche Weise stärken! Dieses Dossier bündelt die wichtigsten **G&G**-Artikel zu den Themen Konzentration, Gedächtnis, mentale Fitness und Hirndoping aus den letzten Jahren und kostet € 8,90.

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



EPOC 2/2011

epoc ist das moderne Magazin für Archäologie und Geschichte. Bleiben Sie bei der wissenschaftlichen Erforschung unserer Vergangenheit auf dem Laufenden! Themen in **epoc** 2/2011 sind u. a.:

- >> Die Hanse – Archäologen und Historiker erforschen die Geschichte der ersten europäischen Wirtschaftsunion
- >> Vitruv – vor gut 2000 Jahren schrieb der römische Gelehrte seine »Zehn Bücher über Architektur«
- >> Waldreform: Im 18. Jahrhundert entwickelte der deutsche Staat das Prinzip der Nachhaltigkeit
- >> Kriegselefanten: In der Antike sollten die Dickhäuter Feinde in Angst und Schrecken versetzen

epoc kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (6 Ausgaben pro Jahr) für € 40,50 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 34,50) zu beziehen.



STERNE UND WELTRAUM 3/2011

Sterne und Weltraum bietet monatlich eine umfassende Weltraumperspektive für alle, die von der kosmischen Umgebung unserer Erde fasziniert sind. Experten ihres Fachs beschreiben für Sie das spannende Geschehen im Weltall. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

- >> Supernovae: Was Weiße Zwerge zum Bersten bringt
- >> Radioteleskope: Tragende Rolle für Peter & Paul
- >> Planck-Mission: Einblick in die Welt vor 14 Milliarden Jahren
- >> Online-Sternwarten: Mieten Sie sich Ihr Wunschteleskop
- >> Steadystar: Schlauer Helfer für die Astrofotografie

Sterne und Weltraum kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (12 Ausgaben pro Jahr) für € 85,20 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 64,-) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:



Franz Kerschbaum, Franz Simbürger
Sonne, Mond und Sterne ... 52 kosmische Antworten
 Seifert, Wien 2010. 80 S., € 10,90

Ein Professor und ein Wissenschaftsredakteur stellen 52 gut ausgewählte »kosmische Fragen«: Wie groß ist das Universum? Woher weiß man das? Warum leuchten Sterne? Wird die Sonne ewig scheinen? Die Antworten sind sorgsam formuliert und mit je etwa einer halben Seite Länge natürlich viel zu kurz. Manche Sachverhalte, die anderswo diffus bleiben, klären sie gut auf, andere nicht: »Schwarze Löcher verschlingen alles«, heißt es; aber dasjenige im Zentrum der Milchstraße ist offenbar kein Problem. »Um Gold zu erzeugen, muss ein ganzer Stern explodieren«; da fehlt der nicht unwesentliche Hinweis, dass dies auch Teilchenbeschleunigern gelingt. Aber das macht nichts. »Sonne, Mond und Sterne ...« bringt die Astronomie unters Volk und ist auch optisch nicht unattraktiv. Zudem verdient der Österreichische Rundfunk mit längst gesendetem Radiomaterial noch einmal ein wenig Geld. So ist allen geholfen.

THILO KÖRKELE



Dietrich Paul
Was ist an Mathematik schon lustig? Ein Lesebuch rund um Mathematik und Kabarett, Musik und Humor
 Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2011. 248 S., € 24,95

Studieren Sie dieses Buch nicht – genießen Sie es als niedergeschriebenen Kabarettabend. Der Mathematiker, begnadete Pianist, Kabarettist und Buchautor (Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 95) Dietrich Paul (»Piano-Paul«) findet an der Mathematik selbst, wie an jeder Wissenschaft, nicht viel zum Lachen, an ihren Vertretern und deren Sprache schon mehr und am mathematischen Unverständnis der restlichen Welt richtig viel. Hinter der überschäumenden Vielfalt der Assoziationen (die ärgsten Gedankensprünge sind leserfreundlich in mehrere hundert Fußnoten ausgelagert) findet sich immer ein roter Faden – von Elementarem und Wissenswertem über Primzahlen bis hin zu einer beeindruckenden Liebeserklärung an die reine Abstraktion in Form von Mathematik und Musik. Aber bevor es zu ernst wird, empfiehlt er zum Thema der a-Moll-Fuge aus dem II. Teil von Bachs Wohltemperiertem Klavier den Text »Leck mich am Arsch«. Das bleibt im Gedächtnis!

CHRISTOPH PÖPPE



Georg Schwedt
Zuckersüße Chemie. Kohlenhydrate & Co
 Wiley-VCH, Weinheim 2010. 164 S., € 19,90

Homöopathisch dosiert, kann Chemie auch für Laien durchaus genießbar sein. Den Beweis dafür liefert mit dem vorliegenden Buch Georg Schwedt, emeritierter Professor für analytische Chemie und jüngst mit dem Preis für Journalisten und Schriftsteller der Gesellschaft Deutscher Chemiker ausgezeichnet. Strukturformeln sind in den Anhang verbannt, und die einzelnen Kapitel präsentieren vor allem interessante kulturhistorische Betrachtungen ihres süßen Gegenstands, gewürzt mit vielen Originalzitate und einigen Rezepten. Am Ende stehen jeweils einfache Experimente, die sich aber wohl nur für den Schulunterricht eignen – so leicht sind die Chemikalien nicht zu beschaffen. Das leicht verdauliche, unterhaltsame Bändchen bietet, chemisch betrachtet, also anregende Appetithäppchen, aber nicht mehr.

GERHARD TRAGESER



Helm Stierlin
Sinnsuche im Wandel. Herausforderungen für die Psychotherapie. Eine persönliche Bilanz
 Carl-Auer, Heidelberg 2010. 148 S., € 19,95

In dem kleinen, doch sehr gehaltvollen Band liefert der Autor mannigfaltige Einblicke in Werdegang und Bedeutung der systemischen Psychotherapie. Diese zunächst in den USA entwickelte Disziplin befasst sich mit dem Patienten im Kontext seiner sozialen Einbindungen, insbesondere seiner Familie. Stierlin, der als ein Vorreiter der Familientherapie in Deutschland gilt, stellt seine Erfahrungen neben die von oft namhaften Kollegen. Das Buch ist kein Ratgeber, obwohl es viele konkrete Situationen anspricht, von der Magersucht bis zu Traumata, von Partnerkonflikten bis zu inneren Entwicklungen. Die Denkanstöße zum Menschenverständnis, die Konnotationen zum Wort »Sinn« bewegen sich eher auf philosophischer Ebene. Lesenswert für alle, die sich für Menschen und ihre Widersprüche interessieren.

ADELHEID STAHNKE



Stanislas Dehaene

Lesen

Die größte Erfindung der Menschheit und was dabei in unseren Köpfen passiert

Aus dem Französischen von Helmut Reuter.

Albrecht Knaus, München 2010.

470 S., € 24,99

HIRNFORSCHUNG

Neuronales Recycling

Stanislas Dehaene liefert eindrucksvolle Belege dafür, dass wir evolutionär alte Hirnschaltkreise für das Lesen umfunktionieren.

Trotz der ungewohnten Schreibweise können sie die Sätze vermutlich relativ mühelos verstehen. Unser Gehirn ist äußerst flexibel hinsichtlich der vielen Gestalten, in denen uns Buchstaben und Wörter zu Gesicht kommen.

In seinem fundierten und erstaunlich flüssig geschriebenen Sachbuch lässt Stanislas Dehaene seine Leser immer wieder über die Wunder des Lesens staunen, die ihnen normalerweise gar nicht bewusst werden. Akribisch und mit zahlreichen empirischen Belegen zeichnet der französische Kognitionswissenschaftler vom Collège de France in Paris den komplizierten Weg nach, den das Geschriebene in unserem Oberstübchen einschlägt.

Scheinbar unmittelbar und auf einen Schlag erfassen wir Wörter und deren Sinn. Doch in Wahrheit zerlegt erst einmal die Netzhaut des Auges das Gesehene in unzählige Teile. Anschließend setzt das Gehirn sie nach und nach wieder zusammen, indem es die Form von Buchstaben analysiert, sie dadurch erkennt und zu Wörtern zusammenfügt. Eine wesentliche Rolle spielt dabei ein Hirnareal an der Grenze zwischen Hinterhaupt- und Schläfenlappen, das Dehaene die »Region der visuellen Wortform« getauft hat.

Doch wie kann das Gehirn des Menschen so wunderbar ans Lesen angepasst sein, obwohl es die raffinierte Kulturtechnik erst seit ein paar tausend Jahren gibt – evolutionär betrachtet ein

Wimpernschlag? Dehaene sucht das von ihm so benannte »Paradox des Lesens« aufzulösen. Bei der Erfindung der Schrift und des Lesens konnte der Mensch sein Gehirn nicht neu »verdrahten«, sondern musste sich mit dem begnügen, was ihm die Natur an Hardware mitgegeben hat. Also passte sich das Gehirn kulturellen Erfordernissen an, indem es bereits bestehende neuronale Schaltkreise neuen Verwendungen zuführte – so die Kernthese seines Werks. Dehaene nennt es »neuronales Recycling«. Schon bei Primaten reagieren gewisse Hirnareale auf elementare Formen von Objekten. Buchstabenähnliche Formen wie das Y einer Astgabel kämen bereits in der Natur vor und seien dann für Schriftzeichen erneut verwendet worden, genauso wie die entsprechenden Hirnregionen.

Diese elementaren Formen findet der Kognitionswissenschaftler beim Sichten der unterschiedlichsten Schriftsysteme wieder. Chinesische Schriftzeichen und das lateinische Alphabet haben auf den ersten Blick nicht viel miteinander gemein, doch die Grundformen ähneln sich. Im Lauf von Jahr-

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Anzeige

Die Gemeinnützige Hertie-Stiftung lädt ein zum

NeuroForum Frankfurt 2011

Kunst und Gehirn: Bildende Kunst aus Sicht der Hirnforschung

Donnerstag, 10. März 2011, 18.30 Uhr ■ Hermann Josef Abs Saal

Junghofstraße 11 • 60311 Frankfurt am Main

• Einführungsvortrag von Prof. Dr. Reto Weiler, Rektor des Hanse-Wissenschaftskollegs, Delmenhorst, Direktor des Forschungszentrums Neurosensorik, Universität Oldenburg

Das kunstvolle Auge

• Anschließende Podiumsdiskussion:

Prof. Dr. Wolf Singer, Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung, Frankfurt

Prof. Peter Weibel, Vorstand des Zentrums für Kunst und Medientechnologie, Karlsruhe

Der Eintritt ist frei, es wird jedoch wegen des begrenzten Kartenkontingents um Voranmeldung gebeten:
Gemeinnützige Hertie-Stiftung
Ingrid Moors
Telefon: 069 660756-148
E-Mail: moorsi@ghst.de

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

tausenden seien alle Schriftsysteme über Versuch und Irrtum zu ähnlichen elementaren Formen gelangt, die das Gehirn relativ problemlos erfassen kann. Daher wundert es Dehaene wenig, dass sich auch die Hirnschaltkreise fürs Lesen über die Kulturen hinweg gleichen.

Vor dem Hintergrund seiner These, dass das Gehirn eigentlich nicht zum

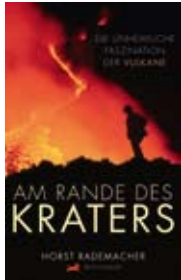
Lesen gemacht ist, wendet sich der Autor auch dem Lesenlernen zu. Dabei beschäftigt er sich unter anderem mit den Ursachen der Legasthenie und dem erstaunlichen Phänomen, dass viele Kinder kurzzeitig in Spiegelschrift schreiben.

Die Fülle der empirischen Details verlangt dem Leser einiges ab. Dafür wird er immer wieder mit anschau-

lichen Vergleichen und Anekdoten entschädigt – und mit überraschenden Einsichten. So auf den Inhalt konzentriert, vergisst er beim Lesen, dass diese komplexen Vorgänge gerade bei ihm selbst ablaufen.

Christian Wolf

Der Rezensent ist promovierter Philosoph und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.



Horst Rademacher

Am Rande des Kraters

Die unheimliche Faszination der Vulkane

Bloomsbury, Berlin 2010.

184 S., € 16,90

GEOLOGIE

Reiz der Vulkane

Horst Rademacher tanzt der Erde auf der geologischen Nase herum.

Auf der Beliebtheitsliste der Sachbuchthemen für die jüngere Generation kommen gleich hinter den Dinosauriern und dem Weltraum die Vulkane auf Platz drei. Die Verlage bie-

ten die ganze Bandbreite von reinen Bildbänden bis hin zu fachspezifischen Wälzern.

Horst Rademacher setzt in seinem neuesten Jugendbuch auf einen konti-

nuierlichen Wechsel zwischen Fakten und Erlebnisberichten – und zwar seinen eigenen; denn bei zahlreichen Expeditionen stand er selbst »Am Rande des Kraters«.

Der Untertitel »Die unheimliche Faszination der Vulkane« zieht sich als Leitgedanke durch das ganze Buch. Auf jedes »wunderschön« folgt bei Rademacher unweigerlich ein »furchtbar gefährlich«, auf jeden faszinierenden Lavastrom ein Dorf, das mitsamt allen Einwohnern verschüttet wurde.

Fast so variantenreich wie die Themenwahl ist das inhaltliche Niveau. Kapitel über die Ausbruchstypen von Vulkanen oder den Nutzen, den die Landwirtschaft aus den Feuerbergen zieht, wird auch ein Zehnjähriger gierig aufsaugen; die Erläuterungen zur chemischen Zusammensetzung von Bimsstein eher weniger.

Solche anspruchsvollen Passagen sind relativ selten – und kein Anlass, dieses Buch zu Gunsten eines Bildbands oder Wälzers zu verschmähen. Man würde eine verständliche und aufschlussreiche Lektüre verpassen.

Amadeus Münch

Der Rezensent besucht die 11. Klasse des Leonardo-da-Vinci-Gymnasiums in Neckargemünd.

Einer der zahlreichen Schlammvulkane auf der indonesischen Zentralinsel Java ist der Bledug Kuwu. Alle ein bis zwei Minuten bricht sich unter Druck stehendes Kohlendioxid mit kanonenschussartigem Lärm eine Bahn, Schlamm und Wasserdampf mit sich reißend.



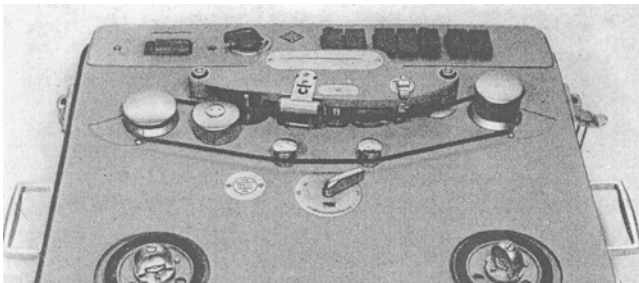
TROND NYBERG, GFZ POTSDAM



Innovativer Datenspeicher

»Eine große Bedeutung hat das Tonbandgerät bei den elektronischen Rechenmaschinen als ›Informationspeicher‹. Hier hält es die anfallenden Zwischenresultate

so lange fest, bis sie zur weiteren Verwertung benötigt werden. Doch kann man den Tonbändern auch ein bestimmtes, in Form magnetischer Impulse vorliegendes ›Programm‹ einprägen und damit z. B. den Arbeitsablauf bei einer Werkzeugmaschine steuern ... ein immer wichtiger werdendes Anwendungsgebiet, das sich wohl erst unseren Kindern und Enkeln richtig offenbaren wird.« Kosmos, Heft 3, März 1961, S. 87



Vor 50 Jahren war das Tonband Daten- und Hoffnungsträger.

Vierbeiner im Weltraum

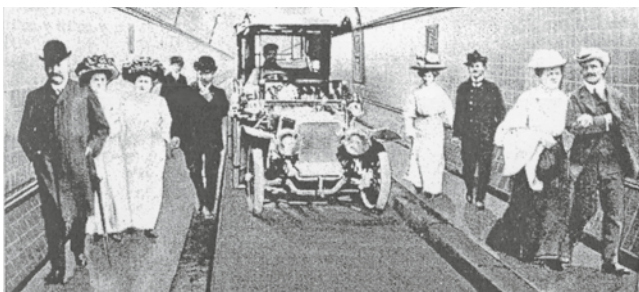
»Der Sowjetunion gelang die Bergung einer 4,6 to schweren Raumkabine nach 17 Erdumläufen. An Bord befanden sich zwei wohltrainierte Hunde, denen die Reise gut bekommen ist. Zwar hatte es nach dem Start dreimal so lange gedauert wie im Laboratorium, bis Atmung und Puls wieder auf normale Werte abgesunken waren; aber dann schien der 24 Stunden anhaltende Zustand der Gewichtlosigkeit den Tieren weiter nichts auszumachen. Sie verhielten sich nach Ausweis des Fernsehbildes normal und nahmen Nahrung zu sich.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Heft 3, März 1961, S. 93

Atombombe auf Amerika

»In den letzten Jahren haben sich neun Unfälle ereignet, an denen amerikanische Atomsprengköpfe oder Bomben beteiligt waren. 1958 wurde versehentlich über Süd-Karolina eine Atombombe aus einer B-47 abgeworfen. Die TNT-Ladung explodierte, zerstörte ein Haus und verletzte die Bewohner, aber eine Atomexplosion fand nicht statt. 1959 war es eine B-52, die beim Auftanken über Kentucky abstürzte. Ihre Wasserstoffbomben zündeten nicht und konnten heil geborgen werden. Die meisten anderen Unfälle ereigneten sich beim Start von Luftwaffenstützpunkten.« Populäre Mechanik 6, Heft 3, März 1961, S. 113

Ein Tunnel unter der Elbe

»Die Erbauung dieses Tunnels ist eine Folge der gewaltigen Ausdehnung, die Hamburg genommen hat, sowie des Umstandes, dass sich die Erbauung einer Brücke verbot, weil sie den Schiffsverkehr beträchtlich gehindert haben würde. Beide Röhren liegen in 2 m Entfernung nebeneinander. Die Herstellung der Röhren erfolgte mit Schildvortrieb und Pressluft. Sie bestehen aus untereinander vernieteten, aussen und innen betonierten Eisenringen mit Kachelverkleidung im Innern. Jedes Rohr hat bei 6 m Durchmesser 450 m Länge und liegt 21 m unter Flut- oder Hochwasserstand. Auf beiden Ufern vermitteln Schachtgebäude mit Aufzügen, die 10 m lange Fuhrwerke befördern können, den Verkehr zwischen Ober- und Unterwelt.« Die Welt der Technik, Nr. 6, März 1911, S. 106 f.



Aufregender Spaziergang dank Elbunterquerung

Wildes Frankreich

»In Nord- und Mitteldeutschland ist der Wolf längst ausgerottet; einzelne Raubtiere verlaufen sich alljährlich aus Rußland, wie aus Frankreich und Belgien nach Ost- und Westpreußen, Posen, Oberschlesien und den Rheinlanden. In strengen Wintern wechseln fast immer Wölfe aus Frankreich nach der Eifel hinüber. Daß auf französischem Boden diese Raubtiere noch zahlreich genug vertreten sind, beweist schon



der Umstand, daß von den 26 000 Franken, über die der dortige Landwirtschaftsminister jährlich als Belohnungen für Tötung schädlicher Tiere verfügt, allein 6000 für Wölfe vorgesehen sind. Im Jahre 1910 gelangten 2135 Franken zur Verteilung, erlegt wurden 68 Wölfe, darunter 30 ausgewachsene Tiere.« Kosmos, Heft 3, 1911, S. 112

Wettlauf zum Südpol

»Zurzeit sind drei Expeditionen, eine norwegische, eine englische und eine japanische im Südpolargebiet tätig und amerikanische, australische, schottische und deutsche in Vorbereitung, so daß man der baldigen Erreichung des Südpols mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit entgegensehen kann.« Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Nr. 11, März 1911, S. 171



Bewohnbare Welten

Unter den Planeten, die um ferne Sonnen kreisen, dürften viele der Erde ähneln. Dort könnte exotisches Leben gedeihen

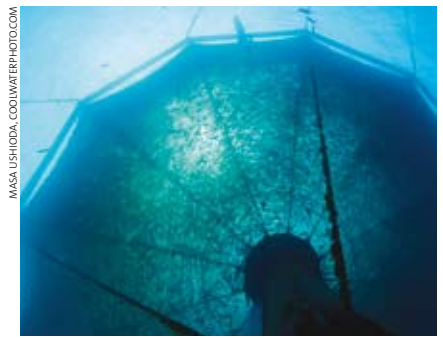
RON MILLER

Computer-Spielereien

Mit mehr als 65 Büchern und 25 Jahren »Mathematical Games« im »Scientific American« hat Martin Gardner (1914–2010) unzähligen Menschen den Spaß an der Mathematik vermittelt und hartnäckige Rätsel aufgegeben. Einige von ihnen sind inzwischen gelöst – mit Hilfe moderner Algorithmen

Auf der Spur des Bewusstseins

Wie wir unsere eigenen geistigen Prozesse und Zustände erleben, ist nach wie vor eines der größten Rätsel. Hirnforscher suchen nach den neuronalen Grundlagen unseres Bewusstseins und entwickeln zusammen mit Philosophen Modelle, es zu verstehen



MASA USHODA, COOLWATERPHOTO.COM

Fischzucht auf hoher See?

In Zeiten leer gefischter Meere könnte die Aquakultur zu einer der wichtigsten Quellen tierischer Proteine werden. Die heute gängigen küstennahen Fischfarmen belasten jedoch die Umwelt. Am Meeresboden verankerte Fischgehege auf hoher See wären eine ökologisch interessante Alternative



GETTY IMAGES / JÖRG LEHMANN

Der wahre Wert der Trüffel

Trüffel gelten als die teuren Lieblinge der Gourmets. Ungleich wichtiger aber sind die ungewöhnlichen Pilze, die Tausende von Arten zählen, für Wälder und viele Tiere

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