

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

DEZEMBER 2013

GENE UND GESELLSCHAFT

Wie sich Sozialverhalten
und DNA beeinflussen

MARS

Die veränderliche Oberfläche
des Roten Planeten

KEILSCHRIFT

Viel sagende
Zeichen in Ton



Das Innenleben der Quarks

Auf der Suche nach den kleinsten
Bausteinen der Materie

8,20 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E





Audi
Vorsprung durch Technik



Verändert die Welt. Nicht den Alltag.

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

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

Auf Deutschlands Straßen ab 2014.



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



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

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

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

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

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

www.academia-net.org



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.de

Forschung und Fiktion

Niemand dürfte sich so umfassend mit der Zukunft der menschlichen Fortpflanzung auseinandergesetzt haben wie Carl Djerassi. Der amerikanisch-österreichische Chemiker, der am 29. Oktober seinen 90. Geburtstag feierte, hatte 1951 die erste Verhütungspille entwickelt. Damit schuf er die medizinische Grundlage für die so genannte sexuelle Revolution. In den 1980er Jahren begann er in einer zweiten Karriere als Schriftsteller, die sozialen Folgen der sich entwickelnden Reproduktionsmedizin zu beleuchten. Lesenswert ist sein Roman »Menachems Same« von 1996, in dem er die praktischen Folgen der fünf Jahre zuvor entwickelten Methode der intrazytoplasmatischen Spermieninjektion (ICSI) für die Menschen durchspielt; sein Theaterstück »Unbefleckt«, 1999 in Wien uraufgeführt, dreht sich um die ethischen Herausforderungen durch ICSI. Ich traf den Jahrhundertzeugen, der als 15-Jähriger vor den Nazis aus Wien fliehen musste und anschließend fünf Jahrzehnte lang kein Wort Deutsch mehr sprach, 2009 in Berlin. Wir unterhielten uns unter anderem über die international sehr unterschiedliche Praxis der Fortpflanzungsmedizin. Djerassi pries die liberale britische Gesetzgebung als beste weltweit. Die deutschen Gesetze hingegen geißelte er als zu konservativ und nicht mehr zeitgemäß.

In der Tat lässt die zunehmende Manipulierbarkeit der Reproduktion manchen nationalen Gesetzgeber weit hinter sich. Was heute bereits möglich ist und was die nahe Zukunft bringen dürfte, berichtet der französische Spezialist Pierre Jouannet ab S. 28 in diesem Heft. »Wie pflanzen wir uns in Zukunft fort?«, lautet die Überschrift seines Artikels. Darin wirft der Gynäkologe auch Fragen auf, vor die Djerassi seine Roman- und Theaterhelden stellt.

Djerassi nennt seine Prosa, in der er die Ergebnisse der Wissenschaft literarisch verarbeitet, »Science-in-fiction«. Im Unterschied dazu blicken Sciencefiction-Autoren weiter in die Zukunft. Um uns zu unterhalten, um uns zu warnen und um die Abgründe der menschlichen Seele aus der Perspektive von übermorgen zu beleuchten, schreiben sie heutige Trends in Gesellschaft, Forschung und Technik fort. Auch die Fachzeitschrift »Nature« bedient das beliebte Genre in jeder Ausgabe. Beginnend mit diesem Heft präsentieren wir Ihnen in unserer neuen Rubrik »Futur III« ausgewählte Sciencefiction-Kurzgeschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erstmals auf Deutsch (S. 104–105).

Viel Spaß bei der zukunftsweisenden Lektüre wünscht
Ihr

Carl Köhnel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Auf Bildern der Marsoberfläche entdeckte der Planetologe **Alfred S. McEwen** von der University of Arizona Strukturen, die auf fließendes Wasser hindeuten könnten (S. 60).



Markus Hilgert, Altorientalist an der Universität Heidelberg und demnächst Direktor des Vorderasiatischen Museums in Berlin, sieht sein Fach im Aufwind: Tontafeln mit Keilschrifttexten bilden einen ständig wachsenden Schatz an Informationen über das Altertum (S. 68).



Raúl Rojas ist Informatikprofessor an der Freien Universität Berlin mit Spezialgebiet künstliche Intelligenz. Er arbeitet an der Realisierung eines verkehrstüchtigen fahrerlosen Fahrzeugs (S. 88).

5 Editorial

8 Leserbrief/Impressum

10 Spektrogramm

Übergang zur Landwirtschaft • Formgedächtnismetalle • Artenvielfalt im Amazonasgebiet • Funktion des Schlafs • Triboelektrische Ladungstrennung • Schutz vor ionisierender Strahlung

13 Bild des Monats

Ein überraschend archaischer Schädel

14 Forschung aktuell: Die Nobelpreise 2013

Nobelpreis für Medizin
Aufklärung des Transportsystems in der Zelle

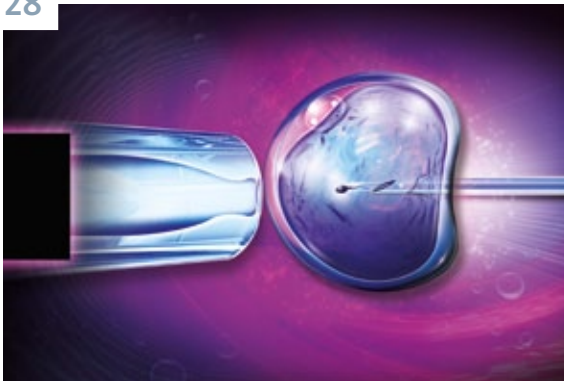
Nobelpreis für Chemie
Simulation biochemischer Reaktionen am Computer

Nobelpreis für Physik
Standardmodell der Teilchenphysik komplettiert

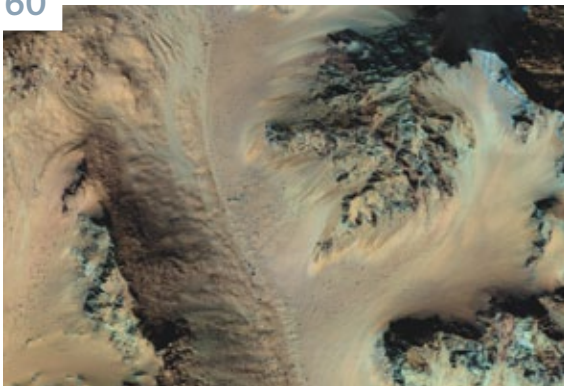
Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften
Empirische Analyse von Aktienkursen

SPRINGER'S EINWÜRFE
Die Erforschung der Forschung
Das Neue kommt nicht aus dem Nichts

28



60



68



BIOLOGIE & MEDIZIN

28 **Wie wir uns in Zukunft fortpflanzen**

Pierre Jouannet

Neue Entwicklungen in der Reproduktionsmedizin werfen immer schwierigere ethische Fragen auf.

▶ 36 **Wie Gene das Verhalten prägen – und umgekehrt**

Michael J. Shanahan, Jason Freeman

Unser soziales Umfeld ist durch unser Erbgut beeinflusst, wirkt aber auch auf dieses zurück.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

54 **Glitzernder Schein**

H. Joachim Schlichting

Hightech-Lametta zaubert Farben aus dem Nichts. Das lässt auch Physiker stutzen, denn eigentlich kann dieser Interferenzeffekt nur mit kohärentem Licht funktionieren.

▶ 60 **Wandelbarer Mars**

Alfred S. McEwen

Neu entdeckte linienartige Strukturen auf der Oberfläche des Roten Planeten liefern die bisher besten Indizien für die Existenz von flüssigem Wasser.

MENSCH & KULTUR

▶ 68 **Wissen für die Elite**

Markus Hilgert

Die Keilschrift war jahrtausendlang in Gebrauch – eine erstaunliche Erfolgsgeschichte.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

75 **Leben in 10 000 Dimensionen**

Christoph Pöppe

In hochdimensionalen Räumen sorgen statistische Effekte für allerlei Merkwürdigkeiten.

► TITELTHEMA

46 Das Innenleben der Quarks

Don Lincoln

Laut Standardmodell der Teilchenphysik haben Quarks und Leptonen weder Ausdehnung noch Struktur. Doch manches spricht dafür, dass es sich ganz anders verhält. Vielleicht stößt der Beschleuniger LHC schon bald in eine verborgene Welt noch kleinerer Partikel vor!

80



88



ERDE & UMWELT

80 Die globalen Folgen der Umweltverschmutzung

Brice Barret, Fabien Solmon

Schadstoffe in der Atmosphäre, von Wind und Wolken verteilt, wirken sich auf Wetter und Klima aus. Sie beeinflussen Temperatur und Niederschlagsmenge – und teils sogar die Häufigkeit von Wirbelstürmen.

TECHNIK & COMPUTER



► 88 Das wahre Auto-Mobil

Raúl Rojas

Der alte Traum vom Auto, das auf Zuruf fahrerlos herbeieilt und seine Passagiere selbsttätig zum Ziel bringt, könnte schon bald wahr werden. Noch fällt es einem solchen Gefährt allerdings schwer, freundliche Handzeichen anderer Verkehrsteilnehmer richtig zu deuten.

94 Rezensionen

Ulrich Kutschera: Design-Fehler in der Natur • Salman Khan: Die Khan Academy • Henning Beck: Biologie des Geistesblitzes • Sandra Geringer, Uta Halle (Hg.): Graben für Germanien • Karl-Heinz Göttert: Abschied von Mutter Sprache • Masha Gessen: Der Beweis des Jahrhunderts u. a.

103 Wissenschaft im Rückblick

Von Stonehenge zum Vogelruf

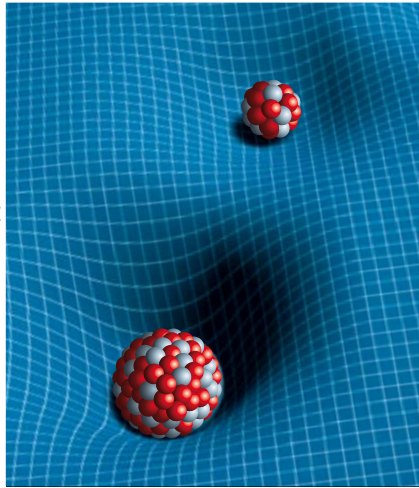
104 Futur III

Ken Liu: Die Seuche

106 Vorschau

Titelmotiv: Craig Cutler

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



Das dreidimensionale Bild veranschaulicht die Wirkung von Massen auf die vierdimensionale Raumzeit, beschrieben in der Relativitätstheorie.

wie eine Uhr verhält. Wie der Autor darlegt, stieß ja schon de Broglie auf einen Widerspruch: Während bei steigender Gravitation eine Uhr langsamer läuft – und damit alle eher klassischen, periodischen Prozesse –, wird die innere Frequenz hingegen schneller. Dies entspringt der steigenden Energie der Teilchen.

Man muss vermuten, dass man es mit einem anderen Phänomen als bei einer üblichen Uhr zu tun hat. Doch offenbar hängen beide irgendwie zusammen, weil beide etwas mit Zeit zu tun haben. Aber wie? Dass der Zusammenhang nicht einfach eine umgekehrte Proportionalität sein kann, lässt sich aus folgender Überlegung ersehen: Nähert sich ein Teilchen dem Ereignishorizont eines Schwarzen Lochs, so strebt der Fortschritt der Zeit – von außen betrachtet – beim Erreichen dieser Grenze gegen null. Die innere Frequenz

hingegen gelangt an einen hohen, aber endlichen Wert.

Daher ist die scheinbar nahe liegende Interpretation der inneren Frequenz als direkter Ausdruck der Zeit nicht zulässig. Kann dies der Physikergemeinde entgangen sein? Es ist an der Zeit, dass der von Giulini angesprochene Konflikt ausgetragen wird. Wenn man die Sache konstruktiv angeht, eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten.

Keinen Aufstand machen

Laut Martin Fehndrich garantiert die Novelle des Wahlgesetzes eine dem Stimmenverhältnis angemessenere Verteilung der Sitze im Bundestag als bisher («Bundeswahlgesetz – dritter Versuch», September 2013, S. 72).

Martin Bernauer, Karlsruhe: Das grundsätzliche Problem der Überhangmandate wird sich nie vollständig vermeiden lassen. Aber man kann die Auswirkungen minimieren, indem man einen elementaren Fehler des Wahlgesetzes korrigiert. Es handelt sich – wie der Name sagt – um eine Bundestagswahl. Daher müssen Überhangmandate

Der Kern der Vereinheitlichung der Physik

Wie sich das einsteinsche Äquivalenzprinzip auf atomarer Ebene interpretieren lässt, diskutierte der theoretische Physiker Domenico Giulini («Einstein im Quantentest», Oktober 2013, S. 56)

Wolfgang Huß, Hamburg: Domenico Giulini beschreibt in seinem Artikel die Uneinigkeit der Physikergemeinde darüber, ob die innere Frequenz eines Elementarteilchens oder Atoms sich

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

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

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

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

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

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

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Anne Angowski, 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

Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch

Redaktionsassistentin: Erika Eschwei

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

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

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Hausanschrift:

Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600,

Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

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. Thorsten

Dambeck, Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne

Lipps-Breda, Dr. Michael Springer.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser,

Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

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

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

Bezugspreise: Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.

Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

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

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

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

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

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

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchoombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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



auch bundesweit ausgeglichen werden. Die vorherige Einteilung in die Bundesländer ist unlogisch und unsystematisch. Dass die Bundesparteien sich aus organisatorischen Gründen nach Bundesländern strukturieren, ist deren interne Angelegenheit und für die Bundestagswahl ohne jegliche Relevanz. Man ermittle also erstens die Überhangmandate einer Partei auf Bundesebene. Erst dann, wenn eine Partei bundesweit mehr Direktmandate hat, als ihr zustehen, kommt ein entsprechender Ausgleich zum Tragen. (Wie die Parteien intern den Ausgleich zwischen starken und schwachen Gebieten bewerkstelligen, ist deren eigene Entscheidung.) Damit hat sich der größte Teil des selbst verschuldeten Problems erledigt.

Zweitens sollen bis zu einer gewissen Grenze Überhangmandate gar nicht ausgeglichen werden. Das Bundesverfassungsgericht hatte eine Gesamtobergrenze vorgeschlagen. Ich bin für eine Freigrenze von zwei Überhangmandaten pro Partei, die noch keinen Ausgleich erfordern. Natürlich ist jede Grenze willkürlich, aber wir haben auch eine andere willkürliche und doch allseits akzeptierte Grenze in unserem Wahlgesetz: die Fünfprozenthürde. Es heißt immer, der Wählerwille würde wegen der Überhangmandate verfälscht. Aber: Bei zwei Überhangmandaten und einem Bundestag mit 598 Mitgliedern beträgt die Verfälschung 0,33 Prozent.

Wegen der Fünfprozentklausel waren bei der letzten Bundestagswahl 16 Prozent aller Stimmen unwirksam.

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/googleplus



www.spektrum.de/twitter

Wenn wir es uns also leisten können, den Willen von über sechs Millionen Wählern unter den Tisch fallen zu lassen, dann brauchen wir bei deutlich weniger als einem Prozent Überhangmandate keinen Aufstand zu machen.

Behinderung der Forschung

Melinda Wenner Moyer stellte die lange akzeptierte Ansicht in Frage, dass oxidativer Stress auf jeden Fall schadet und den Alterungsprozess befördert. (»Entzauberte Antioxidanzien«, Oktober 2013, S. 26)

Günter Ahlert, Oberursel: Der kritische und überfällige Artikel Ihrer Autorin Melinda Wenner Moyer zur Entzauberung einer jahrzehntelang vemu-

teten, aber nie bewiesenen therapeutischen Rolle von Antioxidanzien als Gegenspieler des biologischen Alternsprozesses ist zu begrüßen.

Solche Spekulationen fußen auf der so genannten Free Radical Theorie of Aging von D. Harman aus dem Jahr 1956, wonach das Altern der Lebewesen sich aus der Oxidation der Strukturen von Körperzellen auf Grund von oxidativem Stress durch freie Sauerstoffradikale erklärt. Diese Theorie hat zu erheblicher Behinderung des Fortschritts in der Altersforschung sowie zu medizinisch sinnlosen Anti-Aging-Behandlungen geführt.

Bayessche Formel subjektiv?

Die von Schrödinger in die Quantentheorie eingeführte Wellenfunktion gebe nur das wieder, was ein Beobachter erwartet, meint der theoretische Teilchenphysiker Hans Christian von Baeyer (»Eine neue Quantentheorie«, November 2013, S. 46)

Harald Kirsch, Düsseldorf: Werfen wir einen herkömmlichen Würfel, so erwarten wir die 2 mit Wahrscheinlichkeit 1/6. Erfahren wir dann, dass eine gerade Zahl gefallen ist, so »springt« unsere Erwartung, auf 1/3. Dieser Sprung folgt nach der bayesschen Formel, die nichts anderes ist, als eine Rechnung mit bedingten Wahrscheinlichkeiten, nach den Axiomen der Wahrscheinlichkeitstheorie. Was ist daran subjektiv?

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

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

Nach Überzeugung der Quanten-Bayesianer beschreibt die Wellenfunktion nicht die physikalische Realität, sondern allein die Überzeugungen eines potenziellen Beobachters.



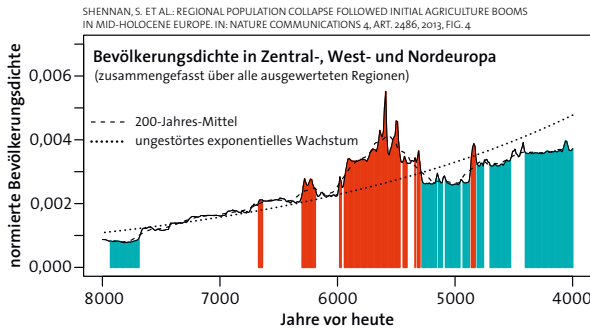
FOTO: CALEBCHARLAND

ARCHÄOLOGIE

Mit der Sense kam der Sensenmann

Einer gängigen Annahme zufolge verbreiteten sich Ackerbau und Viehzucht, weil sie die Nahrungsversorgung auf eine solidere Grundlage stellten. Wie eine neue Studie zeigt, trifft das nur eingeschränkt zu. Die Umstellung vom Jagen und Sammeln auf die Landwirtschaft brachte starke Populationsschwankungen mit sich, in deren Zuge bis zu 60 Prozent der regionalen Bevölkerung ausstarben.

Forscher um Sean Downey vom University College London schätzten hierfür die früheren Bevölkerungsdichten in Zentral- und Westeuropa ab, wobei sie den Zeitraum von 8000 bis 4000 Jahren vor heute betrachteten. Dabei gingen sie von der Überlegung aus: Je mehr Menschen zur gleichen Zeit in einer bestimmten Region lebten, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Archäologen heute Überreste von ihnen entdecken. Downey und sein Team analysierten 7944



Entwicklung der Bevölkerungsdichte in Europa. Verglichen mit einer ungestörten exponentiellen Zunahme (gepunktet) schlägt die Bevölkerungszahl deutlich nach oben (rot) und unten (blau) aus.

datierte Funde aus dem fraglichen Zeitraum, die aus zwölf europäischen Regionen stammen. Laut den Ergebnissen zog die Einführung der Landwirtschaft fast überall einen abrupten Bevölkerungszuwachs nach sich, gefolgt von einem ebenso dramatischen Rückgang. Dieses Auf und Ab wiederholte sich mitunter mehrfach.

Die Einbrüche in der damaligen Bevölkerungsdichte seien vergleichbar mit den Massensterben bei mittelalterlichen Pestepidemien, schreiben die Forscher. Ein Vergleich mit Klima-

rekonstruktionen ergab, dass sie nicht auf Klimaveränderungen zurückzuführen sind. Möglicherweise machten sich die frühen Bauern von einer oder zwei Feldfrüchten abhängig, so dass sie bei Ernteausfällen keine Alternative hatten. Langfristig stellte die Landwirtschaft dennoch einen Überlebensvorteil dar: Trotz wiederholter Massensterben wuchs die europäische Bevölkerung über den gesamten Untersuchungszeitraum betrachtet stark an.

Nature Communications 4, Art. 2486, 2013

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE



Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin

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

www.spektrum.de/diewoche

MATERIALWISSENSCHAFT

Metall mit Gedächtnis

Eine neue Legierung verspricht Fortschritte in der Herstellung von Formgedächtnismetallen. Diese Materialien kehren nach Verformung in ihre Ausgangsgestalt zurück, wenn man sie erwärmt. Bei dem innovativen Werkstoff geschehe das mit bisher unerreichter Reversibilität, berichtet ein Team um Richard D. James von der University of Minnesota (USA).

Gewöhnliche Metalle gewinnen lediglich nach sehr kleinen Verformungen ihre ursprüngliche Gestalt wieder. Übersteigt der äußere Druck einen gewissen Betrag, verschiebt er Fehlstellen in der Gitterstruktur der Atome, die sich nur mit großem Energieaufwand wieder zurückschieben lassen. Zudem finden dabei häufig irreversible Prozesse wie die Bildung von Mikrorissen statt. Anders bei Formge-

dächtnismetallen wie der Legierung $Zn_{45}Au_{30}Cu_{25}$, die James und seine Kollegen hergestellt haben. Übt man auf ihre Oberfläche einen Druck aus, verändert sich die gesamte Kristallstruktur. Erwärmt man das Gitter anschließend, bewegen sich die Atome von selbst in die energetisch günstigere Ausgangsstruktur zurück. Bei der neuen Legierung lässt sich das deutlich öfter wiederholen als bei bisherigen Formgedächtnismetallen.

Allerdings ist das Material teuer. Die Forscher schreiben aber, dass sich mit ihrem Ansatz auch andere Formgedächtnislegierungen herstellen ließen. Mögliche Praxisanwendungen liegen etwa bei medizinischen Implantaten, die sich im körperwarmen Gewebe von selbst entfalten.

Nature 502, S. 85–88, 2013

Monotonie in der Vielfalt

Die Regenwälder des Amazonasbeckens und des angrenzenden Guyana-Plateaus bilden das wohl artenreichste Ökosystem der Erde mit schätzungsweise mehr als 2,5 Millionen Spezies. Auch Bäume finden sich in enormer Vielfalt. Doch das Gros der Baumgewächse rekrutiert sich aus erstaunlich wenigen Arten.

Forscher um Hans ter Steege vom Naturalis Biodiversity Center im niederländischen Leiden haben die Daten von 1170 Bestandsaufnahmen aus allen Teilen des Amazonasgebiets ausgewertet. Nach ihren Hochrechnungen gibt es in der Region rund 390 Milliarden Bäume, die 16 000 verschiedenen Arten angehören. Allerdings wird die Hälfte des gesamten Baumbestands von nur 227 Arten gestellt, das entspricht 1,4 Prozent der Artenzahl. Zu diesen »hyperdominanten« Spezies gehören wild wachsende Nutzpflanzen wie Paranuss-, Açaï- oder Kakaobäume. Besonders aber sticht die Palmenart *Euterpe precatória* hervor: Sie ist mit einem Mengenanteil von 1,3 Prozent das wohl häufigste Baumgewächs des Amazonasregenwalds.

Umgekehrt zeigen die Hochrechnungen aber auch, dass von rund 6000 Arten jeweils weniger als 1000 Individuen existieren, womit sie nach internationalen Kriterien als gefährdet gelten müssen. Die 11 000 seltensten Arten bedecken zusammen gerade einmal 0,12 Prozent des Amazonasbeckens.

Warum manche Bäume hyperdominant werden und andere nicht, ist unbekannt. Auffällig sei, dass viele hyperdominante Arten schon sehr lange als Nutzpflanzen

DANIEL SABATER, INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT, MONTPELLIER



Regenwald in Französisch-Guayana, am Nordrand des Amazonasbeckens. Auf dem Bild sind unter anderem Palmengewächse der Spezies *Euterpe edulis* zu sehen (sternähnliche Baumkronen). Diese Art ist im Amazonasgebiet besonders häufig.

dienen, etwa Frucht- und Kautschukbäume, schreiben die Forscher. Möglicherweise seien sie deshalb so häufig, weil sie bereits von präkolumbischen Einwohnern kultiviert wurden.

Science 10.1126/science.1243092, 2013

Aufräumen im Schlaf

Warum wir schlafen müssen, ist immer noch nicht abschließend geklärt. Wissenschaftler um Maiken Nedergaard vom University of Rochester Medical Center (USA) haben nun in Versuchen an Mäusen entdeckt, dass sich der Zellzwischenraum im Gehirn während des Schlummers vergrößert, so dass die Hirnflüssigkeit besser hindurchfließen kann. Dabei spült sie Abfallprodukte aus, etwa den Eiweißstoff Beta-Amyloid, der am Entstehen der Alzheimerkrankheit beteiligt ist.

Die Forscher untersuchten die Hirne von wachen, schlafenden und betäubten Mäusen. Mit Hilfe von Fluoreszenz-

farbstoffen und anderen Markern ermittelten sie den Durchstrom der Hirnflüssigkeit und den Anteil des Zellzwischenraums am Hirnvolumen. Sie stellten fest, dass Letzterer während des Schlafs anwächst: Macht er bei wachen Mäusen etwa 14 Prozent aus, sind es bei schlafenden oder anästhesierten Tieren etwa 23 Prozent. Durch die größeren Zwischenräume bewegt sich mehr Flüssigkeit und transportiert dabei mehr toxische Stoffe aus dem Gehirn heraus. Radioaktiv markiertes Beta-Amyloid etwa wurde im Schlaf doppelt so schnell ausgespült wie im wachen Zustand. Dabei spülte es keine

Rolle, ob es sich um einen natürlichen oder künstlich herbeigeführten Schlaf handelte.

Die Forscher vermuten, dass der Neurotransmitter Noradrenalin die Größe der Zellzwischenräume reguliert: Blockierten sie bei Mäusen die Noradrenalin-Rezeptoren, vergrößerte sich der Platz zwischen den Hirnzellen ebenfalls. Die These, dass schädliche Abfallprodukte während des Schlummers besonders wirksam aus dem Gehirn entfernt werden, erklärt möglicherweise, warum chronischer Schlafmangel tödlich enden kann.

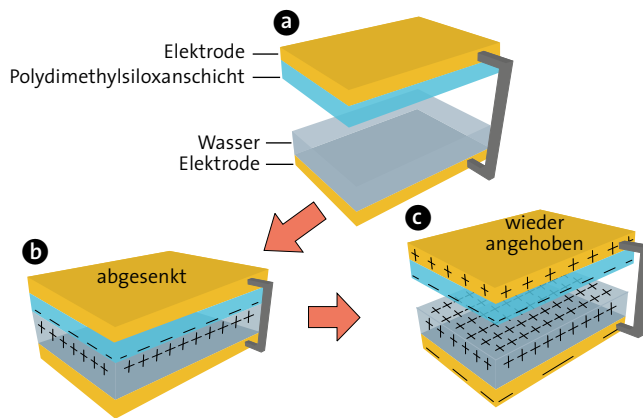
Science 342, S. 373–377, 2013

PHYSIK

Reibung des Wassers erzeugt Strom

Forscher um Zhong Lin Wang vom Georgia Institute of Technology (USA) haben einen Stromgenerator konstruiert, der elektrische Energie aus der Reibung von Wasser an Kunststoff gewinnt. Sie nutzen hierfür den so genannten triboelektrischen Effekt, also die Ladungstrennung beim Kontakt zwischen zwei verschiedenen Stoffen.

Die Wissenschaftler verwenden einen isolierenden Kasten, in dessen Deckel und Boden Kupferelektroden eingelassen sind. Den Deckel bedeckt zusätzlich eine Wasser abweisende Schicht aus dem Kunststoff Polydimethylsiloxan. Wird der Tank mit Wasser gefüllt und der Deckel auf die Wasseroberfläche gesenkt, lädt Letztere sich positiv, der Kunststoff hingegen negativ auf. Hebt man den Deckel wieder an, lässt sich die elektrische Spannung zwischen ihm und dem Wasser in Strom verwandeln. Insgesamt stellt die Apparatur eine elektrische Energie von 0,13 Watt pro Quadratmeter Deckelfläche bereit – genug, um mehrere Leuchtdioden zu betreiben.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH LIN, Z.H. ET AL.: WATER-SOLID SURFACE CONTACT ELECTRIFICATION AND ITS USE FOR HARVESTING LIQUID WAVE ENERGY. IN: ANGEWANDTE CHEMIE 125, 2013, FIG. 2

Wenn Wasser (grau) mit dem Kunststoff Polydimethylsiloxan (blau) in Kontakt kommt, laden sich beide elektrisch auf. Trennt man sie anschließend wieder, kann man die Spannung zwischen ihnen über Elektroden (gelb) entladen.

Triboelektrische Ladungstrennung kennt man üblicherweise bei Festkörpern. Schon die alten Griechen waren auf das Phänomen gestoßen – durch Reiben des Isolators Bernstein mit einem Katzenfell. Wie der Effekt im Detail funktioniert, ist bis heute jedoch nicht vollständig verstanden. Mit Salzwasser lässt er sich ebenfalls erzielen, wobei hier die erreichbaren Leistungen nicht so hoch sind. Konstruiert man ein Wellenkraftwerk, in dem die einlaufenden Meereswellen den Kunststoff immer wieder kurz-

zeitig berühren, kann man die Bewegungsenergie des Wassers teils in Strom umwandeln. Das Konzept hat den Vorteil, dass es ohne bewegliche Teile auskommt, die für Korrosion besonders anfällig sind. Die bereitgestellte Strommenge ist zudem stark von der Temperatur und der Reinheit des Wassers abhängig, so dass Apparate auf Basis des triboelektrischen Effekts auch als Umweltsensoren dienen können.

Angewandte Chemie 10.1002/ange.201307249, 2013

STRAHLENBIOLOGIE

Brokkoli-Inhaltsstoff schützt vor Strahlung

Das der Verzehr von Brokkoli, Blumenkohl und Rettich das Krebsrisiko mindert, ist schon länger bekannt. Nun zeigt sich: Er wirkt auch den schädlichen Folgen ionisierender Strahlung entgegen, die unter ande-



FOTO: JIA / EMI-ART

Brokkoli enthält einen Stoff, der die Strahlenresistenz des Körpers erhöht.

rem bei radioaktiven Zerfallsprozessen entsteht.

Ein bestimmter Inhaltsstoff von Kohlgemüsen, bezeichnet als I3C, wird im körpereigenen Stoffwechsel in die Substanz DIM (3,3'-Diindolylmethan) umgewandelt. Forscher um Saijun Fan vom Georgetown University Medical Center in Washington (D. C.) haben nun deren Strahlenschutzwirkung getestet. Sie setzten Mäuse und Ratten einer Gammastrahlendosis von 13 Gray aus, die in der Regel tödlich ist. Anschließend verabreichten sie einigen der Nager zwei Wochen lang täglich mehrere Milligramm DIM. Von diesen Tieren war 30 Tage später etwa jedes zweite noch am Leben, während die

nicht mit DIM behandelten allesamt gestorben waren.

DIM aktiviert ein Enzym namens Ataxia telangiectasia mutated (ATM), das in tierischen Zellen DNA-Reparaturmechanismen und Überlebensprogramme in Gang setzt. Die Strahlenschutzwirkung von DIM beruht also offenbar darauf, dass sie die Schadenstoleranz der Zelle verstärkt. Hierfür muss die Substanz jedoch in deutlich größerer Menge eingenommen werden, als über normalen Brokkoliverzehr zu erreichen ist. Der Stoff ließe sich zu diesem Zweck in Tablettenform verabreichen, schreiben die Forscher.

PNAS USA 10.1073/pnas.1308206110, 2013

GURAM BUMBIASHVILI, GEORGISCHES NATIONALMUSEUM



EIN NEUES GESICHT

Dieser 1,8 Millionen Jahre alte, sehr gut erhaltene Schädel aus der Ausgrabungsstätte Dmanisi in Georgien sorgte für eine handfeste Überraschung: Mit starken Überaugenwülsten und kräftigem Kiefer wirkt er weit archaischer als vier andere Funde von dort. Nach Ansicht der Forscher um David Lordkipanidze vom Nationalmuseum in Georgien handelt es sich bei dem Fund um den Schädel eines geschätzt 1,50 Meter großen Mannes, während die weiteren, moderner aussehenden Überreste von Frauen stammen dürften. Die Gestaltvielfalt befeuert die Diskussion, ob *Homo habilis*, *H. erectus*, *H. ergaster* und *H. rudolfensis* tatsächlich als eigenständige Arten zu sehen sind – oder vielleicht doch nur Varianten einer einzigen Spezies darstellen.

Science 342, S. 326–331, 2013

NOBELPREIS FÜR PHYSIOLOGIE UND MEDIZIN

Wie Zellen Moleküle von A nach B versenden

Die zelluläre Logistikabteilung in unserem Körper arbeitet pünktlich, zielgenau und verlässlich. Wie sie genau funktioniert, haben die diesjährigen Medizinnobelpreisträger herausgefunden.

VON JAN OSTERKAMP



Randy W. Schekman (links) entdeckte Schlüsselgene für die Regulation des Transportsystems innerhalb von Zellen. **James E. Rothman** (Mitte) nahm die dabei ablaufende Verschmelzung von Transportbläschen mit ihrer Zielmembran genauer unter die Lupe und identifizierte wesentliche daran beteiligte Proteine. **Thomas C. Südhof** schließlich entschlüsselte die molekulare Maschinerie, die für die zeitlich präzise Freisetzung von Botenstoffen an Nervenzellkontakten sorgt.

Wie sorgt eine menschliche Zelle dafür, dass alles, was sie produziert, immer auch dort landet, wo es hin soll – und das genau zum richtigen Zeitpunkt? Diese Frage beantworteten Randy W. Schekman, James Rothman und Thomas Südhof mit ihren Forschungsarbeiten zur Maschinerie des »vesikulären Transportsystems«, wofür sie nun den Medizinnobelpreis erhalten haben. Dieser ebenso elegante wie grundlegende Mechanismus organisiert die Transportprozesse in höher entwickelten Zellen. Versagt er, sind medizinische Probleme unvermeidlich – Diabetes etwa oder verschiedene neurologische und immunologische Störungen.

Die Zellen höher entwickelter Lebewesen, der »Eukaryoten«, unterscheiden sich von denen der einfacher gebauten Prokaryoten in einigen wesentlichen Punkten (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2013, S. 40). Vor allem sind sie komplexer aufgebaut: Ihre Unterteilung in Kompartimente – also durch Membranen eingeschlossene Abteilungen, wie etwa Zellkern oder Mitochondrien – schafft voneinander unabhängige Reaktionsräume innerhalb der Zelle. Darin lassen sich biochemische Spezialprozesse kontrolliert abwickeln, die in ei-

nem einzigen großen Zellkörper gar nicht parallel ablaufen könnten, weil dort sämtliche für alle Reaktionen nötigen Stoffe durcheinanderwirbeln. Der Nachteil dabei: Diese speziellen Reaktionsräume müssen verlässlich mit den für sie bestimmten Molekülen beliefert

werden. Dafür brauchen eukaryotische Zellen ein ausgefeiltes Logistiksystem.

Wie diese unerlässliche Transportmaschine aussieht, begannen Forscher bereits in den 1970er Jahren zu vermuten. Zeitaufwändige mikroskopische Serienuntersuchungen hatten enthüllt,

In Zellen von Eukaryoten (Organismen mit echtem Zellkern) wimmelt es von Transportvesikeln. Sie knospen an Membranen von Organellen immerfort neu und verfrachten dann auf bestimmten Wegen ihren Inhalt in der Regel unverzüglich zum Ziel. Dort bauen sie sich wieder in eine Membran ein, so dass ihre Ladung in dieses Kompartiment gelangt. Je nach Aufgabe und Fracht scheint es verschiedene Sorten von Vesikeln zu geben. Manche befördern frisch entstandene Proteine vom endoplasmatischen Retikulum zum Golgi-Apparat zur weiteren Bearbeitung und Verteilung (gelb). Andere sind für den Proteintransport zwischen den Golgi-Kompartimenten zuständig (blau). Für die Weiterleitung vom Golgi-Apparat gibt es drei Vesikelarten. Zwei davon haben sekretorische Funktion: Eine schüttet Proteine unverzüglich nach draußen aus (braun); eine zweite speichert sie und entlässt sie erst auf ein Signal hin aus der Zelle (lila). Die dritte Sorte (rosa) bringt Verdauungsenzyme zu den Lysosomen. Diese Organellen zerlegen die verschiedensten Moleküle, auch solche, die wiederum andere Vesikel (grün) von außerhalb der Zelle anschleppen.

dass zwischen den einzelnen Kompartimenten der Zellen kleine, membranumhüllte Bläschen umherwandern: die Vesikel. Sie schnüren sich am Anfang ihres Wegs durch die Zelle von einem Startkompartiment ab. Sehr oft handelt es sich dabei um das endoplasmatische Retikulum (ER) – ein System aus Membranschläuchen, auf denen die Ribosomen-Proteinfabriken sitzen. Vom ER aus wandern mit Proteinen gefüllte Vesikel zu einem weiteren Membransystem, dem Golgi-Apparat. Hier werden die Proteine je nach Typ und Einsatzzweck modifiziert und dann in neuen Vesikeln weitergeschleust. Drüsen- und Nervenzellen zum Beispiel leiten vom Golgi-Apparat aus Sekretproteine zur äußeren Zellmembran: Die Vesikel verschmelzen mit dieser und schütten dabei den transportierten Inhalt aus.

Ebenfalls schon in den 1970er Jahren hatten Forscher wie der deutschstämmige Günther Blobel herausgefunden, dass frisch produzierte Eiweiße eine Art Adressaufkleber erhalten, der ihren Zielort in der Zelle beschreibt. Blobel erhielt für diese Entdeckung 1999 den Nobelpreis. Unklar blieb aber, wie das Versandetikett von Vesikeln beschaffen sein könnte, welche die Proteine trans-

portieren. Was bestimmt, ob die Bläschen ihren Inhalt zum Beispiel durch die Zellhülle nach außen schleusen oder ob sie ihn erst einmal zur Weiterverarbeitung in ein anderes Kompartiment bringen?

Der 1948 im US-Bundesstaat Minnesota geborene Randy W. Schekman – er arbeitet heute an der University of Cali-

Was bestimmt, ob die Bläschen ihren Inhalt nach außen schleusen oder zur Weiterverarbeitung in ein anderes Kompartiment bringen?

fornia in Berkeley – experimentierte dazu mit der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*, einem einfach gebauten und deshalb vergleichsweise leicht zu handhabenden Eukaryoten. Hier suchte er nach den genetischen Grundlagen des mysteriösen zellulären Transports und fand Ende der 1970er Jahre 23 »sec«-Gene, die jeweils an verschiedenen Stadien des Vesikelverkehrs in der Hefezelle beteiligt sind.

Auf diesen Erkenntnissen baute James Rothman in den 1980er Jahren auf. Der 1950 in Maryland geborene Biochemiker, heute an der Yale Univer-

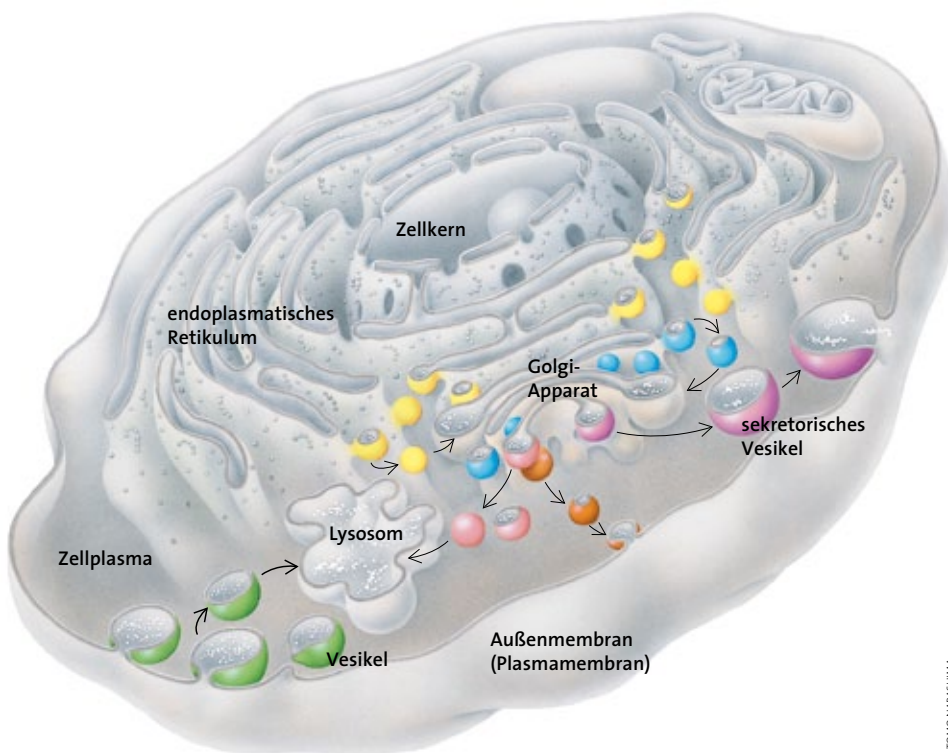
sity, erzielte seinen Durchbruch nicht wie Schekman mit Hefezellen, sondern im Reagenzglas. Anhand eines clever dem natürlichen Vorbild nachgestellten biochemischen Vesikeltransportsystems entdeckte er verschiedene Proteine, die in Säugetierzellen den Transport der Membranvesikel präzise dirigieren.

Die biochemischen Grundzüge dieses Prozesses hat Rothmans Team in den folgenden Jahren ausgearbeitet. Es entstand die bis heute im Wesentlichen akzeptierte »Snare-Hypothese« (nach »soluble N-ethylmaleimide-sensitiv factor attachment receptor«, der Bezeichnung für die am Vesikeltransport mitwirkenden Membranproteine). Sie erklärt, warum Transportvesikel nur an ihrem korrekten Zielpunkt andocken: Zueinander passende Proteine im Zellinneren, in den Vesikelmembranen und in der Zielmembran bilden zusammen spezifische »Snare-Komplexe«. Diese arbeiten ähnlich wie die Hälften eines Reißverschlusses und verschmelzen die Membranen miteinander.

Evolutionär sehr alter Mechanismus

Anfang der 1990er Jahre konnten Schekman und Rothman ihre Erkenntnisse schließlich zusammenführen: Sie ermittelten gemeinsam, dass die von Rothman entdeckten Proteine durch Erbgutabschnitte kodiert werden, die mit den von Schekman gefundenen sec-Genen der Hefe fast identisch sind. Offenbar arbeiten Hefen und Säugetierzellen mit sehr ähnlichen Werkzeugen. Der Transportmechanismus im Inneren eukaryotischer Zellen muss demnach evolutionär sehr alt sein.

Doch wie gelingt es dem Logistiksystem der Zelle, nicht nur den Zielort des Transportguts präzise festzulegen, sondern auch den Zeitpunkt der Auslieferung? Exaktes Timing ist ja zum Beispiel bei Nervenzellen unverzichtbar,



TOMO NARASHIMA

die Signale an nachgeschaltete Neurone weiterreichen und hierzu Transmitterstoffe abgeben.

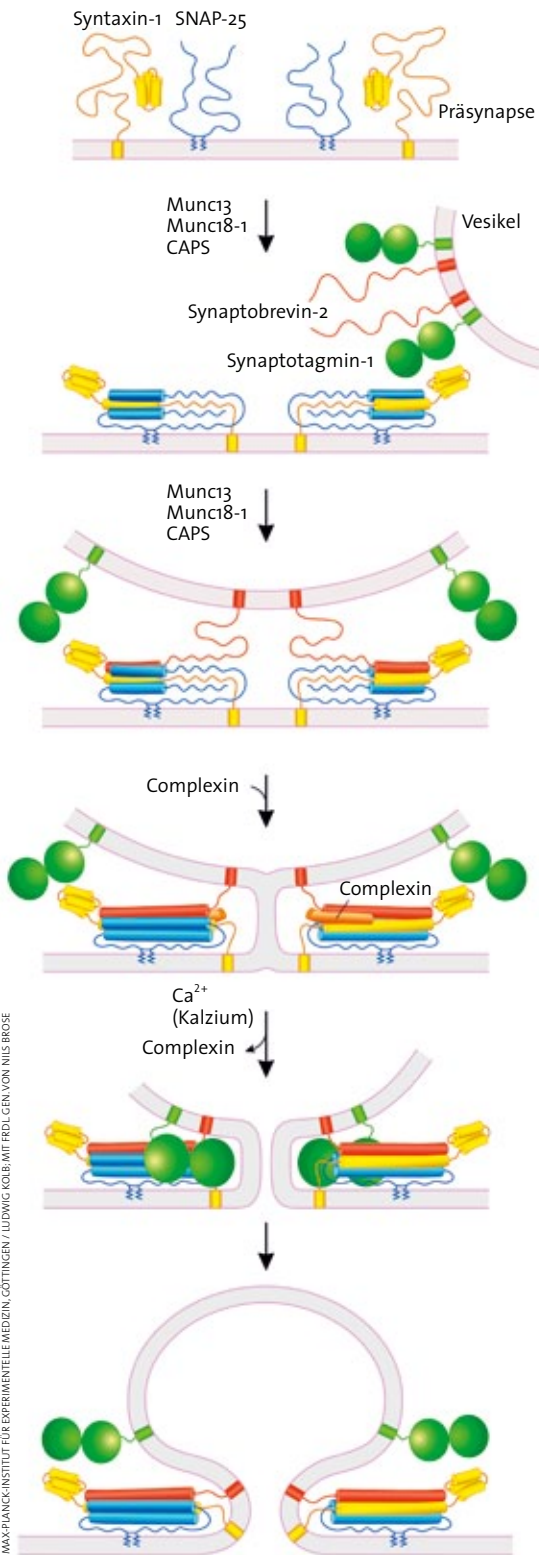
In dieses Problem hatte sich seit den 1990er Jahren der dritte Preisträger ver-bissen. Thomas Südhof, 1955 in Göttingen geboren und heute an der Stanford

University tätig, arbeitete damals nach seiner Ausbildung am Max-Planck-Institut für biophysikalische Chemie in Göttingen am University of Texas Southwestern Medical Center in Dallas.

Vor allem die Rolle von Kalziumsignalen beschäftigte ihn. Bekannt war bereits, dass in die Neurone Ca^{2+} -Ionen einströmen, kurz bevor die mit Trans-

aus dem Proteinkomplex. Die Membranfusion beginnt, und die Botenstoffe werden freigesetzt.

Die Ausschüttung von Neurotransmittern ist eine besonders gut untersuchte Variante zellulären Transports. Doch auch dann, wenn Vesikel andernorts zielgerichtet mit Membranen verschmelzen, laufen ähnliche Prozesse



Ein Ausfall von Elementen kann eine ganze Reihe von unterschiedlichen Krankheiten nach sich ziehen

mitern gefüllten Vesikel mit der äußeren Membran verschmelzen und ihre Fracht in den synaptischen Spalt freisetzen. Offensichtlich mussten sich die Ionen an einen vermittelnden Rezeptor binden, um den Vesikeln grünes Licht zu geben. Südhof fand heraus, wie der Vorgang genau abläuft. Das Kalzium dockt an ein Sensorprotein namens Syntrophin-1 an, das dann an der reißverschlussähnlichen Fusionsstelle zwischen äußerer Neuronenmembran und Vesikelmembran aktiv wird. Daraufhin gibt ein zweites von Südhof beschriebenes Protein seine Position an dieser Stelle auf: das Complexin, das eine unkontrolliert ablaufende Membranfusion verhindert. Unter dem Einfluss von Kalzium und mit Hilfe von Syntrophin löst sich diese Fusionsbremse

Um Neurotransmitter auszuschütten, fusionieren synaptische Vesikel mit der Zellmembran. Die etwa 40 Nanometer großen Bläschen enthalten die Transmittermoleküle und setzen sie nach Verschmelzen mit der Zelloberfläche in den synaptischen Spalt frei. Danach werden die Vesikel durch einen als Endozytose bezeichneten Prozess zurückgewonnen. Die Fusion der synaptischen Vesikel mit der Zellmembran wird von den Snare-Proteinen Synaptobrevin-2, Syntaxin-1 und SNAP-25 gesteuert. Zahlreiche Kontrollproteine wie Munc13, Munc18-1, CAPS und Complexin regulieren deren Funktion und ermöglichen so eine präzise, effektive und flexible Transmitterfreisetzung.

ab. Die Logistikmaschinerie spielt demzufolge eine kaum zu überschätzende Rolle bei zentralen Vorgängen im Körper: etwa im Hormonsystem – bei der Abgabe von Insulin – oder im Immunsystem, das Krankheitserreger durch gezielt freigesetzte Moleküle bekämpft. Kein Wunder, dass ein Ausfall daran beteiligter Elemente beim Menschen eine ganze Reihe von unterschiedlichen Krankheiten nach sich ziehen kann.

So hängen bestimmte Formen der Epilepsie wohl mit einem Versagen der menschlichen Version eines Transportsystems zusammen, das Schekman in Hefe als sec-1 und Südhof später bei Wirbeltieren gefunden hatte – Munc18-1. Ein anderes solches Gen verursacht in defekter Form eine schwere Autoimmunerkrankung: Am falschen Ort zur falschen Zeit von natürlichen Killerzellen abgegebene Immunmodulatoren lösen dabei Attacken auf körpereigenes Gewebe aus. Und auch manche Bakterieninfektionen sind mit dem Vesikeltransport verknüpft. Das vom Tetanuserreger freigesetzte Toxin blockiert etwa die Vesikel-ausschüttung in bestimmten Neuronen und sorgt so für die typischen Krämpfe, die mit der Krankheit einhergehen.

Die Beispiele genügen, um zu zeigen: Ohne dieses präzise regulierte Transportsystem, so resümiert das Nobelpreiskomitee, würden unsere Zellen im Chaos enden.

Jan Osterkamp ist promovierter Biologe und Redakteur bei »Spektrum.de«.

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE MEDIZIN, GÖTTINGEN / LUDWIG KOLB, MIT FÖRDL. GEN VON NILS PROSE

Virtuelle Biochemie

Heute zeigen Computer in hochpräzisen Bildern, wie Enzyme ihre Arbeit verrichten. Doch dazu mussten die diesjährigen Chemienobelpreisträger erst zwei völlig verschiedene Modellierungsmethoden zusammenführen. Der Lohn: eine einzigartige Verbindung zwischen Theorie und Praxis.

VON LARS FISCHER



Arieh Warshel (links), **Martin Karplus** (Mitte) und **Michael Levitt** kombinierten quantenmechanische Verfahren und klassische Potenzialberechnungen, um die Funktionsweise von Enzymen per Computer zu modellieren. Dafür erhielten sie nun den Nobelpreis für Chemie.

Form und Funktion sind in der Chemie untrennbar verbunden. Bei einfach aufgebauten Molekülen genügt meist ein Blick auf die Strukturformel, um zu erkennen, wie sie sich bei chemischen Reaktionen verhalten. Die interessantesten Verbindungen aber sind weitaus komplexer. Dazu zählen insbesondere die Enzyme, die all die unterschiedlichen Reaktionen in einer lebenden Zelle ausführen.

Ein Mensch kann solchen Ungetümen aus Tausenden von Atomen unmöglich ansehen, was sie genau auf welche Weise tun – der Computer aber kann es. Und das ist das Verdienst der diesjährigen Chemienobelpreisträger. Der 73-jährige gebürtige Israeli Arieh Warshel von der University of Southern California in Los Angeles sowie Martin Karplus und Michael Levitt, der eine 1930 in Wien und der andere 1947 im südafrikanischen Pretoria geboren, schufen die Grundlagen dafür, dass sich heutzutage am Bildschirm betrachten lässt, wie im Innern riesiger Molekülstrukturen chemische Reaktionen ablaufen.

Schon in den 1940er Jahren – lange bevor es leistungsfähige Computer gab – überlegten Chemiker, welche Tei-

le eines Moleküls sich elektrostatisch anziehen oder abstoßen und wo sich einzelne Atome unter Umständen in die Quere kommen. Aus diesen sehr einfachen Betrachtungen leiteten sie die ersten theoretischen Modelle für Moleküle ab.

Erster Ansatz: Kraftfeldberechnung

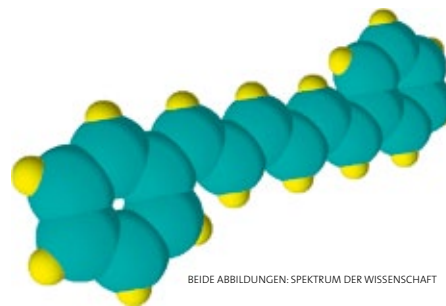
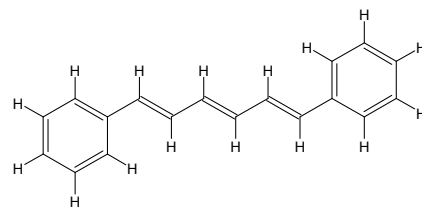
An derartigen Verfahren arbeiteten Warshel und Levitt in den 1960er Jahren gemeinsam mit dem 2001 verstorbenen Shneur Lifson. Warshel und Lifson publizierten 1968 das Consistent-Force-Field-Verfahren (CFF-Verfahren). Es erlaubte mit Hilfe vieler Gleichungen, welche die Wechselwirkungen zwischen Atomen und Atomgruppen mit samt den zugehörigen Energiekurven beschreiben, die korrekte Form auch komplexer Moleküle vorherzusagen.

Im Grunde handelt es sich dabei um ein Optimierungsproblem: Man sucht

An diesem Molekül namens 1,6-Diphenylhexatrien erprobten die beiden Nobelpreisträger Martin Karplus und Arieh Warshel erstmals eine Kombination von klassischer und Quantenphysik zur Berechnung des Absorptionsspektrums.

für ein System aus vielen aneinander gebundenen Atomen den Zustand mit der niedrigsten potenziellen Energie. Dieser entspricht bei einer chemischen Bindung zum Beispiel einem ganz bestimmten Abstand der beteiligten Atome. Das Kraftfeldmodell variiert nun die Anordnung sämtlicher Atome so lange, bis für die Bindungen zwischen ihnen jeweils die energieärmste und damit günstigste Länge erreicht ist.

Gleichzeitig gilt es aber noch viele andere Wechselwirkungen zu optimieren – so die elektrostatische Anziehung oder Abstoßung zwischen geladenen



BEIDE ABBILDUNGEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

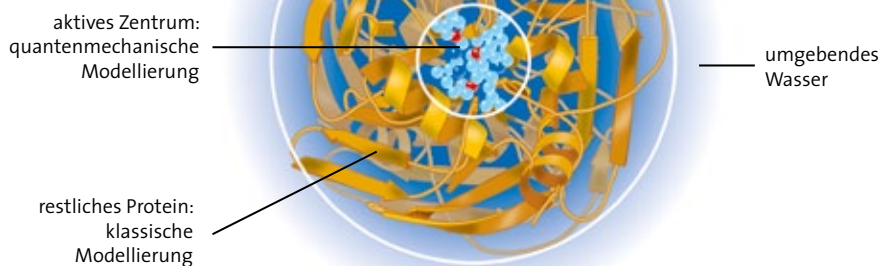
Molekülteilen und die so genannten Van-der-Waals-Kräfte, welche auftreten, wenn sich die Elektronenhüllen von Atomen sehr nahekommen.

Das klingt nach einer Menge Rechenerei. Tatsächlich ist der Aufwand jedoch überschaubar und für heutige Computer relativ leicht zu bewältigen – zumal dann, wenn als weitere Vereinfachung etwa in Proteinen die Seitenketten durch Kugeln und das Rückgrat der Aminosäurekette durch Stäbe ersetzt werden.

Anders verhält es sich mit quantenmechanischen Verfahren, die parallel zum Kraftfeldansatz entwickelt wurden. Sie wären eigentlich das angemessene Handwerkszeug, wenn es – wie hier – um Vorgänge in atomaren Größenordnungen geht. An Stelle von Atomen oder Molekülfragmenten betrachtet die Quantenmechanik aber noch kleinere Objekte: Atomkerne und Elektronen. Zudem sind ihre Gleichungen ungleich komplizierter als die der klassischen Physik zur Berechnung potenzieller Energien. Deswegen würde es selbst heute noch Jahrzehnte an Rechenzeit erfordern, große Moleküle wie Proteine mit quantenmechanischen Verfahren zu modellieren.

Trotz ihrer Überlegenheit in der praktischen Handhabung haben Kraftfeldmethoden aber einen großen Schwachpunkt: Sie berechnen ausschließlich Gleichgewichtszustände. Und die nehmen Moleküle nur dann ein, wenn nichts ihre Kreise stört. Damit sind jegliche chemischen Reaktionen ausgeschlossen. Sobald mit einem Molekül etwas Interessantes passiert – es zum Beispiel eine Bindung mit einem anderen Molekül eingeht –, versagen die Kraftfeldmethoden.

Quantenmechanische Verfahren sind dagegen dynamisch. Sie bilden die lebendige Chemie ab, die sich fern vom Gleichgewicht abspielt – jene Chemie, in der Moleküle angeregt werden, entstehen und vergehen. Mit ihnen kann man somit auch all die Umsetzungen erfassen, die für die Funktion von Biomolekülen von entscheidender Bedeutung sind. Sie erlauben es gleichsam, Enzyme in Aktion zu erleben.



Bei modernen Computersimulationen der Funktionsweise von Enzymen modelliert man nur das aktive Zentrum, in dem die Stoffwechselreaktion abläuft, mit quantenmechanischen Verfahren. Die Struktur des restlichen Proteins wird mit Methoden der klassischen Physik berechnet und das umgebende Wasser sogar als einfaches dielektrisches Medium behandelt.

Oder genauer gesagt: Sie würden es erlauben, wäre da nicht der ungeheure Rechenaufwand. Reaktionen zwischen kleinen organischen Molekülen konnten mit quantenmechanischen Methoden schon bald simuliert werden, doch die Biochemie mit ihrer enormen Bandbreite an Umsetzungen, Produkten und Katalysatoren schien den Computermodellierern für immer verschlossen.

Ein raffinierter Kompromiss

Die Lösung des Problems klingt im Nachhinein sehr einfach und nahe liegend: Man arbeitet auf verschiedenen Größenskalen mit unterschiedlichen Methoden. Nur im aktiven Zentrum, wo sich die eigentliche Reaktion abspielt, kommt die dynamische Quantensimulation zum Einsatz. Der komplette Rest des Moleküls wird mit einfacher klassischer Physik beschrieben.

Die ersten Schritte in diese Richtung unternahmen Karplus und Warshel in den 1970er Jahren. Statt sich gleich an komplizierte Biomoleküle zu wagen, nahmen sie sich zunächst allerdings nur vergleichsweise simple Kohlenwasserstoffe mit so genannten konjugierten Doppelbindungen vor. Deren Schwingungs- und Elektronenspektren versuchten sie im Computer zu simulieren. Die dazu nötigen Bindungslängen und -winkel bestimmten sie mit klassischen Kraftfeldmethoden.

Zusätzlich enthalten die untersuchten Stoffe jedoch die Elektronen der Doppelbindungen, die sich frei über große Bereiche bewegen können und deren genaue quantenmechanische Eigenschaften entscheidend für die Absorptionsspektren sind. Diese so genannten π -Elektronen modellierten Karplus und Warshel mit quantenmechanischen Verfahren. Der kombinierte Ansatz erwies sich als erfolgreich – was alles andere als selbstverständlich war, hatten die Wissenschaftler doch einfach zwei grundverschiedene physikalische Modelle aneinandergeflanscht.

Die plumpe Flickschusterei funktionierte vor allem deshalb, weil die untersuchten Moleküle flach und starr sind. Das »klassische« Elektronensystem befindet sich innerhalb der Molekülebene und das »quantenmechanische« senkrecht dazu. Beide sind so räumlich klar getrennt, und die unterschiedlichen Verfahren kommen sich nicht ins Gehege.

Nur wenige Jahre später konnte sich Warshel, diesmal in Kooperation mit Levitt, auch dieser speziellen Rahmenbedingung entledigen. Diesmal trauten sich die beiden Nobelpreisträger zudem an ein recht kompliziertes Biomolekül: das Lysozym, ein Enzym, das Zuckerketten spaltet. Um seine Funktionsweise zu simulieren, führten sie nur für die unmittelbar an der Spaltung beteiligten Strukturen quantenmechanische Rech-

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

nungen durch; den großen Rest des Proteins modellierten sie klassisch.

Von einer sauberen Trennung der beiden Bereiche kann in diesem Fall freilich keine Rede mehr sein. Vielmehr sind sie innig verwoben und wirken aufeinander ein. Die Aufgabe, die sich hier stellt, ähnelt einem Problem aus der Wirtschaft: Wie organisiert man den Handel zwischen zwei Ländern mit unterschiedlichen Währungen? Man muss ein System finden, das an der Grenze eine Währung zuverlässig und zu berechenbaren Kursen in die jeweils andere umtauscht.

Der Währung im Handel entspricht bei Atomen und Molekülen die Energie. Ungeachtet der grundsätzlichen Unter-

schiede zwischen den Berechnungsmethoden fanden Levitt und Warshel Verfahren, den Transfer von Energie über die Grenze zwischen »Klassik« und »Quanten-Land« hinweg ebenso zufrieden stellend zu beschreiben wie die Wechselwirkungen zwischen Molekülteilen aus beiden Regionen. Damit war es grundsätzlich möglich, im Rahmen eines klassischen Molekülmodells dynamische Reaktionen quantenchemisch zu berechnen.

Von dieser Möglichkeit macht die Chemie seither ausgiebig Gebrauch. Die leistungsfähigen modernen Computermodelle, die Karplus, Levitt und Warshel einst auf den Weg brachten, liefern heute so präzise Ergebnisse, dass

sie den Vergleich mit tatsächlich gemessenen Werten aus dem Labor nicht zu scheuen brauchen. So lässt sich mit diesen Methoden eines der großen Probleme der chemischen Forschung zumindest teilweise umgehen – dass man Moleküle bei der Reaktion nicht zusehen kann. Moderne Computersimulationen liefern aber nicht nur zuvor unerreichbare Daten, sondern auch wirkmächtige Bilder. So eröffnen sie eine ganz neue Art chemischer Forschung, in der Chemiker Moleküle und Reaktionen gleichsam von Angesicht zu Angesicht gegenüberreten.

Lars Fischer ist Chemiker und freier Redakteur bei »Spektrum.de«.

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

Krönender Abschluss des Standardmodells

Peter W. Higgs und François Englert erhalten den Physiknobelpreis 2013 für die Entdeckung des BEH-Mechanismus, der elementaren Teilchen ihre Masse verleiht. 2012 hatten Beschleunigerexperimente am Large Hadron Collider ihre theoretischen Voraussagen aus dem Jahr 1964 bestätigt.

VON GEORG WOLSCHIN



Peter W. Higgs (links) und François Englert wurden für die theoretische Entdeckung eines Mechanismus geehrt, der zu verstehen hilft, wie subatomare Teilchen zu ihrer Masse kommen, und der 2012 durch den Fund eines neuen Bosons am LHC bestätigt wurde.

In den Naturwissenschaften dauert es manchmal sehr lange, bis sich theoretische Voraussagen auch experimentell bestätigen lassen. Das gilt insbesondere für die Teilchenphysik. Nachdem W- und Z-Bosonen als Trägerteilchen der schwachen Wechselwirkung vorhergesagt worden waren, brauchten die Forscher für ihren erstmaligen Nach-

weis rund 15 Jahre. Neutrinos blieben sogar mehr als 25 Jahre lang Theorie. Und ganze 48 Jahre dauerte es, bis mit der Entdeckung des Higgs-Bosons der nach Robert Brout (1928–2011), François Englert (* 1932) und Peter W. Higgs (* 1929) benannte BEH-Mechanismus verifiziert wurde, der Elementarteilchen ihre Masse verleiht.

Mit der Zuerkennung des Preises ging es dafür diesmal geradezu unglaublich schnell. Erst am 4. Juli 2012 hatten die Sprecher der LHC-Experimente CMS und ATLAS gemeinsam mit CERN-Generaldirektor Rolf Heuer die Entdeckung eines bislang unbekanntes Bosons – also eines Elementarteilchens mit ganzzahligem Spin – mit einer Masse von etwa 125 Milliarden Elektronvolt verkündet. Und schon ein Jahr darauf erhalten nun zwei der an seiner Voraussage beteiligten Theoretiker, Englert und Higgs, die prestigeträchtige Auszeichnung.

Endgültig identifiziert war das neue Teilchen im Juli 2012 zwar noch nicht. Aber im Zuge der Auswertung weiterer Daten ist die Überzeugung der Physiker gewachsen, dass es sich bei ihm tatsächlich um das lange gesuchte Higgs-Boson handelt: ein neutrales Teilchen mit Spin 0, also ein so genanntes skala-

res Teilchen, das als Träger des Higgs-Felds fungiert. Dieses Feld machen Physiker dafür verantwortlich, dass Elementarteilchen Masse besitzen.

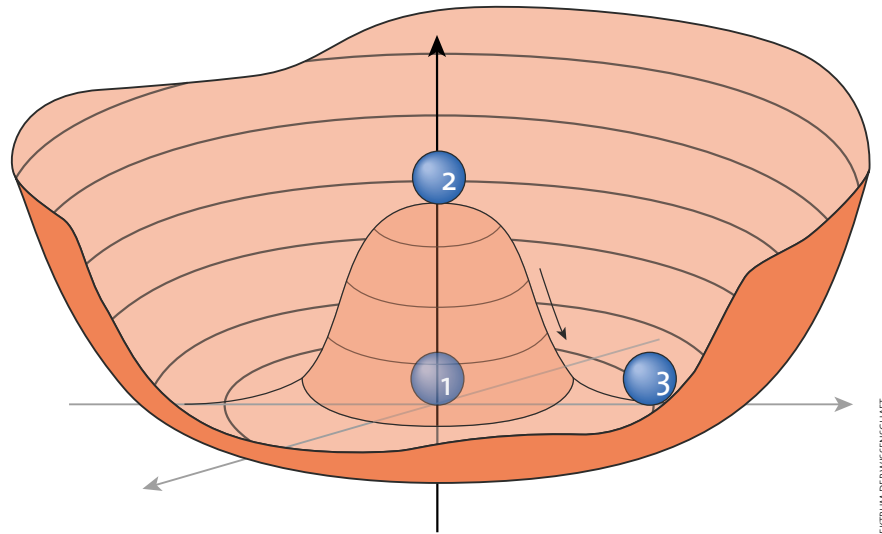
In der Tat handelt es sich um eine bahnbrechende Entdeckung, vielleicht die bislang wichtigste und grundlegendste in der Teilchenphysik. Das Higgs-Teilchen, das trotz groß angelegter Suche am Tevatron-Beschleuniger des US-amerikanischen Fermilab und am LEP-Beschleuniger des CERN (an Letzterem war die Energie zu gering, wie man heute weiß) lange Zeit unentdeckt geblieben war, ist nichts weniger als der letzte Baustein des Standardmodells der Teilchenphysik, das drei der vier Grundkräfte der Natur beschreibt und in vielen Details experimentell bestätigt wurde.

Noch lassen die Daten zwar die vage Möglichkeit offen, dass es sich doch nicht um das Higgs-Boson des Standardmodells handelt, sondern um das masseärmste Mitglied einer neuen – vielleicht supersymmetrischen – Teilchenfamilie. Die bislang hypothetische Supersymmetrie, über deren Existenz die Experimente am LHC ebenfalls Aufschluss geben sollten, wandelt Bosonen und Fermionen ineinander um, also Teilchen mit ganzzahligem in solche mit halbzahligem Spin. Neue Erkenntnisse zu dieser Frage können die Forscher aber frühestens nach dem Ende

Erst mit einer Maschine wie dem **International Linear Collider** wird man die Eigenschaften des neuen Bosons präzise untersuchen können

der Wartungsarbeiten am LHC gewinnen, wenn dieser ab 2015 bei erhöhten Energien von 13 bis 14 Teraelektronvolt (Billionen Elektronvolt) arbeiten wird.

Außerdem hoffen die Physiker auf einen neuen Beschleuniger, vor allem auf einen linearen Collider, in dem Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, auf einer kilometerlangen geraden Strecke aufeinander zu beschleunigt werden, um schließlich aufeinanderzuprallen. Denn erst mit einer Maschine wie dem International Linear



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Das allgegenwärtige Higgs-Feld (blaue Kugel) ruht kurz nach dem Urknall zunächst am Boden einer Potenzialschüssel (1). Eine spontane Symmetriebrechung, hier durch den emporgewachsenen Potenzialhügel im Zentrum veranschaulicht, hebt das Feld an (2) und lässt es in die Mulde rollen (3), wodurch die Symmetrie der Anordnung zerstört wird. Erst in diesem neuen Zustand tritt es in Wechselwirkung mit anderen Teilchen und verleiht ihnen dadurch ihre Masse.

Collider (ILC, siehe SdW 11/2013, S. 54), den ein internationaler Zusammenschluss zu errichten plant – womöglich im Nordosten der japanischen Hauptinsel Honshu –, wird man die Eigenschaften des neuen Bosons präzise untersuchen können, insbesondere die so genannte Zerfallsbreite, aus der sich seine Lebensdauer ermitteln lässt, und die unterschiedlichen Wege, auf denen

tigen. Die knapp dreiseitige Arbeit von Brout und Englert, entstanden an der Universität Libre de Bruxelles, war am 31. August 1964 in Band 13 der renommierten Fachzeitschrift »Physical Review Letters« erschienen. Die ein- einhalb Seiten umfassende Publikation von Higgs, der schon damals an der University of Edinburgh lehrte, wurde im selben Band, jedoch erst am 19. Oktober veröffentlicht. Zuvor hatte der Brite sie schon bei der Zeitschrift »Physics Letters« eingereicht, wo sie aber als »nicht physikalisch relevant« abgelehnt worden war.

Alle drei Forscher hatten sich mit der Frage beschäftigt, ob Vektorbosonen, also Teilchen mit Spin 1 wie die W- und Z-Bosonen, durch so genannte spontane Symmetriebrechung zu ihrer Masse kommen könnten. Die Wissenschaftler bauten dabei auch auf Ideen aus ganz anderen physikalischen Fachgebieten auf, Higgs insbesondere auf Philip Andersons Arbeiten zu elektromagnetischen Plasmen. Ihre Überlegungen verallgemeinerten sie dann auf die relativistische Quantenfeldtheorie, die dem Standardmodell der Teilchenphysik zu Grunde liegt.

es in andere Teilchen zerfallen kann, die so genannten Zerfallskanäle. Man fühlt sich an die Geschichte der W- und Z-Bosonen erinnert: Entdeckt hatte man sie 1983 an einem Proton-Antiproton-Collider, doch erst an dessen Nachfolger, dem Elektron-Positron-Collider LEP, konnten die Forscher auch die Zerfallsbreite des Z-Bosons genau ermitteln und dadurch die Zahl der Elementarteilchenfamilien auf drei eingrenzen.

Bei der Auswahl der Preisträger gab es in diesem Jahr einiges zu berücksich-

Brout, Englert und Higgs waren damals nicht die einzigen, die über spontane Symmetriebrechung und Vektorbosonen nachdachten. Kurze Zeit später und ebenfalls in Band 13 der »Physical Review Letters« veröffentlichten auch Gerald Guralnik, Carl Hagen und Tom Kibble, damals am Imperial College in London, grundsätzliche Überlegungen.

Wer hat den Preis verdient?

Dem Vorbild der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft (APS), die 2010 alle sechs Wissenschaftler mit dem Sakurai-Preis auszeichnete, konnte die Schwedische Akademie allerdings nicht folgen: Den Nobelpreis dürfen sich höchstens je drei Wissenschaftler teilen; überdies legen die Vergaberegeln großen Wert auf die genaue zeitliche Abfolge von Entdeckungen.

Doch was genau bedeutet der Fund? Die Higgs-Teilchen verdanken ihre Existenz dem Higgs-Feld und entste-

hen erst, wenn dieses durch energiereiche Kollisionen im Beschleuniger stark angeregt wird. Entscheidend ist das Feld selbst: Es verleiht elementaren Teilchen, etwa den kraftübertragenden W- und Z-Bosonen, aber auch den Quarks und Leptonen ihre Masse. Ohne Higgs-Feld wären die Quarks, aus denen sich Protonen und Neutronen und damit auch Atomkerne zusammensetzen, ebenso masselos wie die Elektronen in den Atomhüllen. Gewöhnliche Materie wie die, aus der Menschen ebenso wie Planeten und Sterne zusammengesetzt sind, könnte dann nicht existieren. Nur das Photon, Trägerteilchen der elektromagnetischen Kraft, bleibt trotz Higgs-Feld masselos, weil es nicht mit ihm in Wechselwirkung tritt.

Gleichwohl erzeugt der Higgs-Mechanismus nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtmassen von Teilchen. Beispiel Wasserstoff: Die durch den Mechanismus erzeugten Massen der drei Quarks im Wasserstoffkern betragen

insgesamt 9,4 MeV (Millionen Elektronvolt); 0,51 MeV steuert das um den Kern kreisende Elektron bei. Wiegt man ein Wasserstoffatom, erhält man aber den fast 100-fach höheren Wert, nämlich 938,9 MeV. Wie kommt das?

Dass Teilchenphysiker die Massen in Energieeinheiten ausdrücken, ist der einsteinschen Beziehung $E = mc^2$ zu verdanken, der zufolge Energie (E) äquivalent zu Masse (m) ist. Dieselbe Formel löst auch den scheinbaren Widerspruch auf: Der weitaus größte Teil der Masse eines Atoms steckt nämlich nicht in der (Higgs-)Masse der einzelnen Teilchen, sondern in der Energie der Wechselwirkung zwischen ihnen, insbesondere zwischen den Quarks im Atomkern.

Die relative Kleinheit der durch den Higgs-Mechanismus erzeugten Massen ändert jedoch nichts an seiner großen Bedeutung für die Struktur der Materie. Unmittelbar nach dem Urknall befand sich das schon damals allgegenwärtige Higgs-Feld in einem Zustand

ANZEIGE

bgp.de



Du machst bei Randstad Karriere? Als Ingenieur?

Genau. Fach- oder Führungskarriere. Ich kann's mir aussuchen.



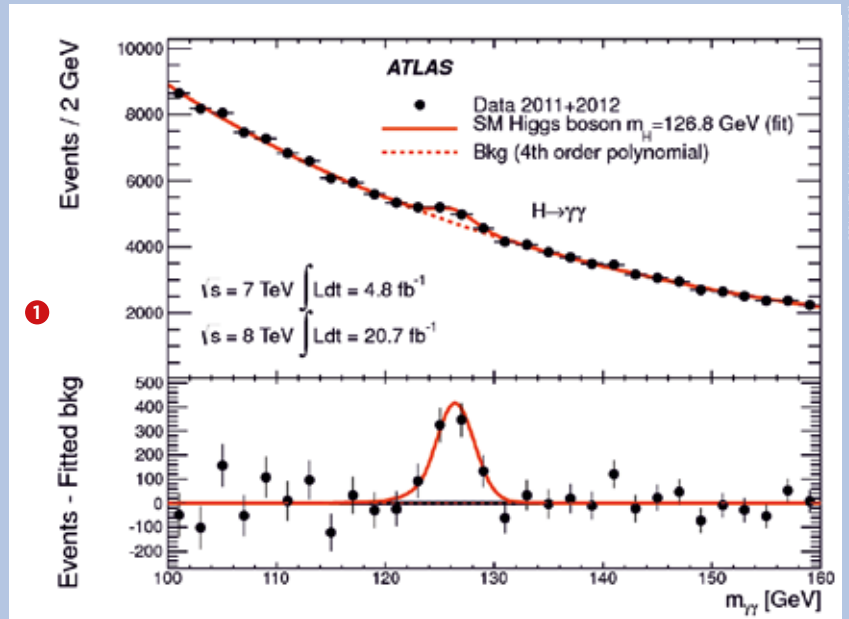
Erfahren Sie mehr über Ihre exzellenten Karrieremöglichkeiten unter www.randstad-wirkt.de

Ihre Sabine Christiansen



Zeitarbeit | Professional Services | Personalvermittlung | HR Lösungen | Inhouse Services

1. Bei der Auswertung der Messungen von Proton-Proton-Kollisionen am LHC tauchte das Higgs-Teilchen als kleine Erhebung in den Daten auf (nebenstehendes Bild). Die Originalgrafik stellt Messwerte der ATLAS-Arbeitsgruppe dar – Ereignisse, bei denen ein Higgs-Teilchen in zwei Gammaquanten zerfiel (Gamma-Gamma-Zerfallskanal). Das neue Boson zeigt sich hier bei einer Masse von 126,8 Gigaelektronvolt (Milliarden Elektronvolt). Der untere Bildteil stellt das Signal relativ zum Untergrund dar. 2. Aus Daten der CMS-Kollaboration, die im Vier-Leptonen-Zerfallskanal gemessen wurden, geht eine Higgs-Masse von etwa 125 Milliarden Elektronenvolt hervor (rote Kurve). Mittelt man über alle Zerfallskanäle, nähern sich die von ATLAS und CMS bestimmten Massenwerte einander an.



hoher Symmetrie. Drückt man diesen Zustand in einem Potenzialbild aus, entspricht er einer Kugel, die sich am Boden einer kreisrunden Schale befindet. Die Kugel – das Higgs-Feld – liegt am niedrigsten Punkt einer völlig symmetrischen Umgebung und hat keinerlei äußeren »Grund«, sich wegzubewegen.

Während das Universum expandierte und abkühlte, kam es jedoch zu einem Phasenübergang. Dabei wurde diese Symmetrie spontan gebrochen, indem sich in der Mitte der Potenzialschüssel ein Hügel bildete (Grafik S. 20); nun genügte schon eine winzige Störung, um die Kugel in irgendeine Richtung in die entstandene Mulde rollen zu lassen.

Die Symmetrie des Potenzials blieb dabei zwar erhalten; für uns ist sie jedoch »verdeckt«, weil wir nicht das Potenzial selbst messen, sondern nur die Ruheposition der Kugel – also den Zustand des Higgs-Felds – abseits des Symmetriezentrums. Anders gesagt: Das System selbst lässt sich weiterhin mit symmetrischen Gleichungen beschreiben, nicht aber sein Grundzustand.

Wenden die Physiker auf das BEH-Feld im Grundzustand nun die übli-

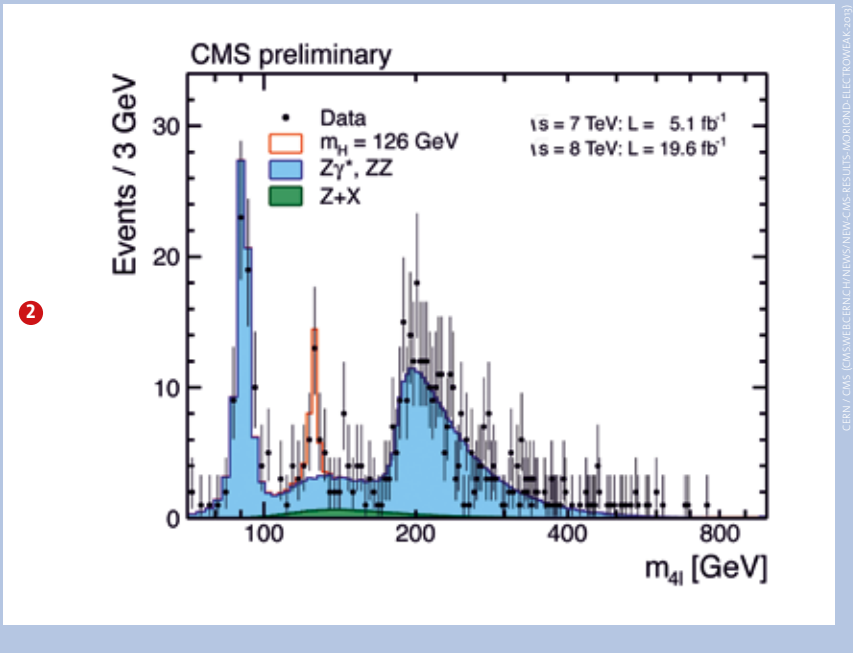
chen quantenfeldtheoretischen Regeln an, erhalten sie eine Theorie, in der unter anderem ein masseloses Vektorboson – das Photon –, drei mit Masse ausgestattete Vektorbosonen (W^+ , W^- und Z) sowie das skalare Higgs-Boson auftauchen. Insofern kann man die Erzeugung von Masse als Konsequenz der spontan gebrochenen Symmetrie betrachten.

Noch spektakulärer als die Suche nach W- und Z-Bosonen

Der Nachweis des neuen Teilchens ist eines der herausragendsten Ergebnisse experimenteller naturwissenschaftlicher Forschung in den letzten Jahrzehnten. Schon die Suche nach W- und Z-Bosonen war spektakulär gewesen, doch im Fall des Higgs kam erschwerend hinzu, dass die BEH-Theorie keinerlei Vorhersage über seine Masse macht – für diese lassen sich nur obere und untere Schranken angeben. Die Forscher wussten also nicht einmal genau, in welchem Massebereich sie suchen mussten. Überdies stellte sich ihr Erfolg unerwartet rasch ein: Die entscheidenden Messungen am ATLAS- und am CMS-Experiment fanden in dem vergleichsweise kurzen Zeitraum zwischen 2010 und 2012 statt.

Nachdem die Spekulationen über das Higgs nun ein Ende haben, bleibt noch die minder wichtige Frage zu erörtern, warum sich die Bekanntgabe der Physikpreisträger in diesem Jahr ungewöhnlicherweise um über eine Stunde verzögerte. Überlegte die Akademie in letzter Minute vielleicht doch noch, auch Experimentatoren oder das CERN selbst auszuzeichnen? Bekam sie späte Zweifel, ob die Auszeichnung zu früh kommt? Schließlich fehlt bislang noch die erforderliche Präzision von fünf Standardabweichungen, um eine endgültige Aussage über den Spin des Teilchens treffen zu können, und auch manche Zerfallswege – etwa der Zerfall des Bosons in Tau-Leptonen – sind noch nicht genau genug vermessen.

Der Grund für das Warten lag aber wohl schlicht darin, dass die Preisträger die gute Nachricht noch vor der Öffentlichkeit erfahren sollen und die Schwedische Akademie zwar Englert ans Telefon bekam, nicht aber Peter Higgs. »Wir haben alle Nummern ausprobiert, die wir hatten«, sagte Staffan Normark, Ständiger Sekretär der Akademie. Higgs war jedoch ohne Telefon unterwegs und erfuhr, wie er dortigen Journalisten schließlich erzählte, die Neuigkeit erst von einer einstigen Nachbarin.



Seinen Namen trägt das Higgs-Teilchen übrigens eher durch Zufall: Der Physiker Benjamin Lee hatte es bei einer Konferenz 1966 im kalifornischen Berkeley so getauft. Higgs selbst übt sich in britischer Zurückhaltung und nennt bei seinen Vorträgen stets alle maßgeblich Beteiligten.

Robert Brout hätte wohl ebenfalls ein Anrecht auf den Preis gehabt, doch die Akademie zeichnet nur lebende Wissenschaftler aus. Den freien Platz ließ sie mit gutem Grund leer. Schließlich: Wen unter den zahlreichen Forscherinnen und Forschern, die zum Teil bereits seit Jahrzehnten am Nachweis des Higgs-Bosons gearbeitet haben, hätte sie denn auswählen sollen?

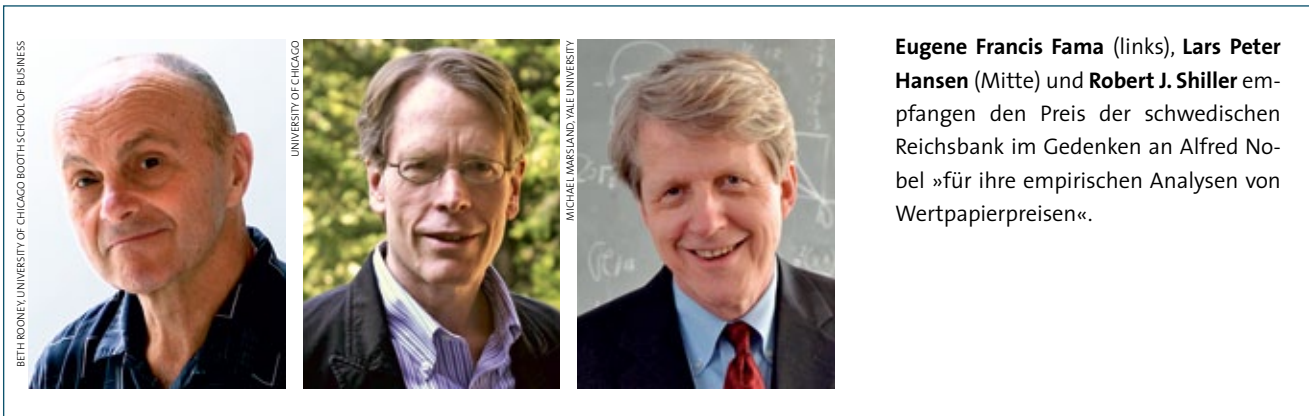
Georg Wolschin ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Wie weit lassen sich Aktienkurse vorhersagen?

Der diesjährige Wirtschaftsnobelpreis geht an drei Amerikaner, die zu demselben Thema sehr gegensätzliche Ansichten vertreten.

VON HILTRUD NEHLS



Eugene Francis Fama (links), **Lars Peter Hansen** (Mitte) und **Robert J. Shiller** empfangen den Preis der schwedischen Reichsbank im Gedenken an Alfred Nobel »für ihre empirischen Analysen von Wertpapierpreisen«.

»Diversifizierung« empfehlen die Finanzmarktstrategen dem vorsichtigen Anleger. In diesem Jahr ist auch das Nobelpreiskomitee bei der Auswahl der Wirtschaftsprize dieser Devise gefolgt. Um im Verständnis von Wertpapierpreisen (»asset prices«) in jedem Fall richtig zu liegen oder zumin-

dest nicht komplett falsch, ehrte es einfach drei Vertreter konträrer Ansichten und Herangehensweisen: Eugene Fama vertritt die These, dass die Finanzmärkte effizient und rational handeln; Robert Shiller hält darüber hinaus den »irrationalen Überschwang« (Titel seines Buchs von 2000) für eine wesentli-

che Einflussgröße; und Lars Peter Hansen hat die Methodik der empirischen Messung von Finanzmarktphänomenen und ähnlich gelagerten Themen der Wirtschaftswissenschaft vorangebracht.

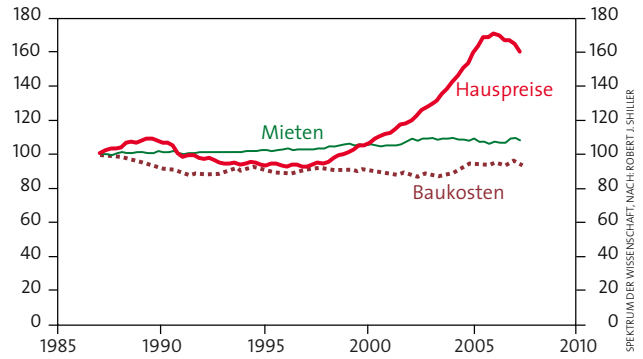
Auch der Einfluss, den die drei Laureaten auf die wissenschaftliche Debatte nehmen, könnte unterschiedlicher

Letzte Warnung vor der Katastrophe

Anfang September 2007, ein Jahr bevor die Weltfinanzkrise ihren spektakulären Höhepunkt erreichte, präsentierte Robert Shiller auf einer von der amerikanischen Zentralbank (Federal Reserve Bank) finanzierten Tagung die nebenstehende Grafik zum US-Immobilienmarkt. Alle Preise sind inflationsbereinigt und so skaliert, dass das Preisniveau des ersten Quartals 1987 gleich 100 gesetzt wird.

Für die der Grafik zu Grunde liegende Zahlen musste Shiller einen erheblichen Analyseaufwand treiben. Die Hauspreise entwickelten sich regional sehr unterschiedlich; da Vermietungen von Einfamilienhäusern selten sind, musste Shiller fiktive Mietpreise bestimmen, auf die sich der Eigentümer und der Bewohner eines Hauses einigen würden, wenn sie verschiedene Personen wären.

In dem Zeitraum von 1987 bis 2007 sind die Baukosten (deren größter Anteil die Bauarbeiterlöhne sind) langsamer gestiegen als die Inflationsrate, während das Mietniveau geringfügig darüber hinausgegangen ist. Da die Differenz zwischen Mieten und Baukosten größer geworden ist als im Referenzjahr 1987, haben sich seitdem die Aussichten, durch Bau und Vermietung eines Hauses einen Gewinn zu erwirtschaften, verbessert. Damit sich jedoch der Kauf eines bestehenden Hauses mehr lohnt als 1987, müsste die Hauspreisentwicklung unter der Mietentwicklung liegen. Zu beobachten ist jedoch ab 2000 ein Anstieg



der Hauspreise unabhängig von den Mieten, was nicht mit Fundamentaldaten zu erklären, sondern (zumindest in diesem Umfang) ein deutlicher Hinweis auf eine Blase ist.

Rationale Marktteilnehmer würden das erkennen, durch massenhaften Verkauf überbewerteter Häuser einen Gewinn erzielen und bereits durch das so erhöhte Angebot die Preise auf ein marktkonformes Niveau zurückbringen. Aber so viele verkäufliche Häuser gibt es nicht; die Rationalen sind in der Minderheit und können nichts gegen die vielen Hauseigentümer ausrichten, die weiter an die Wertsteigerung ihres Besitzes glauben. Also wächst die Blase weiter.

Das kleine Absinken am Ende der Preiskurve ist noch kein sicheres Zeichen dafür, dass die Blase bald platzen würde (was sie dann tat): Die Immobilienpreise in London waren nach einem kurzen Einbruch 2005 so rasant gestiegen wie zuvor.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH ROBERT J. SHILLER

kaum sein. Das gilt vor allem für Fama und Shiller. Während der eine ein Thema abgrenzte, einen analytischen Rahmen schuf und eine grundlegende These entwickelte, hat der andere diese Theorie gründlich angegriffen und teilweise demontiert.

Effiziente Märkte und irrationaler Überschwang

Eugene Francis Fama, geboren 1939 in Boston, arbeitet seit seiner Promotion 1964 (bei Benoît B. Mandelbrot über »das Verhalten der Preise am Aktienmarkt«) mit nur kurzen Unterbrechungen an der University of Chicago. Er begründete mit seiner »Efficient Market Hypothesis« einen neuen Zweig der Kapitalmarkttheorie, die Theorie der informationseffizienten Märkte. Mit seinen Aussagen zum aktuellen Geschehen auf den Finanzmärkten wirkt er dagegen eher weltfremd: Fama betont nach wie vor, er wisse nicht, was das Wort »Blase« in der Analyse von Finanz-

märkten bedeuten solle. Für ihn ist der Preis einer Aktie immer die bestmögliche Schätzung des tatsächlichen, immanenten Werts – die Märkte haben immer Recht.

Der keynesianisch geprägte Shiller dagegen bewegt sich gern dicht am Puls der Zeit und wird gelegentlich sogar als »Krisenprophet« gerühmt. Er hat sowohl das Platzen der Dotcom-Blase 2000 als auch die Subprime-Krise 2007 früh kommen sehen und davor gewarnt (Kasten oben). Der von ihm mitkonzipierte Case-Shiller-Hauspreisindex soll die Informationslage auf den Asset-Märkten verbessern; tatsächlich gehört er zu den wenigen ökonomischen Indikatoren, die einen messbaren Einfluss auf die amerikanischen Aktienmärkte haben. Shiller veröffentlicht seine Ideen nicht nur in Zeitschriften und Lehrbüchern, sondern hat echte Bestseller geschrieben: »Irrationaler Überschwang« (2000) und, zusammen mit George A. Akerlof, »Animal Spirits«

(2009; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 11/2009, S. 107). Aktuell beschreibt er in »Märkte für Menschen« seine Vision einer besseren Finanzmarktorganisation.

Fama wies auf Basis empirischer Daten nach, dass man Aktienkurse kurzfristig nicht vorhersagen kann. Schon kurz nach dem Bekanntwerden relevanter Informationen zu einer Aktie lässt sich die weitere Kursentwicklung durch einen Prozess beschreiben, den die Mathematiker »Irrfahrt« (random walk) nennen: Sie ist zufällig. Aus diesem Ergebnis schließt Fama: Die Marktakteure handeln rational und verarbeiten Informationen effizient, das heißt insbesondere ohne nennenswerten Zeitverzug. Würde sich die Information, dass eine Aktie über Nacht wertvoller geworden ist, nur schleppend verbreiten, dann könnten die gut Informierten ihren verschlafeneren Kollegen die Wertpapiere noch zum alten, niedrigen Preis abkaufen und da-

mit einem risikolosen Gewinn (eine »Arbitrage«) erzielen. Der Preis der Aktie würde dann nur sehr allmählich auf das neue, höhere Niveau ansteigen. Das wird nicht beobachtet. Also sind alle relevanten Parameter immer schon im aktuellen Kurs enthalten.

Doch dieser weitere Schluss ist in gewisser Weise auch ein Glaubensbekenntnis, denn was sind die »relevanten Parameter«? Sicherlich das Risiko – doch wie wird es gemessen? Wichtig ist auch die Gegenwartspräferenz, auszudrücken durch den Diskontfaktor: Wie viel bin ich bereit zu zahlen, damit ich einen Euro schon jetzt und nicht erst in einem Jahr zur Verfügung habe? In Famas Modell ist er konstant, was nicht den Realitäten entsprechen muss. Weitere Annahmen seiner Theorie sind in der echten Welt nicht nur manchmal, sondern regelmäßig nicht erfüllt: Kauf oder Verkauf eines Wertpapiers sind nicht mit Nebenkosten oder Steuern belastet, jeder Akteur hat unendlich viel Kapital zur Verfügung, Informationen sind für alle Marktteilnehmer gleichzeitig verfügbar. Aus diesen Gründen entzieht sich die These der Rationalität auf den Finanzmärkten in der von Fama verallgemeinerten Form der empirischen Prüfbarkeit und bleibt umstritten.

Auch Robert J. Shiller, geboren 1946 in Detroit und heute Professor an der Yale University, versucht über die Prognostizierbarkeit von Aktienkursen

Schlüsse auf die Rationalität auf Aktienmärkten zu ziehen. Er zweifelt auch nicht an dem Ergebnis von Fama für kurze Zeitspannen. Allerdings fand er heraus, dass über einen Zeitraum von vielleicht 100 Jahren die Aktienkurse weit stärker schwanken, als mit den üblichen Parametern erklärbar ist. Also müsse es jenseits von Dividenden, Zeitpräferenz und Risiko noch weitere systematische, bislang unberücksichtigte Einflüsse geben.

Bauchgefühl und Herdentrieb

Für Shiller, der auch Aktienhändler und Investoren befragt, steht mittlerweile fest, dass die Marktakteure eben nicht immer perfekt informiert sind und rational handeln, sondern sich sehr menschlich verhalten, etwa dem »Bauchgefühl« gehorchen oder einigermaßen blind der Herde folgen. »Behavioral finance« heißt das Schlagwort, das Daniel Kahneman (Wirtschaftsnobelpreis 2002, siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 22) dafür geprägt hat. Und wenn es dann vielleicht eine gute »Story« gibt, wie die Dotcom-Geschichte, der zufolge das Internetzeitalter ganz neue Dimensionen von Wohlstand erschließen wird, schätzt plötzlich ein Großteil der Investoren künftige Renditen übermäßig optimistisch ein und ist bereit, entsprechend höhere Preise pro Aktie zu zahlen.

Doch warum nutzen in solchen Situationen nicht einige rationale Investo-

ren die Irrationalität der anderen aus? Wer es besser weiß und einen kühlen Kopf behält, müsste doch Arbitragemöglichkeiten finden und nutzen, und bereits dadurch müsste über das Wechselspiel von Angebot und Nachfrage der Aktienkurs zum fundamental erklärbaren Preis zurückkehren. Shiller beantwortet diese Frage mit institutionellen Schranken, etwa Handelslimiten oder begrenzten Kreditmöglichkeiten: In Zeiten irrationalen Überschwangs wissen die wenigen Rationalen es zwar besser, haben aber nicht genug Kapital zur Verfügung, um dieses Wissen per Arbitrage zu Geld zu machen. So entsteht eine Blase, diese entwickelt eine Eigendynamik und platzt schließlich.

Der 1952 in Urbana (Illinois) geborene Lars Peter Hansen, seit 1981 Kollege von Fama in Chicago, hat sich auf einem nochmals anderen Weg seinen Platz in der Reihe der wirklich bedeutenden Wirtschaftswissenschaftler verdient. Mit seiner »Generalized Method of Moments« (GMM) schuf er das Rüstzeug für die empirische Prüfung von finanzmarkttheoretischen Thesen. Heute gehört die GMM zu den Standardmethoden der Ökonometrie und nimmt einen festen Platz in jedem weiterführenden Lehrbuch ein.

Inzwischen hat sich die GMM von ihrem ursprünglichen Anwendungsgebiet Finanzmarkt völlig gelöst und wird auch in anderen Disziplinen eingesetzt. Ausgangspunkt ist die in der Statistik

ANZEIGE

GUT ZU WISSEN

DIE NEUEN HIGHLIGHTS VON POLYBAND!



GENERATION EARTH –
Wie wir Menschen unsere
Welt verändern



REISE ZUM MITTELPUNKT
DER ERDE – Der rastlose
Planet



AUFBRUCH DER
KONTINENTE –
Die Entstehung der Erde



DIE GESCHICHTE DER
STERNE –
Vom Leben und Sterben der
Himmelskörper



MYSTERIEN DES
WELTALLS 3 – Mit
Morgan Freeman

Die Erforschung der Forschung

Impactanalysen als Mittel zur Früherkennung innovativer Ansätze

Der österreichische Philosoph Karl Popper (1902–1994), der nach sozialistischen Anfängen bald zum strikten Gegner der Planwirtschaft konvertierte, lehnte jeden Versuch, die Zukunft vorherzusehen und Regeln für gesellschaftliche Entwicklungen aufzustellen, als gefährlichen Irrweg ab. Sein Hauptargument: Die Zukunft ist allein schon deshalb offen, weil sich wissenschaftliche Erkenntnisse nicht planen lassen. In der Tat kommen Erfindungen und Entdeckungen stets überraschend – sonst wären sie nicht neu –, und oft krepeln sie die Gesellschaft gründlicher um, als Futurologen und Sciencefiction-Autoren sich das träumen ließen.

Dennoch versuchen Soziologen neuerdings verstärkt, Erkenntnisse über den Erkenntnisgewinn zu gewinnen und Wissen über den Wissenschaftsprozess zu sammeln. Ihr erklärtes Ziel: vom popperschen Stochern im Nebel zu planmäßiger Erkenntnisuche und gezielter Förderung zu gelangen. Für das zunehmende Streben nach solch empirisch-quantitativer »Metaerkenntnis« nennt der Wissenschaftssoziologe James A. Evans von der University of Chicago zwei Gründe.

Erstens eröffnen die elektronischen Medien, speziell das Internet, völlig neuartige Möglichkeiten, Erkenntnisanalysen anhand riesiger Datenmengen durchzuführen (*Science* 331, S. 721–725, 2011). Zweitens scheint es immer mühsamer zu werden, überhaupt neue Entdeckungen zu machen. Da bietet die Analyse von Forschungsprozessen eine Chance, den Aufwand zu reduzieren (*Science* 342, S. 44–45, 2013).

Für quantitative Aussagen über den Wert von Entdeckungen braucht man ein Maß. Die Metaforschung konzentriert sich darum vorderhand auf Analysen und Prognosen des so genannten Impacts wissenschaftlicher Arbeiten. Gemeint ist die Wirkung eines Forschungsartikels in der Fachwelt, gemessen daran, wie oft er in anderen Publikationen zitiert wird.

Beispielsweise hat ein interdisziplinäres Team um den Netzwerkforscher Albert-László Barabási von der Northeastern University in Boston den langfristigen Impact von 200 zufällig ausgewählten Artikeln im Fachorgan »Physical Review« zwischen 1960 und 1970 analysiert. Es gelang ihm, den zeitlichen Verlauf in kompakten Formeln zusammenzufassen und daraus eine Prognose für künftige Zitierungen herzuleiten (*Science* 342, S. 127–132, 2013). Bemerkenswerter Befund: Bereits aus der Gestalt der anfänglichen Zitierkurve lässt sich der gesamte Impact abschätzen. Auf diese Weise könnte man also bedeutende Arbeiten schon früh erkennen und die entsprechende Forschung gezielt fördern.

Was aber zeichnet eine neuartige, kreative Idee aus? Um diese Frage quantitativ zu beantworten, analysierte ein Team von Netzwerkforschern um den Wirtschaftswissenschaftler Ben Jones an der Northwestern University in Evanston (Illinois) nicht weniger als 17,9 Millionen Artikel aus allen möglichen Wissenschaftszweigen. Das Resultat dieses gigantischen Dataminings erwies sich, in gewöhnlicher Umgangssprache statt in Kurven und Formeln ausgedrückt, als überraschend unspektakulär. Eine Arbeit mit herausragend hohem Impact bietet demnach nicht ausschließlich Neues. Vielmehr enthält sie in der Regel einen hohen Anteil herkömmlicher Wissenschaft, in den nur relativ wenige wirklich neuartige Details eingebettet sind (*Science* 342, S. 468–472, 2013).

Durch solche Metaforschungen wird Poppers These vom prinzipiell spontanen Erkenntnisgewinn zwar nicht widerlegt – aber doch relativiert, wie mir scheint. Das Neue kommt nicht urplötzlich aus dem Nichts, sondern als überraschendes Ergebnis planmäßiger Vorarbeit.



Michael Springer

seit Langem bekannte Momentenmethode. Momente sind Kennzahlen einer statistischen Verteilung, wie der Mittelwert oder die Varianz, mit der zusätzlichen Eigenschaft, dass sich Schätzwerte für sie relativ unproblematisch aus einer Stichprobe gewinnen lassen.

Will man nun einen unbekanntem Parameter einer statistischen Verteilung aus einer Stichprobe abschätzen, drückt man ihn als Funktion der Momente aus und berechnet ihn aus Schätzwerten für dieselben. Diese Idee hat Hansen erweitert. Der Charme seines Ansatzes ist, dass sich damit auch die Parameter von nichtlinearen Modellen statistisch bestimmen lassen, ohne dass man, wie in vielen anderen Fällen, unrealistische Annahmen treffen müsste. Hansens Methode umfasst viele andere statistische Schätzverfahren als Spezialfälle.

Paul Krugman, selbst Wirtschafts-Nobelpreisträger (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 18) und bekanntermaßen um drastische Worte nicht verlegen, findet für die Entscheidung des Preiskomitees treffende und nur leicht vergiftete Lobesworte: »Famas Arbeit über effiziente Märkte war bedeutend, weil sie den Maßstab aufstellte, an dem alle alternativen Theorien sich zu messen haben. Shiller hat in unübertroffener Weise die Fälle aufgezeigt, in denen Famas Hypothese in der Praxis nicht zutrifft. Wenn Fama in letzter Zeit auch allerlei dummes Zeug erzählt hat – nicht tragisch, er hat den Preis auf jeden Fall verdient, ebenso wie Shiller. Was Hansen angeht: Ich kenne mich mit seinen ökonometrischen Verfahren überhaupt nicht aus, aber ich vertraue den Experten, die ihm ein großes Werk attestieren. Alles bestens – und die Mitglieder des Preiskomitees sind wirklich zu bewundern. Es ist ihnen gelungen, Fama die lang verdiente Ehre zuzuerkennen, ohne zugleich so auszusehen, als hätten sie den Kontakt zur realen Welt komplett verloren.«

Hiltrud Nehls ist promovierte Volkswirtin und arbeitet bei der NRW.Bank, der Förderbank des Landes Nordrhein-Westfalen, als Länderrisiko-Analystin.

DIGITAL AM
SONNTAG
—
MONTAG
AM KIOSK

KULTUR

Reflexion braucht **Information.**



Freuen Sie sich auf neue Denkanstöße. FOCUS liefert Ihnen wöchentlich interessante Interviews und Reportagen, die tiefe Einblicke in das kulturelle und gesellschaftliche Leben gewähren. Lassen Sie sich jede Woche aufs Neue inspirieren.

Jetzt per QR-Code zum digitalen Angebot von FOCUS.

Erleben Sie das FOCUS Magazin multimedial mit Augmented Reality.

Das Entscheidende im

FOCUS

Wie pflanzen wir uns in Zukunft fort?

Unfruchtbarkeit ist kein unabwendbares Schicksal mehr. Verfahren der Reproduktionsmedizin können vielen kinderlosen Paaren heute zum ersehnten Nachwuchs verhelfen – oder genetisch vorbelasteten Eltern ein gesundes Kind garantieren. Allerdings werfen sie teils schwierige ethische Fragen auf. Das gilt umso mehr für mögliche Weiterentwicklungen.

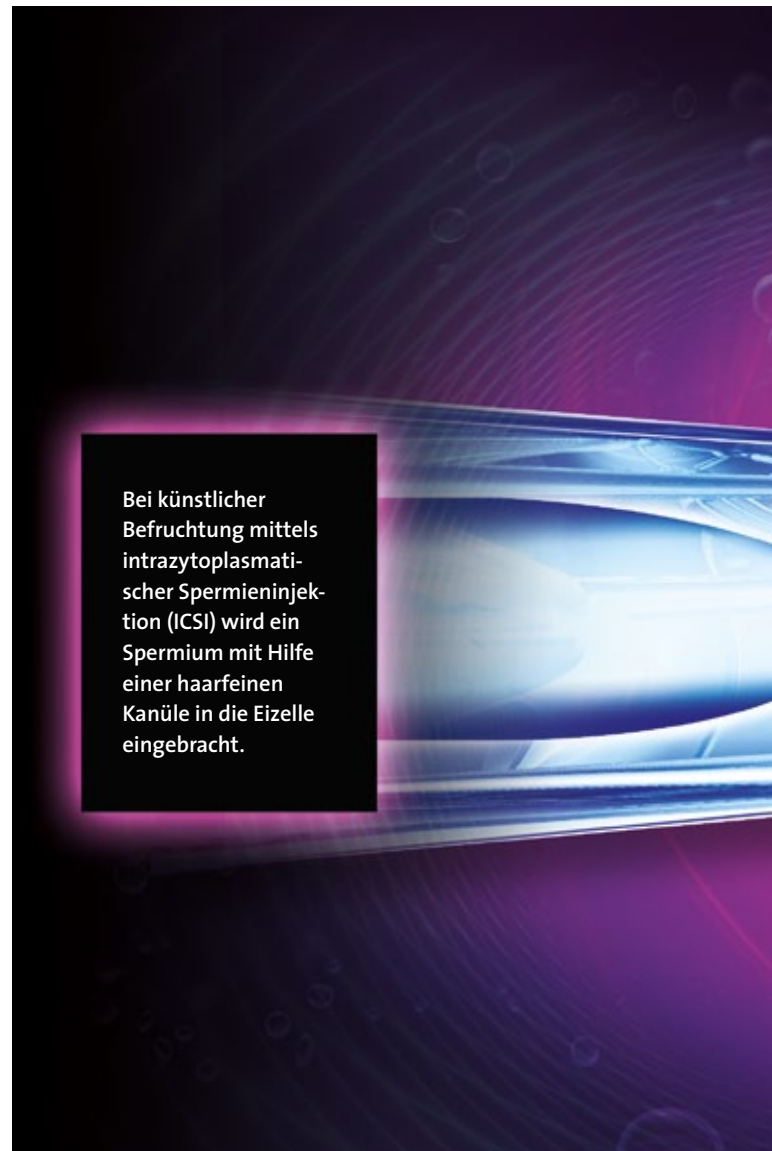
Von Pierre Jouannet

Seit 50 Jahren gewinnt die Medizin einen immer stärkeren Einfluss auf die Fortpflanzung des Menschen – sei es, um sie sicher zu verhindern oder um sie zu ermöglichen, wenn sie auf natürlichem Weg nicht gelingt. Unfruchtbarkeit, von den betroffenen Paaren oft als schwere Bürde erlebt, ist heute kein unabwendbares Schicksal mehr. Mediziner entwickeln immer raffiniertere Methoden, die Befruchtung und frühe Embryonalentwicklung mit technischen Mitteln zu ermöglichen. Bemerkenswerterweise fallen diese Fortschritte mit grundlegenden soziokulturellen Veränderungen des Familienbilds zusammen.

Bis Ende der 1960er Jahre gab es kaum Forschungsarbeiten zur Unfruchtbarkeit. Heute ist die medizinisch unterstützte Fortpflanzung in den meisten Ländern Routine. Bei der einfachsten Methode, der künstlichen Besamung, wird männliches Spermium gewonnen und mit technischen Mitteln in die Gebärmutter der Frau eingeführt. Aufwändiger ist die künstliche Befruchtung oder In-vitro-Fertilisation (IVF). Dabei findet die Verschmelzung von Spermien und Eizellen in Kulturgefäßen statt. Der entstandene Embryo wird anschließend in die Gebärmutter eingepflanzt. Zum Methodenarsenal gehören außerdem das Spenden von Spermien, Eizellen oder Embryonen sowie die langfristige Aufbewahrung von Keimzellen und Embryonen.

Weltweit sind bislang etwa fünf Millionen Kinder nach künstlicher Befruchtung zur Welt gekommen. In Deutschland wurden laut In-vitro-Fertilisationsregister im Jahr 2011 insgesamt 9178 Babys nach Anwendung reproduktionsmedizinischer Verfahren geboren. Das entspricht knapp 1,4 Prozent aller Geburten in diesem Zeitraum.

In welche Richtung entwickelt sich die Reproduktionsmedizin? Das lässt sich schwer sagen, weil es unter anderem von sozialen und politischen Vorgaben abhängt, die der Anwendung künstlicher Methoden in der Fortpflanzung Grenzen setzen. In vielen Ländern unterliegen reproduktions-



Bei künstlicher Befruchtung mittels intrazytoplasmatischer Spermieninjektion (ICSI) wird ein Spermium mit Hilfe einer haarfeinen Kanüle in die Eizelle eingebracht.

medizinische Verfahren strengen gesetzlichen Regelungen. In Deutschland etwa sind sie heterosexuellen Paaren im gebärfähigen Alter vorbehalten. In anderen Ländern wie den USA, Großbritannien und den Niederlanden bestehen dagegen keinerlei Beschränkungen hinsichtlich körperlicher Verfassung, Alter, sexueller Orientierung und Familienstand.

Andere Trends hängen von heute noch nicht absehbaren wissenschaftlich-technischen Fortschritten ab. Wer hätte zum Beispiel Anfang der 1990er Jahre geahnt, dass die intrazytoplasmatische Spermieninjektion (ICSI) – bei der das Spermium mit Hilfe einer feinen Kanüle in die Eizelle eingeführt wird (siehe Bild unten) – die Behandlung der männlichen Unfruchtbarkeit revolutionieren würde? Inzwischen entfallen 60 Prozent der künstlichen Befruchtungen auf diese Methode. Forscher erkunden jedoch weiterhin neuartige Ansätze, um die Erfolgsquote zu steigern und die Risiken für die Kinder zu minimieren.

AUF EINEN BLICK

KAMPF DER UNFRUCHTBARKEIT

1 Mit **reproduktionsmedizinischen Verfahren** lässt sich Unfruchtbarkeit heute oft überwinden. Auch einzelne **Erbkrankheiten** können ausgeschlossen werden.

2 Ziel aktueller Forschungsarbeiten ist es, die **Eingriffe weniger belastend** zu gestalten, die **Erfolgsquote zu verbessern** und die Chancen auf ein gesundes Kind zu erhöhen.

3 In einer Zeit, da sich die **Familienkonstellationen** in der westlichen Welt stark verändern, werfen die Fortschritte der Reproduktionsmedizin zahlreiche Fragen auf. **Künstliche Befruchtung** für alle und in jedem Alter? Auch ohne Partner oder Partnerin oder für gleichgeschlechtliche Paare? Und Fortpflanzung sogar noch nach dem Tod?



VIRGINE DENIS (WWW.ILLUSTRATION-MEDICALE.FR)

Denn derzeit bringt die IVF noch erhebliche Belastungen für die Frau mit sich. Diese erhält zunächst Hormongaben zur Stimulation der Eierstockfollikel: der Zellsäckchen, in denen die Eizellen entstehen. Dadurch lassen sich mehrere Eizellen gleichzeitig gewinnen, was die Erfolgsaussichten der Behandlung verbessert. Dabei ist die Dosierung der Hormone kritisch. Nach herkömmlicher Auffassung sollte sie relativ hoch sein, damit möglichst viele verwertbare Eizellen reifen. Allerdings kann es bei Überstimulation zu Übelkeit und Schmerzen, Flüssigkeitsansammlung im Bauch, Atemnot und Störungen der Blutgerinnung kommen.

Neuen Erkenntnissen zufolge verringert eine weniger intensive Hormonbehandlung, die nicht so viele Eizellen liefert und eher der natürlichen Situation entspricht, die Wahrscheinlichkeit einer Schwangerschaft keineswegs. In Zukunft dürften zum Auslösen des Eisprungs individuell angepasste Methoden dienen, die sich auf klinische, hormonelle und genetische Eigenheiten der jeweiligen Frau stützen.

Nach dem Reifen der Eizellen werden die Follikel unter Ultraschallkontrolle mit einer durch die Vagina eingeführten feinen Kanüle abgesaugt. Der Eingriff ist zwar kurz und unkompliziert, aber nicht völlig risikofrei. In einem Reagenzglas bringt man die Eizellen dann mit den Spermien zusammen oder injiziert diese. Wenn nötig lassen sich die Samenzellen auch operativ aus den Hoden entnehmen.

Um die Chancen auf eine Schwangerschaft zu erhöhen, wird nach der künstlichen Befruchtung oft mehr als ein Embryo in die Gebärmutter eingesetzt. Mehrlingsgeburten sind nach einer IVF daher viel häufiger als nach natürlicher Empfängnis. In Deutschland kamen im Jahr 2010 bei 32 Prozent der Geburten nach IVF Zwillinge zur Welt und bei 2,3 Prozent sogar Drillinge.

Die Mehrlingsschwangerschaft und das damit verbundene Risiko einer Frühgeburt ist heute die wichtigste Komplikation bei der medizinisch unterstützten Fortpflanzung. Viele international anerkannte Experten fordern daher, vorrangig auf die Geburt eines einzelnen gesunden Kindes hin-

zuwirken. Dieses Ziel ist erreichbar, wenn der Arzt nach der IVF weniger Embryonen einsetzt und dabei diejenigen auswählt, welche die besten Chancen haben, sich in der Gebärmutter normal zu entwickeln. In Schweden und Finnland wird der Transfer einzelner Embryonen bereits allgemein praktiziert. Dadurch ist die Zahl der Mehrlingsgeburten erheblich zurückgegangen, ohne dass die Erfolgsaussichten der IVF nennenswert gesunken wären.

Beurteilung der Überlebensfähigkeit von Embryonen

Zur Bewertung der Überlebenschancen eines Embryos dienen per Mikroskop beobachtbare Kriterien wie der Rhythmus der ersten Teilungen, die Anzahl der Zellen und der Kerne pro Zelle sowie die Menge an Zellbruchstücken. Das Risiko einer Fehlgeburt ist erhöht, wenn sich der Embryo zu schnell oder zu langsam teilt: Nach zwei Tagen sollte er aus vier Zellen bestehen. Mit steigendem Anteil an Zellfragmenten und mehrkernigen Zellen nimmt die Überlebensfähigkeit ebenfalls ab. Legt man diese Kriterien zu Grunde und ist die Frau jung genug, sollte der Transfer eines einzelnen Embryos für eine Schwangerschaft genügen.

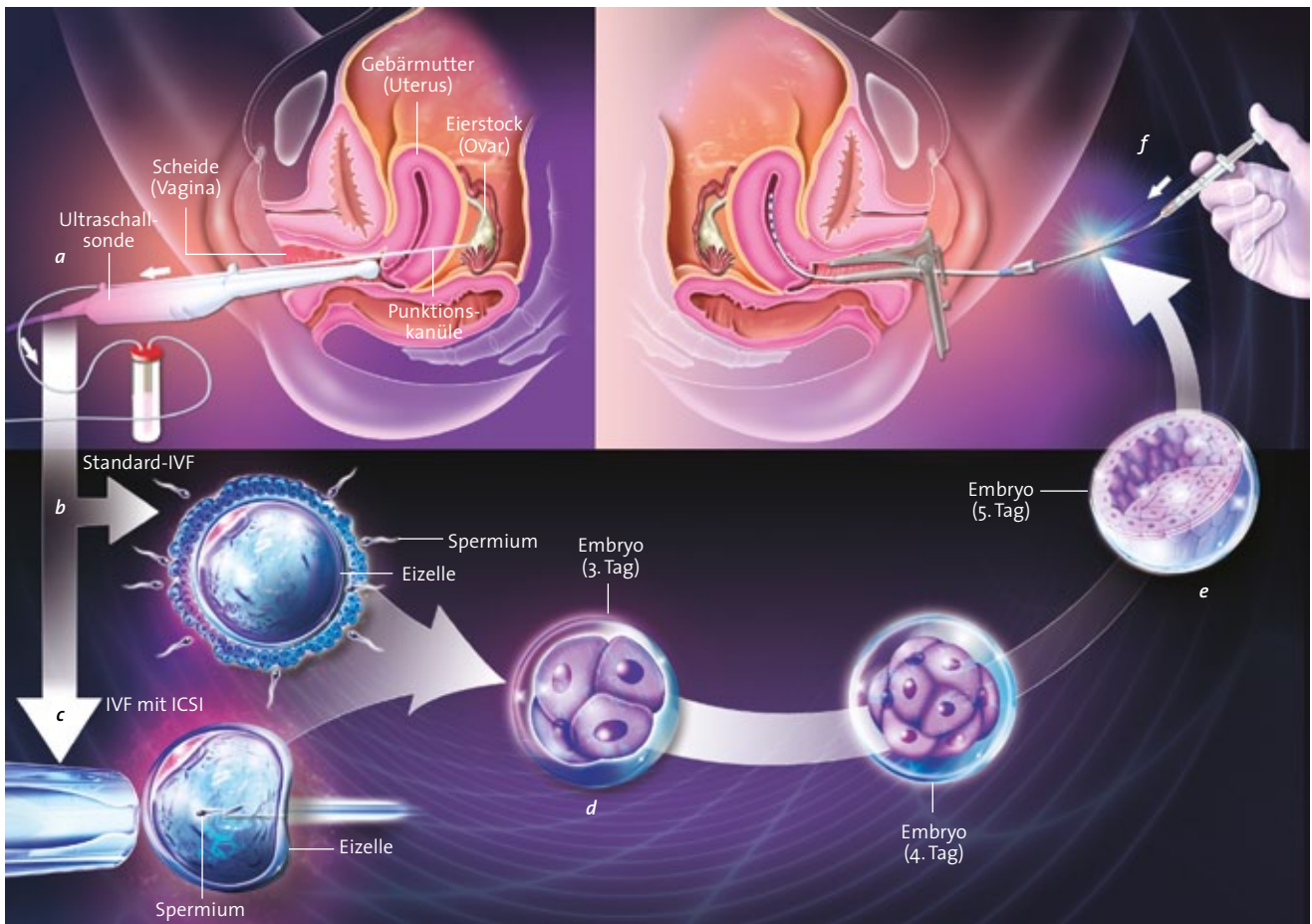
Auf diese Weise ginge nicht nur die Anzahl frühgeborener Kinder zurück – auch die Behandlungskosten würden sinken. Allerdings lässt sich die Überlebensfähigkeit eines Embryos noch keineswegs zuverlässig ermitteln. Bei 53076 im Jahr 2011 in Deutschland durchgeführten In-vitro-Fertilisationen wurden 48166 Embryonen in die Gebärmutter eingesetzt. Doch kam es lediglich in 13841 Fällen zu einer Schwangerschaft, und nur 9178 Kinder wurden geboren, was einer Erfolgsquote von nicht einmal 20 Prozent entspricht.

Trotz der in den letzten 30 Jahren erzielten Fortschritte sind die zellulären und molekularen Mechanismen der frühen Embryonalphase sowie die optimalen Bedingungen für ihren Ablauf in Kultur noch nicht ausreichend erforscht. Immerhin können schon jetzt über mikroskopische Beobachtungen hinausgehende funktionelle Untersuchungen am Embryo durchgeführt werden.

So lässt sich mittels Analyse von Boten-RNA-Molekülen – Abschriften der Gene, die an den Ribosomen zur Synthese der darauf kodierten Proteine dienen – die Genaktivität verfolgen, die beim Menschen am dritten Tag nach der Befruchtung einsetzt. Australische Forscher gewannen die embryonale RNA aus Zellen des Trophektoderms, die später die Plazenta bilden. Diese Zellen hatten sie fünf Tage alten Embryonen im Blastozystenstadium vor dem Transfer in die Gebärmutter entnommen.

Wie sich herausstellte, unterscheidet sich das Konzentrationsprofil der produzierten RNAs – das Transkriptom – bei Embryonen, nach deren Einpflanzung ein Kind zur Welt kam, und solchen, die sich nicht erfolgreich entwickelten. Auch der Stoffwechsel des wenige Tage alten Keims lässt sich anhand von Analysen des Kulturmediums beurteilen. Dabei zeigt sich etwa, welche Substanzen der Keim aufnimmt und welche nicht.





Die künstliche Befruchtung oder In-vitro-Fertilisation (IVF) umfasst mehrere Behandlungsschritte. Nach Stimulation der Eizellreifung in den weiblichen Eierstöcken entnimmt der Arzt unter Ultraschallkontrolle Eizellen mittels einer Punktionskanüle (a). Unter dem Mikroskop sucht er dann geeignete Exemplare aus und bringt diese zur Befruchtung in einer Nährlösung mit Spermien zusammen (Standard-IVF, b) oder führt per Injektion je ein Spermium ein (ICSI, c). Die befruchteten Eizellen bleiben zunächst in der Nährlösung und entwickeln sich im Labor zu Embryonen. Am dritten Tag (im 8-Zell-Stadium, d) können dem Embryo zwei Zellen für die Präimplantationsdiagnostik entnommen werden. Nach fünf Tagen (im Blastozystenstadium, e) wird er mittels einer flexiblen Kanüle in die Gebärmutter implantiert (f).

Solche Techniken sind anspruchsvoll; denn sie müssen mit wenigen Zellen beziehungsweise wenigen Mikrolitern Medium auskommen. Doch das Gebiet macht rasche Fortschritte, und es kann gut sein, dass wir schon bald über leistungsfähige und schonende mikroskopische Methoden verfügen, um die Entwicklungsfähigkeit von Embryonen zuverlässig zu beurteilen. Auch könnten Entwicklungsstörungen mittels Veränderung des Kulturmilieus korrigiert werden.

Dies sind viel versprechende Ansätze, doch unterliegen Forschungen an menschlichen Embryonen in vielen Ländern, darunter auch Deutschland, starken Beschränkungen. So dürfen in der Bundesrepublik Embryonen, die Gegenstand von Forschungsarbeiten waren, keinesfalls in die Gebärmutter einer Frau eingesetzt werden.

Die medizinisch unterstützte Fortpflanzung kann aber nicht nur unfruchtbaren Paaren zu Kindern verhelfen,

sondern befreit auch die weibliche Fruchtbarkeit von den Zwängen der biologischen Uhr. Frauen entscheiden sich aus beruflichen oder ökonomischen Gründen nämlich immer später dafür, Kinder zu bekommen. Da die Fertilität jedoch mit steigendem Alter drastisch abnimmt, suchen mehr und mehr von ihnen medizinische Hilfe, um auch später im Leben noch Mutter werden zu können.

Der Verlust der Fruchtbarkeit beruht im Wesentlichen auf der Alterung der Eizellen, die allmählich die Fähigkeit verlieren, einen entwicklungsfähigen Embryo hervorzubringen. Die künstliche Befruchtung kann hier keine Abhilfe schaffen. Die Wahrscheinlichkeit einer Schwangerschaft nimmt ab dem 40. Lebensjahr auch bei diesem Verfahren stark ab.

Ältere Frauen können jedoch ohne Weiteres schwanger werden, wenn die zur IVF verwendeten Eizellen von einer jüngeren Spenderin stammen. Dann bleibt die Erfolgsquote

bei künstlicher Befruchtung selbst in fortgeschrittenem Alter konstant hoch. Das zeigen Erfahrungen aus den USA. 2009 wurden nach Angaben der Centers of Disease Control and Prevention (CDC) in Bethesda (Maryland) elf Prozent der 146 244 dokumentierten künstlichen Befruchtungen in Amerika bei über 42-jährigen Frauen vorgenommen. Die Hälfte von ihnen erhielt gespendete Eizellen oder Embryonen. Rund 50 Prozent dieser Frauen brachten ein Kind zur Welt. Bei der anderen Hälfte, denen Embryonen aus eigenen Eizellen eingesetzt wurden, waren es nur zehn Prozent.

Eingefrorene Eizellen oder Spermien erlauben Fortpflanzung noch im hohen Alter oder nach dem Tod

Eine andere Möglichkeit, den Faktor Zeit auszuschalten, bestünde darin, einer Frau in jungen Jahren Eizellen oder Eierstockgewebe zu entnehmen, um es später, wenn die natürliche Fruchtbarkeit schwindet, zur Fortpflanzung verwenden zu können. Verbesserte Konservierungsmethoden wie die Vitrifikation – blitzartiges Einfrieren ohne Kristallbildung – erlauben das heute. Tatsächlich gibt es inzwischen zum Beispiel in den USA oder den Niederlanden Zellbanken für Eizellen, die aus nichtmedizinischen Gründen entnommen wurden. Dabei ist jedoch nicht garantiert, dass die aufbewahrten Zellen noch funktionsfähig sind, wenn sie schließlich gebraucht werden. Zudem ist ihre Entnahme nicht völlig risikolos.

Spinnt man diesen Gedanken weiter, stellt sich schließlich die Frage nach einer Fortpflanzung über den Tod hinaus. Der Transfer von Embryonen in die Gebärmutter einer Frau, wenn der männliche Erzeuger nicht mehr lebt, ist in Deutsch-

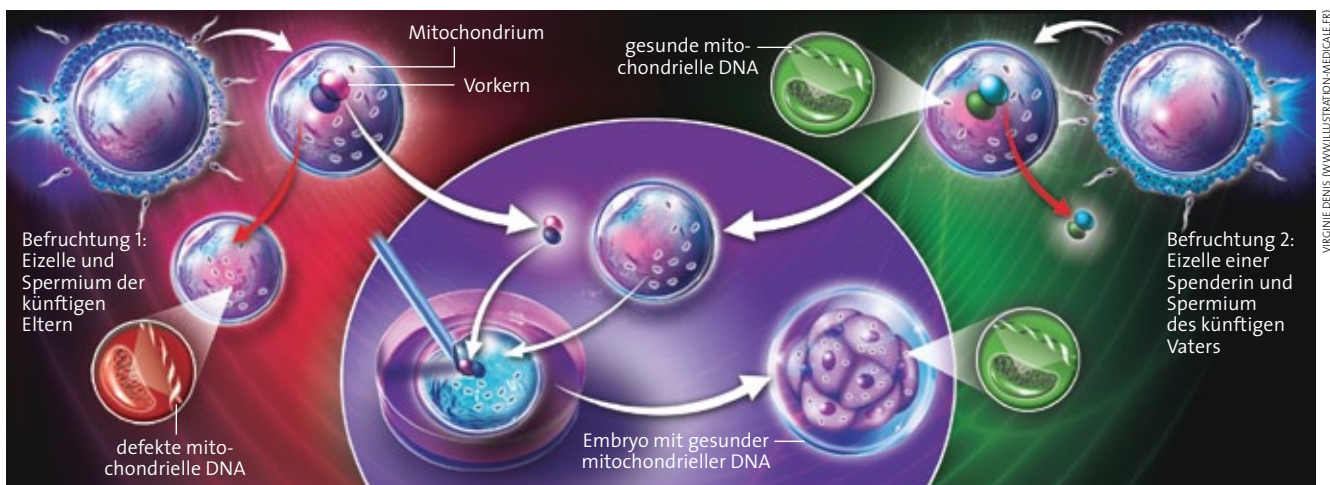
land zulässig. Eine Fortpflanzung post mortem erscheint also grundsätzlich akzeptabel. Aber muss sie auf den Transfer von Embryonen beschränkt bleiben? Wenn ein Mann zum Beispiel zu Lebzeiten zugestimmt hat, dass sein eingefrorenes Spermia nach seinem Tod zur Befruchtung dienen darf, kann man dann seiner Frau verwehren, sich mit ihrem toten Partner fortzupflanzen? Und sollte es verboten sein, aus den Genitalorganen eines gerade verstorbenen Mannes Spermien zu gewinnen, wenn seine Frau oder seine Eltern diesen Wunsch äußern? In den USA und in Israel geschieht das bereits.

Solche Fragen rühren an religiöse, gesellschaftliche und moralische Tabus. Und angesichts ihrer Komplexität ist es nicht sicher, ob ethische Diskussionen zu allgemein akzeptierten Antworten führen werden. Wissenschaftliche Erkenntnisse liefern jedenfalls keine Entscheidungshilfe. Die Politik muss Richtlinien vorgeben, die den allgemeinen Wertvorstellungen der Bevölkerung entsprechen.

Jegliche Form der Fortpflanzung birgt das Risiko von ernsthaften Fehlbildungen oder Störungen. Unfälle, Erkrankungen und Schadstoffe wie Nikotin, Alkohol oder Umweltchemikalien, welche Hormonfunktionen stören, können die vorgeburtliche Entwicklung beeinträchtigen. Gleiches gilt für erbliche Gendefekte bei einem Partner. In diesem Fall musste das Paar früher entweder riskieren, ein krankes Kind zu bekommen, oder sich grundsätzlich gegen Nachwuchs entscheiden.

Schon seit längerem ermöglicht die Pränataldiagnostik – eine Amniozentese (Fruchtwasseruntersuchung) oder Chorionzottenbiopsie –, das Ungeborene auf solche Anlagen zu

Durch Vorkerntransfer können Frauen mit schädlichen Mutationen in der mitochondrialen DNA gesunde Kinder bekommen. Mitochondrien sind Zellorganellen, die der Bereitstellung von Stoffwechselenergie dienen. Sie verfügen über eigene Erbsubstanz. Der Embryo behält ausschließlich die Mitochondrien der Eizelle, nicht die des Spermiums. Vorkerne sind die Vorläuferstadien des Zellkerns der ersten embryonalen Zelle. Sie werden kurz nach der In-vitro-Fertilisation entnommen (links) und dann in die von einer Spenderin stammende Eizelle transferiert, aus der nach der Besamung mit einem Spermium des künftigen Vaters ebenfalls die Vorkerne entfernt wurden (rechts). Der sich entwickelnde Embryo enthält somit das Erbgut aus den Zellkernen des Vaters und der Mutter sowie die mitochondriale DNA der Spenderin.



Forschung am Embryo für den Embryo

Die Frage, ob es erlaubt sein sollte, an menschlichen Embryonen und ihren Zellen zu forschen, ist heftig umstritten. Gegner führen an, dass solche Forschungen letztlich der genetischen Manipulation an Menschen dienen – mit mehr oder weniger ehrenwerten Motiven und vielen denkbaren Missbrauchsmöglichkeiten bis hin zum reproduktiven Klonen. Zudem sehen Kritiker den menschlichen Embryo als schützenswertes Wesen, dessen Würde als Person unbedingt zu achten ist und dessen Leben es um jeden Preis zu bewahren gilt. Forschung am Embryo bedeutet aus dieser Perspektive, menschliche Wesen zu Objekten zu degradieren.

All diese Argumente verdienen gehört zu werden. Aber reichen sie aus, um Untersuchungen an Embryonen generell zu verbieten? Bei jeder biomedizinischen Forschung oder Forschung ganz allgemein lassen sich unerwünschte Entwicklungen und Missbrauch nicht ausschließen. Hat ein solches Risiko auf anderen Gebieten aber je zu einem kategorischen Forschungsverbot geführt? Um Auswüchse zu verhindern, würde es genügen, das Arbeiten mit Embryonen und ihren Zellen strikt einzuschrän-

ken, wie das in der Biomedizin generell geschieht, und dabei den schützenswerten Eigenschaften der menschlichen Keime Rechnung zu tragen.

Auch an bereits geborenen Personen jeden Alters oder deren Zellen wird geforscht, ohne dass sie dadurch zum Objekt herabgestuft würden. Außerdem trägt ein Forschungsverbot nicht zum Schutz des Lebens von Embryonen bei. In Frankreich wurden bereits über 10 000 kryokonservierte Embryonen aus IVF-Labors an Forschungseinrichtungen gespendet. Diese Embryonen dienen nicht mehr dem Fortpflanzungsvorhaben ihrer genetischen Eltern und dürfen auch nicht an andere Paare weitergegeben werden. Ob Wissenschaftler nun daran forschen oder nicht – sie werden nie die Gelegenheit erhalten, sich zu entwickeln, was letztlich gleichbedeutend ist mit ihrem Tod. Sollte uns ein drei Tage alter Embryo also heiliger sein als ein lebendes oder totes frühgeborenes Kind, eine Person im Koma oder eine Leiche? Wäre es nicht an der Zeit, mit Embryonen in wahrhaft humaner Weise zu verfahren und die Embryonenforschung mit allem nötigen Respekt zu erlauben?

testen. Die Kombination aus IVF und modernen genetischen Methoden bietet zudem die Möglichkeit der Präimplantationsdiagnostik: Man entnimmt einem drei Tage alten Embryo eine oder zwei Zellen und untersucht deren Genom auf bekannte Mutationen. So lässt sich dafür sorgen, dass nur Keime ohne diese genetischen Defekte eingepflanzt werden. Allerdings ist das Verfahren umstritten und wurde hier zu Lande erst nach Intervention des Bundesverfassungsgerichts zumindest in solchen Fällen erlaubt, in denen ein schweres Erbleiden beim Kind droht.

Kinder mit drei genetischen Eltern

In Zukunft könnten sich noch weitergehende Möglichkeiten eröffnen, wie 2010 durchgeführte Arbeiten einer britischen Forschergruppe um Doug Turnbull an der University of Newcastle zeigten. Normalerweise beruhen Erbkrankheiten auf der Übertragung von Defekten im gewöhnlichen Genom, das im Zellkern untergebracht ist. Manche schädlichen Mutationen finden sich jedoch im Erbgut der Mitochondrien. Das sind Organellen im Zellplasma, die bei allen höheren Lebewesen als winzige Kraftwerke Stoffwechselenergie bereitstellen. Sie enthalten einen Teil der von ihnen benötigten Gene selbst. Defekte solcher mitochondriellen Gene können schwere Funktionsstörungen in verschiedenen Organen wie Muskeln, Herz und Leber und einen frühen Tod verursachen. Bisher gibt es keine Behandlungsmöglichkeit.

Der Embryo erhält ausschließlich Mitochondrien der Eizelle. Mitochondrielle Gendefekte werden also von der erkrankten Mutter auf die Nachkommen übertragen. Um dies zu vermeiden, könnte man bei der künstlichen Befruchtung

Eizellen einer fremden, gesunden Spenderin verwenden. Daraus würde der Zellkern entfernt und durch den einer Eizelle der kranken Frau ersetzt.

Es bietet sich an, diesen Eingriff unmittelbar vor der künstlichen Befruchtung durchzuführen. Doch das ist nicht so einfach. In diesem Entwicklungsstadium der Eizelle trennen sich nämlich ihre Chromosomen, indem sie sich in Form einer Spindel anordnen. Dabei handelt es sich um eine äußerst zerbrechliche Struktur. Amerikanischen Biologen ist es dennoch gelungen, bei Eizellen von Rhesusaffen den Kern auszutauschen.

Die britischen Forscher entschieden sich für eine andere Vorgehensweise. Sie nahmen die Manipulation erst unmittelbar nach der Besamung vor, wenn die väterlichen und mütterlichen Vorkerne gut erkennbar und leicht auf die entkernte befruchtete Eizelle einer gesunden Spenderin übertragbar sind (siehe Abbildung links). Turnbull und seine Kollegen arbeiteten mit menschlichen Keimzellen. Die gewonnenen Embryonen entwickelten sich bis zum Stadium der Implantation normal, wurden allerdings nicht eingesetzt, weil das Team keine Erlaubnis dazu hatte. Ob die Methode wirklich funktioniert und gesunde Kinder hervorbringt, bleibt also noch zu klären.

Das Verfahren hat hitzige ethische Debatten nicht nur in Großbritannien entfacht. Etwa 0,1 Prozent der DNA eines so gezeugten Kindes würden nämlich von der Spenderin stammen. Hätte es folglich drei Eltern? Da der Kernaustausch vor der Differenzierung der Keimzellen des Embryos geschieht, werden die eingeführten fremden mitochondriellen Gene an künftige Generationen weitergegeben. Handelt es sich also

um eine Keimbahntherapie? Darunter versteht man Methoden, die das embryonale Erbgut vor der Differenzierung in Körper- und Keimzellen verändern. Nach internationalem Konsens sind solche Eingriffe verboten, weil sie nicht nur das Erbgut des entstehenden Kindes betreffen, sondern auch das seiner Nachkommen. Aber vielleicht sollte man diese strikte Haltung angesichts der neuesten Entwicklungen überdenken (siehe Kasten S. 33).

Immerhin rund 10 bis 20 Prozent aller Paare suchen heute irgendwann einen Arzt auf, weil eine gewünschte Schwangerschaft ausbleibt. Bedeutet das, dass die Unfruchtbarkeit in der Bevölkerung zunimmt? Diese Frage zu klären, ist umso wichtiger, als verschiedene Umwelteinflüsse und unser Lebensstil die Reproduktionsfähigkeit beeinträchtigen könnten. In diesem Fall müssten Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Die Europäische Union hat mit dem REACH-Programm bereits gewisse Vorkehrungen getroffen. Demnach sind neu-

artige Chemikalien genauestens auf mögliche schädliche Wirkungen zu untersuchen, bevor sie in größeren Mengen hergestellt und verbreitet werden dürfen. Auch können Substanzen vom Markt genommen werden, wenn sich herausstellt, dass sie die Gesundheit stark gefährden. Zum Beispiel wird Bisphenol A, das als Ausgangsmaterial für verschiedene Kunststoffe dient und die Wirkung des weiblichen Geschlechtshormons Östrogen nachahmt, derzeit im Rahmen des REACH-Programms überprüft. Schwangere sollten in jedem Fall vermeiden, sich Schadstoffen wie Nikotin auszusetzen, da diese die Genitalorgane des Fötus schädigen können und damit seine spätere Fortpflanzungsfähigkeit gefährden.

Fernziel künstliche Gebärmutter

Auch mit modernen reproduktionsmedizinischen Methoden lässt sich Unfruchtbarkeit nicht immer erfolgreich behandeln. Das gilt beispielsweise, wenn Gewebe oder Organe fehlen. So sind für eine Frau ohne funktionsfähigen Uterus

Von der Zeugung ohne Vater zur Zeugung ohne Männer?

In den westlichen Gesellschaften streben immer mehr alleinstehende oder homosexuelle Frauen die Mutterschaft an. Zwar war es immer schon möglich, diesen Wunsch auf natürlichem Weg zu erfüllen – unter Berücksichtigung der Interessen aller Beteiligten. Das Phänomen hat jedoch seit einiger Zeit deutlich größere Dimensionen angenommen. Das liegt vor allem an zwei bemerkenswerten Entwicklungen. Zum einen akzeptiert die Gesellschaft zunehmend allein erziehende Eltern und gleichgeschlechtliche Partnerschaften und passt ihr Wertesystem entsprechend an. Zum anderen entwickelt sich die Reproduktionsmedizin weiter und öffnet sich auch nicht medizinisch begründeten Anwendungen.

In Großbritannien, Schweden und den Vereinigten Staaten, wo es alleinstehenden und in gleichgeschlechtlicher Partnerschaft lebenden Frauen erlaubt ist, durch künstliche Befruchtung mit Spendersamen schwanger zu werden, nehmen diese die IVF bereits häufiger in Anspruch als unfruchtbare heterosexuelle Paare. Manchmal sucht die Frau einen Samenspender in ihrem Bekanntenkreis, doch birgt das Risiken. Der Spender kann dann nämlich seine Rechte am Kind geltend machen. Dies führt manchmal zu erbitterten Auseinandersetzungen, wie aktuelle Gerichtsprozesse in Großbritannien und den Vereinigten Staaten zeigen. Um solchen Konflikten mit einem persönlich bekannten Samenspender vorzubeugen, wenden sich die Frauen meist an eine Samenbank.

In all diesen Fällen wächst das Kind ohne Vater auf. Leidet es darunter? Diese Frage ist Gegenstand hitziger öffentlicher Debatten. Die Ergebnisse der bisher veröffentlichten, wenn auch noch unzureichenden Studien scheinen Entwarnung zu geben: Die Kinder entwickeln sich gut und scheinen in der Mehrzahl zufrieden zu leben. Es fällt jedoch auf, dass sie später

häufig wissen möchten, wer ihr biologischer Vater ist, um ihn kennen zu lernen.

Die Rolle eines Samenspenders, der die Vaterschaft nicht lebt, bleibt auf die des reinen Erzeugers beschränkt und sollte aus anthropologischer, philosophischer und gesellschaftlicher Sicht diskutiert werden, zumal immer mehr Kinder ohne väterliche Beteiligung aufwachsen. Spinnt man den Gedanken weiter, stellt sich die Frage, ob der auf seine Erzeugerrolle reduzierte Mann überhaupt noch gebraucht wird. Könnten sich Frauen nicht auch ohne männliches Erbgut fortpflanzen? Forschungen zur Entwicklung künstlicher Eizellen und Spermien aus Stammzellen lassen dies als prinzipiell machbar erscheinen. Zwar gibt es noch zahlreiche Hindernisse, doch zeigen Untersuchungen an Mäusen wie auch am Menschen, dass eine rein weibliche Fortpflanzung eines Tages technisch möglich sein dürfte.

Wenn alle Hürden beseitigt wären, könnte man eine reprogrammierte adulte Stammzelle dazu bringen, sich in eine männliche oder weibliche Keimzelle zu differenzieren. In der Praxis sollte es so auch gelingen, aus den einer Frau entnommenen adulten Zellen Spermien zu züchten. Diese könnten dann dazu dienen, Eizellen ihrer Partnerin zu befruchten. Bei Mäusen ist das bereits gelungen – allerdings unter extremen experimentellen Schwierigkeiten.

Dabei entstünden natürlich nur weibliche Nachkommen, da die künstlich erzeugten Spermien ausschließlich X-Chromosomen tragen würden. Aber das wäre nicht weiter schlimm, denn Männer bräuhete ja niemand mehr – zumindest zur Fortpflanzung. Bei Mäusen hat sich der Verzicht auf sie sogar als vorteilhaft erwiesen: Die aus den Keimzellen zweier Weibchen entstandenen Nachkommen lebten länger als normal gezeugte!



KATSUHIKO HAYASHI, UNIVERSITÄT KIOTO (PRESSEBILD ZU HAYASHI K. ET AL., SCIENCE 338, S. 971-975, 2012)

Die Mäusejungen auf diesem Foto wurden mit Eizellen erzeugt, die sich aus induzierten pluripotenten Stammzellen (iPS) ableiten. Diese waren ihrerseits durch Reprogrammierung aus bereits differenzierten Hautzellen eines weiblichen Mäuseembryos gewonnen worden. Katsuhiko Hayashi von der Universität Kioto (Japan) und seine Kollegen brachten die iPS dazu, sich zu Urkeimzellen zurückzuentwickeln, und inkubierten sie dann – um die Bedingungen im Eierstock zu imitieren – zusammen mit Nichtkeimzellen aus den Keimdrüsen weiblicher Mäuseembryonen. Nachdem die Keimzellen in diesem nachgeahmten und schließlich in eine Maus eingesetzten Eierstock zu Eizellen gereift waren, wurden sie entnommen und im Reagenzglas befruchtet. Die erhaltenen Nachkommen waren vermehrungsfähig

die Adoption oder eine Leihmutter, die das Kind für sie austrägt, derzeit die einzigen Perspektiven. Deshalb denken Wissenschaftler bereits über die Entwicklung einer künstlichen Gebärmutter nach.

Noch deutlich schwieriger dürfte es sein, die Plazenta technisch nachzuahmen. Dieses Organ erfüllt eine Reihe von Funktionen, die vom Stoffaustausch zwischen mütterlichem Organismus und Fötus über die Regulation der Immunverträglichkeit bis hin zur Produktion wichtiger Hormone reichen. Außerdem macht sie von der Einnistung des Embryos in die Gebärmutter Schleimhaut bis zum dritten Monat der Schwangerschaft tief greifende Veränderungen durch.

Ein weiteres Fernziel wäre die künstliche Herstellung von Spermien und Eizellen für Patienten ohne funktionsfähige Hoden oder Ovarien. Auf dem Gebiet der gesteuerten Differenzierung embryonaler und reprogrammierter adulter Stammzellen (induzierter pluripotenter Stammzellen, iPS) hat es in den letzten Jahren große Fortschritte gegeben. Wenn es gelingt, aus iPS Neurone oder funktionsfähige Herzmuskelzellen zu erzeugen, weshalb nicht auch Keimzellen? Untersuchungen an Mäusen zeigen, dass das möglich sein dürfte, auch wenn noch zahlreiche Hindernisse zu überwinden sind.

Man müsste die iPS zunächst in Urkeimzellen verwandeln und diese dazu bringen, sich zu Eizellen oder Spermien zu entwickeln. Dabei sind drei Vorgänge exakt zu steuern. Der erste ist die Meiose, also die Reduktionsteilung der Urkeimzellen, bei der durch Aufspaltung der Chromosomenpaare das Genom der Keimzellen entsteht. Beim zweiten Vorgang handelt es sich um die epigenetische Reifung, in deren Verlauf Gene gleichsam Etiketten in Form angehängter chemischer Gruppen erhalten, die später über die jeweilige Aktivität der mütterlichen und väterlichen Erbanlagen bestimmen. Und drittens müssen all die zellulären und molekularen Bestandteile von Keimzellen entstehen, die für den Befruchtungsvorgang und die Entwicklung des Embryos nötig sind.

All dies ließe sich wohl nur bewerkstelligen, wenn man die Keimvorläuferzelle in ein Milieu bringt, das der natürlichen Umgebung im Hoden oder Eierstock ähnelt. Wissenschaftler konnten die genannten Vorgänge mit Mäusezellen teilweise

bereits im Labor nachvollziehen (Bild oben), und es besteht kaum ein Zweifel, dass es eines Tages möglich sein wird, beim Menschen künstliche Keimzellen zu erzeugen.

Die aktuellen Entwicklungen offenbaren eine tiefe Kluft zwischen dem Tempo, in dem wir neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewinnen, und der Geschwindigkeit, mit der sie von der Gesellschaft verarbeitet und assimiliert werden. Kein Wunder also, dass es zu Konflikten und Verwirrung kommt. Mehr als je zuvor bedarf es daher ethischer, sozialer und politischer Reflexionen darüber, welchen Regularien die menschliche Fortpflanzung in der Zukunft unterliegen sollte. ~

DER AUTOR



Pierre Jouannet ist emeritierter Professor der Université Paris Descartes und Mitglied der französischen Académie nationale de Médecine.

QUELLEN

- Barnéoud, L.:** La procréation assistée? Belin, Paris 2013
Craven, L. et al.: Pronuclear Transfer in Human Embryos to Prevent Transmission of Mitochondrial DNA Disease. In: Nature 465, S. 82–85, 2010
Jégou, B. et al.: La fertilité est-elle en danger? La Découverte, Paris 2009
Pudakalakatti, S. M. et al.: NMR Studies of Preimplantation Embryo Metabolism in Human Assisted Reproductive Techniques: A New Biomarker for Assessment of Embryo Implantation Potential. In: NMR in Biomedicine 26, S. 20–27, 2013
Therre, H. et al.: Assistance médicale à la procréation. In: Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire 23–24, S. 261–283, 2011

WEBLINKS

Diesen Artikel und Links zu Statistiken sowie allgemeinen Informationen zur medizinisch unterstützten Fortpflanzung in Deutschland und den USA finden Sie unter:
www.spektrum.de/artikel/1210960

Wie Gene das Sozialverhalten prägen – und umgekehrt

Gene und Umwelt prägen unsere Persönlichkeit. Zwischen beiden herrscht eine höchst komplexe Wechselbeziehung. So wird unser soziales Umfeld durch unsere Erbanlagen beeinflusst. Umgekehrt aber wirkt es auch auf diese zurück. Das hat Folgen – bis hin zur Chancengleichheit in unseren Schulen.

Von Michael J. Shanahan und Jason Freeman

Enorme Fortschritte auf dem Gebiet der Molekulargenetik ermöglichen es inzwischen, Vorgänge im Genom unmittelbar zu messen. Das hat zu spannenden neuen Einsichten geführt. Zu diesen gehört insbesondere die Erkenntnis, dass die sozialen Verhältnisse unser Erbgut verändern können. Das mag den einen oder anderen überraschen, ja ungläubig die Stirn runzeln lassen – verletzt es doch das einstmals eherne »zentrale Dogma« der Molekularbiologie, wonach der Informationsfluss in der Zelle eine Einbahnstraße ist: von der DNA (dem genetischen Programm) über die RNA (eine Art Blaupause) zu den Proteinen (den Handlangern) und nicht umgekehrt.

Weit gefehlt! Die Mechanismen der DNA-Expression, wie Biologen den gesamten Ablauf nennen – genauer die Vorgänge, durch die Gene ein- und ausgeschaltet werden – sprechen auf soziale Faktoren an: auf die gesellschaftliche Stellung

und zwischenmenschliche Beziehungen, aber auch auf kulturelle und allgemeine Regeln und Normen im gegenseitigen Miteinander. Diese grundlegende Erkenntnis stellt gängige Vorstellungen über den Zusammenhang von Genen, Gesellschaft und Verhalten auf den Kopf. Im »postgenomischen Zeitalter«, in dem wir leben, hat die alte Idee der Einbahnstraße der Einsicht weichen müssen, dass der Informationsfluss in beide Richtungen erfolgt: Gesellschaftliche Verhältnisse gehen uns buchstäblich unter die Haut und verändern dort genetische Strukturen. Das aber wirkt über die Genexpression wiederum auf Verhaltensweisen zurück. Manchmal kommt es dadurch zu Erkrankungen.

Vom frühen Stress zur defensiven Persönlichkeit

In der Tat sind es die Wechselbeziehungen zwischen Genen und Umwelt, die das Verhalten von uns Menschen und viele unserer Krankheiten so vielschichtig und komplex erscheinen lassen. Im Gegensatz zu mendelschen Merkmalen wie dem Albinismus oder Erbleiden wie der Chorea Huntington (auch als Veitstanz bekannt), über die ein einziges Gen bestimmt, haben sie ein verworrenes Geflecht von Ursachen. Damit stehen wir Forscher vor der schwierigen Aufgabe, das subtile Wechselspiel zwischen Genom und Umwelt zu ergründen und auf diese Weise zu klären, wie beide gemeinsam unsere Persönlichkeit und letztlich unser Leben prägen.

Bisher wurde, was die Steuerung der Genexpression betrifft, gerade erst die sprichwörtliche Spitze des Eisbergs entdeckt. Ähnliches gilt für die gesellschaftlichen Verhältnisse, in denen Menschen leben. Auch hier beginnt sich die wahre Komplexität erst ansatzweise abzuzeichnen.

Am Beginn der Genexpression steht die Transkription. Dabei fertigt die Zelle eine RNA-Abschrift des betreffenden Gens an. Dieser Vorgang ist von größter Bedeutung, weil die

AUF EINEN BLICK

WECHSELSPIEL VON GENEN UND UMWELT

1 Wie wir uns verhalten, hängt in hohem Maß von unseren Genen ab. Zugleich hat es einen großen Einfluss auf unser **soziales und berufliches Umfeld**. Dieses wirkt sich nach jüngsten Erkenntnissen aber seinerseits auf die **Aktivierung von Genen** aus.

2 So sorgen **soziale Isolation** und **geringer sozioökonomischer Status** für ein dauerhaft **hohes Stressniveau**, das vielerlei Spuren im Erbgut hinterlässt. Dadurch werden etwa **Entzündungsreaktionen** begünstigt, die zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs führen können.

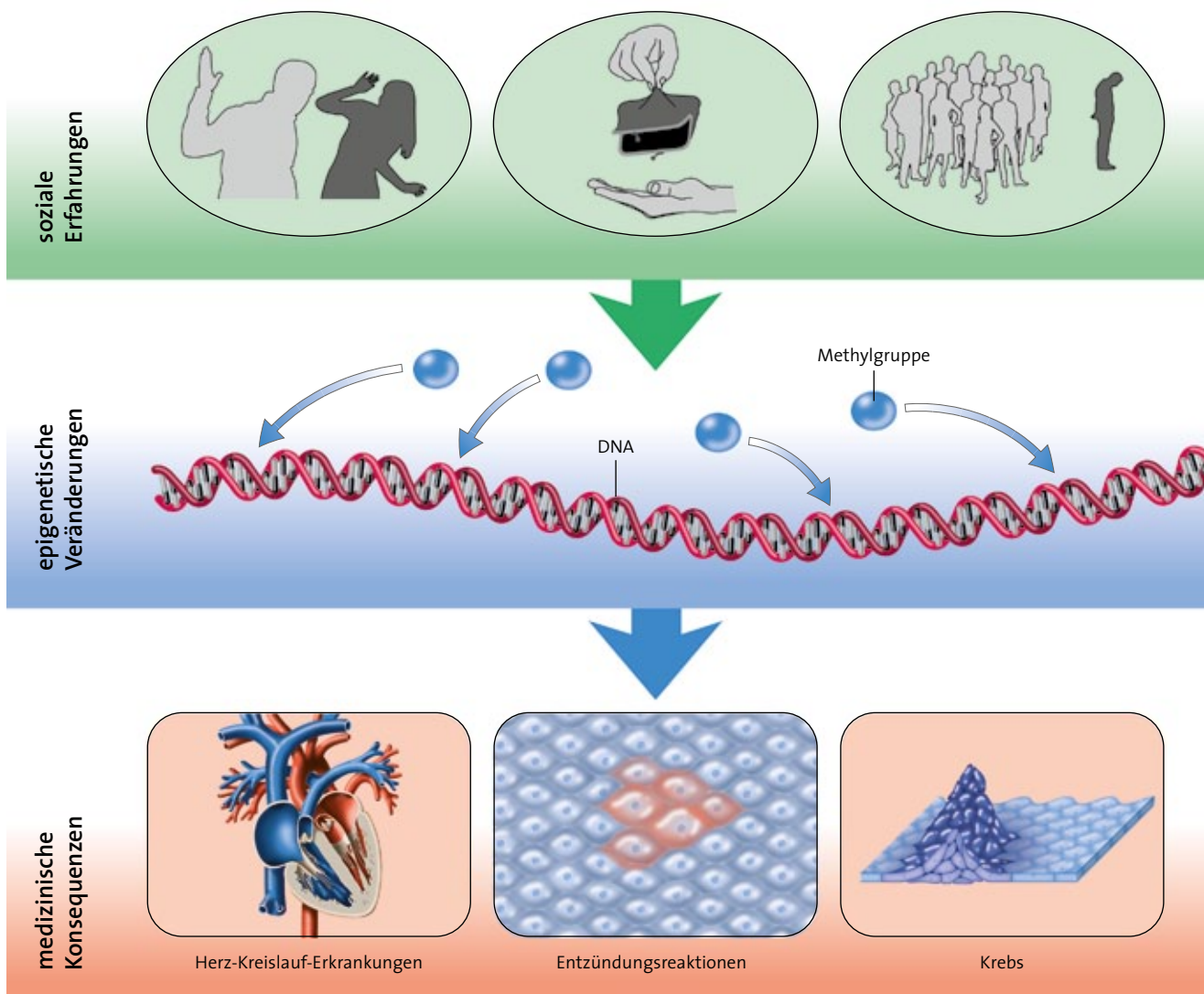
3 Besonders deutlich zeigt sich das komplexe Wechselspiel zwischen Erbanlagen und sozialen Faktoren beim **Schulerfolg**. Hier verstärken sich genetisch bedingte **Verhaltensdispositionen** und **Umweltbedingungen** gegenseitig. Das kann zu einem **Teufelskreis** führen, den es im Sinn der Chancengleichheit dringend zu durchbrechen gilt.

dabei erzeugte Boten- oder mRNA als Bauanleitung für die Proteine dient, die praktisch alle biologischen Vorgänge in der Zelle steuern. Bei der Transkription heftet sich ein Enzym namens RNA-Polymerase (RNAP) an die Promotorregion eines Gens und synthetisiert dann mit dem DNA-Strang als Vorlage die mRNA (Bild S. 38). Diese wandert zu den Ribosomen, wo die in ihr kodierten Proteine aus Aminosäuren zusammengesetzt werden.

Die Transkription – und das ist entscheidend – beinhaltet einen Anpassungsmechanismus, der es der Zelle ermög-

licht, auf wechselnde äußere Bedingungen zu reagieren. Grundlage dafür ist die Regulation der RNA-Polymerase und ihrer Anheftung an die Promotorregion eines Gens. Letzteres geschieht durch Transkriptionsfaktoren, die sich gleichsam als molekulare Fähnchen an kurze Abschnitte dieser Region – so genannte Response-Elemente – binden können. Auf diese Weise fördern oder hemmen sie die Anlagerung der RNA-Polymerase, was sich auf die Transkriptionsrate des betreffenden Gens auswirkt. Als einer der ersten Transkriptionsfaktoren, die auf Umweltreize ansprechen, wurde 1974

Fortgesetzte Gewalt, materielle Not und soziale Isolation verursachen Dauerstress. Dadurch ändert sich – etwa über die Methylierung von DNA-Regionen – die Aktivität bestimmter Gene. Diese Modifikationen, die über die belastende Lebenssituation hinaus bestehen bleiben, fördern chronische Entzündungen, die zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs führen können.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

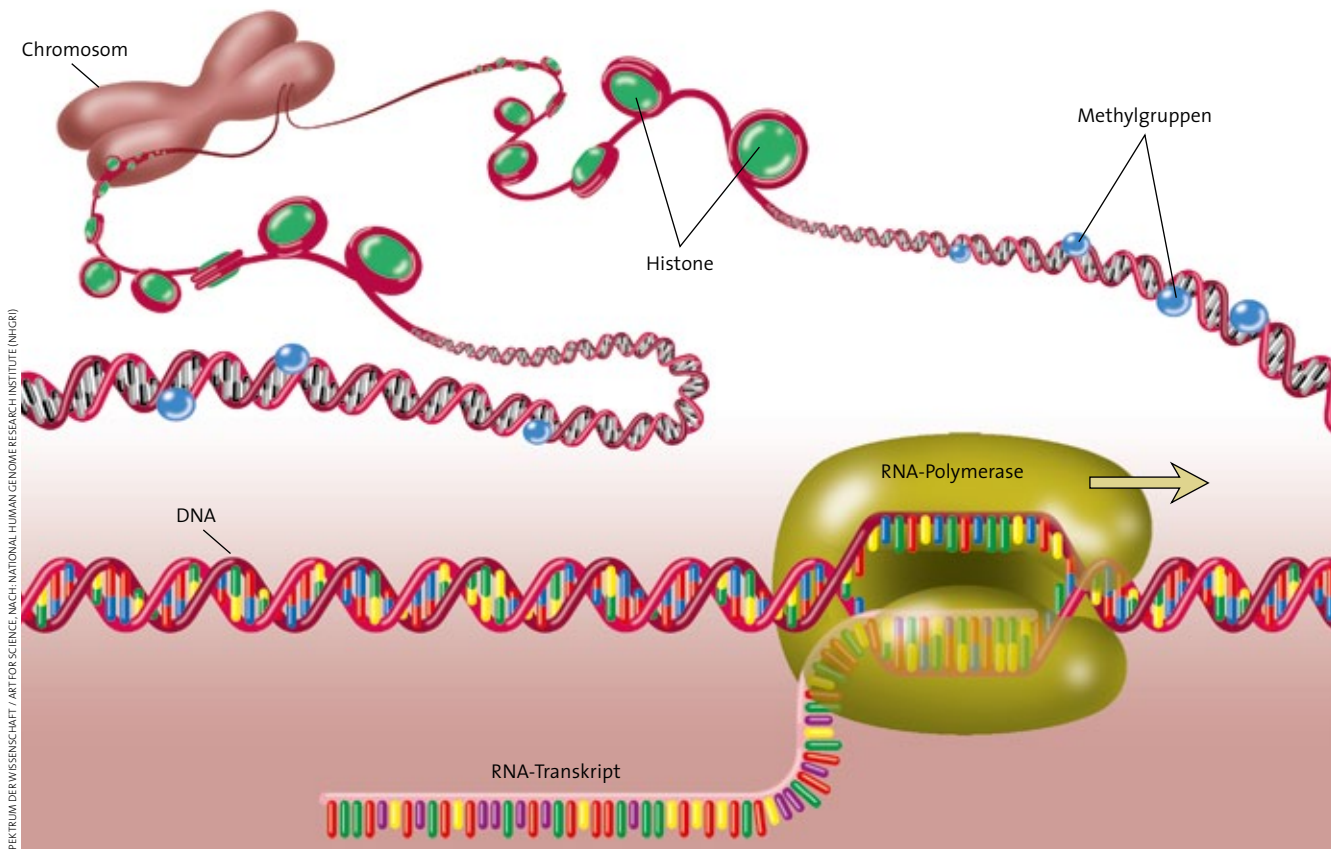
bei Taufliegen (*Drosophila melanogaster*) der Hitzeschockfaktor entdeckt. Tatsächlich kommt er in kaum veränderter Form bei den verschiedensten Arten vor – auch bei Menschen.

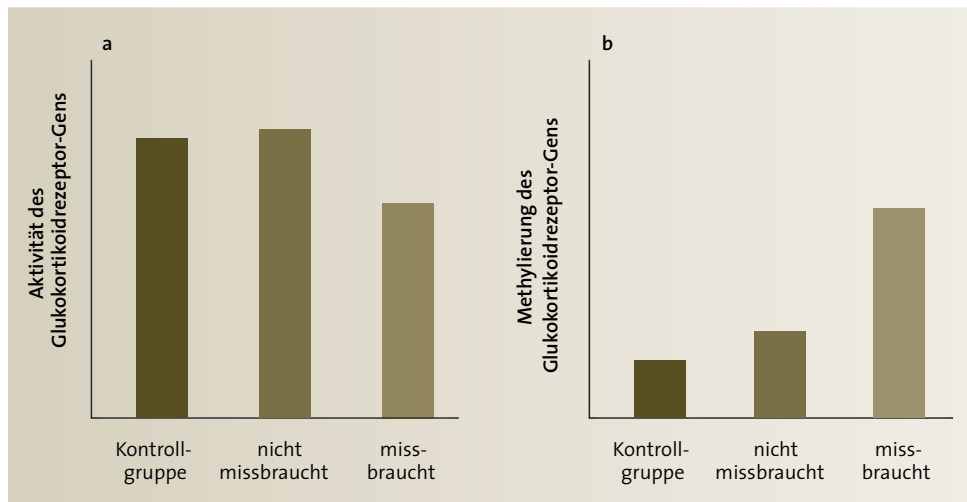
Dass die Genregulation auf Temperaturänderungen anspricht, erscheint plausibel. Aber wie verhält es sich mit dem sozialen Umfeld? Indem Forscher die Transkriptionsrate einzelner Gene maßen und verglichen, haben sie mögliche Auswirkungen von Umweltfaktoren wie soziale Isolation und sozioökonomischer Status (gemessen an Bildung, Einkommen und beruflichem Prestige) untersucht. So gingen Gregory E. Miller, inzwischen an der Northwestern University in Evanston (Illinois), und seine Kollegen 2009 der Frage nach, warum sich die gesellschaftliche Stellung von Kindern, gemessen an der ihrer Eltern, auf ihre spätere Gesundheit im Erwachsenenalter auswirkt. Wie frühere Untersuchungen an der Johns Hopkins Medical School in Baltimore (Maryland) ergeben hatten, erhöht ein niedriger sozioökonomischer Status in der Kindheit selbst dann das Risiko für eine koronare Herzkrankheit im Erwachsenenalter, wenn die Betroffenen später zu Ansehen und Wohlstand gelangen. Gibt es einen »biologischen Bodensatz« von Kindheitserfahrungen, der im späteren Leben nachwirkt?

Wie Miller und seine Kollegen vermuteten, könnte ein niedriger sozioökonomischer Status in den ersten Lebensjahren die Entwicklung eines »defensiven Phänotyps« begünstigen, den eine übermäßige biologische Reaktion auf Stress kennzeichnet, zu der auch entzündliche Prozesse gehören. Wenn sich im Lauf des Lebens belastende Faktoren häufen, treten bei solchen Personen verstärkt chronische Entzündungsreaktionen auf, wie sie manchen Formen von Herz-Kreislauf-, Atemwegs- und Krebserkrankungen zu Grunde liegen.

In Einklang mit dieser Hypothese beobachteten die Forscher, dass ein niedriger sozioökonomischer Status in der frühen Kindheit – beurteilt anhand des Berufs der Eltern während der ersten fünf Lebensjahre – bei den späteren Erwachsenen mit einer Reihe von Transkriptionsmustern einherging, die zu einem defensiven Phänotyp passen. Demnach scheinen frühe Armutserfahrungen für eine dauerhafte »Programmierung« des Stressreaktionssystems zu sorgen. Ganz ähnliche Auswirkungen hat auch soziale Isolation: Sie begünstigt ebenfalls einen Phänotyp, der durch chronische Entzündungsreaktionen gekennzeichnet ist und über viele Jahre den Weg zu verschiedenen Krankheiten bahnt.

Der Einfluss der Umwelt auf die Genaktivität findet hauptsächlich auf der Stufe der Transkription statt. Dabei erzeugt ein Enzym von dem jeweiligen Gen eine RNA-Abschrift, die dann von den Ribosomen in ein Protein übersetzt wird. Chemische Gruppen an der DNA oder den Histonproteinen, um die sie gewickelt ist, können die Transkription erschweren oder erleichtern.





SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MCGOWAN, P. O. ET AL.: EPIGENETIC REGULATION OF THE GLUCOCORTICOID RECEPTOR IN HUMAN BRAIN ASSOCIATES WITH CHILDHOOD ABUSE. IN: NATURE NEUROSCIENCE 12, S. 342–348, 2009

Das Gen für den Glukokortikoidrezeptor ist bei Menschen, die in ihrer Kindheit missbraucht wurden, weniger aktiv als bei anderen (a). Das entdeckten Forscher, als sie die Gehirne von Suizidopfern untersuchten. Grund könnte das Ausmaß der Methylierung des Gens sein: Das Erbgut der früher missbrauchten Selbstmörder trug mehr solche chemischen Anhängsel (b).

Ein geringer sozioökonomischer Status in der Kindheit und soziale Isolation haben wohl deshalb ähnliche Auswirkungen auf das Genexpressionsmuster, weil beide mit dem gleichen psychischen Zustand zusammenhängen: dem Gefühl der Bedrohung. Demnach sind Kinder, die in einem armen, gesellschaftlich gering geachteten Umfeld aufwachsen, und sozial isolierte Menschen mehr auf der Hut vor möglichen Gefahren; dieser chronische Stressfaktor führt zu entzündungsfördernden Transkriptionsmustern.

Die Bedeutung epigenetischer Mechanismen

Am Wechselspiel zwischen sozialem Umfeld und Genexpression sind auch epigenetische Faktoren beteiligt. Epigenetisch bedeutet wörtlich »oberhalb des Gens«. Üblicherweise steht der Begriff für Veränderungen der DNA, die nicht die Basenpaare selbst betreffen, in deren Reihenfolge die Erbinformation verschlüsselt ist, sondern Strukturen im Umfeld dieses Moleküls. Epigenetische Veränderungen sind nach heutiger Kenntnis ziemlich stabil, so dass sie sogar weitervererbt werden können. Trotzdem lassen sie sich jederzeit auch wieder rückgängig machen. Was jedoch am wichtigsten ist: Sie aktivieren oder inaktivieren Teile der DNA.

Bisher wurden hauptsächlich zwei epigenetische Mechanismen mit Verhalten und Wohlbefinden in Verbindung gebracht. Der eine ist die DNA-Methylierung. An einen Baustein der DNA – häufig in der Promotorregion eines Gens gelegen – wird dabei eine Methylgruppe angehängt. In der Regel gilt: Je stärker die Methylierung einer Sequenz, desto schwächer wird sie exprimiert. Der zweite Mechanismus betrifft die Tatsache, dass die DNA im Zellkern auf komplizierte Weise um die Histone gewickelt ist. Dabei handelt es sich um Proteine, die als eine Art »Spule« dienen. Werden sie verändert, kann dies einen DNA-Abschnitt frei legen oder wegpacken, was seine Transkription erleichtert oder erschwert.

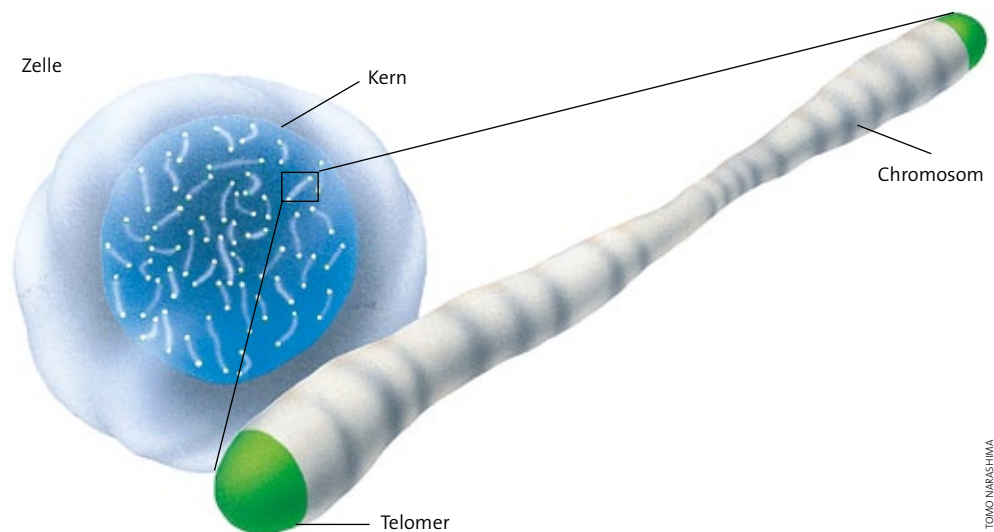
Epigenetische Prozesse hängen offenbar mit grundlegenden Verhaltensweisen von uns Menschen zusammen, auch

wenn die meisten Untersuchungen bisher an Tieren angestellt wurden. Bei Ratten und Mäusen verbessert eine interessantere Umwelt, die beispielsweise Spielzeug oder kompliziert gebaute Behausungen enthält, die Gedächtnisfunktion. Dies geschieht über die Abwandlung von Histonen im Hippocampus, einer Gehirnregion, die mit dem Erinnerungsvermögen zu tun hat. Solche Befunde stehen in Einklang mit einer langen Reihe von Studien an Menschen, wonach ein Zusammenhang zwischen einem stimulierenden familiären Umfeld – traditionell dient als Maß dafür zum Beispiel die Anzahl der Bücher im Wohnzimmer – und der kognitiven Entwicklung von Kindern besteht. Nach allgemeiner Ansicht lässt sich die abwechslungsreiche Umgebung in den Versuchen mit Nagetieren durchaus mit einem kognitiv anregenden Milieu bei Menschen vergleichen.

Andere Untersuchungen galten der Langzeitwirkung von Stress im frühen Lebensalter. So haben Forscher Rattenjunge verglichen, die von ihren Müttern umsorgt wurden oder nicht. Dabei stellte sich heraus, dass Erstere im späteren Leben weniger ängstlich waren und nicht so stark auf Stressfaktoren ansprachen. Die jeweilige Disposition spiegelt sich in einem Methylierungsmuster wider, das sich auf die Expression des Gens für den Glukokortikoidrezeptor (GR) auswirkt, der für Reaktionen auf Stress von Bedeutung ist. Diese vielfach diskutierte Forschungsrichtung ist vor allem deshalb so faszinierend, weil sie auf einen Mechanismus schließen lässt, der die Eltern-Kind-Beziehung mit dem späteren Auftreten von Krankheitssymptomen in Verbindung bringt.

Schließlich ergaben Untersuchungen an Mäusen, dass chronischer Stress sowohl zu depressivem Verhalten führt als auch mit verschiedenen Abwandlungen der Histone einhergeht. Letztlich wird dabei ein Gen heruntergeregelt, das die Stressreaktion steuert. Vor dem Hintergrund dieser Befunde verglichen Patrick O. McGowan von der McGill University in Montreal (Kanada) und seine Kollegen 2009 die epigenetischen Modifikationen im Promotor des GR-Gens im Hip-

Telomere schützen die Enden der Chromosomen vor dem Abbau bei der Zellteilung. Das Enzym Telomerase sorgt dafür, dass sie selbst intakt bleiben. Wie sich zeigte, vermindert psychische Belastung die Aktivität dieses Enzyms, wodurch sich die Telomere mit der Zeit verkürzen, was das Altern beschleunigt.



TOMO NAKASHIMA

pocampus von Selbstmordopfern, von denen einige als Kinder missbraucht worden waren, andere dagegen nicht, sowie von Kontrollpersonen. Dabei entdeckten sie bei den früher missbrauchten Suizidopfern eine verstärkte Methylierung des GR-Promotors, was die Expression des Glukokortikoidrezeptors drosselte. Offenbar beeinflusst also die Misshandlung im Kindesalter auf epigenetischem Weg die Entwicklung des Stressreaktionssystems. Auf diese Weise erhöht sich die Wirkung von Stressfaktoren und die Wahrscheinlichkeit von Gemütskrankheiten für das gesamte Leben.

Abnutzung der Telomere

Der dritte und letzte Prozess, über den psychosoziale Belastungen die Genaktivität modulieren können, betrifft die Telomere an den Enden der Chromosomen. Sie schützen die dort gelegenen Gene im Verlauf der Zellteilung vor dem Abbau. Bei der Verdopplung der Chromosomen kann das dafür zuständige Enzym, die DNA-Polymerase, den äußersten Rand nämlich nicht kopieren, so dass er wegfällt. Die Telomere dienen als »Futter«, das jeweils ein Stück verkürzt wird. Anschließend verlängert die Telomerase, eine reverse Transkriptase, sie wieder und sorgt damit für die Stabilität der Chromosomenenden.

Die Verkürzung der Telomere beim Menschen ist nach heutiger Kenntnis eine Begleiterscheinung des Alterns und hängt mit vielen altersbedingten Störungen zusammen, darunter Krebs, Immunschwäche und Herz-Kreislauf-Krankheiten. Die Telomere werden nämlich trotz der Erneuerung durch die Telomerase im Zuge der Chromosomenreplikation allmählich immer kürzer.

Eine wichtige Rolle spielt auch oxidativer Stress – eine Art »Rosten« der Zellen. Psychosoziale Belastungen beschleunigen diesen biologischen Abnutzungsprozess, der ein breites Spektrum von Zellbestandteilen schädigt, darunter die Telomere. Das führt zu einer vorzeitigen Alterung. Mit anderen Worten: Zwei 35-jährige Menschen können ein sehr unterschiedliches biologisches Alter haben, je nachdem, welchen

Stressfaktoren sie in der Vergangenheit ausgesetzt waren und wie lang demnach ihre Telomere sind.

Mit neu entwickelten Verfahren zur Messung von Telomerlängen gelang es, diese Zusammenhänge genauer zu untersuchen. In einer bahnbrechenden Arbeit verglichen Elissa S. Epel, Elisabeth H. Blackburn (die für ihre Forschungen an Telomeren 2009 den Medizinnobelpreis erhielt) und Kollegen die Länge der Telomere und die Telomerasefunktion bei Müttern mit gesundem Nachwuchs und solchen, die ein chronisch krankes Kind zu versorgen hatten – eine höchst belastende Situation. Dabei zeigte sich: Je größer der gefühlte Stress der Mütter, desto geringer die Telomerlänge und Telomeraseaktivität.

Soziale Belastung beschleunigt also das biologische Altern. Tatsächlich zeigen andere Forschungsarbeiten, dass die Telomerlänge mit häuslicher Gewalt, der eigenen Bildung sowie derjenigen der Eltern, Kindheitstraumata, Vollzeitarbeit von Frauen, Leistungsbeurteilungen und Gewalterfahrungen in der Kindheit zusammenhängt. Neueren Befunden zufolge scheint sogar Stress während der Schwangerschaft die Telomerlänge der Nachkommen im jungen Erwachsenenalter zu beeinflussen.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten: Immer leistungsfähigere und ausgefeiltere Messverfahren für das Genom und die darin ablaufenden Vorgänge haben in den letzten zehn Jahren tiefe Einblicke in die Beziehung zwischen Genen, Verhalten und Gesundheit ermöglicht. Demnach sprechen die Genexpression (über Transkription und epigenetische Mechanismen) und die Abnutzung der Telomere auf ein breites Spektrum gesellschaftlicher Faktoren an. Dazu zählen der sozioökonomische Status, soziale Isolation oder Integration, eine intellektuell anregende Umgebung, akuter Stress in jungen Jahren, chronischer Stress und Stress am Arbeitsplatz. Es entbehrt nicht einer gewissen Ironie, dass ausgerechnet verbesserte Messverfahren im Bereich der Erbforschung zeigen, wie wichtig das soziale Umfeld der Menschen für deren Wohlergehen ist.

Im Folgenden möchte ich auf meine eigenen Forschungsarbeiten eingehen, die dem Zusammenhang zwischen dem Bildungsgrad und dem mesolimbischen System im Gehirn nachspüren, das mit dem Neurotransmitter (Nervenbotenstoff) Dopamin arbeitet und entscheidend an der Empfindung von Freude oder Niedergeschlagenheit beteiligt ist.

Zusammenhänge zwischen Genen und Schulerfolg

In den westlichen Staaten ist Bildung wohl der wichtigste Faktor, der über Einkommen, Gesundheit, Sterblichkeit und Lebensqualität entscheidet. Mit dem dopaminergen System verknüpfte Gene sind im Hinblick auf die Bildung besonders interessant, weil sie an Lernprozessen mitwirken. Dabei bestimmen sie mit darüber, wie gut Menschen aus ihren Fehlern und durch Belohnungen lernen – Psychologen sprechen von No-go- und Go-Lernen.

Der Dopaminspiegel erreicht bei angenehmen Erfahrungen – wenn man zum Beispiel gelobt wird oder die Verletzung geschafft hat – und dem Go-Lernen besonders hohe Werte. Bei negativen Erlebnissen und No-go-Lernen – etwa bei einem Tadel wegen schlechten Benehmens oder unbefriedigenden Schulnoten – sinkt er dagegen stark ab. Die Schaltkreise für das Go-Lernen stehen in Verbindung mit dem Dopaminrezeptor D1, während die für das No-go-Lernen mit dem Dopaminrezeptor vom Typ D2 zusammenhängen. Variationen in den zugehörigen Genen DRD1 und DRD2 sind also ein Grund, warum Menschen unterschiedlich gut aus Fehlern und durch Belohnungen lernen.

Der Zusammenhang zwischen dem Schulerfolg und diesen Formen des Lernens hat wahrscheinlich weniger mit intellektuellen Fähigkeiten zu tun als mit der Verhaltenssteuerung im Unterricht. Wie jeder Schüler weiß, sind Gefühle und Impulse in der Klasse streng unter Kontrolle zu halten: Man muss aufpassen und Regeln beachten. Kinder lernen diese Fähigkeit durch Belohnungen und Bestrafungen schon früh im Elternhaus und üben sie dann in der Schule weiter ein. Allerdings verfügt – so das alarmierende Ergebnis einer aktuellen landesweiten Umfrage unter US-amerikanischen Lehrern – die Hälfte der Grundschüler inzwischen nicht mehr über die nötige Disziplin, um erfolgreich am Unterricht teilzunehmen.

Nach heutiger Kenntnis haben die Gene DRD1 und DRD2 also mit dem Bildungserfolg zu tun, weil sie letztlich mit darüber entscheiden, wie gut Schüler »das Lernen lernen« – eine Grundvoraussetzung für gute Leistungen. Im Einklang damit zeigt eine wachsende Zahl von Befunden, dass DRD2 mit impulsivem Verhalten zusammenhängt, das heißt mit unüberlegtem Handeln, bei dem die Betroffenen nicht über die Folgen nachdenken, nicht motiviert sind und unter Umständen große Risiken eingehen.

Ausgehend von diesem begrifflichen Rahmen, sind meine Mitarbeiter und ich anhand von Daten einer landesweiten Längsschnittstudie (dem National Longitudinal Survey of Adolescent Health) der Frage nachgegangen, ob eine auffällige Abweichung im Gen DRD2 – der so genannte Taq1A-Poly-

morphismus – mit dem Erwerb eines höheren Bildungsgrads zusammenhängt. Wie sich herausstellte (siehe Tabelle S. 42), besuchten nur 44 Prozent der weißen Jungen mit der abweichenden DRD2-Variante ein College, bei den anderen waren es 59 Prozent. Das ist ein deutlicher Unterschied, der analog auch bei Farbigen auftrat. Das abweichende DRD2-Gen verringert also offenbar die Wahrscheinlichkeit für den Besuch eines College.

Angesichts der Tatsache, dass komplexe Verhaltensweisen aus einem Wechselspiel zwischen Genen und Umwelt hervorgehen, fragten wir uns als Nächstes, ob bestimmte gesellschaftliche Verhältnisse den genetischen Nachteil kompensieren könnten. Wie müsste das soziale Umfeld der Schüler aussehen, damit Träger der DRD2-Variante mit der gleichen Wahrscheinlichkeit aufs College gehen wie andere? Diese Frage führte schließlich dazu, dass wir uns genauer bewusst machten, wie kompliziert das soziale Umfeld eines Menschen tatsächlich ist.

Zunächst einmal beruht die Komplexität des menschlichen Verhaltens darauf, dass die gesellschaftlichen Verhältnisse die Wechselbeziehungen zwischen vielen Faktoren widerspiegeln. Es handelt sich also um eine systemische Größe. Ein wenig ähnelt das soziale Umfeld einem Habitat in der Biologie: In beiden Fällen bilden zahlreiche Aspekte der Umwelt ein ganzheitliches Ambiente. In der Tierwelt handelt es sich dabei allerdings nur um den rein



SVEN JÄHNICHEN / CC-BY-SA-3.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BB-SA3.0)

Der Dopaminrezeptor (im Bild: dreidimensionale Strukturdarstellung) vermittelt die Wirkung des Botenstoffs Dopamin, der mit dem Belohnungssystem im Gehirn zusammenhängt. Unterschiede in diesem Rezeptor erklären, warum manche Menschen besser oder schlechter aus Fehlern oder durch Belohnungen lernen als andere.

physischen Lebensraum. Dagegen besteht der soziale Rahmen aus den Beziehungen zwischen den Menschen, ihren Rollen und ihrer Stellung in der Gesellschaft sowie den kulturellen Regeln und Normen, die ihr Verhalten beeinflussen. Wie schaffen alle diese Dinge gemeinsam das soziale Umfeld eines Menschen?

Der Einfluss der Lebensumstände

Die wohl am gründlichsten untersuchten gesellschaftlichen Variablen in der Genomforschung sind mit seelischer Anspannung verbundene Erlebnisse. Dabei handelt es sich um einschneidende – positive oder negative – Geschehnisse im Leben eines Menschen wie den Tod eines nahen Angehörigen, die Eheschließung, den Umzug in eine andere Stadt, eine schwere Erkrankung, die Beschaffung eines Immobiliendarlehens oder die Geburt eines Kindes. In der Genomforschung sollen die Versuchspersonen meist aus einer langen Liste solcher Ereignisse diejenigen ankreuzen, die bei ihnen selbst in den letzten ein oder zwei Jahren vorkamen. Die Zahl der Kreuze dient dann als Indikator für das Vorliegen einer Depression oder anderen Störung. Dieser Ansatz krankt jedoch daran, dass die wichtigen Begebenheiten nicht im Gesamtzusammenhang der jeweiligen Lebensumstände, sondern als isolierte Einzelereignisse betrachtet werden.

Tatsächlich hat die Forschung gezeigt, dass die Auswirkungen einschneidender Erlebnisse davon abhängen, in welcher Beziehung sie zu anderen zwischenmenschlichen Erfahrungen stehen – welche Rolle sie also in dem verflochtenen System des sozialen Umfelds spielen. Ein gutes Beispiel ist die Ehescheidung. Sie kann sehr belastend sein, doch hängen die Auswirkungen von vielen Faktoren ab. Dazu zählen die Situation im Vorfeld (das Ausmaß der Ehekonflikte), der Grad der Bedrohung (welche finanziellen Folgen hat die Scheidung, wie stark sind die Kinder betroffen), die subjektive Bedeutung für Identität und kulturelles Selbstverständnis (inwieweit billigt die eigene Gesellschaftsschicht oder Kultur die Auflösung der Ehe) und der sozialen Unterstützung (etwa

durch Freunde, die emotionalen oder materiellen Beistand leisten).

Berücksichtigt man all diese Überlegungen, so stellt sich überraschenderweise heraus, dass mit Stress verbundene negative Lebensereignisse oft sogar gut für die geistige Gesundheit sind. Das gilt etwa für die Partner in einer stark konfliktbelasteten Ehe, wenn sie finanziell abgesichert sind, keine Kinder haben und in einer Gesellschaft leben, die in einer Ehescheidung nichts Schlimmes sieht und soziale Unterstützung bietet. Wenn man einfach nur die einschneidenden Ereignisse im Leben addiert, bleibt ihr systemischer Charakter, das heißt die Abhängigkeit ihrer Effekte von persönlichen Beziehungen und anderen sozialen Faktoren unberücksichtigt.

Auch das Beispiel DRD2 und Bildungsgrad macht deutlich, wie wichtig eine ganzheitliche Betrachtungsweise ist. Eine der bestuntersuchten Grundlagen für den Erwerb von Bildung ist das Sozialkapital; der Ausdruck umfasst persönliche Beziehungen und die daraus erwachsenden Ressourcen, die das Erlangen von etwas Wertvollem erleichtern können.

Ein einfaches Modell des Sozialkapitals, für das umfangreiche Forschungsarbeiten sprechen, ist in der Grafik rechts dargestellt. Man erkennt die Beziehungen eines Schülers mit anderen Menschen wie Eltern, Lehrern und Mitschülern sowie die potenziellen Ressourcen, über die diese Menschen verfügen. Das Schema legt beispielsweise die Vermutung nahe, dass der Besuch eines College beim Schüler nicht nur gebildete Eltern voraussetzt, sondern auch eine enge Beziehung zu ihnen sowie das Engagement der Eltern für eine hochwertige Schule. Mit anderen Worten: Das soziale Umfeld besteht aus zahlreichen miteinander verflochtenen Komponenten und lässt sich mit nur einer Ressource oder Beziehung allein nicht angemessen berücksichtigen.

Das Sozialkapital ist in der Realität noch um einiges komplexer, als die Grafik suggeriert. Das macht seine empirische Untersuchung so schwer. Unter der Annahme, dass jede Person jede einzelne Beziehung (zum Beispiel Gespräche mit den Eltern) und jede Ressource (etwa gebildete Eltern) besitzt oder nicht, ergeben sich für das scheinbar einfache Modell in dem Diagramm bereits 2¹¹ oder 2048 mögliche Kombinationen. Unterstellt man eine rein zufällige Verteilung der Beziehungen und Ressourcen, müsste man für statistisch verlässliche Aussagen ungefähr 20 500 Personen untersuchen.

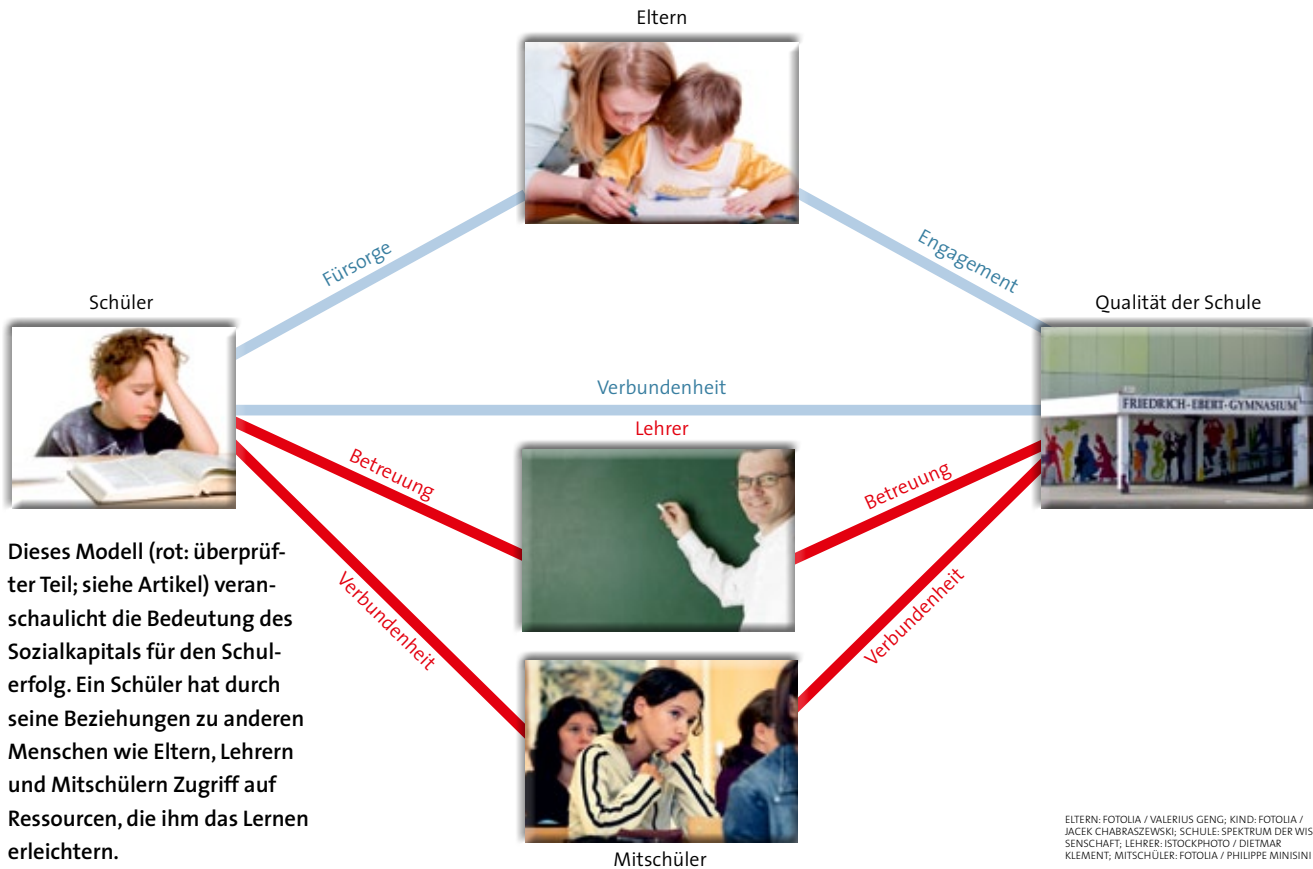
In Wirklichkeit sind die Beziehungen und Ressourcen natürlich nicht unabhängig voneinander und damit zufällig verteilt – so engagieren sich gebildete Eltern zum Beispiel auch häufiger in der Schule ihrer Kinder. Deshalb müsste man noch viel mehr als 20 500 Personen in die Untersuchung einbeziehen; einen solchen Datenbestand aber gibt es derzeit nicht.

Um die Analyse zu vereinfachen, kann man das Diagramm aufspalten. Wir haben beispielsweise den rot markierten Teil des Modells überprüft, der 2⁵ oder 32 Möglichkeiten repräsentiert. Für jede Kombination berechneten wir den Anteil der Schüler, die nach der Highschool auf das College

Besuch eines College				
	weiße Jungen		farbige Jungen	
	DRD2-Variante	normales DRD2	DRD2-Variante	normales DRD2
gesamte Stichprobe	44%	59%	35%	51%
ausreichendes Sozialkapital	67%	76%	60%	76%

Jungen mit einer Variante des Dopaminrezeptors vom Typ D2 (DRD2) gehen in den USA, wie eine landesweite Längsschnittstudie (der National Longitudinal Survey of Adolescent Health) ergab, nach der Highschool seltener auf ein College. Ihr genetisches Handikap, zu dem bei schwarzen Jungen noch ein gesellschaftliches hinzukommt, lässt sich jedoch durch ausreichend Sozialkapital kompensieren. Dieses umfasst gebildete Eltern, die sich in der Schule ihrer Kinder engagieren, und eine gute Schule.

PERSÖNLICHE BEZIEHUNGEN UND SCHULERFOLG



wechselten. Dann ermittelten wir die Kombinationen, bei denen im Vergleich zu den anderen signifikant mehr Schüler das College besuchten, und berechneten schließlich mit boolescher Algebra, welche davon für den erhöhten Anteil an Studienanfängern ausreichen. Mit anderen Worten fragten wir, welche der 32 Kombinationen von Beziehungen und Ressourcen mindestens vorliegen muss, damit eine höhere Chance für den Collegebesuch besteht. Die Antwort ist vor allem für Jungen mit einem DRD2-bedingten Risiko interessant, denn sie zeigt, welches soziale Kapital einen Ausgleich für das genetische Manko schaffen kann.

Wie Sozialkapital ein genetisches Handikap kompensieren kann

Unsere Ergebnisse, die in der Tabelle links zusammengefasst sind, belegen wieder einmal den systemischen Charakter des gesellschaftlichen Umfelds. Für weiße ebenso wie farbige Jungen besteht die Mindestkombination, bei der Schüler aufs College gehen, aus gebildeten Eltern, die sich in der Schule engagieren, und einer guten Schule. In diesem Fall wechselten 60 Prozent der farbigen Jungen mit DRD2-bedingtem Risiko aufs College; unter denen ohne das Risiko waren es sogar 76 Prozent.

Keine Komponente des sozialen Kapitals reicht also für sich allein aus – die Eltern müssen sowohl gebildet sein als auch sich in der Schule engagieren. Wie unsere und andere

Forschungen ergaben, bedeutet Engagement dabei nicht nur, regelmäßig mit den Lehrern und dem Schulleiter zu sprechen, sondern auch die Teilnahme an Kuchenbasaren und ähnlichen Veranstaltungen, wo die Eltern wertvolle Erfahrungen und Ratschläge im Zusammenhang mit Schule, Lehrern und Unterricht austauschen, die ihren Kindern zugutekommen.

Interessant ist ferner, welche Kombination mindestens vorliegen muss, damit Jungen nicht aufs College wechseln. Bei weißen Jungen handelt es sich um Eltern mit geringer Schulbildung, die sich nicht in der Schule engagieren, sowie eine schlechte Schule oder eine geringe Bereitschaft der Eltern, mit ihrem Kind über die Schule zu reden. In diesem Fall gehen nur 30 Prozent der Jungen mit DRD2-bedingtem Risiko und 42 Prozent der nicht genetisch belasteten aufs College. Für farbige Jungen reichen sogar zwei Faktoren aus: Eltern mit schlechter Schulbildung, die sich nicht in der Schule ihres Kindes engagieren. Unter diesen Umständen wechseln nur 20 Prozent aufs College.

Unsere Ergebnisse zeigen zum einen die enorme Bedeutung von Sozialkapital und DRD2-Status. Sind beide positiv, gehen 76 Prozent der Jungen gleich welcher Hautfarbe aufs College, im doppelt negativen Fall dagegen nur 30 Prozent der weißen und 20 Prozent der farbigen. Zum anderen wird deutlich, dass Sozialkapital das DRD2-Risiko ausgleichen kann: Jungen mit dem genetischen Handikap und gutem

Vom Muttertier liebevoll
gepflegte Rattenjunge sind
später stressresistenter.



ISTOCKPHOTO / ERIC ISSELÉE

Sozialkapital besuchen sogar häufiger das College als unvorbelastete mit schlechtem. Keine dieser Erkenntnisse hätten wir ohne die systemische Betrachtungsweise gewonnen.

Teufelskreis aus impulsivem Verhalten und schlechten Schulleistungen

Jahrzehntelang nahm man an, dass Stress und andere belastende Umstände zu seelischen Erkrankungen – etwa einer Depression – führen. Man sprach von »exogenen« Stressfaktoren. Das Wort setzt sich aus griechisch »exo« (von außen) und »gen« (verursacht) zusammen und bringt so zum Ausdruck, dass die Stressfaktoren von außen in das soziale Umfeld eindringen und die Depression verursachen. Inzwischen deutet immer mehr darauf hin, dass diese Vorstellung zu einfach ist. Zwar lösen Stressfaktoren wohl tatsächlich Depressionen aus, aber diese sorgen ihrerseits für weiteren Stress – eine typische Rückkopplungsschleife, die leicht zum Teufelskreis wird. Zum Beispiel kann der Tod eines Haustiers seinen Besitzer deprimieren, was dessen Unfallrisiko erhöht. So kommen möglicherweise körperliche Schäden und finanzielle Probleme hinzu, welche die Depression verstärken.

Der Stress hat dann keine äußeren Ursachen mehr, sondern wird von der psychischen Störung selbst hervorgerufen und verschlimmert sie. Deshalb ist es oft schwierig, die Auswirkungen von belastenden Faktoren auf eine Depression genau festzustellen: Sie sind vielfach nicht exogen, sondern »endogen«, kommen also »von innen« (endo). Verhalten und soziales Umfeld bilden einen Rückkopplungskreis, wodurch sich nur noch sehr schwer feststellen lässt, inwieweit soziale Variablen (zum Beispiel bedeutende Ereignisse im Leben) be-

stimmte Verhaltensweisen (etwa Depressionen) verursachen und wie stark sich diese Verhaltensweisen umgekehrt auf die äußeren Umstände auswirken.

Dasselbe gilt für DRD2 und die weiterführende Bildung. Hier steigert ein hohes Sozialkapital nicht nur die Wahrscheinlichkeit für den Collegebesuch, sondern kompensiert auch das DRD2-bedingte Risiko. Aber haben Jungen mit und ohne das genetische Handikap das gleiche Sozialkapital? Dass unbeherrschte Rüpel engen Kontakt zu Menschen pflegen, die ihnen bei schulischen Problemen helfen können, ist wenig wahrscheinlich. Auch scheuen ihre Eltern in vielen Fällen davor zurück, sich in der Schule ihrer missratenen Sprösslinge zu engagieren und mit diesen über den Unterricht zu sprechen. Bei weißen Jungen mit DRD2-Risiko lässt sich eine solche Gesetzmäßigkeit in der Tat beobachten. Fehlt das genetische Handikap, findet man dagegen häufiger Konstellationen mit hohem Sozialkapital, darunter die wichtigste Kombination: eine gute Schule und gebildete Eltern, die sich stark in ihr engagieren. Die schlechteste Kombination besteht aus Eltern mit geringer Bildung, die sich aus der Schule ihrer Kinder fernhalten. Sie kommt bei Jungen mit DRD2-Risiko besonders häufig vor.

Unter sonst gleichen Bedingungen führen die geschilderten Zusammenhänge zu einer Aufspaltung der Schülerschaft in zwei Gruppen. Die erste umfasst Jungen mit DRD2-Risiko und wenigen Beziehungen zu Menschen, die ihnen unter die Arme greifen könnten. Die Folge ist ein Teufelskreis aus impulsivem Verhalten und schlechten Schulleistungen. Mitglieder der zweiten Gruppe haben kein DRD2-Risiko und verfügen über viele Quellen für Sozialkapital, die ihnen helfen, in der Schule erfolgreich zu sein. Bei ihnen entwickelt sich

deshalb eine positive Rückkopplungsschleife aus Selbstbeherrschung und guten Schulleistungen.

Der soziale Hintergrund spielt auch deshalb eine so große Rolle, weil er über viele Jahre bis Jahrzehnte unverändert bleibt. Dagegen wirken stressige Erlebnisse meist nicht so lange nach. Nur manche davon, beispielsweise elterliche Gewalt vor dem fünften Lebensjahr, haben längerfristige Folgen, weil sie das Genexpressionsmuster verändern. Isolierte Gewaltakte im späteren Leben hinterlassen dagegen wohl keine bleibenden psychischen Schäden. Wie viel Stress einschneidende Ereignisse mit sich bringen, hängt auch von ihrer Häufigkeit ab – mit einem bis zwei in fünf Jahren werden die meisten Menschen fertig, drei oder vier bergen aber bereits die Gefahr, Gesundheit und Wohlbefinden zu untergraben.

Die Rolle der Lebensgeschichte

Generell muss man zwischen akutem und chronischem Stress unterscheiden. Der eine entsteht durch eine kurzzeitige starke Belastung, beispielsweise den Tod eines Angehörigen, der andere durch langfristige negative Einflüsse wie ein unangenehmes Arbeitsklima. In beiden Fällen werden nach heutiger Kenntnis unterschiedliche biologische Systeme aktiviert, die jeweils charakteristische Verschleiß- und Krankheitserscheinungen hervorrufen. Besonders schädlich ist anscheinend eine starke akute Belastung vor einem Hintergrund aus chronischem Stress.

Bei früheren Forschungsarbeiten wurden die Menschen in der Regel nach einschneidenden Erlebnissen in jüngster Zeit gefragt. Mittlerweile weiß man jedoch, dass die Auswirkungen solcher Erfahrungen stark davon abhängen, in welchem Lebensabschnitt sie gemacht werden, wie weit sie zeitlich auseinanderliegen und ob es andere, chronische Stressfaktoren gibt. Wichtig ist also, die gesamte Lebensgeschichte zu betrachten. Oft kommt es weniger auf die Art der belastenden Ereignisse an als darauf, wie sie sich über das Leben eines Menschen verteilen.

Auch den Zusammenhang zwischen DRD2-Risiko und Bildung haben wir auf seine Bedeutung für die Biografie hin genauer analysiert. Wie eine Reihe von Untersuchungen ergab, sind in den USA die Leistungen in den ersten Schuljahren ein guter Indikator dafür, wie lange ein Kind insgesamt zur Schule gehen wird. Mit der Einschulung beginnt es seine jeweilige Bildungskarriere (abgeleitet von dem lateinischen Wort »carriaria«, das eine Fahrerinne für Karren bezeichnet), deren Ausgang sich zumindest teilweise anhand der ersten Jahre voraussagen lässt. Wer da schon weniger Fähigkeiten, Kenntnisse und häusliche Lernmöglichkeiten hat, gerät von Anfang an in eine Spur, die nicht so weit führt wie bei Kindern mit den angemessenen Fähigkeiten und einem anregenden Elternhaus.

Wenn die ererbte DRD2-Version, wie oben gezeigt, mit darüber entscheidet, ob ein Schüler später aufs College geht, stellt sich die Frage: Beeinflusst sie auch die Leistung in den ersten Schuljahren? Die Vermutung liegt nahe, dass ein Kind mit DRD2-Risiko in den frühen Lebensjahren weniger elter-

liche und speziell mütterliche Zuwendung erfährt und deshalb seine Emotionen nicht so gut kontrollieren kann. Das wiederum beeinträchtigt sein Verhalten im Unterricht und seine kognitiven Leistungen. Statistische Daten bestätigen diese grundlegenden Zusammenhänge. Damit ist die obige Frage mit Ja zu beantworten. Tatsächlich beginnt die negative Entwicklung schon in den ersten Lebensjahren mit Verhaltensproblemen auf Grund mangelnder elterlicher Fürsorge, die das Kind von zu Hause in die Schule mitnimmt.

Eine einzelne unscheinbare Genvariante kann also einen gravierenden Einfluss auf das Schicksal eines Menschen haben. Dabei ist DRD2 sicherlich nicht das einzige Gen, das eine solche negative Kaskade auf der Verhaltensebene nach sich zieht. Für die Zukunft wird die Herausforderung darin bestehen, sämtliche genetischen und sozialen Faktoren in all ihrer Komplexität und wechselseitigen Bedingtheit zu erfassen. Diese Aufgabe verlangt nach interdisziplinären Arbeitsgruppen aus Soziologen, Psychologen und Biologen – keine geringe Anforderung, wenn man bedenkt, dass diese Fachgebiete an den Universitäten immer noch streng getrennt sind und Forscherkarrieren nicht von Teamarbeit, sondern von individuellen Leistungen abhängen. Der gesamte Wissenschaftsbetrieb muss neu organisiert werden. Der Aufwand ist enorm, doch der Ertrag – ein tiefes Verständnis der Verflechtung zwischen gesellschaftlichen Verhältnissen und unserem Genom – ist ihn wert. ~

DIE AUTOREN



Michael J. Shanahan (links) ist Professor für Soziologie an der University of North Carolina in Chapel Hill. Er hat an der University of Iowa in Iowa City Soziologie und Jura studiert und 1991 an der University of Minnesota in Twin Cities in

Soziologie promoviert. **Jason Freeman** erforscht als Doktorand in seinem Arbeitskreis, wie sich die Wechselwirkung zwischen religiösen Normen und genetischen Faktoren auf die Gesundheit auswirkt. Er hat Soziologie und Genetik studiert.

QUELLEN

Bauldry, S. et al.: Beyond Mendel's Ghost: Sociology and Molecular Genetics, Present and Future. In: Contexts 9, S. 34–39, 2010

Shanahan, M. J., Hofer, S. M.: Molecular Genetics, Aging, and Well-Being: Sensitive Period, Accumulation, and Pathway Models. In: Binstock, R. H., George, L. K. (Hg.): Handbook of Aging and Social Sciences, Elsevier, 7. Auflage, New York 2011, S. 135–147

Shanahan, M. J., Bauldry, S.: Improving Environmental Markers in Gene-Environment Research: Insights from Life Course Sociology. In: Kendler, K. S. et al. (Hg.): The Dynamic Genome and Mental Health, Oxford University Press 2011, Kapitel 3

Shanahan, M. J. et al.: Environmental Contingencies and Genetic Propensities: Social Capital, Educational Continuation, and Dopamine Receptor Gene DRD2. In: American Journal of Sociology 114 (S1), S. S260–S286, 2008

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1210961

Das Innenleben der Quarks

Quarks und Leptonen besitzen weder Ausdehnung noch Struktur – so lehrt es das Standardmodell der Teilchenphysik. Doch es gibt Hinweise, dass es auch anders sein könnte. Vielleicht stößt der Beschleuniger LHC schon bald in eine verborgene Welt noch kleinerer Partikel vor.

Von Don Lincoln

Das Standardmodell der Teilchenphysik ist eine der erfolgreichsten Theorien, die je entwickelt wurden. Gerade einmal eine Hand voll Prinzipien vereinten die Physiker zu einem sich durch seine Einfachheit auszeichnenden Modell, das alle bekannten Elementarteilchen im Universum sowie die meisten Wechselwirkungen zwischen ihnen beschreibt. Im Wesentlichen postuliert es, dass zwei Arten nicht teilbarer Materieteilchen existieren: Quarks und Leptonen, beide in unterschiedlichen Varianten. Quarks kennt man als Bausteine von Protonen und Neutronen, ein Beispiel für Leptonen sind die Elektronen. Durch die richtige Kombination von Leptonen und Quarks lässt sich jedes Atom und somit auch jegliche Materie im Universum hervorbringen.

Außerdem wirken vier fundamentale Kräfte. Zwei davon sind uns sehr vertraut, nämlich die Gravitation und die elektromagnetische Wechselwirkung. Hinzu kommen die weniger bekannte starke sowie die schwache Kernkraft. Die drei letztgenannten Kräfte beschreiben Physiker mathematisch durch den Austausch so genannter Bosonen. Versuche, auch die Gravitation in dieses Modell einzubeziehen, sind allerdings sämtlich gescheitert. Auch weitere Antworten bleibt das Standardmodell schuldig: Wieso gibt es ausgerechnet vier Kräfte und nicht mehr oder weniger? Und warum existieren gerade zwei verschiedene Sorten fundamentaler Teilchen und nicht nur eine?

Verbergen Quarks (in der Illustration rot dargestellt) ein Geheimnis? Manche Forscher glauben, dass sie in ihrem Inneren weitere Partikel beherbergen könnten, die Preonen (gelb).

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

GROSSE FRAGEN DER PHYSIK

- | | | |
|--------|--|---------------|
| Teil 1 | ▶ Einstein im Quantentest
<i>Domenico Giulini</i> | Oktober 2013 |
| Teil 2 | ▶ Teilchenschleudern der Zukunft
<i>Gerhard Samulat</i> | November 2013 |
| Teil 3 | ▶ Das Innenleben der Quarks
<i>Don Lincoln</i> | Dezember 2013 |



Zweifellos wichtige Fragen. Doch mich und auch viele meiner Physikerkollegen fasziniert schon seit langer Zeit ein ganz anderes Rätsel. Es gibt Indizien, dass Quarks und Leptonen, die im Standardmodell als punktförmig und unteilbar gelten, aus noch kleineren Komponenten aufgebaut sein könnten. Falls dies tatsächlich der Fall ist, falls Quarks und Leptonen also nicht wirklich fundamental sind, stünde dem Standardmodell eine grundlegende Überarbeitung ins Haus. Ebenso wichtig wären wohl die praktischen Konsequenzen. So wie es vor Ernest Rutherfords Entdeckung der Struktur des Atoms im Jahr 1911 undenkbar war, die Kernenergie-technik zu entwickeln, so brächte wohl auch die Entdeckung einer tieferen Ebene der Materie völlig Neues mit sich.

Doch gibt es diese Ebene wirklich? Um eine Antwort zu finden, brauchen Physiker Werkzeuge, um auch ins Innere der Quarks schauen zu können. Die fehlten bislang. Der Large Hadron Collider (LHC) am Forschungszentrum CERN bei Genf, an dem 2012 das Higgs-Teilchen gefunden wurde, könnte der Aufgabe allerdings schon bald gewachsen sein.

Mehr als genug, um sämtliche Materie zu bilden

Die ersten Hinweise auf eine innere Struktur von Quarks und Leptonen entdeckten Physiker schon vor Jahrzehnten. Protonen und Neutronen bestehen aus zwei Quarksorten, nämlich Up-Quarks und Down-Quarks. Während Up-Quarks mit $+2/3$ der Protonenladung ausgestattet sind, verfügen Down-Quarks über $-1/3$ dieser Ladung. Kombiniert man zwei Up-Quarks mit einem Down-Quark oder zwei Down-Quarks mit einem Up-Quark, kommen das Proton beziehungsweise das Neutron heraus. Zusammen mit den Elektronen würden diese beiden Quarksorten also ausreichen, sämtliche Materie im Kosmos zu bilden.

Doch die Forscher fanden zusätzliche Quarks, etwa das Strange-Quark, das die gleiche Ladung wie das Down-Quark besitzt, jedoch schwerer ist, und das noch massereichere Bottom-Quark. Auch das Up-Quark hat noch schwerere Verwandte, nämlich das Charm- und das Top-Quark. Die vier Schwergewichte sind allerdings instabil und zerfallen binnen Sekundenbruchteilen in Up- und Down-Quark. Auch das Elektron hat eine ebenso übergewichtige wie instabile Verwandtschaft: das Myon und das noch schwerere Tau-Lepton. Außerdem kennen die Teilchenphysiker drei Varianten des Neutrinos; alle sind superleicht und elektrisch neutral.

Diese Fülle scheint überflüssig: Wenn bereits Up-Quark, Down-Quark und Elektron ausreichen, um alle Materie im Universum zu bilden, wieso gibt es dann trotzdem so viele verschiedene Teilchen? Diese Frage brachte der US-amerikanische Physiknobelpreisträger Isidor Isaac Rabi auf den Punkt, als er nach der Entdeckung des Myons fragte: »Who ordered that?«, »Wer hat das bestellt?«

Wie man diese mysteriöse Überzahl deuten soll, ist unklar. Einer der Ansätze bestand darin, die Teilchen tabellarisch und schematisch nach ihren Eigenschaften zu ordnen (Kasten rechts), ähnlich wie beim ehrwürdigen Periodensystem der

Elemente. Letzteres hatte seinerzeit erste Hinweise darauf gegeben, dass die chemischen Elemente womöglich nicht im Wortsinn elementar sind. Die in jeweils denselben Zeilen beziehungsweise Spalten angeordneten Elemente des Schemas wiesen nämlich Gemeinsamkeiten auf, die auf systematische Muster im inneren Aufbau der Atome hindeuteten.

Die analoge Tabelle für Quarks und Leptonen hat drei Spalten. Jede enthält eine so genannte Generation von Teilchen; die rätselhafte Teilchenzahl wird entsprechend als Generationenproblem bezeichnet. Ganz links steht die Generation eins. Sie enthält Up- und Down-Quark sowie Elektron und Elektron-Neutrino – also alles, was man braucht, um das uns vertraute Universum zu erklären. In Generation zwei tummeln sich die massereicheren Versionen dieser Teilchen, in drei die ganz schweren. Wie einst beim Periodensystem deuten die Muster in der Tabelle auf die Möglichkeit hin, dass noch kleinere Materiebausteine im Innern der Partikel sich zu unterschiedlichen Konfigurationen zusammensetzen und so die Unterschiede zwischen den Generationen erklären könnten.

Ein weiteres historisches Vorbild für die Suche nach der inneren Struktur von Quarks ist möglicherweise die Entdeckung des radioaktiven Zerfalls. An der Schwelle zum 20. Jahrhundert rätselte man über einen mysteriösen Prozess, der schier Unerhörtes vollbrachte, nämlich ein chemisches Element in ein anderes umwandelte. Heute wissen wir, dass sich der Traum der mittelalterlichen Alchemisten, Blei in Gold zu verwandeln, erfüllen lässt. Dazu muss lediglich die Zahl der Protonen und Neutronen im Atomkern verändert werden. Mit Hilfe der schwachen Kernkraft kann die nukleare Alchemie sogar Neutronen in Protonen verwandeln und umgekehrt. Dafür ist es nur nötig, dass die Quarks im Innern dieser Elementarteilchen ihre Identität wechseln. Auch Leptonen lassen sich ineinander umwandeln. Lediglich die Verwandlung von Quarks in Leptonen ist nicht möglich, ebenso wenig wie der umgekehrte Weg.

Weisen die Metamorphosen von Quarks und Leptonen auf ein Innenleben der Partikel hin, so wie die Wandlungsfähigkeit der chemischen Elemente deren atomare Struktur

AUF EINEN BLICK

DEN PREONEN AUF DER SPUR

1 Der Chemiker Dmitri Mendelejew bemerkte 1869, dass die Anordnung der Elemente in einem bestimmten Schema – dem **Periodensystem** – auffällige Muster ihrer Eigenschaften zu Tage förderte. Diese konnten Physiker später mit der atomaren Struktur der Elemente erklären.

2 Analoges könnte sich nun wiederholen, denn auch die Eigenschaften der bekannten Materieteilchen folgen Mustern. Ist dies ein Hinweis darauf, dass sie nicht wirklich elementar sind, sondern noch kleinere Partikel beherbergen, die **Preonen**? Andere Befunde sprechen bislang allerdings gegen diese Möglichkeit.

3 Experimente am Genfer **Large Hadron Collider** könnten die Frage nach der Existenz von Preonen schon bald beantworten.

Landkarte der Teilchen

Die Teilchenphysik fußt auf einer umfassenden Theorie, dem so genannten Standardmodell, das alle bekannten fundamentalen Teilchen beschreibt sowie – mit Ausnahme der Gravitation – die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Es enthält zwei Familien von Teilchen: die Fermionen, zu denen alle elementaren Bestandteile der Materie gehören, und die Kräfte übertragenden Bosonen.

Fermionen lassen sich in drei so genannten Generationen anordnen; die Teilchenmassen nehmen dabei von Generation zu Generation zu.



widerspiegelt? Forscher haben schon zahlreiche Vorschläge für hypothetische Teilchen gemacht, aus denen Quarks und Leptonen zusammengesetzt sein könnten. Sie tragen unterschiedliche Namen, werden aber alle unter dem Begriff Preonen zusammengefasst. Ein einfaches Preonenmodell stammt von 1979. Der Israeli Haim Harari, der damals am Linear Accelerator Center in Stanford forschte, und der US-Amerikaner Michael Shupe, damals an der University of Illinois, hatten es unabhängig voneinander entwickelt (siehe Kasten auf S. 51). Gemeinsam mit seinem Schüler Nathan Seibert erweiterte Harari es 1981 noch, beide arbeiteten damals am israelischen Weizmann Institute of Science.

Diesem Modell zufolge existieren zwei Arten von Preonen: das eine mit einer elektrischen Ladung von $+1/3$, das andere ohne Ladung. Außerdem hat jedes dieser Preonen ein Pendant aus Antimaterie, das entgegengesetzte Ladung besitzt, also $-1/3$ und ebenfalls null. Diese Preonen sind Fermionen, also Materieteilchen. Jedes Quark und jedes Lepton besteht aus einer unterschiedlichen Kombination von je drei Preonen. Zum Beispiel ergeben zwei Preonen mit jeweils Ladung $+1/3$ und ein Preon mit Ladung null das Up-Quark. Dessen Gegenstück aus Antimaterie enthält zwei Preonen mit Ladung $-1/3$ sowie ein weiteres mit Ladung null.

Das Gegenstück zu den Fermionen sind Bosonen. Erstere sind für die Bildung von Materie zuständig, Letztere für die Übertragung der Kräfte. Dem Modell zufolge bestehen Bosonen aus preonischen Sechserkombinationen. Das positiv geladene W-Boson zum Beispiel, das die schwache Kernkraft überträgt, die sowohl auf Quarks als auch auf Leptonen wirkt, ist demzufolge aus drei Preonen mit $+1/3$ -Ladung und drei weiteren elektrisch neutralen Preonen aufgebaut.

Ausgehend von einer Reihe plausibler Annahmen postulierten Harari und Shupe die jeweilige Zusammensetzung aller Teilchen der ersten Generation. Auch Gluonen, welche die starke Kernkraft vermitteln, also Quarks zu Protonen und Neutronen zusammenfügen, sind dem Modell der beiden Forscher zufolge aus Preonen aufgebaut. Dasselbe gilt für die anderen kraftübertragenden Bosonen.

Der Trick bei der Entschlüsselung jeder inneren Struktur von Quarks, Leptonen und Bosonen besteht darin, die zahllosen Wechselwirkungen dieser Teilchen zu berücksichtigen. Bei der Kollision eines Up-Quarks mit einem Down-Quark aus Antimaterie etwa entsteht ein positives W-Boson. Dieses wiederum zerfällt in ein Positron, also ein Anti-Elektron, und ein Elektron-Neutrino. Im Preonenmodell von Harari und Shupe vereinen sich die beiden aufeinandertreffenden

Quarks mit ihren jeweils drei Preonen zu einem W-Boson, das nun alle drei $+1/3$ -Ladungen sowie die drei Nullladungen zu einer ganzen positiven Elementarladung von $+1$ kombiniert. Der anschließende Zerfall des W-Bosons führt erneut zu einer anderen Konfiguration der sechs Preonen: Sie verteilen sich auf ein Positron mit drei $+1/3$ -Ladungen und auf ein Elektron-Neutrino, das die drei Nullladungen enthält.

Bislang klingt dies nach einem Zahlenspiel – es scheint einfach nur darum zu gehen, dass numerisch alles stimmt. Von einem Preonenmodell wird jedoch mehr erwartet: Es soll Quarks und Leptonen mit einer kleinen Anzahl elementarer Bausteine und einigen wenigen Regeln erklären. Scheinbar verschiedene Teilchen muss es in einem gemeinsamen Erklärungsrahmen vereinen, um die zu Grunde liegende Ordnung zu enthüllen. Dies gelingt sowohl dem Harari-Shupe-Modell als auch konkurrierenden Ansätzen – zumindest für die erste Generation. Betrachten wir aber auch die zweite und dritte Generation von Quarks und Leptonen, werden die Dinge komplizierter. Harari und Shupe interpretierten höhere Generationen als angeregte Zustände der ersten Generation, analog zu Elektronen, die um ein Atom kreisen und von einem niedrigeren Energieniveau auf ein höheres angeregt werden können. Denkbar ist nämlich, dass die Preonen in Teilchen der höheren Generation aus irgendeinem noch unbekanntem Grund mehr Energie besitzen und – gemäß der von Einstein formulierten Äquivalenz zwischen Energie und Masse – damit auch mehr Masse.

Physiker entwickeln Preonenmodelle zuhauf

Diese Erklärung mag recht beliebig erscheinen, zumal viele Details des Konzepts noch ungeklärt sind. Doch das spricht nicht unbedingt gegen den Vorschlag: Die meisten Untersuchungen, die am Anfang der Quarktheorie standen, brachten ähnliche Schwierigkeiten mit sich. Genauere mathematische Beschreibungen etwa der starken Kernkraft kamen oft erst später hinzu. Trotzdem muss das Generationenproblem als noch ungelöst gelten. Physiker haben darum konkurrierende Konzepte vorgeschlagen, Preonen etwa, die eine Generationenanzahl tragen, oder die so genannte Hyperfarbe, die eine neue Art von Ladung sein soll und Preonen in Quarks und Leptonen aneinander bindet.

Die hier vorgestellte Preonentheorie ist also beileibe nicht die einzige auf dem Markt; buchstäblich Hunderte von Publikationen befassen sich mit anderen Preonenmodellen. Oft weichen sie nur wenig von einander ab. Einige gehen von Preonen mit $1/6$ - anstelle der $1/3$ -Ladung aus dem Harari-Shupe-Modell aus, andere von fünf statt von drei Preonen, die sich zu Quarks und Leptonen zusammensetzen. Wieder andere schlagen eine Mischung aus fermionischen und bosonischen Preonen vor. Manche Physiker kombinieren die Preonen auch auf andere Weise zu Bosonen, als dies die Tabelle rechts zeigt. Welches der Modelle uns auf den richtigen Weg führt, lässt sich ohne weitere experimentelle Daten aber nicht entscheiden.

Viele Forscher fasziniert der Gedanke, dass die vermeintlich kleinsten Einheiten der Materie aus etwas noch Kleine-

rem bestehen könnten, doch interessieren sie sich auch aus einem weiteren Grund für Preonen. Sollten diese wirklich existieren, könnten sie nämlich auch über ein anderes Geheimnis Auskunft geben. Im Standardmodell der Teilchenphysik gilt das Higgs-Feld als Quelle der Masse von fundamentalen Teilchen. Demnach spüren massebehaftete Teilchen eine Art Widerstand, wenn sie sich durch dieses allgegenwärtige Feld bewegen, während zum Beispiel die masselosen Photonen unbehelligt weiterfliegen.

Falls die Preonen, welche die Teilchen der zweiten und dritten Generation bilden, tatsächlich identisch sind mit denen in der ersten Generation, so müssen sie entweder energetisch angeregt sein und deshalb mehr Masse besitzen. Oder die Preonen in den höheren Generationen sind auf eine besondere Weise angeordnet oder »konfiguriert«, so dass beispielsweise das Top-Quark stärker mit dem Higgs-Feld wechselwirkt als das Up-Quark und dadurch eine höhere Masse gewinnt. Analog dazu kann man sich vorstellen, die Hand aus dem Fenster eines fahrenden Autos zu halten; dann ist ihre Wechselwirkung mit dem Wind mal stärker, mal schwächer, je nachdem, wie die Hand zu ihm orientiert ist. Verstehen wir eines Tages die verborgene Struktur von Quarks und Leptonen und den Unterschied zwischen den Generationen besser, werden wir wohl auch viel über das Higgs-Feld dazulernen.

Wie andere Theorien haben auch Preonenmodelle ihre Probleme. Zum einen schlugen alle Versuche fehl, die postulierten Teilchen tatsächlich zu entdecken. Doch das ist vielleicht nur eine Frage unserer experimentellen Möglichkeiten. Manche Einwände hingegen sind untrennbar mit der Theorie selbst verbunden. Einer betrifft das Confinement, das »Eingesperrtsein« von Teilchen. Solche Partikel teilen sich mit anderen ihrer Art ein Volumen – wie die Quarks, die in einem Proton oder Neutron eingesperrt sind –, lassen sich aber prinzipiell nicht voneinander isolieren, kommen also nie als freie Teilchen vor. In jeder »confining theory« sind die relevanten Massen umgekehrt proportional zur Größe des Volumens: je kleiner das Volumen, desto größer die Masse. Eingesperrt in einem winzigen Quark, müssten Preonen eine sehr große Masse besitzen und folglich auch die Quarks. Doch die Masse der Up- und Down-Quarks in einem Proton können wir messen – und die ist sehr klein. Wie kommt es, dass ein Objekt weniger als die Summe seiner Teile zu sein scheint, und schlimmer noch: sogar weniger als jedes einzelne seiner Teile?

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



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



www.spektrum.de/teilchenphysik

Das Problem scheint unüberwindbar. Und doch haben Physiker schon einmal eine ähnliche Klippe umschiffen. Ein bestimmtes Boson, das Pion, setzt sich aus einem Quark und einem Anti-Quark zusammen, und auch dabei taucht das rätselhafte Confinement-Problem auf. Eine Idee, die der Brite Jeffrey Goldstone bereits 1961 am CERN skizzierte, brachte Theoretiker jedoch auf die Idee, dass Symmetrien in der zu Grunde liegenden Theorie diese Schwierigkeit überwinden können. Die geringe Pion-Masse war in diesem Licht betrachtet dann keine wirkliche Überraschung mehr.

Leider gilt diese Überlegung nur für Bosonen, aber nicht für Fermionen wie die Quarks. Im Jahr 1979 erarbeitete Gerard 't Hooft von der niederländischen Universität Utrecht jedoch einen verwandten Ansatz, der auch für Fermionen funktionieren könnte. Ob sich sein Konzept auf reale Teilchen anwenden lässt, ist noch nicht entschieden, doch möglicherweise sind die theoretischen Klippen, vor die uns das Problem der Quarkmassen stellt, doch nicht so hoch, wie sie zunächst erschienen.

Koexistenz von Superstrings und Preonen?

Physiker sind noch andere Wege zur Lösung des Generationsproblems gegangen. Ein prominentes Konzept betrachtet die kleinsten Bausteine der Materie nicht als Teilchen, sondern als winzige schwingende Saiten, die Superstrings genannt werden. Jedes Teilchen des Standardmodells kann demnach als bestimmte Note gedacht werden, die auf einem solchen String erklingt. Die Realität wäre, etwas pathetisch formuliert, die orchestrale Inszenierung einer kosmischen Symphonie von Superstrings. Superstrings und Preonen schließen sich nicht unbedingt gegenseitig aus, sondern wären zu friedlicher Koexistenz fähig. Denn Erstere sind viel kleiner als Quarks und Leptonen – beide wären also auf sehr unterschiedlichen Größenskalen beheimatet. Sollten Superstrings tatsächlich existieren, könnten folglich nicht nur Quarks und Leptonen aus ihnen bestehen, sondern auch Preonen, Pre-Preonen oder Pre-Pre-Preonen – je nachdem, wie viele unentdeckte Ebenen die Materie noch zu bieten hat.

Eine weitere Alternative beschrieb Sundance Bilson-Thompson, Forscher an der südaustralischen University of Adelaide, der sich Preonen als gewundene Zöpfe in der Raumzeit vorstellt. Sein Modell, das er erstmals 2005 präsentierte, steckt zwar noch in den Kinderschuhen. Trotzdem analysieren Physiker bereits dessen Implikationen, nicht zuletzt, weil man auf diesem Weg vielleicht die lange gesuchte Quantentheorie der Schwerkraft finden und damit auch die Gravitation in das Standardmodell integrieren kann.

Letztlich bleibt die Physik aber eine experimentelle Wissenschaft. Wie ausgefeilt eine Theorie auch sein mag: Passt sie nicht zu den Messungen, hat sie den entscheidenden Test nicht bestanden. Was also können Experimentatoren tun, um die Existenz von Preonen nachzuweisen oder zu widerlegen? Sie müssen nach kleinen Abweichungen von den Vorhersagen des Standardmodells suchen, gleichsam nach winzigen Rissen im Gebäude der Teilchenphysik. Denn möglicherweise sind es Preonen, mit denen sie sich erklären lassen.

Preonen für Einsteiger

Möglicherweise sind Quarks und andere Elementarteilchen aus Preonen aufgebaut. Für die Beschreibung der noch hypothetischen Partikel haben Physiker verschiedene Konzepte entwickelt. Eines davon, das Harari-Shupe-Modell, geht auf das Jahr 1979 zurück. Ihm zufolge gibt es zwei Arten von Preonen sowie je eine Antimaterieversion dieser Teilchen. Preonen können einerseits Materieteilchen bilden, also Fermionen (obere Tabelle), andererseits auch Bosonen (untere Tabelle). Bosonen sind für die Übertragung der fundamentalen Kräfte zuständig.

Fermionen: die Teilchen der Materie

Die beiden Preonen dieses Modells kann man als + und 0 darstellen. Das + hat eine elektrische Ladung von +1/3, 0 ist ungeladen. Zusätzlich haben beide einen entsprechenden Begleiter aus Antimaterie, der entgegengesetzte Ladung trägt. – hat also eine Ladung von –1/3, während $\bar{0}$ für das ungeladene Anti-Preon steht. Im Harari-Shupe-Modell werden je drei Preonen gebraucht, um Quarks beziehungsweise Leptonen zu bilden.

LADUNG	ENTHALTENE PREONEN	TEILCHEN
+1	+++	Antielektron (Positron)
+2/3	++0	Up-Quark
+1/3	+00	Anti-Down-Quark
0	000	Elektronneutrino
0	$\bar{0}\bar{0}\bar{0}$	Anti-Elektronneutrino
–1/3	– $\bar{0}\bar{0}$	Down-Quark
–2/3	-- $\bar{0}$	Anti-Up-Quark
–1	---	Elektron

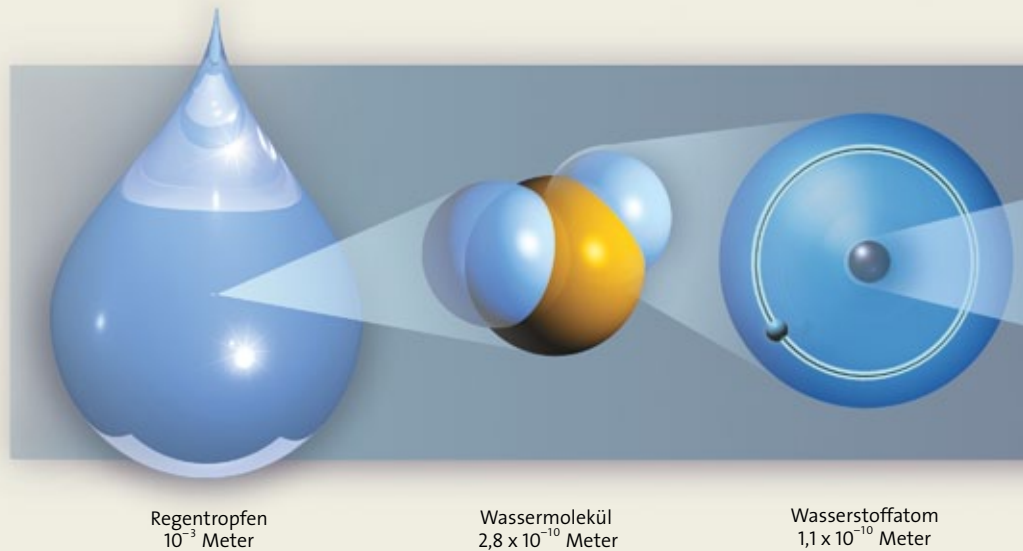
Bosonen: die kraftübertragenden Teilchen

Auch Bosonen setzen sich dem Modell zufolge aus Preonen zusammen. Diese formieren sich in Zweier- oder Sechsergruppen, um das Photon (das Kraftteilchen des Elektromagnetismus), das Gluon (starke Kernkraft) und das W^+ , das W^- und das Z-Boson (alle drei für die schwache Kernkraft) zu bilden. Die verwickelten Details im Zusammenhang mit dem Gluon – ein Teilchen, das für die Bindungskräfte zwischen den Quarks im Atomkern sorgt – sind hier nicht dargestellt.

LADUNG	ENTHALTENE PREONEN	TEILCHEN
+1	+++000	positives W-Boson
–1	--- $\bar{0}\bar{0}\bar{0}$	negatives W-Boson
0	000 $\bar{0}\bar{0}\bar{0}$ +++--- ++–0 $\bar{0}$ +–0 $\bar{0}\bar{0}$	Z-Boson (vier Varianten)
0	+–	Photon

Materie im Zoom

Falls Preonen existieren, sind sie unvorstellbar winzig. Sie müssten schließlich in ein Quark hineinpassen! Quarks wiederum müssen klein genug sein, um in ein Proton zu passen. Keines der bisherigen Experimente widerspricht allerdings einer möglichen Quarkgröße von null; eine innere Struktur dieser Teilchen wäre dann ausgeschlossen. Mit künftigen Experimenten werden Physiker jedoch genauer hinschauen. Sollten sie feststellen, dass die Quarks doch eine Ausdehnung besitzen, erhalte die Preonen-Hypothese starken Auftrieb.



Insbesondere zwei Aspekte lohnen einer genaueren Untersuchung, zum Ersten die Größe. Wie schon erwähnt, behandelt das Standardmodell Quarks und Leptonen als Punktteilchen ohne innere Struktur und mit der Größe null. Besäßen die Teilchen eine endliche Größe, wäre dies ein gewichtiges Argument für die Existenz von Preonen. Der Radius von Protonen und Neutronen, so zeigen Messungen an Teilchenbeschleunigern, liegt bei rund 10^{-15} Meter. Immer wieder suchte man auch nach Hinweisen auf eine messbare Größe von Quarks oder Leptonen. Bisherigen Experimenten zufolge sind sie auf jeden Fall kleiner als 1 Tausendstel, manchen Messungen zufolge sogar kleiner als 0,2 Tausendstel der Protonengröße. Sie sind also entweder sehr, sehr winzig – oder haben vielleicht doch eine Ausdehnung von null. Um zwischen diesen beiden Möglichkeiten zu unterscheiden, sind aber viel genauere Messungen nötig. Die riesigen Datenmengen des LHC und die höheren Energien, die er nach seiner Wartungsphase erreichen wird, bieten die Chance, sie durchzuführen.

Zweitens müssen die Forscher den Spin und das magnetische Moment der Teilchen genauer untersuchen, zumindest an Leptonen wie dem Elektron. Sehr vereinfacht kann man sich das Elektron als rotierende Kugel vorstellen; es besitzt, wie Physiker sagen, den Spin $1/2$. Die Kombination von Spin und Ladung verleiht ihm darüber hinaus ein magnetisches Moment, was nichts anderes bedeutet, als dass es sich wie ein Magnet mit Nord- und Südpol verhält. Dieses magnetische Moment sollte einen ganz bestimmten Wert besitzen, wenn das Elektron tatsächlich punktförmig ist und Spin $1/2$ besitzt. Falls Messungen am Elektron (oder auch am Myon) abweichende Werte ergäben, läge ein starkes Argument gegen die Annahme punktförmiger Teilchen auf dem Tisch.

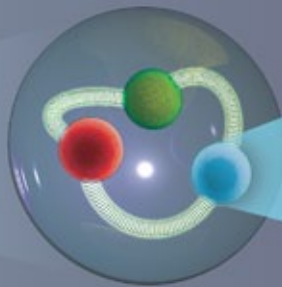
Die magnetischen Momente von Elektron und Myon weichen tatsächlich leicht von denen eines Punktteilchens ab.

Diese kleine Differenz hat jedoch nichts mit Preonen zu tun, denn sie lässt sich im Rahmen des Standardmodells erklären. Jedes Lepton ist von einer Art flimmernder Wolke umgeben, in der so genannte virtuelle Teilchen kontinuierlich aus dem Nichts entstehen, aber auch sogleich wieder vergehen. Da diese virtuelle Teilchenwolke eine endliche Größe hat, verändert sie das magnetische Moment des Leptons; der Einfluss liegt im Promillebereich. Die Effekte von Preonen wären sogar noch kleiner, könnten sich aber trotzdem nachweisen lassen, etwa am Myon-g-2-Experiment des Fermilab bei Chicago, dessen Genauigkeit diejenige bisheriger Messungen um den Faktor vier übertreffen wird.

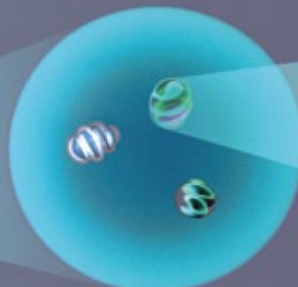
Nach Jahrzehnten des Stillstands steigt die Stimmung

Vielleicht tauchen die Preonen aber auch bei Zerfällen anderer Teilchen auf, etwa dem eines Myons in ein Elektron und ein Photon. Das könnte geschehen, wenn die höheren Generationen tatsächlich angeregte Zustände der ersten wären. Auf der Suche nach einem solchen Zerfall haben sich Physiker bereits durch riesige Datenmengen von Teilchenbeschleunigern gewühlt, bislang erfolglos. Wenn es ihn überhaupt gibt, tritt er mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 1 zu 100 Milliarden auf.

Bislang stehen alle Messungen im Einklang mit der Hypothese, dass Quarks und Leptonen Punktteilchen mit Spin $1/2$ sind. Für diejenigen von uns, die wir das Generationenproblem begeistert als Hinweis auf noch unentdeckte physikalische Phänomene aufgefasst haben, waren die letzten Jahrzehnte daher enttäuschend. Doch nun steigt die Stimmung wieder. 2011 kollidierten am LHC Protonenbündel bei einer Energie von 7 Billionen Elektronvolt (7 TeV). Das ist mehr als das 3,5-Fache des Weltrekords, den das Tevatron am Fermilab über ein Vierteljahrhundert lang gehalten hatte. In Genf



Proton
 $1,7 \times 10^{-15}$ Meter



Quark
kleiner als 10^{-18} Meter



Preon (hypothetisch)
punktförmig oder aus noch kleineren
Komponenten zusammengesetzt

MALCOLM GODWIN

wurden allein in diesem einen Jahr Daten von etwa halb so vielen Kollisionen aufgezeichnet wie während des gesamten 28-jährigen Betriebs des US-Beschleunigers.

2012 steigerte der LHC seine Energie geringfügig auf 8 TeV. Für die Suche nach Preonen war der Zuwachs dennoch wichtig: Er bedeutete eine Verfünffachung der Kollisionen, die bei höchsten Energien stattfanden. Gerade bei diesen finden die Wechselwirkungen auf Skalen statt, auf denen sich Preonen offenbaren könnten. Außerdem kamen 2012 Verbesserungen im Beschleunigerbetrieb zum Tragen, die viermal so viele Kollisionen wie zuvor möglich machten. Beides zusammen genommen bescherte den Preonenjägern mehr als das 20-Fache an interessanten Kollisionen. Durch ihre Auswertungen konnten sie die obere Grenze für die mögliche Größe der Preonen bereits auf den halben Wert reduzieren. Diesen Wert werden wir demnächst noch ein weiteres Mal halbieren können – vielleicht finden wir aber auch schon die Preonen selbst.

Das US-amerikanische Fermilab ist ebenfalls weiter im Spiel. Dessen Tevatron ist zwar seit 2011 stillgelegt (siehe »Abschied vom Tevatron«, SdW 1/2012, S. 46), so dass die Fermilab-Beschleuniger nicht mehr im Wettlauf um die höchsten Energien antreten. Stattdessen konzentrieren sich die Forscher auf die Erhöhung der Strahlintensität. So wollen sie mit bislang unerreichter Präzision seltene Phänomene in den Fokus nehmen. Zwei der Experimente sind für die Preonensuche besonders wichtig: zum einen das schon erwähnte Myon-g-2-Experiment zur Vermessung des magnetischen Moments des Myons, zum anderen die Suche nach Myonen, die in ein einzelnes Elektron zerfallen, ohne dabei Neutrinos zu produzieren.

Die Jagd nach Substrukturen in Quarks und Leptonen nimmt also wieder an Fahrt auf. Während Sie diesen Artikel lesen, durchkämmen meine Kollegen und ich den gewaltigen Wust an LHC-Daten nach Belegen für eine endliche Größe

von Quarks und Leptonen. Außerdem wollen wir klären, ob es vielleicht eine vierte Generation dieser Teilchen gibt und auch nach einer Antwort auf die Frage suchen, ob die krafttragenden Bosonen ebenfalls in Generationen organisiert sind – ob insbesondere die W- und Z-Bosonen der schwachen Kernkraft schwerere Verwandte haben.

Wie vor drei Jahrzehnten, als das Tevatron in Betrieb ging, beginnt also erneut ein wissenschaftliches Abenteuer. Dieses Mal werden wir unsere Pfade noch tiefer in das Dickicht des subatomaren Reichs schlagen. Denjenigen, die nach den wirklich fundamentalen Bausteinen des Universums fahnden, stehen aufregende Zeiten bevor. ~

DER AUTOR



Don Lincoln ist leitender Wissenschaftler am Fermilab bei Chicago, arbeitet aber auch am Genfer Forschungszentrum CERN. Seit Jahrzehnten ist er der inneren Struktur von Quarks und Leptonen auf der Spur. Für seine populärwissenschaftlichen Veröffentlichungen erhielt er 2013 den HEPP Outreach Award der Europäischen Physikalischen Gesellschaft.

LITERATURTIPP

Lincoln, D.: Die Weltmaschine: Der LHC und der Beginn einer neuen Physik. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2011

WEBLINKS

Den Link auf eine Leseprobe zu Don Lincolns Buch sowie Verweise auf wissenschaftliche Publikationen zu Preonen finden Sie im Internet unter: www.spektrum.de/Artikel/1210963

Glitzernder Schein

Hightechlametta bringt Farben aus dem Nichts hervor. Das ist erstaunlich, denn eigentlich kann dieser Interferenzeffekt nur mit kohärentem Licht funktionieren.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Zur Weihnachtszeit Plastik statt Lametta? Das klingt nach billigem Ersatz und möglicherweise auch schlechtem Geschmack. Doch zumindest physikalisch gesehen können die hergebrachten Streifen aus schwerem Stanniol dem neomodischen Hightechkunststoff nicht das Wasser reichen. Was Letzterem an Schwere fehlt – im tatsächlichen wie im übertragenen Sinn –, ersetzt er mühelos durch optischen Überfluss.

Lametta aus Zinnfolie wirft einfalendes Licht fast unverändert in den Raum zurück, nämlich durch bloße Reflexion. Metallisch beschichtetes Kunststofflametta hingegen bringt Farben gewissermaßen aus dem Nichts hervor. Pigmente sind dabei nicht im Spiel, was also dann? Schaut man sich die metallisch spiegelnde Oberfläche der Glitzerstreifen genauer an, erkennt man kleine, kreisförmige Plättchen, die sich teilweise überlappen und ihrerseits durch parallele Linien strukturiert

sind (Foto unten). Diese Plättchen sind es, die das einfallende Licht zurückwerfen. Es handelt sich bei ihnen aber nicht einfach um gefärbte Minispiegel, denn ihre Licht- und Farbdynamik entwickeln sie nur, wenn der Beobachter sie unter wechselndem Blickwinkel betrachtet. Außerdem würden Spiegel das Licht nicht in mehrere Richtungen reflektieren, wie es hier geschieht.

Fassen wir eines der Glitzerplättchen senkrecht von oben ins Auge und beleuchten es auch aus dieser Richtung, sehen wir erst einmal nur weißes Licht. Neigen wir dann den Kopf immer mehr zur Seite, sehen wir erst blaues, dann grünes, gelbes und rotes Licht aufblitzen. Offenbar haben wir es mit Interferenzfarben zu tun, die durch Beugung entstehen. In der Tat bestätigt der Blick durch ein Mikroskop, dass es sich bei den Plättchen um winzige optische Gitter handelt, die auf einer reflektierenden Kunststoffolie aufgebracht sind. Die parallel verlaufenden

Das Licht treibt sein lachendes Spiel an der Oberfläche der Dinge.

Gaston Bachelard (1884–1962)

Gitterstege blockieren das Licht, die dazwischenliegenden Furchen lassen es dagegen auf den reflektierenden Untergrund durchscheinen. Der Effekt der Anordnung: Phasenverschiebungen in den zurückgeworfenen Lichtwellen. Diese interferieren im Auge des Betrachters – oder auf dem Chip der Kamera –, ihre Farben verstärken sich also oder löschen sich gegenseitig aus (siehe »Verwirrende Beugung« in SdW 5/2011, S. 54). Das Gitter muss allerdings extrem fein sein. Nur dann trennt es die Beugungsordnungen und damit die Farben gut sichtbar voneinander.

Doch halt: Interferenz kann eigentlich nur auftreten, wenn das einfallende Licht kohärent ist. Diese Bedingung ist ziemlich anspruchsvoll, denn Lichtwellen gelten streng genommen erst dann als kohärent, wenn ihre Frequenzen und Phasen in fester Beziehung zueinander stehen. All die Geschenkfolien, Papierbögen und Schmuckbänder, denen heutzutage Reflexionsgitter aufgebracht werden, irisieren erstaunlicherweise in praktisch jeder Situation mehr oder weniger stark. Selbst im Licht des bedeckten Himmels, das wohl kaum als kohärent gelten darf, erscheinen die Glitzerteile nur selten farblos.

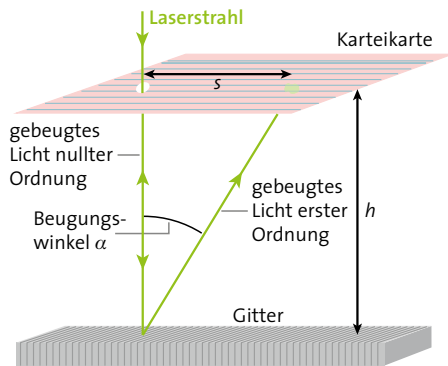
Tatsächlich reicht es aus, wenn das einfallende Licht aus einem räumlich eng begrenzten Gebiet kommt. Denn Lichtwellen von mehr oder weniger demselben Entstehungsort schwingen nicht unabhängig voneinander – sie sind also zumindest teilweise kohärent. Zum besseren Verständnis kann man sich vorstellen, dass inkohärentes Licht durch eine Lochblende fällt und dort Elementarwellen auslöst, die auf Grund ihrer gemeinsamen Entstehung mehr



Das Glitzern von Kunststofflametta wird von kreisförmigen Plättchen hervorgebracht, deren winzige Strukturen als optische Gitter fungieren.

Auf Geschenkbändern (Foto rechts) zeigt sich in weißem Licht das farbigere Beugungsmuster erster Ordnung. Die zweite Beugungsordnung deutet sich durch schwache blaue und grüne Reflexe an (links und rechts außen). Offenbar sind hier ebenfalls optische Gitter im Spiel.

BEIDE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H. JOACHIM SCHLICHTING



Eine simple Anordnung (Foto und Skizze links) genügt, um die Gitterkonstante eines optischen Gitters zu vermessen. Man nehme einen Laserpointer bekannter Wellenlänge, stecke ihn durch eine Karteikarte und richte ihn auf das untersuchende Lametta. Dann schimmern entlang eines Kreises grün die Beugungsmaxima erster Ordnung. Mit einem Lineal und den Formeln aus dem Text kann man nun die Gitterkonstante bestimmen. Weil der Laser leicht schräg nach unten weist, zeigt sich auch das Maximum nullter Ordnung (links neben dem Pointergehäuse).

oder weniger kohärent sind. Die entsprechenden Bedingungen lassen sich durch äußere Vorkehrungen sicherstellen. Entweder muss die weiße Lichtquelle sehr klein sein oder sehr weit vom Gitter entfernt. Dann ist das auf das Gitter fallende Licht kohärent genug, um eine oder gar mehrere Beugungsordnungen erkennen zu lassen (Foto rechts oben).

Kleine Strahlungsquellen sorgen für kohärentes Licht

Oft reichen sogar lokale Intensitätsunterschiede des einfallenden Lichts aus. Angenommen, ein beliebiges Objekt besitzt eine inhomogene Oberfläche. Dann senden kleine Regionen dieser Oberfläche möglicherweise helleres Licht als benachbarte Regionen aus – der Effekt ist derselbe, als würde das Licht aus einer entsprechend kleinen Quelle stammen.

Den maximalen Durchmesser einer Strahlungsquelle, deren Licht noch kohärent genug ist, um farbigere Interferenzerscheinungen hervorzurufen, können wir mit der von Marcel Émile Verdet (1824–1866) formulierten verdetschen Kohärenzbedingung abschätzen. Dieser zufolge darf er nicht größer sein als das Produkt aus Abstand zwischen Gitter und Lichtquelle und der Wellenlänge des Lichts, dividiert durch

die Gitterkonstante, die den Abstand zwischen den Gitterstegen angibt. Bei grünem Licht mit einer Wellenlänge von 0,5 Mikrometer (millionstel Meter), das aus 1 Meter Entfernung auf ein Gitter mit einer Konstanten von 1 Mikrometer fällt, erweisen sich damit alle Lichtquellen als ausreichend, deren Durchmesser weniger als 50 Zentimeter beträgt. Praktisch jede Haushaltslampe kommt also als Quelle in Frage! Tatsächlich: Hält man Lametta sehr nahe an eine kugelförmige Küchenlampe aus mattem Glas, glitzert es noch silbern, doch schon bei einem Abstand von 10 bis 15 Zentimetern tauchen die ersten Farben auf.

Wer übrigens glaubt, die Gitterstege tatsächlich mit dem bloßen Auge erkannt zu haben, unterliegt einem Trugschluss. Es handelt sich wohl um eine beim Herstellungsprozess entstehende Überstruktur mit einer Gitterkonstante von allenfalls 0,1 Millimeter, wie man durch schlichtes Abzählen und mit Hilfe eines Lineals ermitteln kann. Doch wie groß ist die Gitterkonstante wirklich? Um das herauszufinden, drückt man ein kleines Loch in eine waagrecht gehaltene Karteikarte und steckt seinen Laserpointer so hindurch, dass er nach unten auf das Gitter zeigt (Foto und Skizze oben). Von dort kehrt der Strahl nach oben zurück – das ist das nullte

Beugungsmaximum –, zusätzlich fällt er aber auch in schräger Richtung auf die Karte zurück. Hier, am Ort des ersten Beugungsmaximums, schimmert nun ein Lichtpunkt durch die Karte hindurch. Den Beugungswinkel α bestimmt man geometrisch, indem man den Abstand s dieses Lichtpunkts vom Laserstrahl und den Abstand h der Karte vom Gitter misst. Aus $s = 3,5$ Zentimeter und $h = 6$ Zentimeter, wie in unserem Fall, ergibt sich $\alpha = \tan^{-1}(\frac{s}{h}) = 30,26$ Grad. Jetzt muss man noch die Wellenlänge λ des Lasers in Erfahrung bringen; bei unserem grün strahlenden Exemplar sind es 0,532 Mikrometer. Setzt man beide Werte in die Formel für den Gitterabstand $g = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$ ein, erhält man $g = 1,056$ millionstel Meter.

So winzig muss die Gitterkonstante schon sein, wenn Hightechlametta Farben aus dem Nichts zaubern soll. ~

DER AUTOR



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

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1210969

Die Weihnachtszeit entspannt genießen:

Einfach ein Geschenkabo mit exklusiven Extras bestellen!

Ihre Vorteile im Geschenkabo:

► SCHENKEN UND BESCHENKT WERDEN:

Sie bereiten dem Beschenkten ein Jahr lang Freude und erhalten von uns als Dankeschön ein Geschenk.

► 2 IN 1:

Der Beschenkte erhält nicht nur die Print-, sondern auch die Digitalausgabe inklusive Onlinearchiv des gewünschten Magazins.

(gilt nur bei den Geschenkabos von Spektrum der Wissenschaft, Gehirn und Geist, Sterne und Weltraum)

► MIT GRUSSKARTE:

Pünktlich zum Fest erhält der Beschenkte das erste Heft mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



Spektrum der Wissenschaft

Experten aus Wissenschaft und Forschung berichten monatlich über die aktuellen Erkenntnisse – kompetent, authentisch und verständlich.

12 AUSGABEN PRO JAHR
€ 89,- (ERMÄSSIGT € 69,90)

Wählen
Sie ihr
Geschenk!



SCHREIBSET

Kugelschreiber und
Druckbleistift von Lamy



Gehirn und Geist

Spannende Einblicke in die Welt der Psychologie, Hirnforschung und Pädagogik von renommierten Wissenschaftlern und Fachjournalisten.

10 AUSGABEN PRO JAHR
€ 71,- (ERMÄSSIGT € 57,-)



Sterne und Weltraum

Alles über Astronomie und Raumfahrt: Direkt aus den Forschungslaboren aus aller Welt.

12 AUSGABEN PRO JAHR
€ 89,- (ERMÄSSIGT € 67,80)



BUCH

»Barrow's Boys«
von Fergus Fleming

Schnell und
einfach bestellen!

sdwv.de/verschenken

Weitere Geschenkideen ►

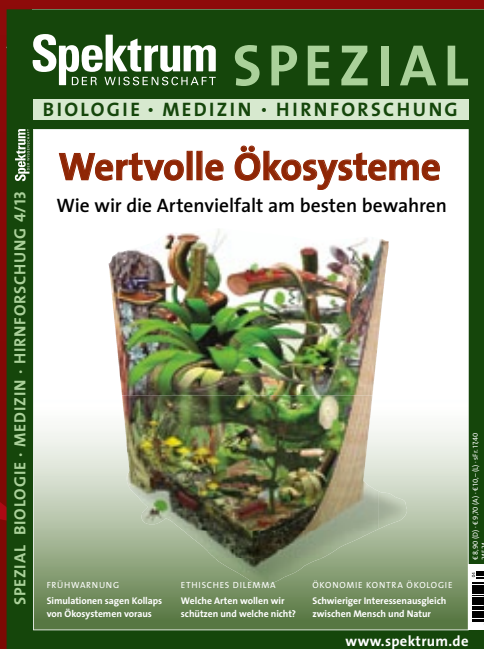
Geschenkabos, die Freu(n)de machen

Unsere **SPEZIAL-Reihen:**
Für jedes Interessengebiet
das passende Abo

JEDE SPEZIALREIHE ERSCHEINT 4-MAL
PRO JAHR UND KOSTET € 29,60
(ERMÄSSIGT € 25,60).



**SPEZIAL Physik ·
Mathematik · Technik**



**SPEZIAL Biologie ·
Medizin · Hirnforschung**



**SPEZIAL Archäologie ·
Geschichte · Kultur**

sdwv.de/xmas

Spektrum – DIE WOCHE

Deutschlands einziges
wöchentliches digitales
Wissenschaftsmagazin
bietet Ihnen auf mehr
als 40 Seiten News,
Hintergründe, Analysen,
Kommentare und Bilder
aus der Wissenschaft.

52 AUSGABEN PRO JAHR,
IM PDF-FORMAT, € 39,95,-
(ERMÄSSIGT € 30,-)



sdwv.de/woche



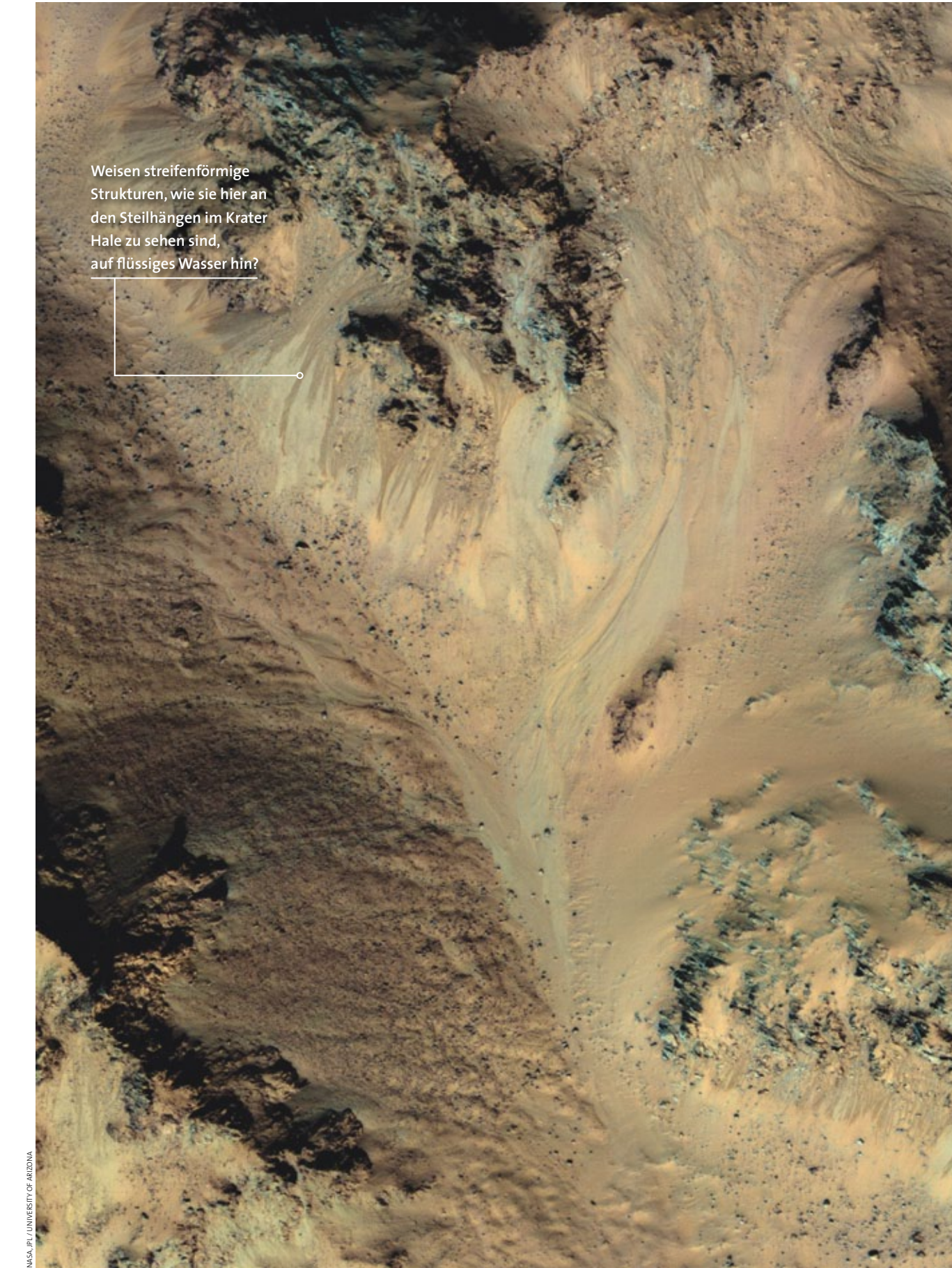
BUCH

»Mit der Endurance
ins ewige Eis«
von Sir E. Shackleton

Unser Dank für
Ihr SPEZIAL- oder
DIE WOCHE-Abo

Tablet Sleeve
von Reisetel





Weisen streifenförmige
Strukturen, wie sie hier an
den Steilhängen im Krater
Hale zu sehen sind,
auf flüssiges Wasser hin?

PLANETENFORSCHUNG

Wandelbarer Mars

Die Oberfläche des Roten Planeten verändert sich ständig. Forscher rätseln: Gehört auch fließendes Wasser zu den Ursachen? Neu entdeckte linienartige Strukturen, die »Recurring Slope Lineae«, liefern die bislang besten Indizien für seine Existenz auf dem Mars.

Von Alfred S. McEwen

Wasserfunde auf dem Roten Planeten haben längst keinen Neuigkeitswert mehr. Mancher Forscher spottet schon: »Herzlichen Glückwunsch, du bist jetzt der Tausendste, der Wasser auf dem Mars nachgewiesen hat!« Doch schauen wir genauer hin. Die meisten dieser Meldungen basieren auf sichtbaren Hinweisen darauf, dass hier früher Wasser existierte, inzwischen aber lange verschwunden ist, oder stützen sich auf Beobachtungen von Eis, Dampf oder unter Beteiligung von Wasser entstandenen Mineralien. Was weiterhin aussteht, ist der Nachweis von flüssigem Wasser auf dem heutigen Mars. Eine solche Entdeckung könnte die Marsforschung dramatisch beeinflussen, denn unsere Chancen, Leben auch auf dem Mars zu finden, würden sich dann erheblich verbessern. Schließlich finden wir auch auf der Erde fast überall dort Lebewesen, wo es Wasser gibt.

Im Jahr 2000 ging die NASA mit einer Aufsehen erregenden Meldung an die Öffentlichkeit. Aufnahmen des Mars Global Surveyor (MGS) zeigten eine große Zahl von Strukturen, die irdischen Erosionsrinnen verdächtig ähnlich waren. Auf der Erde werden solche Rinnen, die man auch Runsen oder Gullys nennt, durch fließendes Wasser gegraben. Ihre Pendanten auf dem Mars deuteten also darauf hin, »dass es in der jetzigen Zeit Quellen flüssigen Wassers auf oder dicht unter der Oberfläche des Roten Planeten gibt«, wie es in der Pressemitteilung der NASA hieß.

Die Gullys erregten die Aufmerksamkeit vieler Planetenforscher, denn damals herrschte die Ansicht, dass ihre Ursache in fließendem Wasser oder zumindest in der Bewegung feuchten Gerölls zu suchen sei. Doch schnell tauchten ärgerliche Fragen auf. Zehntausende dieser Rinnen, einige davon viele Kilometer lang, liegen auf Abhängen in den mittleren geografischen Breiten des Mars. Um ihre Existenz zu erklären, müsste eine große Menge Wasser im Spiel sein. Der Atmosphärendruck auf dem Planeten ist so niedrig – er beträgt weniger als ein Prozent des irdischen Luftdrucks –, dass reines Wasser an seiner Oberfläche schnell gefrieren oder verdampfen würde. Einige Forscher argumentierten deshalb, die Gullys müssten Relikte einer Vergangenheit sein, in der es im Verlauf der Jahreszeiten regelmäßig zu größeren Temperaturunterschieden kam. 2006 zeigten neue MGS-Daten aber, dass in den vorangegangenen Jahren helles Material aus den Erosionsrinnen herausgespült worden war. Die Gullys waren also keineswegs uralt.

AUF EINEN BLICK

SPUREN VON FLÜSSIGEM WASSER?

1 Die Oberfläche des Mars unterliegt kontinuierlich einer Vielzahl von Veränderungen – dies zeigen hoch aufgelöste Bilder der Kamera **HiRISE** an Bord des **Mars Reconnaissance Orbiter**. Forscher versuchen nun herauszufinden, ob einige davon durch flüssiges Wasser verursacht werden.

2 Allerdings scheint – wenn überhaupt – nur in Einzelfällen zuzutreffen, dass auch die auffälligen »**Gullys**« oder **Erosionsrinnen** durch Wasser entstehen, was Experten früher vermutet hatten.

3 Nun aber fanden Wissenschaftler auf sonnenerwärmten steilen Abhängen **linienartige Strukturen**, die möglicherweise von fließendem Salzwasser herrühren. Bestätigt sich diese Vermutung, könnten sie ideale Orte für eine Suche nach **mikrobiellem Leben auf dem Mars** sein.

Während die Auseinandersetzung um die Rinnen immer heftiger tobte, erreichte eine neue Sonde unseren Nachbarplaneten: der Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). Seine hochauflösende Kamera HiRISE (High-Resolution Imaging Science Experiment), die leistungsfähigste, die je an Bord einer Planetensonde war, sollte schon bald entscheidende Hinweise über die Ursache der Gullys liefern – und noch mehr.

Während die MRO-Bilder halfen, die Geheimnisse der Gullys zu enträtseln, entdeckte ein Student an meinem Institut auf ihnen verblüffende, nie zuvor gesehene streifenartige Strukturen. Sie scheinen Abhänge hinunterzufließen, im Lauf der Zeit langsam zu wachsen und sich mit den Jahreszeiten zu verändern – in einer Art und Weise, die auf fließendes Wasser schließen ließ. Diese Streifen haben sich mittlerweile als die bislang besten Hinweise auf die Existenz von flüssigem Wasser auf dem Mars herausgestellt und uns auf neue Ideen gebracht, wie es in einer so wasserfeindlichen Umwelt überdauern kann. Und sie sind das bislang beste Indiz dafür, dass nahe der Oberfläche des Roten Planeten Nischen denkbar sind, in denen primitive Lebensformen existieren könnten.

Bei der Entwicklung von HiRISE, an der ich als wissenschaftlicher Projektleiter beteiligt war, hatten wir von Anfang an Gullys und andere kleine Geländeformationen im Blick. Dank der Kamera konnten wir diese Strukturen nun in höherer Auflösung als je zuvor untersuchen. HiRISE ist in der Lage, die komplette Marsoberfläche zu kartieren, in Farbe und mit einer Auflösung von 0,25 mal 0,32 Metern pro Pixel. Außerdem kann der Orbiter die Kamera bei verschiedenen Umläufen um den Planeten immer wieder hochpräzise auf bestimmte Strukturen ausrichten, um so nach Veränderungen Ausschau zu halten. Die Sonde kartografiert die Landschaft zudem in Stereobildern, so dass wir aus den Daten eine dreidimensionale topografische Darstellung gewinnen können.

Mittlerweile hat MRO unser Wissen über Veränderungen auf der Marsoberfläche – solche, die sich im Verlauf von einigen Jahren abspielen – erheblich erweitert. Die von HiRISE gelieferten Bilder dokumentieren Sand und Staub, die vom Wind über die Oberfläche getrieben werden, Lawinen aus Ge-

MEHR WISSEN BEI Spektrum.de



Unser Online-Dossier zum Thema »Tagebuch der Marsmissionen« finden Sie unter



www.spektrum.de/mars

stein, Reif und Eis sowie neue Meteoriteneinschläge. Eines der ersten HiRISE-Bilder zeigt einen Abhang in den mittleren südlichen Breiten, der die bereits vom MGS entdeckten Gullys aufwies. Dort herrschte damals gerade Winter, und der Südhang lag zu großen Teilen noch im Schatten der Kraterwand. Er war von Reif bedeckt, der vor allem aus gefrorenem Kohlendioxid bestand. Einige der Erosionsrinnen waren jedoch frei von Reif. Warum?

Im Verlauf zweier Marsjahre, das sind knapp vier Erdenjahre, konnten wir solche veränderlichen Strukturen bei einer Vielzahl von Gullys nachweisen. Schließlich zeichnete sich ein überraschender Befund ab: Die Rinnen begannen aktiv zu werden, also neue Alkoven, Furchen und Schwemmkegel zu bilden, sobald sich Kohlendioxidreif auf den Boden legte. Schon früher hatten wir Trockeneis auf dem Mars in Aktion gesehen. In den Polarregionen führt die Sublimation von Kohlendioxid – sein Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand – zu bizarren geysirartigen Fontänen. Nahe dem Südpol, wo Eis und Staub schichtweise abgelagert sind, erzeugt der Vorgang »Spinnen«, also radiale Netze aus Furchen, die das unter dem Trockeneis strömende Gas hervorruft. Solche ungewöhnlichen Strukturen sind auf der Erde nicht zu beobachten, verdanken sich also wohl einem noch unbekanntem Prozess.

Fremdartige Vorgänge ohne irdisches Pendant

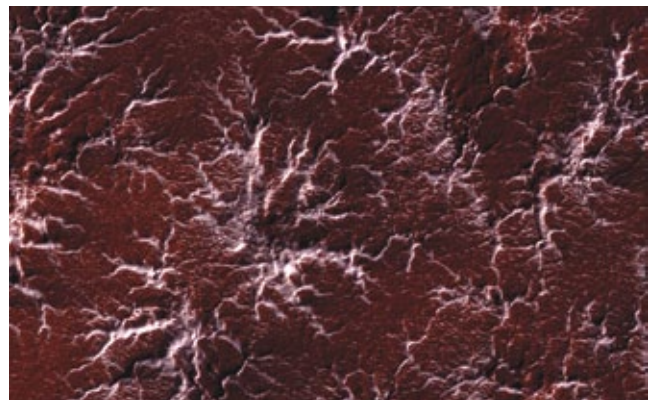
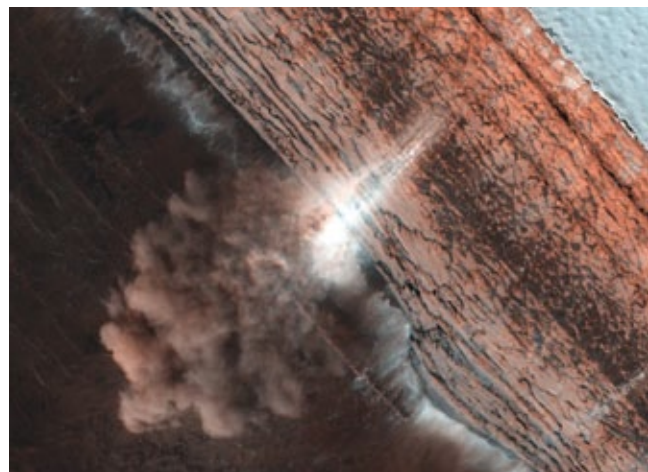
Die Gullys dagegen ähneln irdischen Sturz- und Erosionsrinnen so sehr, dass viele Forscher Abläufe am Werk sahen, die wir in ähnlicher Weise von der Erde her kennen. Doch wie wir herausfanden, können sich diese Landschaftsformen auch durch Vorgänge bilden, zu denen kein irdisches Pendant existiert. Meine Kollegen und ich kamen zu dem Schluss, dass Kohlendioxid über einen wasserlosen Prozess auch die Gullys entstehen lässt: Erdreich und Gestein könnten sich infolge von Sublimation nach Art einer Flüssigkeit in die Tiefe bewegen.

Betrachtet man Trockeneis als Ursache der Gullys, löst dies tatsächlich eine ganze Reihe von Rätseln. So hatten wir uns darüber gewundert, dass es solche Rinnen überwiegend auf polwärts gerichteten Abhängen zwischen dem 30. und dem 40. südlichen Breitengrad gibt; anderswo beobachteten wir keine ausgeprägte Präferenz hinsichtlich ihrer nördlichen oder südlichen Ausrichtung. Dieses Muster, so zeigte sich schließlich, stimmt mit der jahreszeitlichen Verteilung des Trockeneises überein. Lange konnten wir uns auch nicht erklären, warum die Gullys auf der südlichen Hemisphäre so viel aktiver sind als auf der nördlichen. Die Rotationsachse des Planeten ist gegenwärtig so orientiert, dass die südlichen Winter länger dauern als die nördlichen; in ersteren bildet sich also mehr Trockeneis. Ist die Oberfläche mit Trockeneis bedeckt, so stabilisiert sich die Temperatur der Atmosphäre bei minus 125 Grad Celsius, dem Gefrierpunkt von Kohlendioxid – kaum die richtigen Bedingungen für flüssiges Wasser.

Angesichts dieser Erkenntnisse gewann ich allmählich die Überzeugung, dass gefrorenes Kohlendioxid für den Großteil

der heutigen Erosion der Marsoberfläche verantwortlich ist und dass die Idee, es könne noch heute flüssiges Wasser auf dem Roten Planeten geben, schlicht eine Sackgasse ist. Über alle Breitengrade hinweg verändern trockene Umweltprozesse wie etwa Wind die Marsoberfläche. Aber die stärksten Veränderungen sehen wir dort, wo der Boden je nach Jahreszeit von Trockeneis bedeckt ist.

Doch Mitte 2010 stieß der am HiRISE-Experiment beteiligte Student Lujendra Ojha auf ein ganz neues Phänomen. Seine Aufgabe war es, aus den Stereoaufnahmen von HiRISE digitale Oberflächenmodelle zu erstellen, und ich schlug ihm vor, nach Veränderungen in einem Gebiet zu suchen, in dem wir kanalartige Einschnitte in einem Gully gesehen hatten. Aus den Daten errechnete er Ansichten des Terrains, wie sie die Kamera gewonnen hätte, wenn sie vom Orbiter aus senk-



Auf der Marsoberfläche ist viel los: Die HiRISE-Kamera fotografierte Lawinen, die einen steilen Hang hinabrutschen (oben, Bild um 180 Grad gedreht), durch Kohlendioxideis entstandene »Spinnen« (Mitte) und Staubeufel (unten).



recht nach unten geschaut hätte, und untersuchte sie mit speziellen Verfahren, die winzige Veränderungen aufspüren. Dabei entdeckte Ojha Rätselhaftes: Auf einer der Aufnahmen waren viele schmale, dunkle Linien zu erkennen, die von steilen, felsigen Gegenden abwärtsführten, während auf einem früheren Bild derselben Gegend, das nur zwei Monate zuvor aufgenommen worden war, nichts dergleichen zu sehen war.

Weil wir für die seltsamen Linien erst einmal keine Erklärung hatten, sammelten wir weitere Informationen und überprüften alle Stereobilder, die steile Abhänge zeigten. Um Gullys, gut erhaltene Einschlagkrater und frei liegenden Felsboden zu untersuchen, hatten wir bereits Hunderte solcher Bildpaare zusammengestellt. Tatsächlich stießen wir auf weitere Beispiele und sahen immer das Gleiche: dunkle Linien, die auf steilen Abhängen neben Felsgestein verliefen und keine erkennbare Topografie aufwiesen – wir konnten also nicht feststellen, ob es sich um Material aus Ablagerungs- oder Erosionsprozessen handelt. Die Bilder zeigten stets Abhänge in mittleren südlichen Breiten, die in Richtung Äquator abfallen, und waren alle im Sommer aufgenommen worden, also gerade nicht in der Jahreszeit, in der Kohlendioxid die Aktivität auf der Marsoberfläche bestimmt.

Natürlich denken wir Erdlinge bei abwärts verlaufenden dunklen Linien sofort an Wasser oder zumindest an feuchtes Erdreich. Trotzdem beschlossen meine Kollegen und ich, Vorsicht walten zu lassen und erst einmal die Datenlage zu verbessern. Dabei gingen wir der Vermutung nach, dass die Linien über Wochen oder Monate langsam anwachsen, zu den kälteren Jahreszeiten hin wieder verschwinden und im nächsten Sommer dann erneut auftauchen.

Da wir das Phänomen erst im zweiten südlichen Sommer entdeckt hatten, den die MRO-Sonde in einer Marsumlaufbahn verbrachte, mussten wir auf den dritten Sommer warten, um unsere Hypothesen zu testen, also bis Anfang 2011. Wir wählten sechs Gebiete aus, die wir intensiv überwachten, und machten zudem Stichproben in anderen Regionen. Mit Erfolg: Die Beobachtungen bestätigten unsere Annahmen, und im August 2011 konnten wir die Ergebnisse im Fachmagazin »Science« veröffentlichen. In dieser Publikation bezeichneten wir die Strukturen als »recurring slope lineae« (wiederkehrende Hanglinien, kurz RSL). »Linea« ist

der aus dem Lateinischen stammende Fachbegriff für lange helle oder dunkle Strukturen auf der Oberfläche von Himmelskörpern. Wir beschränkten uns also auf eine rein beschreibende Bezeichnung ohne jeden Hinweis auf eine mögliche Ursache.

War aber denn nun Wasser im Spiel oder nicht? Zumindest wir glaubten immer stärker daran, dass es auf irgendeine Weise zu dem neu entdeckten Phänomen beitrug. Fest stand, dass die RSL bestimmte Umgebungen bevorzugten: mittlere Breiten, speziell warme Abhänge auf der südlichen Hemisphäre, auf der die Sommer wärmer sind als auf der Nordhalbkugel. Ein Messinstrument an Bord der Mars Odyssey hat an solchen Orten Nachmittagstemperaturen von bis zu 27 Grad Celsius nachgewiesen. Das wäre natürlich perfekt für flüssiges Wasser, wäre da nicht die dünne Marsatmosphäre, in der es rasch verdampfte.

Bei salzhaltigem Wasser ist die Situation jedoch anders. Tatsächlich ist die Oberfläche des Roten Planeten sehr salzig, wie in der Vergangenheit verschiedene Marslander und Rover, spektroskopische Untersuchungen aus dem Orbit und sogar die chemische Analyse von Marsmeteoriten gezeigt haben. Auch Wasser, das auf der Marsoberfläche oder dicht darunter fließt, muss also sehr salzhaltig sein.

Kühlt Salzwasser ab, gefriert es entweder teilweise zu Eis, oder es fällt ein Teil des Salzes aus, oder es geschieht beides.

Erdlinge denken bei abwärts verlaufenden dunklen Linien sofort an Wasser. Doch wir blieben vorsichtig

Was immer an Flüssigkeit zurückbleibt, besitzt eine sogenannte eutektische Zusammensetzung: Wasser mit exakt dem richtigen Salzgehalt, so dass es bis zur

tiefstmöglichen Temperatur flüssig bleibt. Eine Salzlake im eutektischen Zustand aus Eisensulfat oder Kalziumperchlorat – beides Salze, die auf dem Mars häufig vorkommen – kann noch bei bis zu minus 68 Grad Celsius in flüssiger Form existieren. Außerdem überdauern eutektische Flüssigkeiten wegen ihrer zehnmal geringeren Verdampfungsrate an der Oberfläche länger als Wasser. Dank seiner ungewöhnlichen Eigenschaften ist eutektisches Salzwasser auf dem Mars also viel stabiler als normales Wasser.

Wir fingen an zu glauben, dass wir damit wirklich die Ursache für die seltsamen Strömungen auf den warmen Abhängen entdeckt hatten. Doch könnte auch ein trockenes oder zumindest nahezu trockenes Phänomen die Beobachtungen erklären? Eher nicht. Bislang ist kein rein trockener Prozess, also zum Beispiel Erdrutsche oder Felsstürze, bekannt, der das jahreszeitlich bedingte Auftauchen der Linien, ihr allmähliches Wachstum und ihre Temperaturabhängigkeit reproduzieren kann. Und auch auf dem trockenen Erdmond hat man nichts Vergleichbares beobachtet.

Als Nächstes überlegten wir, ob flüchtige Komponenten wie Wasser zwar an dem Geschehen beteiligt sein könnten, möglicherweise aber nur eine Nebenrolle spielen. Flüchtige Stoffe kleben unter Umständen Partikel des Marsbodens zusammen. Steigen die Temperaturen später so weit, dass der

Wie könnte flüssiges Wasser auf dem Mars existieren?

Planetenforscher streiten noch darüber, was die alljährlich auf Abhängen der Südhalbkugel auftauchenden dunklen Linien verursacht. Zahlreiche Indizien, darunter auch die Tatsache, dass die Streifen stets auf warmen, der Sonne zugewandten Hängen erscheinen, sprechen für ein jahreszeitlich bedingtes Schmelzen von gefrorenen Salzwasserreservoirien. Die Grafiken illustrieren, wie Wassereis durch verschiedene Prozesse in Oberflächennähe gelangen könnte, wo es dann in wärmeren Monaten schmilzt.

Salzkristalle absorbieren Wasserdampf aus der Umgebung; die dabei entstehenden Tröpfchen aus Salzwasser gefrieren später.



wiederkehrende Hanglinien (recurring slope lineae, RSL)

Drei Möglichkeiten, Eis zu produzieren

Während des südlichen Sommers, wenn der Mars der Sonne näher ist als sonst, erreichen die Temperaturen an sonnenbeschienenen Hängen deutlich mehr als null Grad Celsius. Wenn sich an solchen Stellen Eis befindet, kann es schmelzen und durch die körnige Oberfläche fließen. Dadurch färbt sich der Boden an diesen Stellen des Hangs dunkel. Dicht unter der Oberfläche liegende Eisablagerungen können hygroscopisch entstehen, also dadurch, dass das im Boden reichlich vorhandene Salz Wasserdampf aufnimmt (a). Sie verdanken sich möglicherweise aber auch aufsteigendem Wasserdampf aus tiefer liegenden Reservoirien (b) oder Tiefenwasser, das durch komplexere Prozesse nach oben befördert wird (c).

Tauwetter im südlichen Sommer

Die Umlaufbahn des Planeten Mars ist stärker elliptisch als die Erdbahn. Der Unterschied zwischen Perihel und Aphel, dem sonnennächsten und sonnenfernsten Punkt, ist daher besonders groß. Gegenwärtig ist die Rotationsachse des Mars so ausgerichtet, dass er sein Perihel während des südlichen Sommers durchquert, dadurch ist der Sommer auf der südlichen Hemisphäre deutlich wärmer als der Nord-Sommer. Die dunklen Linien tauchen bevorzugt während der warmen Monate auf der Südhalbkugel auf – ein Hinweis darauf, dass sie durch schmelzendes Eis entstehen könnten.

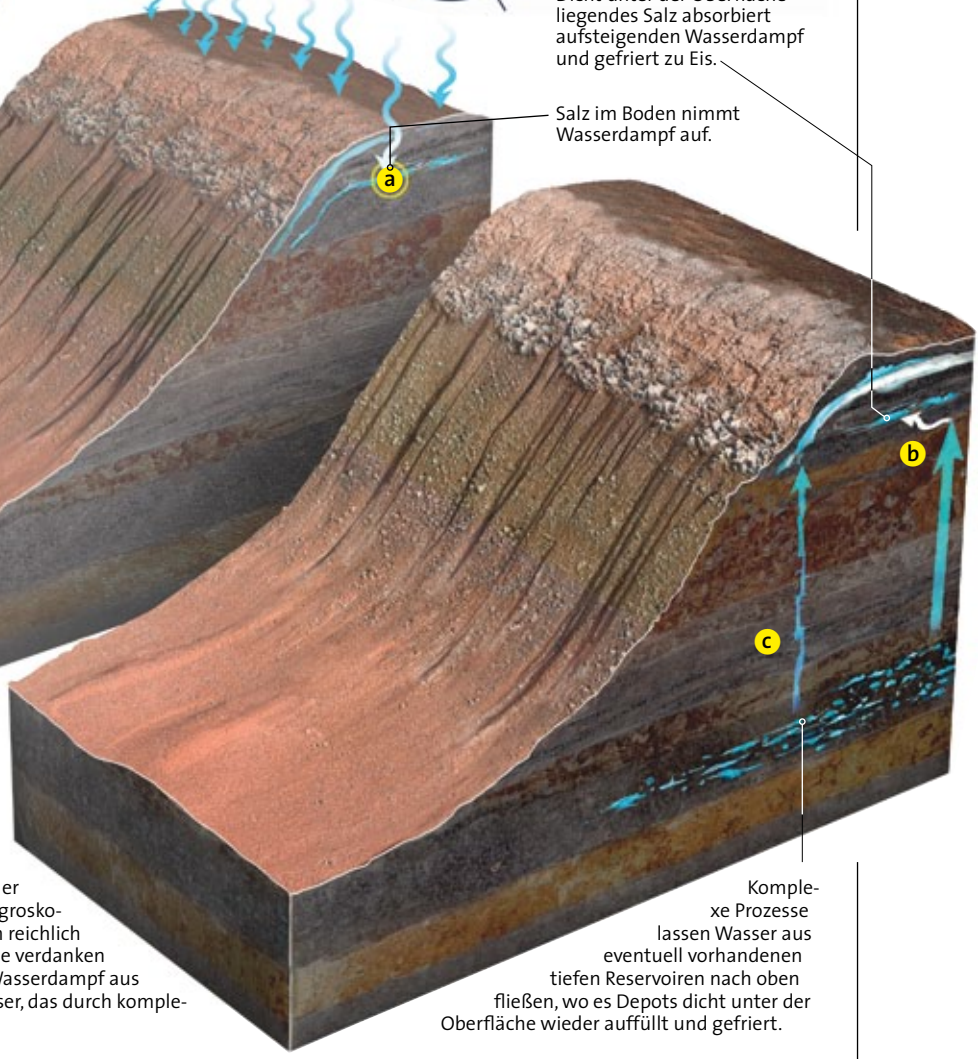
CHUCK CARTER



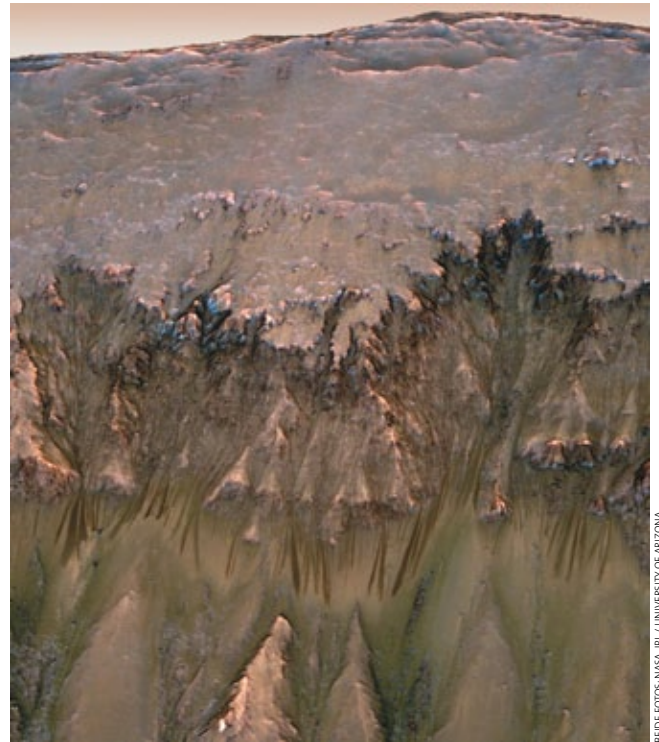
Wasserdampf in bodennaher Atmosphäre

Dicht unter der Oberfläche liegendes Salz absorbiert aufsteigenden Wasserdampf und gefriert zu Eis.

Salz im Boden nimmt Wasserdampf auf.



Komplexe Prozesse lassen Wasser aus eventuell vorhandenen tiefen Reservoirien nach oben fließen, wo es Depots dicht unter der Oberfläche wieder auffüllt und gefriert.



BEEBE FOTOS: NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

Auf diesen Falschfarbenaufnahmen von Mars-Gullys (links) ist blau markiert, was Forscher als Ergebnis von Erosions- und Ablagerungsprozessen in jüngerer Zeit deuten. Die Ursache ist hier vermutlich nicht Wasser, sondern Trockeneis. Hingegen entstehen die wiederkehrenden Hanglinien an Kraterwänden (rechts) möglicherweise tatsächlich durch fließendes Wasser.

Klebstoff verdampft, würden die trockenen Körnchen bergab rutschen. Mit einem ähnlichen Effekt hatte 2008 der Phoenix-Lander zu kämpfen: Damals blieb der körnige Marsboden störrisch in der Schaufel des Grabarms kleben, statt in die Öffnungen der Instrumente zu rieseln. Trotzdem führen diese Überlegungen nicht weiter. Wendet man sie auf die RSL an, können sie nicht erklären, warum die Linien kein topografisches Relief zeigen und warum sie wieder verschwinden.

Wir sollten noch nicht »Heureka!« rufen

Am Ende ist es dann doch das Wasser, das unsere Beobachtungen am besten erklärt: Es verdunkelt den Boden, fließt nur bei Wärme und gefriert bei Nacht wieder. Diese Erklärung ist nicht einmal allzu ausgefallen. In der irdischen Antarktis lässt Salzwasser, das dicht unter der Oberfläche fließt, ganz ähnlich aussehende Wasserspuren entstehen; Forscher haben dort sogar Mikroben entdeckt. Trotzdem sollten wir noch nicht »Heureka!« rufen: Die Gullys haben uns gelehrt, der äußeren Erscheinung zu misstrauen. Zudem wird es auf dem Mars nachts erheblich kälter als in der Antarktis, die aktive Schicht ungefrorenen Bodens ist daher viel dünner. Festzuhalten bleibt aber auch, dass wir interessanterweise viele RSL in der Nähe kleiner Gullys gefunden haben. Vielleicht entstehen einige der Letzteren also doch durch Wasser.

Wir waren nicht die erste Forschergruppe, die die Existenz von flüssigem Wasser auf dem heutigen Mars für möglich

hielt. Schon auf den Aufnahmen der Phoenix-Sonde von ihren eigenen Landebeinen war etwas zu erkennen, das aussieht wie Wassertropfen. Das erschien mir reichlich seltsam, bis ich an das Phänomen der Hygroskopie dachte: Salze können Wasser aus der Atmosphäre aufnehmen, wenn sowohl Temperatur als auch Feuchtigkeitsgehalt der Luft hoch genug sind. Falls also die Bremsraketen von Phoenix bei der Landung Perchlorate aufgewirbelt hatten und sich dabei die passenden Bedingungen einstellten, hätten die Salze Wasser absorbieren und Tropfen bilden können. So neu, wie mir meine Idee erschien, war sie allerdings keineswegs. Robert B. Leighton und Bruce C. Murray vom California Institute of Technology hatten sie bereits 1966 publiziert. Doch letztlich lässt dieser Prozess nur winzige Mengen an Wasser aus der dünnen Atmosphäre des Roten Planeten entstehen – nicht so viel, dass es Abhänge hinabfließen könnte, es sei denn, es sammelte sich über eine gewisse Zeit hinweg auf irgendeine Weise an.

Vielleicht werden die RSL auch durch schmelzendes Eis unter der Oberfläche hervorgebracht. In mittleren und hohen Breiten gibt es große, flach unterhalb der Oberfläche verlaufende Eisschichten, wie wir durch die Mission Mars Odyssey wissen. Deren Spektrometer hatte aus dem Orbit heraus Neutronen vermessen, die durch kosmische Strahlung aus dem Marsboden geschlagen worden waren und die Signatur von Wassermolekülen trugen. HiRISE hat mittlerweile auch Bilder frischer Einschlagkrater geliefert, in denen Eis freige-

legt wurde – und zwar in Regionen bis zu 40 Grad nördlicher Breite, näher am Äquator als erwartet. Erstaunlicherweise enthalten Proben von Eis aus diesen Ablagerungen kaum Verunreinigungen. Es kann also nicht durch Kondensation aus der Atmosphäre entstanden sein, denn dabei würde es die feinkörnigen Regolithpartikel einschließen. Ein Überbleibsel von Schneefällen ist es wohl ebenso wenig, da Schnee an der Oberfläche viel zu schnell sublimiert. Stattdessen wandern vielleicht dünne Filme aus salzhaltigem Wasser aus der Tiefe nach oben und gefrieren knapp unter der Oberfläche zu einer Schicht aus purem Eis.

Salzfreies Eis sublimiert viel schneller als gefrorenes Salzwasser. Nahezu das gesamte Eis, das sich in einer früheren Klimaepoche gebildet und in oberflächennahen Schichten abgelagert haben könnte, wäre also inzwischen durch Sublimation verschwunden; nur das salzhaltigste Eis wäre zurückgeblieben. Denkbar ist dann, dass steile, der Sonne zugewandte Abhänge im Sommer die nötige Wärme absorbieren, um es dort, wo es immer noch existiert, zu schmelzen.

Sind die Linien nur vorübergehende Erscheinungen?

Wir haben Beobachtungen gemacht, die diese Vorstellung stützen. Die maximale RSL-Aktivität trifft nicht mit der maximalen Aufheizung der Oberfläche zusammen, sondern mit dem Monate später eintretenden Temperaturmaximum dicht unter der Oberfläche. Diese Erklärung bringt allerdings auch ein Problem mit sich: Wenn die Temperaturen im Sommer ausreichen, um das salzige Eis zu schmelzen, dann sollte es im Lauf der Zeit schlicht verschwunden sein. Aber vielleicht verschwindet es ja tatsächlich. Das würde bedeuten, dass die Linien jeweils nur für ein paar Jahre oder Jahrzehnte existieren. Vielleicht ist auch irgendein Prozess im Gang, der Wasser nachliefert, so dass sich neues Eis bilden kann.

Trotz aller Hinweise steht ein direkter Nachweis von Wasser an den Fundstätten der RSL bislang noch aus. Wir hoffen daher auf das MRO-Spektrometer, doch ist sein Auflösungsvermögen womöglich zu gering, um die extrem dünnen Linien nachzuweisen. Schlimmer noch: Die Sonde umläuft den Mars so, dass sie die Oberfläche stets dort ins Visier nimmt, wo gerade Nachmittag herrscht. Möglicherweise findet sich gerade dann kein oder nur wenig Wasser an diesen Stellen.

Laborexperimente zeigen, dass Salzwasser auf der Marsoberfläche in bestimmten Jahreszeiten an bestimmten Orten stabil sein kann – und zwar am frühen Morgen und am frühen Abend. Die relative Luftfeuchtigkeit nimmt ab, wenn sich die Luft vormittags erwärmt, und sie nimmt wieder zu, wenn es zum Abend hin abkühlt. Während kurzer Zeitspannen könnten sowohl Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit gerade so hoch sein, dass bestimmte Salze hygroskopisch Wasser absorbieren können. Abends dürfte der Prozess nach Sonnenuntergang stattfinden, was gezielte Beobachtungen aus der Umlaufbahn nicht gerade erleichtert. Morgens beginnt er nach Sonnenaufgang; anschließend könnte sich das Wasser eine Weile halten, auch wenn die relative Luftfeuchtigkeit erheblich abnimmt.

Das ideale Instrument, um zu überprüfen, ob die RSL wirklich durch flüssiges Wasser entstehen, wäre ein Spektrometer mit hoher räumlicher Auflösung, das die bis zu fünf Meter breiten RSL gut abbildet und mit dem wir sie gezielt mehrmals täglich und vor allem auch früh am Morgen beobachten können. Auf einer Arbeitstagung haben meine Kollegen und ich bereits ein Konzept für eine solche Mission vorgestellt, die außerdem hoch aufgelöste Bilder schießen sowie Höhen- und Temperaturmessungen durchführen würde.

Ließe sich wirklich fließendes Wasser nachweisen, würde sich zwangsläufig die Frage stellen, ob es Salz liebenden Mikroben eine lebensfreundliche Umgebung bietet. Auf der Erde kennen wir Spezies, die sehr hohe oder niedrige Temperaturen überleben können, aber auch extreme Trockenheit, Salzgehalte oder Strahlungsbelastung. Forscher haben herausgefunden, dass solche extremophilen Organismen nicht einfach nur überleben, sondern sich in bestimmten Flüssigkeiten noch bei Temperaturen bis hinab zu minus 20 Grad Celsius vermehren können.

Andererseits sind – zumindest soweit wir wissen – manche eutektischen Flüssigkeiten für Leben nicht geeignet. In den oberen Zentimetern sind viele der RSL aber vermutlich wärmer als minus 20 Grad Celsius, zumindest zeitweise und an bestimmten Sommertagen. Und natürlich könnten sich auf dem Mars noch widerstandsfähigere Organismen entwickelt haben, als wir sie auf der Erde kennen. Doch das sind bislang nur Spekulationen.

Inzwischen haben wir sehr viel mehr Regionen mit aktiven Linien aufgespürt, als unsere erste Veröffentlichung 2011 ausführte. Zudem haben Forscher bei Laboruntersuchungen und Feldstudien in der Antarktis zu reproduzieren versucht, was HiRISE aus der Marsumlaufbahn sieht. Wir hoffen, dass all diese Anstrengungen schließlich zu einer Erklärung für das Phänomen der RSL führen. Sollte sich fließendes Wasser tatsächlich als die beste Erklärung für ihre Ursache herausstellen, wäre nach 1000 vermeintlichen Entdeckungen die 1001. vielleicht endlich ein Volltreffer. ~

DER AUTOR



Alfred S. McEwen ist Professor für Planetenforschung an der University of Arizona. Er ist wissenschaftlicher Projektleiter der Marskamera HiRISE und auch an Missionen zum Erdmond und zu Saturn beteiligt.

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/may2013/mars

Bildergalerie mit englischen Texten von »Scientific American«, welche die zeitliche Entwicklung von Recurring Slope Lineae und andere Veränderungen auf der Oberfläche des Roten Planeten zeigt

Den genannten Link sowie Hinweise auf Fachpublikationen zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1210964

MESOPOTAMIEN

Wissen für die Elite

Die Keilschrift, das erste bekannte Schriftsystem der Welt, war jahrtausendlang in Gebrauch. Heute verrät sie Forschern sogar, wie die Sprache des Zweistromlandes einst klang.

Von Markus Hilgert

Mehr als 3500 Jahre lang, seit etwa 3300 v. Chr., notierten ausgebildete Schreiber Verträge und Korrespondenzen, Gesetze und astronomische Beobachtungen, medizinische Anweisungen wie auch rituelle Vorschriften, Mythen und literarische Werke, indem sie Griffel in Ton drückten, der danach trocknete und das Geschriebene so bewahrte. Keine andere Art der Überlieferung hat eine solche Erfolgsgeschichte vor-

zuweisen wie die Keilschrift. In Mesopotamien – dem heutigen Irak und den angrenzenden Gebieten – einst ersonnen, vermochte sie Informationen in einer ganzen Reihe von Sprachen niederzulegen, obwohl sich diese mitunter stark unterschieden. Dazu gehörten das dem heutigen Arabischen und Hebräischen verwandte Akkadische, das linguistisch isoliert dastehende Sumerische und das Hethitische, das zum anatolischen Zweig der indogermanischen Sprachen zählt.

In der 2. Hälfte des 2. Jahrtausends v. Chr. avancierte diese Technik zum bevorzugten Schriftsystem für den diplomatischen Verkehr im gesamten Vorderen Orient. Ägyptologen entdeckten sogar in den Ruinen von Amarna, der legendären Hauptstadt des Pharaos Echnaton, ein umfangreiches Tontafelarchiv. Es ist die wichtigste Quelle jener Zeit, um die Beziehungen Ägyptens mit den Reichen des Zweistromlandes und der hethitischen Hauptstadt Hattuscha zu rekonstruieren und die politischen Gepflogenheiten der Großmächte jener Zeit besser zu verstehen (siehe Bild S. 74).

Es dürften bereits mehrere hunderttausend Keilschrifttexte bekannt sein, und archäologische Ausgrabungen – leider auch die Plünderungen von Ruinenstätten im Irak und neuerdings in Syrien – bringen ständig neue zu Tage. Dabei wurde der Bestand noch nicht einmal annähernd wissenschaftlich aufgearbeitet. Die Altorientalistik, also die Wissen-

AUF EINEN BLICK

VIEL SAGENDE EINDRÜCKE

1 Gegen Ende des 4. Jahrtausends v. Chr. kam in den **sumerischen Stadtstaaten des Zweistromlandes** ein Schriftsystem auf, das keilförmige Eindrücke in weichem Ton zu Zeichen kombinierte.

2 Auf Grund der leichten Verfügbarkeit und guten Haltbarkeit des Materials verbreitete sich die Keilschrift derart, dass die Fragmente von Tontafeln heute die **Hauptquelle der Altorientalistik** bilden.

3 Das Schriftsystem war allerdings sehr komplex und erforderte eine gute Ausbildung. Insbesondere erschwerten **Vieldeutigkeiten der Zeichen** ihren Gebrauch, ermöglichten es aber auch, einen Text mit mehreren Bedeutungsebenen zu unterlegen.



STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN, VORDERASIATISCHES MUSEUM; FOTO: OJAF M. TESSMER

Dieses Fragment gehörte zum 22. Kapitel des sumerisch-akkadischen Wörterbuchs »urra – hubullu« (der Name verdankt sich den Worten der ersten Zeile). Der Abschnitt der zweisprachigen Liste enthielt Bezeichnungen von Ländern, Wasserläufen und Himmelskörpern. So listet die dritte Kolumne Namen von Kanälen auf, zum Beispiel »Reiner Kanal«, »Erhabener Kanal« oder »Kanal des Gottes Sin«. Das Tafelstück wurde Anfang des 20. Jahrhunderts in den Ruinen von Assur im heutigen Irak ausgegraben; es entstand im 1. Drittel des 1. Jahrtausends v. Chr.

schaft von den Sprachen und Kulturen des Alten Orients, besitzt daher ein enormes Potenzial gerade für junge Forscher mit innovativen Ideen.

Freilich ist dieser Reichtum auch dem Material geschuldet: Guter Ton war in Mesopotamien überall zu haben und weit einfacher zu gewinnen als andere Beschreibstoffe wie Tierhaut (der Vorläufer des Pergaments) oder die in Ägypten aus Papyrusfasern hergestellten Rollen.

Vor allem aber war eine in der Sonne getrocknete Tontafel lange haltbar. Für die Altertumswissenschaften zählt dies umso mehr, als die mineralische Substanz nicht von Mikroorganismen zersetzt wurde. Ging ein Archiv beispielsweise in Folge kriegerischer Ereignisse in Flammen auf, wurde der Ton überdies durch Brennen noch widerstandsfähiger. Daher vermitteln selbst jahrtausendealte Keilschriftmanuskripte mitunter den Eindruck, als habe sie der Schreiber eben erst angefertigt.

Ein solches Schriftstück war ziemlich unverwüsthlich: Das wusste man sicher schon im Altertum zu schätzen. Denn in der Antike bemaßen sich Innovationszyklen nicht in Jahren wie heute. Es konnte durchaus vorkommen, dass der Verwaltungsakt eines längst verstorbenen Herrschers aus einem Archiv geholt wurde. Literarische Stoffe wurden sogar über Jahrtausende hinweg gesammelt, überarbeitet und in eine standardisierte, dem Zeitgeist gemäße sprachliche und stilistische Form gebracht. Gelehrte Abhandlungen dienten als Grundlage für neue Werke, die dann den jeweils aktuellen Wissensstand abbildeten.

Stießen Arbeiter bei Bau- oder Renovierungsarbeiten an Tempeln, Palästen oder Verteidigungsanlagen immer wieder auf Gründungsdokumente früherer Herrscher, wurden diese oft viele hundert Jahre alten Fundstücke mit höchstem Respekt behandelt, von Gelehrten studiert und bisweilen sogar als Vorlagen für zeitgenössische Inschriften verwendet. Um

Diese in Uruk im heutigen Irak ausgegrabene Urkunde aus der Zeit um 3300 v. Chr. zeigt vier Keile als Zahlzeichen sowie drei, noch unklare Wortzeichen. Das obere könnte ein Gefäß mit Flüssigkeit darstellen, das untere einen Schafspferch. Es handelt sich um eines der frühesten bekannten Verwaltungsdokumente der Menschheitsgeschichte.



STATISCHE MUSEEN ZU BERLIN, VORDERASATISCHES MUSEUM; FOTO: OLAF M. TESSEMER

die Anmutung der ehrwürdigen Vorbilder zu bewahren, gestalteten die Schreiber sie nicht nur in Schriftbild und Ausdrucksweise bewusst altertümlich, sie imitierten sogar das keilförmige Aussehen der Zeichen, auch wenn sie nicht Ton, sondern Stein, Metall oder glasierte Lehmziegel als Beschreibstoff verwendeten. Offenbar schrieb man der Keilschrift in Mesopotamien eine die Welt ordnende Kraft zu.

Tatsächlich gibt es nahezu keinen Bereich menschlichen Geistes- und Kulturschaffens, der nicht in der einen oder anderen Form seinen Niederschlag in Keilschrifttexten gefunden hätte. Die heutige Grundlagenforschung zu den Gesellschaften des antiken Zweistromlands kann sich somit gleichermaßen auf Texte des täglichen Gebrauchs wie Verwaltungsurkunden, Verträge, Gerichtsprotokolle und Briefe stützen wie auf Schriftzeugnisse, die wir heute vielleicht den Bereichen Literatur, Wissenschaft oder Esoterik zuordnen würden: zum Beispiel mythisch-epische Dichtungen wie das berühmte Gilgamesch-Epos (siehe Bild S. 72), Liebeslieder, Hymnen, Aphorismen, Traktate etwa zu Pflanzen, Mineralien, Tieren, Amtsbezeichnungen (siehe Bild rechts) oder Himmelskörpern, Handbücher der hoch spezialisierten altmesopotamischen Vorzeichenkunde und Gesetzestexte wie der »Kodex Hammurapi« – eine Sammlung von Vorschriften auf einer monumentalen schwarzen Stele, die zum Gedenken an König Hammurapi aufgestellt worden war, der im 18. Jahrhundert v. Chr. in Babylon herrschte. Dazu gesellen sich ab der Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. Tausende von Herrscherinschriften, die von der wechselvollen politischen Geschichte Mesopotamiens zeugen (siehe Bild S. 73).

Das grafische Grundelement war der keilförmige Eindruck, den ein Schreibgriffel, zum Beispiel ein schräg abgeschnittenes Schilfrohr, im weichen Ton hinterließ. Das einfachste Zeichen war DISCH, – ein senkrechter Keil 𐎠 – die Namen der Zeichen werden von Altorientalisten mit Großbuchstaben geschrieben. Viele Lettern bestanden aus zwei oder drei davon, manche auch waagrecht oder schräg ange-setzt; selbst zehn oder mehr Keile kamen oft vor. In jeder Phase der altorientalischen Geschichte waren mehrere hundert verschiedene Schriftzeichen in Verwendung, wenn auch ein einfacher Verwaltungsvorgang weniger als 30 be-

nötigen konnte. Form und Ausführung veränderten sich immer wieder, so dass Wissenschaftler häufig einen Text schon auf Grund seines Schriftbildes einer bestimmten Epoche zuordnen können.

Seiner Verbreitung zum Trotz war das Keilschriftsystem alles andere als einfach zu erlernen. Vor allem seine Mehrdeutigkeit bereitete wohl schon Schreischülern im antiken Zweistromland Kopfzerbrechen – und sorgt heute für Diskussionen unter den altorientalischen Philologen. So konnten die meisten Schriftzeichen für Silben und Wörter gleichzeitig stehen. In jeder dieser beiden Funktionen besaßen sie zudem oft mehrere Wertigkeiten, kodierten also verschiedene Silben beziehungsweise Begriffe. Darüber hinaus gab es etliche Symbole, die zusätzlich als stumme Klassifikatoren dienten, also die Zugehörigkeit eines Begriffs zu einer bestimmten Kategorie kennzeichneten. In akkadischen Keilschrifttexten des 1. Jahrtausends v. Chr. kann beispielsweise das Zeichen GISCH 𐎠 ein Silbenzeichen sein und dabei diverse Wertigkeiten besitzen: »iz«, »is«, »its«, »ez«, »es«, »ets« und eben auch »gisch«. Des Weiteren wurde es als Wortzeichen verwendet und stand dann für »itsu« in der Bedeutung von »Holz« oder »Baum«. Als Klassifikator kennzeichnete es hölzerne Objekte. Dem Zeichen KU vorangestellt, also als Kombination GISCH.KU 𐎠𐎠, konnte es in der Funktion eines Klassifikators daraus das Akkadische »kaku« machen: »Keule, Waffe«. Welche Wertigkeit ein Keilschriftzeichen jeweils besitzt – häufig sind in einem Text gleich mehrere nachweisbar – lässt sich nur aus dem Zusammenhang erschließen.

Schreiben als Kunst der Eliten

Das aber traf so auch schon im Altertum zu. Schreiben und Lesen erforderten deshalb Konzentration, geistige Flexibilität – und viel, viel Übung. Wer diese Kompetenzen erwerben wollte, musste schon im Kindesalter damit beginnen. Die meist männlichen Schüler entstammten wohl der kleinen städtischen Oberschicht, zu der vor allem die Funktionäre in Verwaltung und Kult gehörten. Angehende Schreiber absolvierten ein mehrjähriges Curriculum, dessen Struktur und Methodik sich über die Jahrtausende kaum veränderte. Anhand von Übungstabern lässt sich die Abfolge der einzelnen Lektionen heute zuverlässig rekonstruieren.

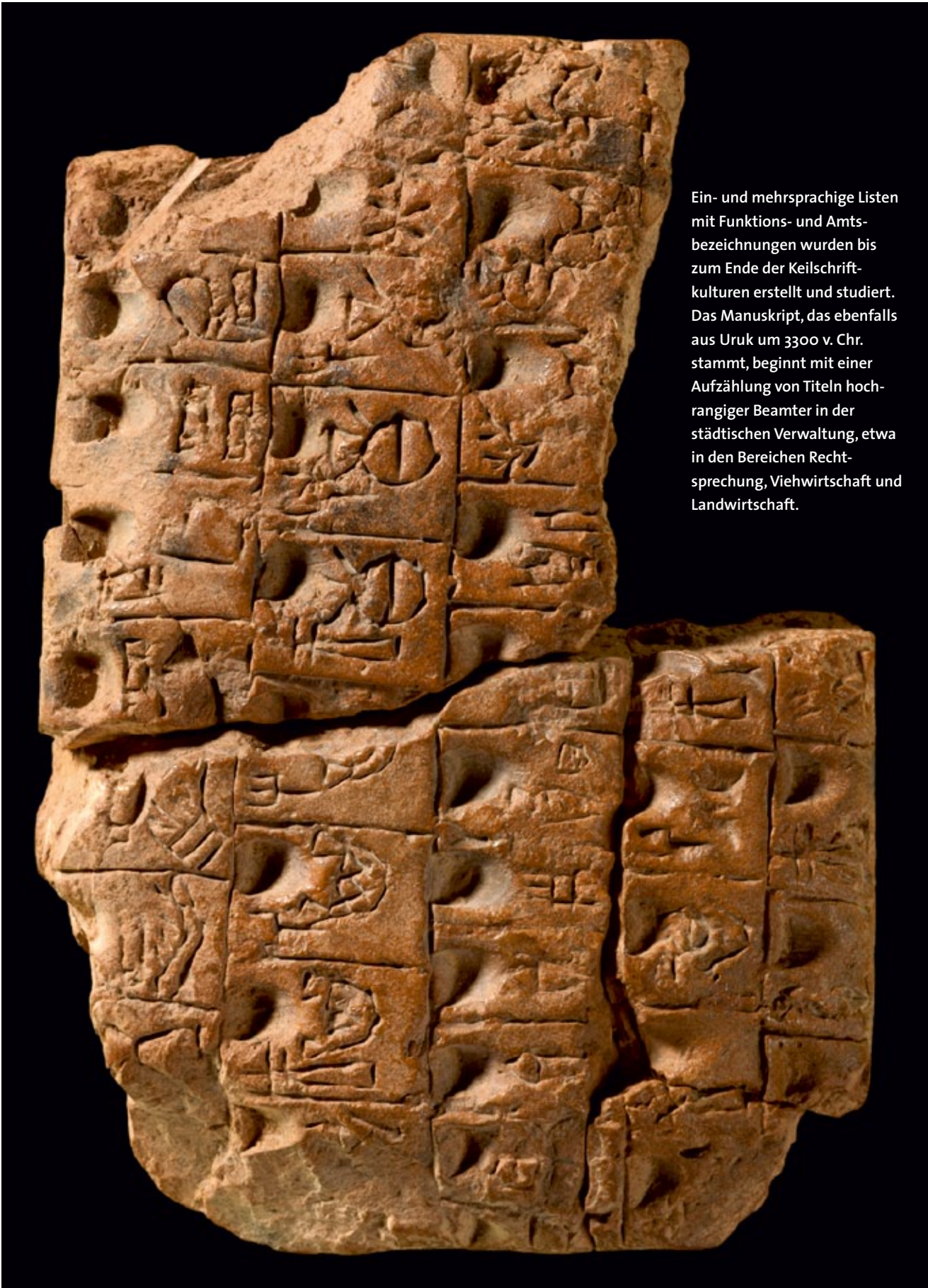
So wissen wir inzwischen, dass das Zeichen DISCH, der senkrechte Keil, tatsächlich am Beginn der Ausbildung stand, wie es auch ein altorientalisches Sprichwort sagt: »Der An-

WEBTIPP

Assyriologen lesen akkadische Gebete und Hymnen in der rekonstruierten Originalsprache.

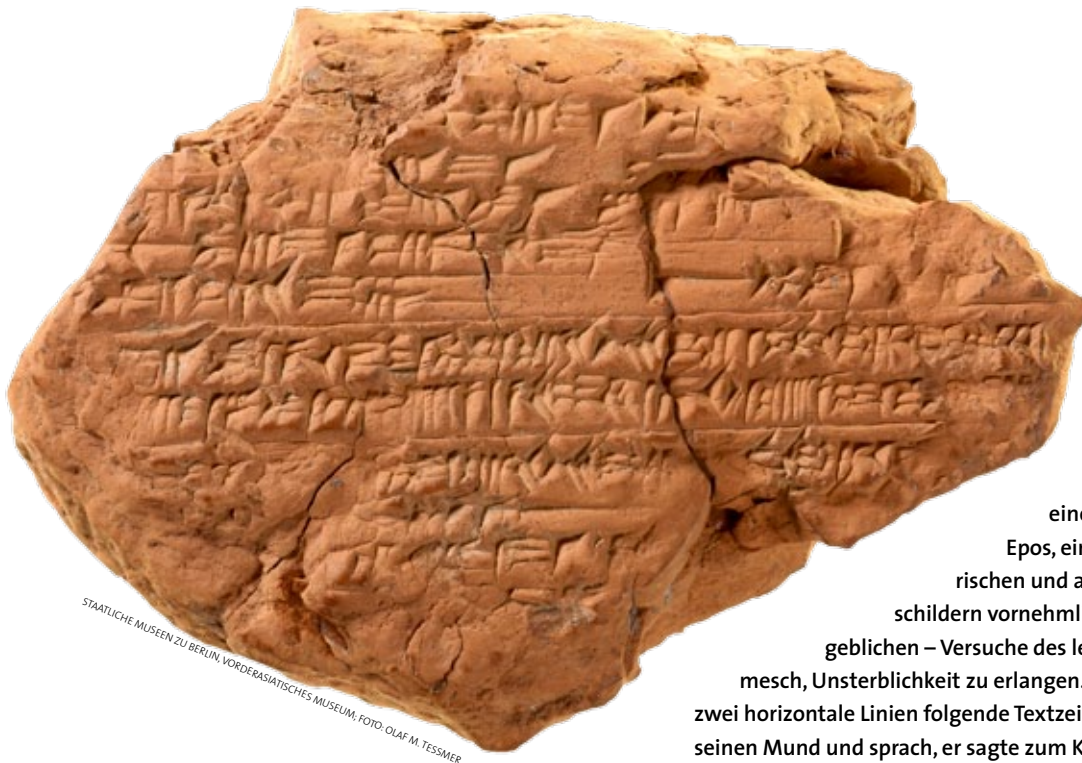
www.soas.ac.uk/baplar/recordings





Ein- und mehrsprachige Listen mit Funktions- und Amtsbezeichnungen wurden bis zum Ende der Keilschriftkulturen erstellt und studiert. Das Manuskript, das ebenfalls aus Uruk um 3300 v. Chr. stammt, beginnt mit einer Aufzählung von Titeln hochrangiger Beamter in der städtischen Verwaltung, etwa in den Bereichen Rechtssprechung, Viehwirtschaft und Landwirtschaft.





STAATLICHE MUSEEN ZU BERLIN, VORDERASIATISCHES MUSEUM, FOTO: OLAF M. TESSMER



Dieses Fragment aus Assur, einer Metropole des 1. Jahrtausends v. Chr., birgt einen Teil des Gilgamesch-Epos, eine Gruppe von sumerischen und akkadischen Texten. Sie schildern vornehmlich die – letztlich vergeblichen – Versuche des legendären Königs Gilgamesch, Unsterblichkeit zu erlangen. Hier umrahmen zwei horizontale Linien folgende Textzeilen: »Ninurta öffnete seinen Mund und sprach, er sagte zum Krieger Enlil: ›Wer, wenn nicht Ea, vermag solches? Denn (nur) Ea kennt alle Werke!«

fang der Schreibkunst ist ein senkrechter Keil. Er hat sechs verschiedene Aussprachen.« Auf grob geglätteten Tonfladen übte man bald auch waagerechte und schräge Eindrücke, die noch ohne Regeln wahllos auf der Tafeloberfläche platziert wurden, wie Petra Gesche von der Universität Heidelberg in ihrer Doktorarbeit nachwies.

Keil für Keil zur Meisterschaft

Konnten die Schüler mit dem Griffel in der einen, einer Tafel in der anderen Hand umgehen, versuchten sie sich an ersten Keilkombinationen und dem Schreiben in Zeilen. Auf einer Tafel vom Beginn des 2. Jahrtausends v. Chr. folgt beispielsweise auf das DISCH ein waagerechter Keil mit zwei angesetzten schrägen, das Zeichen BAD: . Dazu kamen etwas später die Zeichen A: ; ME: ; und PAP: . Mit den Zeichenfolgen ME-ME, PAP-PAP und A-A hatten die Schüler zugleich die ersten drei Zeilen einer damals schon weitgehend standardisierten Zeichenliste kennen gelernt, die auf das Schreiben etwa von Eigennamen und kürzeren Ausdrücken vorbereitete.

Hatte ein junger Schreiber diese Stufe gemeistert, begann ein Unterricht über eine Sprache, die seit dem frühen 2. Jahrtausend v. Chr. im Alltag wohl nicht mehr gesprochen wurde, bis zum Ende der Keilschriftüberlieferung in den ersten Jahrhunderten n. Chr. aber von größter Bedeutung war: das Sumerische, das sich von den semitischen Verkehrssprachen

des Zweistromlandes jener Zeit, Akkadisch und Aramäisch, fundamental unterschied. Eine Formulierung wie »zusammen mit deinen älteren Brüdern« wurde im Sumerischen formuliert als »Bruder groß-dein-Plural-zusammen mit« (»schesch gal-zu-ne-da«), Akkadisch aber »zusammen mit Brüder-dein große« (»itti ahhika rabuti«).

Dafür gab es zunächst einen rein praktischen Grund: Sumerische Texte waren wohl die ersten, die mit der Keilschrift aufgezeichnet wurden, akkadische folgten Jahrhunderte später. Daher trugen die Keilschriftzeichen sumerische Namen und wurden mit Hilfe sumerischer Begriffe beschrieben. Wer die Keilschrift erlernen wollte, kam am Sumerischen nicht vorbei. Oder wie es ein sumerisches Sprichwort aus dem frühen 2. Jahrtausend v. Chr. auf den Punkt brachte: »Ein Schreiber, der kein Sumerisch kann, was für ein Schreiber ist er?«

Die Weiterverwendung einer eigentlich überholten Sprache aus den Anfängen Mesopotamiens war sicher auch ideologisch begründet. Die Herrscher des frühen 2. Jahrtausends v. Chr. – und damit auch die sich aus Verwandten ihrer Familie rekrutierende Elite – waren nämlich vielfach die Nachfahren von Nomaden, die mit ihren Viehherden erst später eingewandert waren. Ihre Muttersprache war das Amurritische, wie das Akkadische eine semitische Sprache. Indem sie in offiziellen Angelegenheiten an ihre sumerischen Vorgänger anknüpften, sorgten sie für Kontinuität und Legitimation. Die Potentaten gaben sogar Gedenkschriften in Auftrag, die sich in Diktion, Metaphorik und theologischen Bezügen

an ältere Vorbilder anlehnten. Bis zum Ende der babylonisch-assyrischen Kultur um die Zeitenwende sollte Sumerisch auch die Sprache sein, in der Priester zu den Göttern sprachen und in der man eine Gottheit um Vergebung und Hilfe anflehte.

An solch anspruchsvolle Texte wurden die Schreischüler freilich langsam herangeführt. Zunächst studierten sie etwa eine Liste von Personennamen, die überwiegend dem Sumerischen entstammten, so etwa »Bawu-ninam« für »Die Göttin Bawu ist Herrin« oder »Bawu-teschgu« für »Die Göttin Bawu ist meine Lebenskraft«. Dabei folgt jeder Listeneintrag demselben formalen Schema: Ein senkrechter Keil markierte den Beginn, daran schloss sich jeweils eine Sequenz von bis zu fünf Zeichen an. Das Kompendium, das vor allem in der Stadt Nippur weit verbreitet war, bot allerdings ausschließlich Namen, die – so zeigt eine Analyse zeitgenössischer Alltagstexte – längst aus der Mode gekommen waren und auf die Schüler, die sie aus dem Gedächtnis niederschreiben mussten, altertümlich gewirkt haben dürften.

Der krönende Abschluss: Schreiben in einer vergangenen Sprache

Doch in didaktischer Hinsicht war das Listenwerk von hohem Wert. Wie die Beispiele oben zeigen, bestanden diese Namen bereits aus kurzen Sätzen, vermittelten also Grundlagen sumerischer Orthografie und Grammatik sowie einen kleinen Wortschatz. Darüber hinaus gaben sie erste Einblicke in die theologischen und anthropologischen Vorstellungen einer wohl idealisierten Vergangenheit.

Auch in der nächsten Unterrichtsphase war der Lernstoff in Wortlisten organisiert; diese konnten mehrere tausend Einträge enthalten. Das ursprünglich einspaltige Format wurde im Lauf der Jahrhunderte um weitere Spalten ergänzt, die Erläuterungen und zusätzliche Informationen enthielten (siehe Bild S. 69). Dennoch dürfte das nicht ausgereicht haben, um den Kontext der sumerischen Begriffe vollständig zu erschließen. Den lieferte vermutlich der Lehrer mündlich dazu.

So eingeschränkt die Aussagekraft der Zeichen- und Wortlisten hinsichtlich der Inhalte auch war – sie vermitteln heute sogar einen Eindruck davon, wie das Sumerische oder Akkadische näherungsweise geklungen haben könnte. Dazu tragen Philologen alle relevanten Informationen zur Wertigkeit eines Silbenzeichens zusammen und analysieren sie vor





In einer von Religion und Kult bestimmten Welt war auch ein Bauvorhaben nicht ohne Darbringungen denkbar. So zeigt diese um 2100 v. Chr. in Uruk dargebrachte Bronzefigur König Schulgi, der einen Korb mit Lehm trägt. Umlaufend um den Unterkörper berichtet eine Keilinschrift von Renovierungsarbeiten an dem der Göttin Inana geweihten Heiligtum Eana: »Für Inana, die Herrin des Eana, seine Herrin, hat Schulgi, der starke Mann, der König von Ur, der König von Sumer und Akkad, das Eana renoviert und ihr dessen große Mauer wieder errichtet.«










Keilschrifttafeln aus der Staatskanzlei von Amarna geben Einblicke in die Diplomatie des 2. Jahrtausends v. Chr. In diesem Schreiben etwa begrüßte der Herrscher von Mittani den Pharao Amenhotep III. als »Bruder«, sah sich also als gleichrangigen Partner.

dem Hintergrund bereits bekannter und allgemein gültiger orthografischer, grammatikalischer oder etymologischer Sachverhalte.

So erklärte etwa eine Zeichenliste, die in der ersten Hälfte des 2. Jahrtausends v. Chr. im Zweistromland weit verbreitet war, die Aussprache des Zeichens  durch die beiden aufeinanderfolgenden Zeichen  und . Doch was waren deren Lautwerte? Das Zeichen  erscheint in einem akkadischen Brief an einer Stelle, wo man auf Grund des inhaltlichen Zusammenhangs ein »nicht« erwartet. Verneinungen sind in der semitischen Sprachfamilie meist nach dem Schema »l« plus Vokal konstruiert wie das arabische »la« für »nein«.

Rekonstruktion der Lautwerte – wie klang das Sumerische?

Für die Aussprache des  gibt es ebenfalls einen Anhaltspunkt. In einem anderen, einige Jahrhunderte älteren akkadischen Text erscheint es im Auslaut eines Substantivs. Das aber müsste wegen seiner Funktion innerhalb des Satzes im Akkusativ stehen, und den drücken viele semitische Sprachen durch die Endung »a« am Wortstamm aus. Aus anderen Untersuchungen ist zudem bekannt, dass im älteren Akkadischen die Markierung des grammatischen Falls stets um ein »m« erweitert wurde. Demnach klang das  sehr wahrscheinlich wie »am«. Ein letztes Indiz liefert schließlich eine Konvention der keilschriftlichen Rechtschreibung: Silben des Typs Konsonant-Vokal-Konsonant wurden häufig durch zwei Silbenzeichen des Typs Konsonant-Vokal beziehungs-

weise Vokal-Konsonant dargestellt, was den Vokal aber nur in der Schrift, nicht in der Aussprache verdoppelte. Demnach wären die beiden Zeichen  und  zwar »la-am« zu lesen, das Zeichen  aber »lam« auszusprechen. Da Forscher für die überwiegende Mehrzahl der keilschriftlichen Silbenzeichen durch entsprechende Überlegungen Lautwerte ermitteln konnten, ist es heute tatsächlich möglich, Keilschrifttexte vorzulesen (siehe Webtipp S. 70).

Dass die Fehlerbreite dieser Rekonstruktionen kaum abzuschätzen ist, dessen sind sich die Philologen freilich sehr bewusst. Allein die Mehrdeutigkeit des Schriftsystems und die im Vergleich zu anderen Sprachen doch recht flexiblen orthografischen Regeln erlauben oft keine definitiven Aussagen. In der Schreiberausbildung stellten sie eine hohe intellektuelle Hürde dar, boten den erfolgreichen Absolventen aber auch faszinierende Möglichkeiten, Worte auf unterschiedliche Arten darzustellen.

Verwaltungsurkunden etwa ließen sich durch vermehrten Gebrauch von Wortzeichen zeit- und platzsparend ausstellen. Dagegen setzten Gelehrte laut jüngeren Forschungsergebnissen ungewöhnliche, komplizierte Schreibungen in literarischen oder wissenschaftlichen Werken nicht nur ein, um ihre hohe Bildung unter Beweis zu stellen, sondern auch, um verschiedene Bedeutungsebenen sichtbar zu machen. Ein schönes Beispiel ist das akkadische Wort für Feindschaft: »nu-kur-tum«. Es ließ sich auch mit einer Variante des »kur« schreiben, die neben ihrer Silbenwertigkeit ebenfalls eine Bedeutung als sumerisches Wortzeichen hatte: »Feind«. Sogar das Schriftbild konnte so die aversive Einstellung noch einmal unterstreichen. Das Zeichen war nämlich kein anderes als das aus zwei gekreuzten Keilen bestehende PAP. Nur wenige Schriftsysteme der Menschheitsgeschichte erlaubten wohl in solcher Weise, Bedeutungen auf mehreren Ebenen gleichzeitig zu vermitteln. So fremd uns die vor zwei Jahrtausenden vergangene babylonisch-assyrische Kultur heute auch sein mag – diesem differenzierte Umgang mit den Mehrdeutigkeiten der Welt zollen wir Respekt.

Die Entzifferung von Keilschrifttexten wird auch weiterhin die Arbeit des Altorientalisten prägen, zumal der Bestand anwächst. Dabei gilt es, den archäologischen Kontext künftig stärker miteinzubeziehen, um die Bedeutung der Schriftlichkeit in Mesopotamien besser zu verstehen. ~

DER AUTOR



FRIEDRIKE ELIAS

Markus Hilgert lehrt Assyriologie an der Universität Heidelberg. Der Autor leitet den DFG-Sonderforschungsbereich 933 »Materiale Textkulturen« an der Universität Heidelberg, der sich mit der Verbreitung von beschrifteten Objekten in den antiken Gesellschaften des Mittelmeerraums befasst. Er ist Vorsitzender der Deutschen Orientgesellschaft und designerter Direktor des Vorderasiatischen Museums der Staatlichen Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz.

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/1210965

GEOMETRIE

Leben in 10 000 Dimensionen

Die mathematischen Formeln sind dieselben wie in unserem gewohnten Raum. Aber wenn man 10 000 verschiedene Richtungen zur Verfügung hat, die sämtlich aufeinander senkrecht stehen, kommen statistische Effekte ins Spiel – mit den merkwürdigsten Folgen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Wer zum ersten Mal im Leben in einen vierdimensionalen Raum gerät, fühlt sich unweigerlich etwas unwohl – selbst wenn es nur in der Fantasie ist (Spektrum der Wissenschaft 11/2004, S. 101). Vier Koordinatenachsen, die alle aufeinander senkrecht stehen, überfordern eben doch das Vorstellungsvermögen. Unübersichtlich ist es dort auch. Dass sich zwei Leute mehr als einmal im Leben per Zufall begegnen – auf der zweidimensionalen Erdoberfläche ein häufiges Ereignis –, kommt in vier Dimensionen praktisch nicht vor. Und wehe, man lässt seine Brille liegen! Die ist kaum wiederzufinden, weil man so viele Richtungen zum Suchen zur Auswahl hat.

Hat man sich aber erst einmal daran gewöhnt, fällt der Übergang in den fünfdimensionalen Raum nicht mehr schwer (Spektrum der Wissenschaft 12/2004, S. 106). Die vielen ungewohnten Phänomene sind im Wesentlichen dieselben, nur schlimmer.

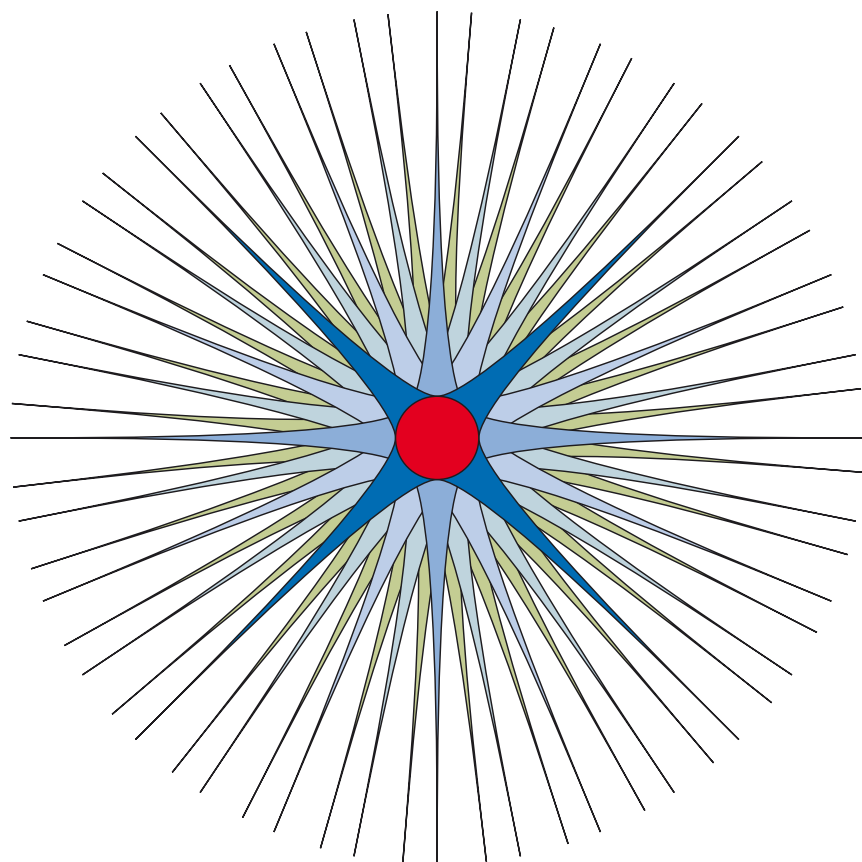
Spätestens an dieser Stelle verweisen die Mathematiker darauf, dass man sich mit dem Induktionsprinzip bequem von Dimension zu Dimension hangeln kann und es auf deren Anzahl nicht besonders ankommt, solange sie endlich bleibt. Unendlichdimensionale Räume sind eine ganz andere Baustelle. Aber in allen n -dimensionalen Räumen, wobei n eine natürliche Zahl ist, sind die algebraischen Hilfsmittel dieselben.

Wenn aber n richtig groß wird – sagen wir in der Größenordnung von 10 000 –, wird unsere Intuition von Neuem auf eine harte Probe gestellt. Man muss sich daran gewöhnen, dass eine Kugel nur einen verschwindend geringen Teil vom Volumen des kleinsten Würfels ein-

nimmt, in den sie hineinpasst (Spektrum der Wissenschaft 8/2012, S. 52). Wer mit einem 10 000-dimensionalen Analogon von Wurfpielen auf einen bestimmten Punkt zielt, trifft selbst bei olympiareifer Zielgenauigkeit praktisch nie ins Schwarze – einfach weil die Möglichkeiten, danebenzuwerfen, so gigantisch zahlreich sind. Und jede

einigermaßen disziplinierte Funktion von 10 000 Variablen ist im Wesentlichen konstant. Wie kann das sein?

Legen wir uns für die Reise in die hochdimensionalen Räume zunächst etwas Wanderausrüstung zurecht. Wie im vertrauten Raum denken wir in Koordinaten. Ein Punkt im n -dimensionalen Raum ist nichts weiter als eine Folge



CHRISTOPH PÖPPE



Ein Würfel mitsamt der größten Kugel, die in ihn hineinpasst: Das vertraute Bild aus zwei Dimensionen (links) führt in n -dimensionalen Räumen mit großem n in die Irre, denn in einem Würfel, der in allen Koordinaten nur von -1 bis $+1$ reicht und daher auch nur eine Kugel mit Radius 1 beherbergen kann, sind die Ecken \sqrt{n} Längeneinheiten vom Nullpunkt entfernt. Da kommt das große Bild trotz gekrümmter Kanten der Realität näher.

von n reellen Zahlen. Die erzählen einem, wie weit man von einem Nullpunkt aus nach rechts, hinten, oben, ... (für die weiteren Richtungen fehlen uns dreidimensionalen Wesen die Worte) gehen muss, um zu diesem Punkt zu kommen. Statt von Punkten sprechen die Mathematiker gerne von »Vektoren«, denken dabei aber nicht an die in der Schule üblichen Pfeile, die an irgendeiner Stelle ansetzen und von dort als Verschiebungs-, Kraft- oder Impulsvektor zu einem anderen Punkt weisen. Unsere Vektoren sind alle im Nullpunkt angepflockt.

Universalwerkzeug Skalarprodukt

Mit reellen Zahlen lässt es sich trefflich rechnen; aber irgendwie, wenn es auch sehr abstrakt ist, wollen wir uns in diesen Räumen auch zurechtfinden. Dazu genügt uns ein einziges mathematisches Hilfsmittel namens Skalarprodukt. Für große n ist es mit Papier und Bleistift etwas mühsam zu berechnen, für einen Computer jedoch kein Problem. Das Skalarprodukt der Vektoren $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ und $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ist die Summe der Produkte der Komponenten: $x \cdot y = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \dots + x_n y_n$. Das Skalarprodukt eines Vektors mit sich selbst ist dessen Länge zum Quadrat: $x \cdot x = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2$. Für $n = 2$ ist das nichts weiter als der Satz des Pythagoras, und diesen auf beliebig große n zu erweitern, fällt nicht schwer.

Allgemeiner ist das Skalarprodukt von x und y gleich der Länge von x mal der Länge von y mal dem Cosinus des Winkels zwischen beiden. Kennen Sie aus der Schule noch den Cosinussatz? Der sagt im Wesentlichen dasselbe. Insbesondere stehen zwei Vektoren genau dann senkrecht aufeinander, wenn ihr Skalarprodukt null ist.

Damit haben wir Längen und Winkel beisammen; mehr braucht es nicht, um nach dem antiken Vorbild des Euklid Geometrie zu betreiben. Der Strahlensatz gilt, und die Winkelsumme im Dreieck ist 180 Grad. Entsprechend nennt man die hochdimensionalen Räume »euklidisch« in Abgrenzung von ihren weniger ordentlichen Kollegen, bei denen das nicht der Fall ist.

Der Abstand zweier Punkte x und y ist die Länge des Vektors $x - y$. Eine Kugel mit Mittelpunkt M und Radius r ist die Menge aller Punkte, für die der Abstand von M kleiner oder gleich r ist. Ist er genau gleich r , so sind wir auf der »Oberfläche«; man nennt dieses Gebilde eine »Sphäre«.

Wie kann man im gewöhnlichen Raum mit Hilfe des Skalarprodukts eine Ebene ausdrücken? Man nehme einen (vom Nullpunkt ausgehenden) Vektor, der auf der (ebenfalls den Nullpunkt enthaltenden) Ebene senkrecht stehen soll. Dann ist die Ebene bequem zu definieren als die Menge aller Punkte oder eben Vektoren, die auf diesem speziellen »Normalenvektor« senkrecht stehen, das heißt mit diesem das Skalarprodukt null haben. Aus einer Ebene durch den Nullpunkt gewinnt man eine in beliebiger Lage, wenn man zu all ihren Punkten noch einen konstanten Vektor addiert, das heißt, ihre Punkte um diesen Vektor verschiebt.

Diese Definitionen kann man wortwörtlich auf hochdimensionale Räume übertragen. Die entsprechenden Punkt-mengen heißen dann »Hyperebenen«.

So wie man im gewöhnlichen Raum eine Kartoffel mit einem unendlich scharfen Messer zerschneiden kann (wissenschaftlich ausgedrückt: Man bildet die Schnittmenge aus einer Ebene und einer irgendwie geformten kompakten Teilmenge des Raums), so darf man auch über den Teil einer n -dimensionalen Kartoffel nachdenken, der innerhalb einer Hyperebene liegt. Oder man zerteilt den ganzen Raum mit einer Hyperebene in zwei Hälften, behält davon nur eine übrig und schneidet auf dieselbe Weise mit weiteren Hyperebenen Teile des verbleibenden Restes ab, bis der nur noch endliche Ausmaße hat. Im gewöhnlichen Raum nennt man diesen ein Polyeder; das ist ein räumlicher Körper, der von lauter ebenen Flächen begrenzt ist. In hochdimensionalen Räumen heißt das entsprechende Gebilde ein »Polytop«.

Eine Hyperebene ist »unendlich dünn« verglichen mit dem Raum, in dem sie enthalten ist. Die Schnittfläche einer dreidimensionalen Kartoffel ist

nur zweidimensional, ebenso die Grenzflächen eines Polyeders. Entsprechendes gilt auch in hohen Dimensionen. Eine Sphäre ist dünn verglichen mit der Kugel, deren Rand sie bildet. Nur fällt es anfangs etwas schwer, sich eine immerhin 9999-dimensionale Teilmenge eines 10000-dimensionalen Raums als richtig dünn vorzustellen.

n -dimensionale Zwiebeln ...

Brian Hayes hat uns in dieser Rubrik (Spektrum der Wissenschaft 8/2012, S. 52) darüber aufgeklärt, dass in hohen Dimensionen ein Würfel ein weitaus größeres Volumen hat als die größte Kugel, die in ihn hineinpasst. Was ist ein Würfel? Zum Beispiel die Menge aller Punkte, deren Koordinaten sämtlich zwischen -1 und 1 liegen. Dieser spezielle Würfel hat seinen Mittelpunkt im Nullpunkt und die Kantenlänge 2 , was das Rechnen mit ihm bequem macht. Und was ist Volumen? Länge mal Breite mal Höhe mal ... Wieder fehlen uns die Worte für die restlichen Dimensionen. Aber für einen Würfel ist das Volumen schnell berechnet, in unserem Beispiel 2^n , auch wenn eine Maßeinheit wie Meter¹⁰⁰⁰⁰ etwas gewöhnungsbedürftig ist. Für die Kugel muss man etwas Integralrechnung zu Hilfe nehmen.

Dass die Kugel mit Radius 1 im Volumen so kläglich hinter unserem Würfel zurückbleibt, kann man plausibel dadurch erklären, dass ein Würfel sehr viele Ecken hat – 2^n Stück in n Dimensionen – und jede Ecke weit über die Kugeloberfläche hinausragt (Bild S. 75). Ihre Entfernung vom Nullpunkt beträgt \sqrt{n} , das ist für $n = 10000$ immerhin der 100-fache Kugelradius.

Die allgemeine Weisheit lautet: Außen ist mehr Platz als innen. Das gilt zwar schon für die Ringe auf einer (zweidimensionalen) Zielscheibe und die Schalen einer (dreidimensionalen) Zwiebel; aber in hohen Dimensionen ist dieser Effekt bis ins Monströse verschärft. Wenn man von einer 10000-dimensionalen Zwiebel die äußerste Schale entfernt, bleibt von ihr kaum noch etwas übrig, selbst wenn diese Schale sehr dünn ist. Das sieht man bequem mit einem Argument aus der

Massenkonzentration in hohen Dimensionen

Vom Volumen einer n -dimensionalen Kugel liegt der größte Teil in der Nähe der Äquatorebene, das heißt der Teilmenge aller Punkte, deren erste Koordinate gleich null ist. Oder: Das Volumen der Teilmenge aller Punkte, deren erste Koordinate zwischen $-\varepsilon$ und $+\varepsilon$ für eine kleine Zahl $\varepsilon > 0$ liegt, unterscheidet sich nur geringfügig vom Volumen der ganzen Kugel. Damit aus dieser Aussage eine beweisbare Behauptung wird, muss man die Wörter »klein« und »geringfügig« präzisieren. Es stellt sich heraus, dass ε in der Größenordnung von $1/\sqrt{n}$ zu wählen ist.

Die genaue Behauptung lautet: Für jede Konstante $c > 0$ ist das Kugelvolumen nördlich der Breite $c/\sqrt{n}-1$ kleiner als $(2/c) e^{-c^2/2}$. Das ist schon für mäßig große c eine sehr kleine Zahl. Dabei soll die Breite nicht, wie üblich, den Winkel gegen die Äquatorebene bezeichnen, sondern die Höhe über dem Äquator oder schlicht die erste Koordinate x_1 ; Breite 1 entspricht dem Nordpol.

Der Ausdruck »nördlich der Breite ε « ist zu verstehen als » x_1 größer als ε «. Es genügt, die Nordhalbkugel zu betrachten; denn auf der Südhalbkugel (das heißt für $x_1 < 0$) liegen die Dinge genau symmetrisch.

Wenn also in der (bis fast zum Äquator reichenden) Nordpolarkappe nicht viel Volumen ist und in der dazu spiegelbildlichen Südpolarkappe genauso wenig, muss der große Rest in der dünnen Äquatorialscheibe dazwischenliegen.

Differenzialrechnung. Für das Volumen einer n -dimensionalen Kugel mit Radius r gilt die Formel $V(n, r) = c_n r^n$; um den dimensionsabhängigen Vorfaktor c_n müssen wir uns hier nicht kümmern. Diese Formel leiten wir nach r ab und erhalten für das Volumen einer dünnen Zwiebelschale der Dicke dr den Wert $c_n n r^{n-1} dr$. Es ist der Faktor n in dieser Formel, der die Schale so voluminös macht. Eine Schale der Dicke $dr = r/\sqrt{n}$ (ein Hundertstel des Zwiebelradius für $n = 10000$) hat das 100-Fache des Zwiebelvolumens!

... und Kartoffeln

Derselbe Effekt macht auch das Kartoffelschälens in hohen Dimensionen zu einer frustrierenden Angelegenheit. Denken wir nicht an die Schälkünstler, die das Messer auf gekrümmten Bahnen führen können, sondern gehen wir davon aus, dass unsere Schnitte nur Hyperebenen sein können. Wir verwandeln also die Kartoffel in ein Polytop; daran soll kein Stück Schale mehr sein, aber natürlich wollen wir möglichst viel Kartoffel übrig behalten.

Die schlechte Nachricht: Bei einer hochdimensionalen Kartoffel sitzen dicht unter der Schale nicht nur die Vitamine, sondern wie bei der Zwiebel der

größte Teil der Masse. Wer von ihr mehr behalten will als einen vernachlässigbaren Rest, muss sorgfältig und kleinteilig schneiden. Eine nennenswerte Ausbeute gibt es nur, wenn das Polytop größenordnungsmäßig 2^n Ecken hat; das sind 100 Millionen für $n = 10000$. Diese Schätzung gilt für eine kugelförmige Kartoffel; und eine knollige Gestalt macht die Sache nur schlimmer.

Das ist übrigens nicht nur müßiges Geplänkel über nichtexistente Erdknollen. Zahlreiche kombinatorische Probleme laufen darauf hinaus, das Volumen eines konvexen – und das heißt zumindest irgendwie kartoffelförmigen – Gebildes in einem hochdimensionalen Raum zu berechnen. Aber es kostet erheblichen Rechenaufwand, dessen Gestalt zu bestimmen. Irgendwelche Rundungen zu erfassen, ist aussichtslos. Man muss sich schon glücklich schätzen, wenn man eine hinreichend große Anzahl von Punkten findet, die den Rand des Gebildes ungefähr abstecken. Und wenn man das Volumen des Polytops berechnet, das diese Punkte zu Ecken hat, ist das wie faules Kartoffelschälens: Man unterschätzt das Kartoffelvolumen gewaltig.

Die Mathematiker haben übrigens nicht nur das Problem entdeckt, son-

dern bieten auch eine Lösung an. Und zwar grast man das Volumen, in dem sich die Kartoffel befindet, nicht systematisch ab, sondern lässt den Zufall eine entscheidende Rolle spielen. Aber das ist eine andere Geschichte (Spektrum der Wissenschaft 2/2012, S. 88).

Bei der Gelegenheit müssen wir uns von einer vermeintlichen Selbstverständlichkeit verabschieden. Nehmen wir zwei Kartoffeln K und L und zerschneiden sie mit unserem unendlich dünnen Hyperebenen-Messer. Dafür stehen uns unendlich viele Richtungen zur Verfügung; der Übersichtlichkeit zuliebe stellen wir uns zusätzlich vor, dass beide Kartoffeln punktsymmetrisch sind und jeder Schnitt durch das Symmetriezentrum geht. Wenn jetzt für jede der unendlich vielen Schnittrichtungen die Schnittfläche von K kleiner ist als die von L , dann müsste doch das Volumen von K kleiner sein als das von L , oder?

Das klingt so einleuchtend, dass die Mathematiker es selbst eine ganze Weile geglaubt haben. Herbert Busemann und Clinton Myers Petty haben 1956 diese Vermutung aufgestellt und für gewisse Spezialfälle bewiesen. Sie trifft auch für gewöhnliche Kartoffeln zu; aber ab Dimension 5 ist sie im Allgemeinen falsch! Das einfachste Gegenbeispiel bieten ausgerechnet Würfel und Kugel, diesmal in etwas anderen Größen. Die Koordinaten des Würfels sollen diesmal nicht von -1 bis 1 reichen, sondern von $-1/2$ bis $1/2$. Dann hat er die Kantenlänge 1 und damit auch das Volumen 1. Die Kugel machen wir so groß, dass ihr Volumen ebenfalls 1 beträgt, zu welchem Zweck wir ihren Radius ordentlich vergrößern müssen.

Schneiden wir nun beide Körper mit Hyperebenen, die durch den Nullpunkt gehen, so kommt bei der Kugel immer so etwas heraus wie eine »Äquatorebene«; deren $(n-1)$ -dimensionales Volumen strebt für große n gegen \sqrt{e} . Beim Würfel kommt es darauf an, ob der Schnitt Ecken trifft und, wenn ja, wie viele. Aber größer als $\sqrt{2}$ wird sein Volumen nie. Da e größer als 2 ist, fällt jede Schnittfläche der eckigen Kartoffel kleiner aus als die entsprechende Flä-

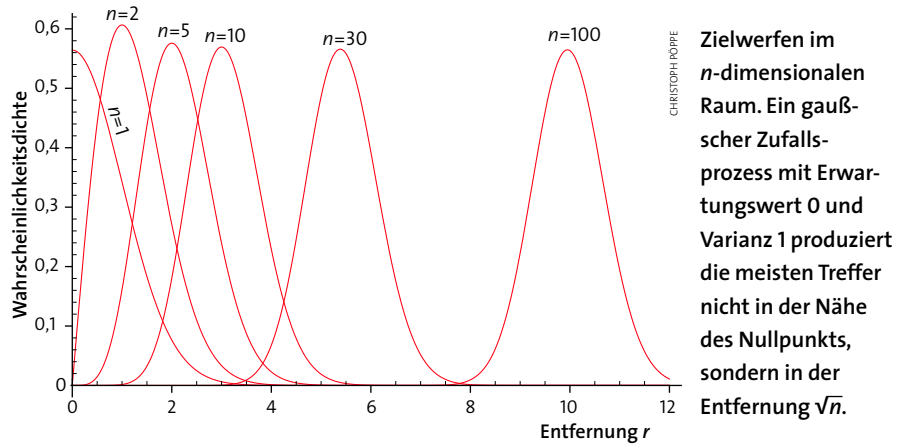
che der runden. Gleichwohl hat die eckige das gleiche Volumen.

Das nächste Paradox ist noch merkwürdiger: Von der Masse einer Kugel liegt der größte Teil in der Nähe der Äquatorebene. Auch Mathematiker denken bei »Kugel« an die vertraute Erde. Wenn die Koordinate x_1 die Nord-Süd-Richtung bezeichnet, dann ist der Punkt $(1, 0, 0, \dots, 0)$ der Nordpol, und die Äquator-(Hyper-)Ebene ist die Menge aller Punkte mit $x_1=0$.

Auf den ersten Blick leuchtet die Behauptung sogar ein. Sie sagt zunächst nichts anderes, als dass die n -dimensionale Erde dort das meiste Volumen hat, wo sie am dicksten ist, also in der Äquatorebene. Und wir haben oben schon erfahren, dass dick sein – also Masse fern vom Zentrum aufweisen – in hohen Dimensionen viel eindrucksvollere Wirkungen hat als in der gewöhnlichen Welt. Nur – die Wahl des Nordpols ist völlig willkürlich! Nichts zeichnet die erste Koordinate vor den anderen aus, und zu allem Überfluss haben wir die Freiheit, das Koordinatensystem so zurechtzudrehen, dass da, wo wir gerade auf der Kugeloberfläche stehen, der Nordpol ist.

Sagt uns also die Abschätzung, dass die größte Masse der Kugel immer da ist, wo wir gerade nicht sind, sondern weit weg? Das auch, aber vor allem erzählt sie uns, dass fast alle Punkte der Kugel auf unserem Standpunkt senkrecht stehen.

Das kann man sich mit einem Zufallsexperiment begreiflich machen. Für einen beliebigen Punkt $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ der Kugel gilt ja $x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \leq 1$. Wir stellen n Näpfe in einer Reihe auf und verteilen einen Liter Vanillesoße nach dem Zufallsprinzip auf alle Näpfe; es darf auch etwas Soße übrig bleiben. Die Soßenmenge im k -ten Napf soll dann der Zahl x_k^2 entsprechen; also ist x_k bis auf das Vorzeichen die Wurzel aus dieser Zahl. Wie viel Soße gerät im Durchschnitt in Napf 1? $1/n$ Liter, denn alle Näpfe sind gleichberechtigt und empfangen daher im Durchschnitt auch gleich viel Soße. Also ist der Durchschnittswert (genauer: der Erwartungswert) für x_1 gleich $1/\sqrt{n}$ (wir ignorieren



wieder das Vorzeichen). Nun ist das Skalarprodukt von x und unserem Standort, dem Nordpol, schnell berechnet: $1 \cdot x_1 + 0 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + \dots + 0 \cdot x_n = x_1$, und das ist ziemlich nah an der Null, wie wir soeben gesehen haben. In hohen Dimensionen sind rechte Winkel nicht nur nichts Besonderes, sondern – bis auf kleine Abweichungen – praktisch unvermeidbar.

Auch große Meister werfen weit daneben

Ein anderes Zufallsexperiment liefert ebenfalls merkwürdige Ergebnisse. Denken wir an einen sehr geschickten Dartspieler, der eigentlich mit jedem Wurf ins Schwarze träfe, wenn nicht kleine, zufällige Einflüsse dessen Weg stören würden. Trägt man die Häufigkeiten der Einschlagpunkte in Abhängigkeit von der Abweichung vom Mittelpunkt der Zielscheibe auf, so entsteht die bekannte gaußsche Glockenkurve, und zwar sowohl in x - als auch in y -Richtung. Viele physikalische Prozesse produzieren eine solche Verteilung.

Selbst ein sehr guter Dartspieler setzt jedoch die meisten Pfeile nicht in den innersten Kreis der Zielscheibe, sondern vielleicht in den Ring, der den innersten Kreis umgibt – nicht weil er so schlecht im Zielen wäre, sondern weil der Ring eine größere Fläche hat als der Kreis. Dieser Effekt, der in zwei Dimensionen noch recht mäßig ausgeprägt ist, nimmt bei hochdimensionalen Zielscheiben überhand. Die gibt's nicht? Doch; sie sind sogar in einem abstrakten Sinn relativ einfach herzustellen. Man wiederhole den Wurf oder das

physikalische Experiment 10 000-mal. Jedes einzelne Ergebnis ist eine Komponente eines 10 000-dimensionalen Vektors, oder anders ausgedrückt: Ein Punkt im 10 000-dimensionalen Raum fasst die Ergebnisse entsprechend vieler Experimente zusammen.

Auf einer solchen Zielscheibe kommt ein Treffer ins Schwarze praktisch überhaupt nicht mehr vor. Vielmehr konzentrieren sich für eine Standard-Gaußverteilung mit Erwartungswert 0 und Varianz 1 die Ergebnisse bei einer Entfernung von \sqrt{n} . Eigentlich nimmt mit zunehmender Entfernung vom Nullpunkt die Ereigniswahrscheinlichkeit rapide ab. Zugleich aber wächst das verfügbare Volumen so rasant mit der Entfernung, dass es diese Abnahme überkompensiert – zumindest eine Weile (Bild oben).

Diesen Effekt kann man sich zu Nutze machen. Stellen wir uns zwei Dartspieler – oder zwei physikalische Prozesse – vor, die zugleich auf dieselbe Scheibe werfen, aber geringfügig unterschiedliche Zielvorstellungen haben: Für den einen liegt das Schwarze ein paar Zentimeter höher als für den anderen. Aus dem Muster der Treffer ist dann kaum zu erschließen, welcher Pfeil von welchem Werfer stammt, ganz zu schweigen von den jeweiligen Zielvorstellungen, für die sich die Physiker eigentlich interessieren. Auf einer hochdimensionalen Zielscheibe dagegen ist dieselbe Aufgabe ganz einfach: Jeder Werfer produziert Punkte in einer sehr dünnen Kugelschale mit Radius \sqrt{n} . Selbst wenn die Mittelpunkte beider Schalen gar nicht weit auseinanderliegen, sind sie

säuberlich voneinander zu trennen, denn sie überschneiden sich nur in einem noch dünneren »Ring«. Hier führt uns unsere dreidimensionale Intuition ausnahmsweise nicht in die Irre.

So gibt die geometrische Vorstellung dem Physiker ein Mittel an die Hand, aus eigentlich unbrauchbaren, da stark verrauschten Messwerten doch noch Information herauszuholen – wenn sie hinreichend zahlreich sind.

Fast getreue Abbildung in niedrigere Dimensionen

Fotografen kennen das Problem: Einerlei, wo man sich hinstellt, man kriegt das Bauwerk nie so vor die Linse, dass alle Längen stimmen. Bei einer Frontalansicht werden die Seitenwände verkürzt bis zur Unkenntlichkeit, und selbst vom Flugzeug aus gelingt es nicht, sowohl das Dach als auch die Wände unverzerrt abzubilden.

In höheren Dimensionen ist das alles kein Problem – vorausgesetzt, nicht nur das Objekt darf sehr viele Dimensionen haben, sondern auch das Bild ist nicht auf die zwei Dimensionen Länge und Breite beschränkt. Was dem Fotografieren entspricht, nennen die Mathematiker »Projizieren auf einen niedrigerdimensionalen Unterraum«. In dem hochdimensionalen Raum lebt das Objekt, bestehend aus einer Menge von Punkten, auf deren Entfernungen voneinander es ankommt. Der Fotograf nimmt eine günstige Position ein, das heißt, er dreht das Koordinatensystem in geeigneter Weise, wirft dann alle Koordinaten bis auf einige wenige weg und stellt erfreut fest, dass alle Entfernungen bis auf einen kleinen Fehler erhalten geblieben sind. Für die Dimension des Bildraums, das heißt die Anzahl der Koordinaten, die übrig bleiben müssen, kommt es nur auf die Anzahl der abzubildenden Punkte und die geforderte Genauigkeit an, nicht aber auf die Dimension des Objektraums.

Beim Beweis dieser erstaunlichen Behauptung, die als das Lemma von Johnson und Lindenstrauss bekannt ist, stellt sich heraus, dass der Fotograf sich bei der Wahl des Standorts keine besondere Mühe geben muss. Er muss nur ei-

nige wenige ungünstige Stellen vermeiden, und es wäre schon äußerst ungewöhnlich, wenn er bei einer zufälligen Wahl ausgerechnet so einen schlechten Standort erwischt.

Mit einer ähnlichen Technik beweist man auch, dass jede Funktion, die Punkte eines hochdimensionalen Raums auf reelle Zahlen abbildet und nicht zu wilde Sprünge macht (die offizielle Bezeichnung ist »lipschitzstetig«), »im Wesentlichen konstant« ist. Für eine Abweichung von diesem konstanten Wert müssten nämlich sozusagen so viele Dimensionen konspirieren, dass die Wahrscheinlichkeit dafür verschwindend gering ist.

Auch das Lemma von Johnson und Lindenstrauss hat eine überaus praktische Anwendung. Diesmal sind die Koordinaten des Raums die Wörter einer Sprache; da kommen mit Leichtigkeit 10000 Dimensionen zusammen. Aus einem in dieser Sprache verfassten Dokument gewinnen wir einen Vektor im Sprachraum, indem wir auszählen, wie oft jedes Wort vorkommt. Zwei Dokumente gelten dann als ähnlich, wenn ihre Vektoren nah benachbart sind – ein grobes Maß für Ähnlichkeit, weil es jeden Zusammenhang zwischen den Wörtern eines Textes ignoriert, aber gut genug für Computerprogramme wie den Suchalgorithmus von Google. Einige Verfeinerungen sind noch erforderlich; so muss man alle Vektoren auf Einheitslänge zurechtstutzen, weil sonst ein langes und ein kurzes Dokument mit denselben relativen Worthäufigkeiten nicht als ähnlich erkannt würden.

Wenn es nun darum geht, neue Dokumente mit einem nicht allzu großen Vorrat an bekannten Dokumenten abzugleichen, macht sich das Lemma von Johnson und Lindenstrauss nützlich: Man suche zu den Punkten, die den bekannten Dokumenten entsprechen, einen geeigneten Fotografierstandpunkt. Daraufhin kann man sämtliche späteren Suchanfragen in einem Raum niedrigerer Dimension mit entsprechend geringerem Rechenaufwand erledigen. Für eine Datenbanksuche kann das den Unterschied zwischen brauchbar und unbrauchbar ausmachen.

»Big Data« ist ein bedeutendes neues Teilgebiet der Informatik. Seit Daten in ungeheuren Mengen vorliegen – DNA-Sequenzen, Messergebnisse der Hochenergiephysik und der Astronomie, Satellitenaufnahmen der Erde, Dokumente und Bilder im Internet, Facebook-Profile, E-Mail- und Telefonverbindungs-Daten –, wächst das Bedürfnis, eine Übersicht darüber zu gewinnen und möglichst auch wertvolle Informationen aus dem Datenhaufen zu ziehen. Da ist es hilfreich, wenn man sich in den hochdimensionalen Räumen etwas auskennt, in denen diese Daten leben.

Und wie jede mathematische Abstraktion fragt die Geometrie in 10000 Dimensionen weder nach der Bedeutung der Daten noch nach dem Zweck der Datenanalyse. Das Bild von der Mathematik als der Magd, die jedermann dienstbar ist, trifft hier in besonderem Maß zu. Gehen wir davon aus, dass auch die National Security Agency in ihrem unermüdlichen Bemühen um Erkenntnisgewinn in hochdimensionalen Räumen unterwegs ist. ∞

DER AUTOR



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

QUELLEN

Halevy, A.: Old Tails and New Trails in High Dimensions. In: The College Mathematics Journal 44, S. 48–52, 2013

Hopcroft, J., Kannan, R.: Foundations of Data Science. Buch in Vorbereitung, vorläufige Fassung unter www.cs.cornell.edu/jeh/NOSOLUTIONS90413.pdf

Matoušek, J.: Lectures on Discrete Geometry. Springer, New York 2002. Darin Kapitel 13 »Volumes in High Dimension« und 14 »Measure Concentration and Almost Spherical Sections«; Liste von Korrekturen unter kam.mff.cuni.cz/~matousek/dg-err.html

WEBLINK

Dieser Artikel sowie Hinweise auf weitere Webseiten im Internet: www.spektrum.de/artikel/1210970

Die globalen Folgen der Luftverschmutzung

Winde und Wolken können lokal freigesetzte Substanzen und Schadstoffe, die durch chemische Reaktionen in der Atmosphäre daraus hervorgehen, über große Teile der Erde verteilen. Solche Luftverunreinigungen beeinflussen dann weltweit sowohl die Niederschläge als auch das Klima.

Von Brice Barret und Fabien Solmon

Bei starker Hitze gibt es im Sommer regelmäßig Warnungen wegen erhöhter Ozonwerte in der Luft. Gesundheitsrisiken bestehen besonders für empfindliche Bevölkerungsgruppen wie Kinder, Senioren und Menschen mit Atemwegserkrankungen. Nach jüngsten Modellrechnungen einer Forschergruppe um Raquel Silva von der University of North Carolina in Chapel Hill verursacht bodennahes Ozon weltweit jährlich 470 000 Todesfälle. Schon 1999 hatte das Umwelt- und Prognose-Institut (UIP) in Heidelberg ermittelt, dass in Deutschland zwischen 1990 und 1995 fast 4000 Menschen im Jahr – vorwiegend Alte und Kranke – wegen zu hoher Ozonbelastung gestorben sind.

Ein reizendes Gas

Das aggressive Reizgas zählt zusammen mit Aerosolen, also Schwebeteilchen wie Staub, Ruß und Säuretröpfchen, zu den wichtigsten Luftverunreinigern. Bei beiden Substanzgruppen beruhen Verteilung und Spitzenwerte der Schadstoffe auf komplexen Wechselwirkungen zwischen chemischen sowie thermo- und fluiddynamischen Prozessen. Die Vorläufersubstanzen stammen aus verschiedenen Quellen, sowohl natürlichen als auch vom Menschen erzeugten. Sie werden vom Wind verfrachtet, mittels fotochemischer Reaktionen in die betreffenden Schadstoffe umgewandelt und irgendwann schließlich durch Niederschläge ausgewaschen.

Vorher aber können sie weite Wege zurücklegen – manchmal von einem Kontinent zum nächsten oder sogar rund um den Erdball. Insofern hat die Luftverschmutzung, die oft als lokales oder regionales Problem empfunden wird, eine weltweite Dimension. Vor Ort ergriffene Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität sind dadurch nicht immer so wirksam wie erhofft. Um Luftverschmutzungen zutreffend

vorhersagen und gegebenenfalls begrenzen zu können, müssen die Verantwortlichen die Rolle von Wind und Wolken genau verstehen. Nicht zuletzt beeinflussen Ozon und Aerosole auch Wetter und Klima.

Ozon entsteht in einem komplizierten fotochemischen Zyklus, an dem zwei Gruppen primärer Schadstoffe beteiligt sind: zum einen die Stickoxide NO und NO_2 , gemeinsam als NO_x bezeichnet, sowie zum anderen Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige organische Verbindungen wie Methan (CH_4). Eine wichtige Rolle spielt außerdem das Hydroxylradikal OH als bedeutendstes Oxidationsmittel in der Troposphäre, der etwa acht Kilometer hohen unteren Atmosphärenschicht, in der sich das Wetter abspielt (siehe linke Grafik S. 82).

Sonnenlicht spaltet NO_2 in NO und Sauerstoffatome, von denen sich ein Teil mit Luftsauerstoff zum Ozon verbindet. Ein anderer Teil reagiert mit Wasser zu Hydroxylradikalen, die unter Mitwirkung von flüchtigen organischen Verbindungen oder von Kohlenmonoxid NO_2 aus NO zurückbilden, ohne selbst dabei verbraucht zu werden.

Das Hydroxylradikal und die Stickoxide wirken somit als Katalysatoren, das heißt Reaktionsbeschleuniger. Letztere dürfen allerdings nicht in zu hoher Konzentration vorliegen, da sie Ozon auch zersetzen können. Je nach der Höhe über dem Meeresspiegel liegt die optimale NO_x -Konzentration für die Ozonbildung zwischen einigen Teilen pro Milliarde oder pro Trillion. Der Reaktionszyklus endet, wenn die Hydroxylradikale oder die Stickoxide chemisch abgefangen und durch Niederschläge aus der Luft ausgewaschen werden.

Durch Turbulenzen in der atmosphärischen Grenzschicht, die vom Boden rund zwei Kilometer hoch reicht, werden die an der Oberfläche ausgestoßenen Schadstoffe rasch verwirbelt. In der Höhe weht ein stärkerer Wind, der die

dorthin verfrachteten Substanzen rasch über größere Entfernungen transportieren kann. Dies gilt insbesondere im Umfeld der Strahlströme (Jetstreams): mehrere hundert Kilometer breiten Bereichen in 6 bis 15 Kilometer Höhe, in denen die Windgeschwindigkeit meist mehr als 100 und im Extremfall bis zu 360 Kilometer pro Stunde beträgt. Allerdings gelangen verunreinigte Luftmassen gewöhnlich nur dann über die Grenzschicht hinaus, wenn sich Wolkensysteme bilden, die mit einem starken Aufwind einhergehen. Ausnahmen sind Gebirgsregionen, deren Relief die Luft zum Aufstieg zwingt.

Je nach Jahreszeit und Region entstehen unterschiedliche Typen von Wolkensystemen. In den Tropen – sowie im Sommer auch in den mittleren Breiten – kommt es zu einer thermodynamischen Instabilität, wenn feuchtwarme Luftmassen aufeinandertreffen, so dass sie angehoben werden.

AUF EINEN BLICK

PER EXPRESS UM DEN GLOBUS

1 In die Luft geblasene Schadstoffe unterliegen vielerlei Einflüssen. Sie wandeln sich durch **chemische Reaktionen** um und werden von Wind und Wolken verfrachtet. Dabei können sie Ozeane überqueren und von einem Kontinent zum anderen gelangen.

2 Ihre Auswirkungen sind vielfältig und je nach Höhe zum Teil sogar entgegengesetzt. Manche **Schadstoffe** bedrohen die **Gesundheit** oder schaden **Ökosystemen**. Andere greifen die **Bausubstanz** an.

3 Luftverunreinigungen beeinflussen auch Wetter und Klima. So können sie die Temperatur sowie die **Wolkenbildung** und die **Niederschlagsmenge** verändern. Selbst über die **Wirbelsturmaktivität** entscheiden sie unter Umständen mit.



Fabrikschlote sind eine berüchtigte Quelle von Luftschadstoffen.

SHUTTERSTOCK / ANDREY GURIANOV

Durch Kondensation und Gefrieren von Wasserdampf bilden sich dann Wolken. Dabei wird latente Energie – die Verdampfungs- oder Sublimationsenthalpie – freigesetzt, was die Luftmassen erwärmt und weiter aufsteigen lässt. Dieser als tiefe Konvektion bezeichnete Vorgang erklärt die Bildung von Gewitterwolken (Cumulonimbus), die sich in den Tropen bis zu 18 Kilometer hoch auftürmen können.

In den mittleren Breiten reihen sich die konvektiven Wolkensysteme gewöhnlich entlang der Kaltfront von Tiefdruckzellen aneinander. An deren Vorderseite wird auf einer Strecke von einigen tausend Kilometern feuchtwarme Luft angehoben. Dieser Vorgang zieht sich bis zu zwei Tage hin; in den Tropen erfolgt der Aufstieg hingegen innerhalb weniger Minuten.

Die Luftmassen im Inneren der Wolken sind von der Umgebung weit gehend abgeschottet. Das Mischungsverhältnis der mitgeführten chemischen Substanzen bleibt deshalb erhalten, sofern diese lange genug beständig sind – weshalb kurzlebige chemische Verbindungen wie NO_x die höheren Luftschichten nur bei tropischer Konvektion erreichen.

Auch wasserlösliche Luftbestandteile gelangen in konvektiven Wolkensystem nicht sehr weit, weil sie durch Nieder-

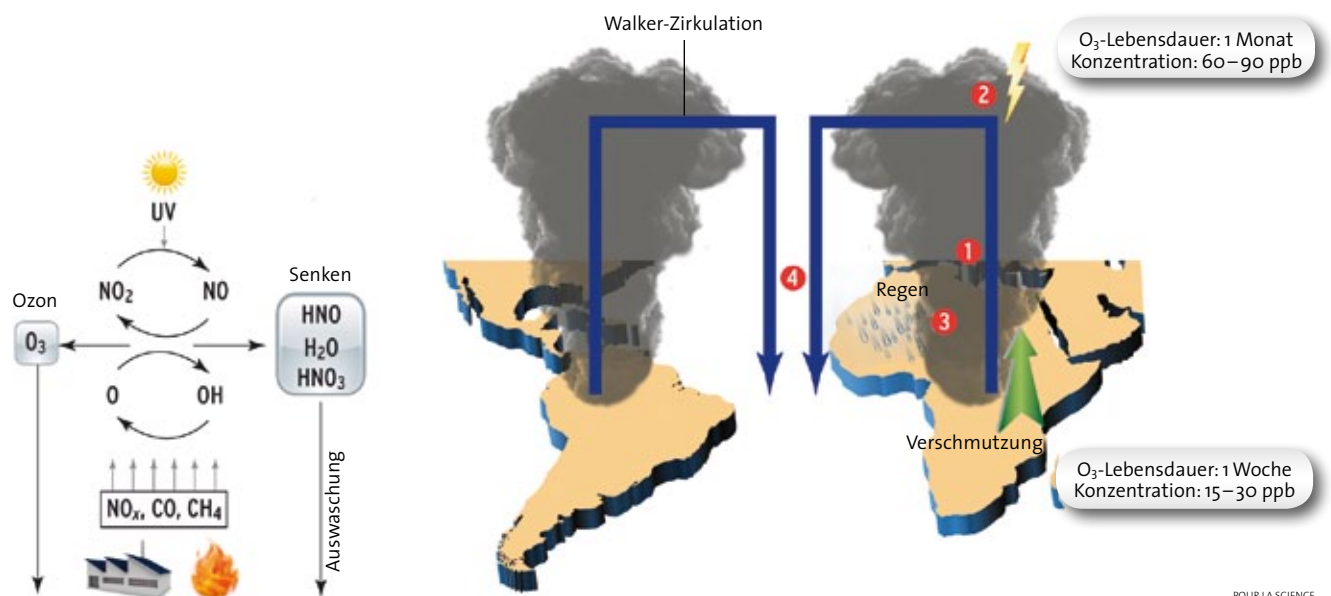
schläge ausgewaschen werden. Auf Ozon und Kohlenwasserstoffe trifft das nicht zu, wohl aber auf lösliche Substanzen, die aus Vorläufern des Ozons entstehen können. Diese bilden daher Ozonsenken; denn sie entziehen dem Reaktionskreislauf wichtige Komponenten. So ist etwa die Salpetersäure (HNO_3), die bei der Reaktion von NO_2 mit einem OH-Radikal entsteht, die größte Senke für Stickoxide in der Atmosphäre und – neben Schwefelsäure – der Hauptbestandteil des sauren Regens.

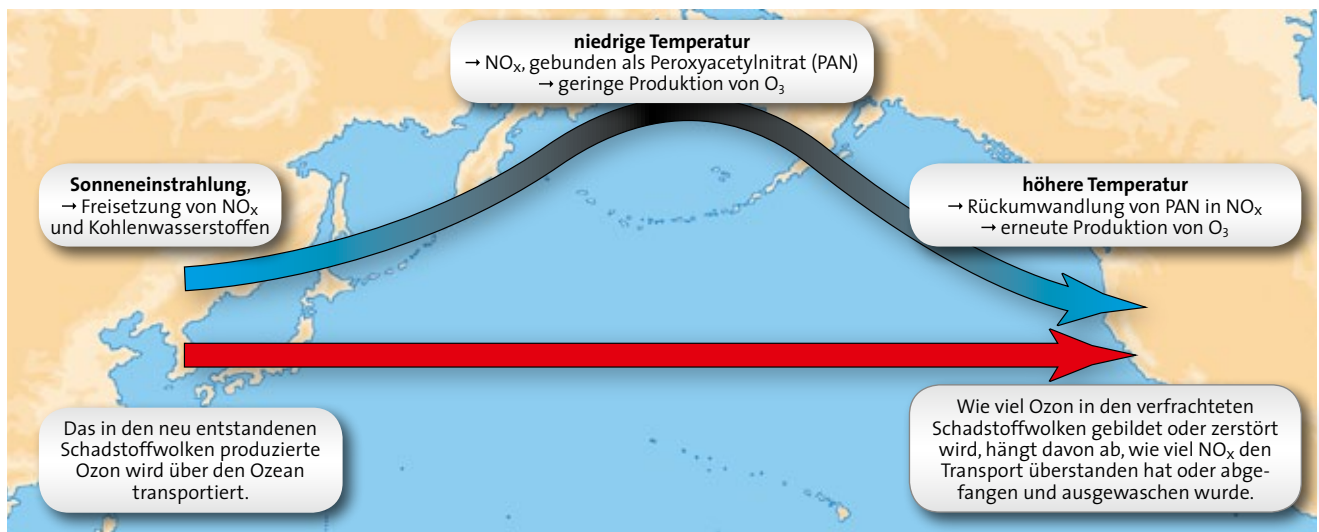
Ozonverteilung in den Tropen

Ein großer Teil der Ozon-Vorläufer stammt vom Menschen. Stickstoff kommt in der Atmosphäre normalerweise nur als reaktionsträges zweiatomiges Molekül (N_2) vor. Bei hohen Temperaturen, wie sie etwa bei der Zündung des Treibstoff-Luft-Gemischs in einem Verbrennungsmotor auftreten, wird das Molekül jedoch gespalten, und der resultierende monoatomare Stickstoff verbindet sich mit Sauerstoff zu Stickoxiden. Diese werden in modernen Kraftfahrzeugen zwar vom geregelten Dreiwegekatalysator aus den Abgasen entfernt. Trotzdem stammen die meisten Stickoxide in der Atmo-

Ozon (O_3) entsteht in einem fotochemischen Kreislauf (links). Dabei wird ein Stickstoffdioxid-Molekül (NO_2) durch ultraviolette Sonnenstrahlen in Stickstoffmonoxid (NO) und ein Sauerstoffatom gespalten, das sich mit einem O_2 -Molekül zu einem O_3 -Molekül oder mit einem Wassermolekül zu zwei OH-Radikalen verbindet. Diese schließen den Zyklus, indem sie über die Oxidation von Verbrennungsprodukten wie Kohlenmonoxid (CO) oder von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC nach englisch: volatile organic compounds) unter Beteiligung von Sauerstoff das NO in NO_2 zurückverwandeln. Der Kreislauf bricht ab, wenn sich die Stickoxide oder OH-Radikale durch Reaktion miteinander oder mit anderen Stoffen in wasserlösliche Verbindungen wie Salpetersäure (HNO_3) verwandeln, die vom Regen ausgewaschen

werden. Hochreichende Konvektionszellen beeinflussen die vertikale wie auch die horizontale Verteilung des Ozons (rechts). Sie lassen ozonarme Luft aus tiefen Schichten (1), die über den Kontinenten stark mit primären Schadstoffen wie VOC und CO verunreinigt ist, in die obere Troposphäre aufsteigen, wo Blitze aus Stickstoff und Sauerstoff Stickoxide erzeugen (2). Damit existieren dort günstige Voraussetzungen für die fotochemische Bildung von Ozon. Wasserlösliche Reaktionsprodukte werden durch Niederschläge ausgewaschen (3). Die tropische Walker-Zirkulation verfrachtet die Luftmassen aus Afrika und Südamerika schließlich hinaus auf den Atlantik, wo sie absinken (4). Deshalb ist dort die Ozonkonzentration besonders hoch, obwohl an Ort und Stelle keine Luftschadstoffe gebildet werden.





Schadstoffe wie Ozon oder Stickoxide können in verschiedenen Höhen von einem Kontinent zum anderen gelangen. In Luftschichten unterhalb von 2000 Metern (rot) geschieht das allerdings sehr langsam. Viel schneller ist der Transport, wenn die

Luftverunreinigungen vor Tiefdruckzellen aufsteigen, dann in der mittleren (blau) und oberen Troposphäre (schwarz) von so genannten Strahlströmen mitgenommen werden und später wieder absinken.

sphäre aus der Verbrennung fossiler Energieträger – etwa in Heizungen oder Kraftwerken.

In der oberen Troposphäre können auch Blitze den Luftstickstoff spalten. Die dabei erzeugten Stickoxide produzieren mehr Ozon als die an der Erdoberfläche gebildeten, weil sie in dieser Höhe länger beständig und dem Sonnenlicht stärker ausgesetzt sind. Allerdings ist die von Blitzen stammende NO_x -Menge schwer zu beziffern.

Stickoxide entstehen zudem durch Mikroben im Erdboden, wenn er von Niederschlägen durchfeuchtet ist. Bodenbakterien dürften im weltweiten Mittel für 15 Prozent des NO_x -Gehalts der Troposphäre aufkommen, in den Tropen sogar für 70 Prozent. Tropische Regionen sind überdies eine Hauptquelle anderer Luftschadstoffe. Die dort praktizierte Brandrodung verursacht beispielsweise 40 Prozent der weltweiten CO -Emissionen.

In den Tropen ist die untere Luftschicht relativ arm an Ozon, aber teils stark mit dessen Vorläufermolekülen befrachtet. Wird sie mit den Aufwinden in einer Gewitterwolke in die obere Troposphäre befördert, bilden sich dort durch Blitze zusätzlich Stickoxide. Dadurch herrschen in den aufgestiegenen Luftmassen günstige Bedingungen für die Bildung von Ozon. Am Rand der Wolke sinkt die ozonreiche Luft aus der oberen Troposphäre dann wieder ab und führt das aggressive Gas mit nach unten. In der Höhe gelangen die Schadstoffe aber teilweise auch in den Einflussbereich großräumiger Zirkulationssysteme. Das sind zum einen so genannte Hadley-Zellen mit einer polwärts gerichteten Strömung und zum anderen Walker-Zellen, die für einen Transport in östlicher und westlicher Richtung sorgen.

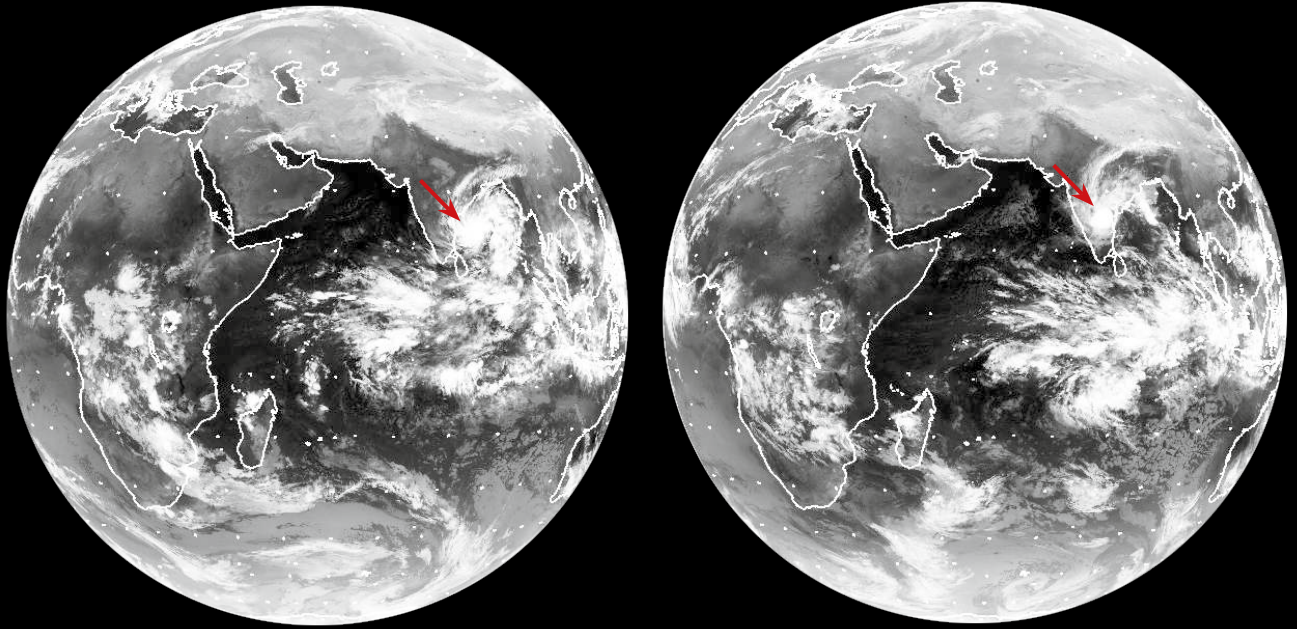
All das erklärt die beobachtete Verteilung des troposphärischen Ozons in den Tropen. Die Konzentration des Gases ist

über dem Atlantik am höchsten und über dem westlichen Pazifik am geringsten. Verantwortlich für das Maximum über dem Atlantik sind Stickoxide, die aus brennender Biomasse sowie von Blitzen über Afrika und Südamerika stammen. Sie geraten zusammen mit anderen Ozon-Vorläuferstoffen in den Sog der Walker-Zirkulation, die einen absteigenden Ast über dem Atlantik hat (siehe rechte Grafik unten).

Neueren Satellitenbeobachtungen zufolge können während des indischen Monsuns die Schadstoffe aus den unteren Luftschichten etwa 17 Kilometer hoch bis in die Stratosphäre aufsteigen. Mit ein Grund dafür ist zweifellos die vom Himalaja erzwungene ausgeprägte Konvektion; denn in anderen Monsunregionen wie Westafrika fällt der Aufstieg weit geringer aus. Die Schadstoffe geraten in großer Höhe unter den Einfluss eines vom asiatischen Monsun verursachten Hochdruckgebiets, dessen Zentrum über Tibet liegt. Ein Teil von ihnen wird dann durch den von Osten wehenden tropischen Strahlstrom bis ins östliche Mittelmeerbecken verfrachtet. Indem die belastete Luft im dortigen Hochdruckgebiet absinkt, trägt sie zum sommerlichen Ozonmaximum in dieser Region bei.

Die Rolle der Stürme

Durch tiefe Konvektion entstehen auch Stürme und tropische Zyklone über den Ozeanen. Sie werden allerdings durch feuchtwarmer Meeresluft genährt, die arm an Schadstoffen ist. Dadurch wirken sie genau umgekehrt wie die konvektiven Systeme, die sich während der Monsunzeit über den stärker verschmutzten Kontinenten entwickeln. So haben Satellitenbeobachtungen gezeigt, dass der Wirbelsturm Khai-Muk, der am 14. November 2008 im Golf von Bengalen entstand und bis zum 17. November ins Zentrum Indiens zog,



die untere Troposphäre über dem Subkontinent geradezu von Ozon gereinigt hat (Bilder oben).

Die meisten Luftschadstoffe werden in den mittleren Breiten der Nordhalbkugel, also in Nordamerika, Europa und Ostasien, von den dort vorherrschenden Westwinden in östlicher Richtung zum nächstgelegenen Kontinent verfrachtet. Für den vertikalen Transport von Luftmassen und damit auch von Schadstoffen sorgen dabei, wie schon erwähnt, Tiefdruckgebiete, die entlang der Sturmzugbahnen von West nach Ost driften.

Regionen mit starker Luftverschmutzung befinden sich vor allem an den Ostküsten Nordamerikas und Asiens. Hier befördert der warme Luftstrom vor den Tiefdruckzellen an der Westflanke oberflächennaher Hochdruckgebiete, in denen sich bei Windstille fotochemischer Smog anhäufen kann, die Schadstoffe in große Höhen. Die belasteten Luftmassen überqueren dann mit dem Strahlstrom den Atlantik in drei Tagen und den Pazifik in etwa einer Woche.

Ein Teil der Stickoxide reagiert unterwegs mit Peroxysäureradikalen, die bei der fotochemischen Oxidation flüchtiger Kohlenwasserstoffe entstehen. Dabei bildet sich Peroxyacetylnitrat (PAN), eines der Hauptreservoirs für NO_x . Das nicht wärmebeständige PAN kann in großer Höhe bei den dort herrschenden niedrigen Temperaturen über weite Strecken verfrachtet werden. Es zersetzt sich wieder in seine Bestandteile, sobald die Luftmassen in die unteren Atmosphärenbereiche absinken.

Die Schadstoffe können auch in der unteren Troposphäre die Ozeane überqueren. Das dauert jedoch wesentlich länger, so dass die Stickoxide den Transport nicht überleben.

Die Luftverschmutzung im östlichen Nordamerika und in Ostasien trägt also erheblich zur bodennahen Ozonkonzentration in Europa beziehungsweise im Westen Nordamerikas bei.

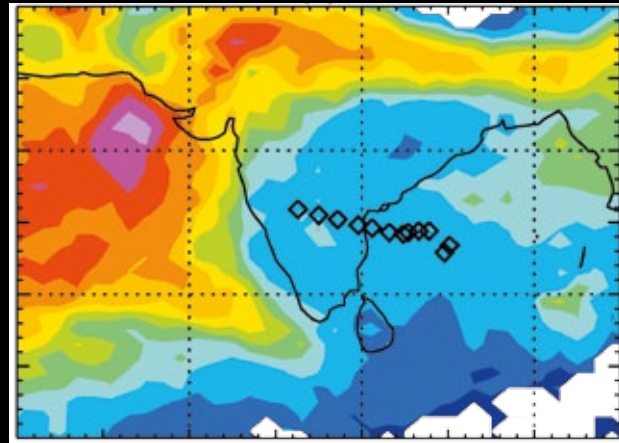
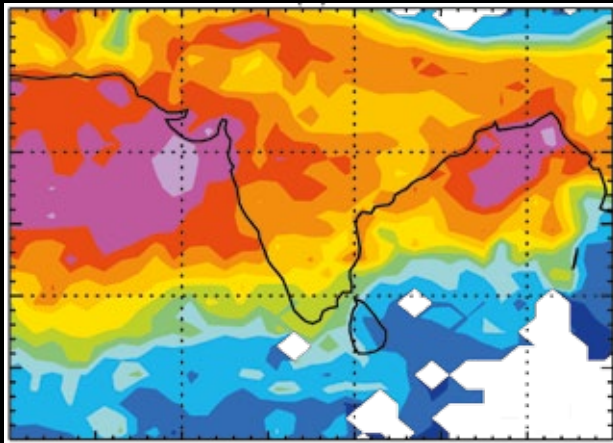
Der interkontinentale Transport kann dabei auch für die Überschreitung der behördlich empfohlenen Ozongrenzwerte verantwortlich sein. So bewegt sich der lokal verursachte Ozongehalt der bodennahen Luft in Europa an heißen Sommertagen im Bereich von 100 Mikrogramm pro Kubikmeter. Ein zusätzlicher Beitrag aus Nordamerika kann die Konzentration des Gases leicht über den Grenzwert von 120 Mikrogramm pro Kubikmeter anheben, den die Europäische Kommission 2010 festgelegt hat.

Kleine Partikel mit großer Wirkung

Aerosole sind nicht nur potenziell gesundheitsschädlich, sondern haben zugleich direkte sowie indirekte Auswirkungen auf das Klima. Erstere ergeben sich aus Wechselwirkungen der Partikel mit der atmosphärischen Strahlung, letztere aus ihrem Einfluss auf die Bewölkung.

Aerosole streuen und absorbieren sowohl das Sonnenlicht als auch die thermische Infrarotstrahlung der Atmosphäre. In welchem Ausmaß sie das tun, hängt ganz entscheidend von der Größe der Teilchen im Verhältnis zur Wellenlänge der einwirkenden Strahlung ab. Stimmen beide überein, ist die Streuung maximal. Das trifft auf Partikel im Submikronbereich zu; denn das Energiemaximum des Sonnenlichtspektrums liegt bei einer Wellenlänge von ungefähr 0,5 Mikrometern.

Stark streuende Teilchen werfen einen großen Teil des Sonnenlichts in den Weltraum zurück. Stark absorbierende Partikel schwächen die einfallende Sonnenstrahlung ebenfalls ab; allerdings verschlucken sie das Licht, statt es ins All zu reflektieren. Ein Beispiel ist Ruß, der bei unvollständiger Verbrennung entsteht.



zunehmende Ozonwerte

Im November 2008 zog der Zyklon Khai-Muk über Indien (links). Die Satellitenbilder zeigen ihn (rote Pfeile) am 14. November über dem Golf von Bengalen (links) und am 16. über dem Zentrum des Subkontinents. Wie aus Daten des Weltrauminstruments IASI an

Bord des Satelliten Metop-A hervorgeht (rechts), hat er Indien regelrecht vom Ozon leer gefegt. Die linke Karte stammt aus der Zeit vom 10. bis 12. und die rechte vom 16. bis 18. November. Die Zugbahn des Zyklons ist durch schwarze Rauten markiert.

Bei Tag werfen Aerosolpartikel mehr einfallendes Sonnenlicht zurück, als sie von der Erdoberfläche ausgesandte Infrarotstrahlung absorbieren. Deshalb wirken sie kühlend. Klimatologen sprechen von einem negativen Strahlungsantrieb. Bei Nacht verhält es sich umgekehrt: Weil kein Sonnenlicht auftrifft, die Aerosole aber die Wärmeabstrahlung der Erde teilweise absorbieren, wird ihr Strahlungsantrieb positiv. Normalerweise dominiert der abkühlende Effekt am Tag über den wärmenden in der Nacht.

Entscheidend für die klimatische Wirkung der Aerosole ist allerdings ihr Strahlungsantrieb am Oberrand der Atmosphäre (top of atmosphere, TOA). Dabei vergleicht man, wie viel Strahlung die Erde mit und ohne die Schwebeteilchen insgesamt in den Weltraum zurückwirft. Die Differenz steht für die Energie, die das System Erdoberfläche/Atmosphäre auf Grund der Aerosole gewinnt oder verliert. Bei einem positiven Strahlungsantrieb an der TOA wird die Erde erwärmt, bei einem negativen abgekühlt.

Regional hängen Vorzeichen und Stärke des Strahlungsantriebs nicht nur vom Verhältnis zwischen Absorption und Streuung durch die Aerosole ab, sondern auch von der Albedo (Helligkeit) der darunterliegenden Oberfläche. Ein absorbierendes Aerosol über einer hellen Region wärmt das System auf, während ein streuendes über einem dunklen Untergrund abkühlend wirkt. So hat Wüstenstaub, der mäßig stark absorbiert, über hellen Wüstengebieten einen positiven Strahlungsantrieb, aber einen negativen, sobald er auf das Meer hinausgeweht wird.

Global gesehen, dürften die unmittelbaren Auswirkungen von Aerosolen auf die irdische Strahlungsbilanz negativ sein. Sie wirken also abkühlend. Klimaforscher schließen daraus, dass die vermehrte Freisetzung von Aerosolen im Zuge der

Industrialisierung dazu beigetragen hat, einen Teil der weltweiten Erwärmung durch Treibhausgase zu kaschieren.

Der regionale Einfluss von Aerosolen auf das Klima hängt nicht nur von der Helligkeit der Oberfläche, sondern auch von den atmosphärischen Besonderheiten der jeweiligen Gegend ab. Es gibt Modellrechnungen für an der Erdoberfläche ansetzende Luftsäulen, die verschiedene Atmosphärenschichten erfassen, darunter eine aerosolhaltige. Diesen Simulationen zufolge kühlt sich die oberflächennahe Luft gewöhnlich ab, während sich die Aerosolschicht in einem Ausmaß erwärmt, das von der Konzentration und dem Absorptionsgrad der Schwebeteilchen abhängt. Die Aerosole verändern also das vertikale Temperaturprofil in der Luftsäule.

Durch die Abkühlung in Bodennähe verringert sich die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht, und der turbulente vertikale Austausch in ihr schwächt sich ab. Das gilt insbesondere für Regionen mit starker Luftverschmutzung. Hier zeigen Beobachtungen und Computermodelle teils eine regionale Abkühlung, die im Gegensatz zur allgemeinen globalen Erwärmung steht.

Bei instabiler Atmosphäre kann die Änderung des Temperaturprofils zudem Strömungen in der Luftsäule auslösen, welche die Störung verstärken. Der Bereich unterhalb der Aerosolschicht kühlt dann noch mehr ab, während die Konvektion gehemmt wird. Dagegen nimmt die Thermik oberhalb der Aerosolschicht zu. Das gilt vor allem dann, wenn diese Schicht relativ niedrig liegt und das Aerosol Sonnenlicht stark absorbiert.

Veränderte Bedingungen in der Luftsäule beeinflussen auch die Wolken, die ihrerseits die Strahlungsbilanz der Erde modifizieren. Daraus resultiert der indirekte Effekt der Aerosole auf das Klima.



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

www.spektrum.de/klima



Liegt eine Wolkendecke auf gleicher Höhe wie eine absorbierende Aerosolschicht, neigt sie dazu, sich aufzulösen, weil die lokale Erwärmung die Wassertröpfchen verdunsten lässt. Stattdessen bilden sich bevorzugt Wolken in größerer Höhe, wo eine gesteigerte Thermik herrscht. Befindet sich dagegen eine niedrige Wolkendecke unterhalb der Aerosolschicht, dann nimmt ihre Dicke zu. Denn die trockenen Luftschichten darüber werden von den Sonnenlicht absorbierenden Schwebeteilchen erwärmt, steigen auf und ziehen die tiefere feuchtwarme Luft mit in die Höhe.

Braune Wolke über Asien

Da Aerosole eine begrenzte Lebensdauer haben, konzentrieren sie sich gewöhnlich an ihrem Ursprungsort. Deshalb sind sie sehr ungleichmäßig verteilt. Auch der mit ihnen verbundene Strahlungsantrieb variiert folglich stark von Ort zu Ort. Hohe Anreicherungen finden sich über den Großstädten sowie über Wald- und Buschregionen in Afrika und Südamerika, in denen Brandrodungen häufig sind. Außerdem gibt es Phänomene wie die Sahara-Aerosole oder die »braune Wolke« über Asien – eine Ansammlung von Rußpartikeln, die regelmäßig den Indischen Subkontinent, einen Teil Südostasiens und den Indischen Ozean bedeckt.

Die Aerosole interagieren dabei mit den regionalen Wetter- und Klimasystemen. Neueren Untersuchungen zufolge verstärkt die Anhäufung absorbierender Aerosole über Indien das Temperaturgefälle in den unteren Luftschichten zwischen der wärmeren Landmasse und dem kälteren Indischen Ozean. Dadurch strömt mehr feuchte Luft vom Meer zum Kontinent, was im Frühjahr die Monsunwinde verstärkt, so dass diese noch bis weit ins Landesinnere Regen bringen.

Weil die braune Wolke wie ein Sonnenschirm wirkt, verringert sie allerdings auch das Temperaturgefälle zwischen Nord- und Südindien sowie auf dem Meer zwischen dem Äquator und der indischen Küste. Dieser Effekt, der sich vor allem im Sommer bemerkbar macht, hemmt den Zustrom der Monsunwinde und reduziert die Niederschläge. Laut jüngsten Untersuchungen dürfte die steigende Emission von Aerosolen in Indien mit dazu beitragen, dass im Arabischen Meer vermehrt tropische Wirbelstürme auftreten.

Die Sahara-Aerosole verringern die Niederschläge über der Sahelzone, indem sie den afrikanischen Monsun schwächen. Durch ihre Kühlwirkung vermindern sie nämlich das

Temperaturgefälle zwischen der Sahara und dem weiter südlich gelegenen Golf von Guinea, das den afrikanischen Monsun antreibt (siehe SdW 10/2013, S. 74). Geringere Niederschläge fördern aber die Entstehung von Wüsten und damit die Staubbildung. Diese positive Rückkopplungsschleife ist ein Teufelskreis, der für die Sahelzone nichts Gutes verheißt. Der Unterschied zum indischen Monsun beruht auf der Natur des Wüstenstaubs, der Sonnenlicht weniger stark absorbiert als der Ruß der braunen Wolke in Asien.

Schließlich können sich die von Aerosolen verursachten regionalen Änderungen der Strahlungsbilanz und Wolken-dynamik auch in weit entfernten Regionen bemerkbar machen, allerdings meist erst nach mehreren Jahren. Diese Effekte lassen sich mit allgemeinen Zirkulationsmodellen berechnen, die neben der Atmosphäre den Ozean einbeziehen und die verschiedenartigen Auswirkungen der Aerosole explizit berücksichtigen. Simulationen mit solchen Modellen legen beispielsweise einen Zusammenhang zwischen dem Spitzenwert für Schwefelaerosole auf der Nordhalbkugel und der Trockenheit in der Sahelzone in den 1980er Jahren nahe. Der Saharastaub wiederum scheint eine Rolle bei den mehrjährigen Temperaturschwankungen an der Oberfläche des Atlantischen Ozeans zu spielen, die unter anderem die Wirbelsturmaktivität in der Karibik beeinflussen.

All dies illustriert die weltweiten Auswirkungen lokal emittierter Schadstoffe. Die mit der Überwachung und Reglementierung von Luftverunreinigungen beauftragten Entscheidungsträger sollten sich dessen bewusst sein! ~

DIE AUTOREN

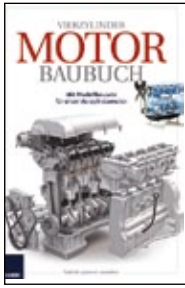


Brice Barret (links) arbeitet im Laboratorium für Aerologie (Höhenwetterkunde) an der Universität Paul Sabatier in Toulouse (Frankreich). **Fabien Solmon** ist am Internationalen Zentrum für Theoretische Physik in Triest (Italien) tätig.

QUELLEN

- Barret, B. et al.:** The Detection of Post-Monsoon Tropospheric Ozone Variability over South Asia Using IASI Data. In: Atmospheric Chemistry and Physics 11, S. 9533–9548, 2011
- Barret, B. et al.:** Transport Pathways of CO in the African Upper Troposphere during the Monsoon Season: A Study Based upon the Assimilation of Spaceborne Observations. In: Atmospheric Chemistry and Physics 8, S. 3231–3246, 2008
- Cooper, O.R. et al.:** Trace Gas Composition of Midlatitude Cyclones over the Western North Atlantic Ocean: A Seasonal Comparison of O₃ and CO. In: Journal of Geophysical Research 107, S. 4057–4069, 2002
- Zhang, L. et al.:** Transpacific Transport of Ozone Pollution and the Effect of Recent Asian Emission Increases on Air Quality in North America: An Integrated Analysis Using Satellite, Aircraft, Ozoneprobe, and Surface Observations. In: Atmospheric Chemistry and Physics 8, S. 6117–6136, 2008

Dieser Artikel im Internet: www.spektrum.de/artikel/1210966



Vierzylinder Motor Baubuch mit Bausatz

☎ (9-3381-9) **89.95**

Erkunden Sie, was unter der Motorhaube Ihres Autos steckt! Bauen Sie ein detailgetreues Motorenmodell mit transparentem Gehäuse, in dem alle Teile sich genau so bewegen wie beim großen Vorbild. Die Bauteile lassen sich einfach zusammenstecken und -schrauben – ganz ohne

Kleber. Entdecken Sie die Einzelteile des Motors und ihre Funktion. Das Komplettpaket enthält über 100 Bauteile und ein reich bebildertes Buch, das keine Fragen über Verbrennungsmotoren und ihre Einsatzmöglichkeiten offen lässt. Mit über 100 Bauteile, elektrischer Antriebsmotor, Starterbox, Zündverteiler und vieles mehr ... Noch nie war es so einfach, ein realistisches Motorenmodell zu bauen. Nur noch zwei 1,5-Volt-Batterien (Typ AA) einstecken, und schon kann es losgehen!



Genuss und Wissen!

Wissensbecher

je nur **9.95**



Diese Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan bringen Ihre grauen Zellen bereits am Morgen in Schwung! Material: Porzellan, Höhe: 10,5 cm, Durchmesser: 9 cm, Inhalt: 0,46 L, spülmaschinenfest.

Mathematik

☎ (9-3788-5)

Biologie

☎ (9-3789-0)

Farbenlehre

☎ (9-3789-1)

Chemie

☎ (9-3788-8)

Physik

☎ (9-3788-6)

Geschichte

☎ (9-3788-9)

Astronomie

☎ (9-3788-7)

Frank H. Netter:

Atlas der Anatomie

☎ (9-2522-6)

statt 94.95 nur **32.95**

Das Standardwerk zum Thema: Netter's Atlas der Anatomie beweist seit Jahren, dass Anatomie-Lernen auch locker sein kann. Die preisgekrönten Tafeln im typischen Netter-Stil führen von vereinfachten Darstellungen zu komplexen Strukturen. Detailreich beschriftet und von bestechender Klarheit und Präzision - so wird Anatomie greifbar! Über 2.000 aussagekräftige Abbildungen - viele Bildthemen sind über unterschiedliche Beschriftungen optimal verständlich dargestellt. (R) 640 S., durchg. Farbabb., Format 22 x 28 cm, kartoniert. (Urban & Fischer, 4. Aufl. 2008)



Alexander von Humboldt Die Entdeckung der Neuen Welt

☎ (8-8336-0)

2 Bände statt 128.- nur **24.90**

Die Entdeckung der Neuen Welt ist neben dem Kosmos das Hauptwerk

Alexander von Humboldts. Es bildet den Schlüsselstein seiner Amerikabücher, in denen er mit epischem Schwung seine große Amerikareise (1799-1804) auswertet. Erstmals seit der Veröffentlichung vor 170 Jahren liegt das Werk nun wieder auf deutsch vor – zusammen mit dem zugehörigen prächtigen Atlas von Humboldts eigenen und der von ihm erwähnten Karten. (R) 533 Seiten, zahlreiche Abbildungen & Karten, 24 x 31 cm, gebunden im Schmuckschuber. (Insel)



Platonische Körper Bergkristall in Holzschatulle

☎ (9-3086-4) statt 24.90 nur **19.90**

Die platonischen Körper wurden nach dem griechischen Philosophen Platon benannt. Es sind fünf besonders regelmäßige konvexe Polyeder (Vielflächner), die dadurch charakterisiert sind, daß ihre Seitenflächen zueinander kongruente regelmäßige Vielecke sind, von denen in jeder Ecke jeweils gleich viele zusammentreffen. Ihre Namen bezeichnen im Griechischen die Anzahl ihrer Flächen: Tetraeder (4 Dreiecke), Hexaeder (6 Quadrate), Oktaeder (8 Dreiecke), Dodekaeder (12 Fünfecken) und Ikosaeder (20 Dreiecke). In Platons Weltbild symbolisieren vier Körper die vier Elemente und der Dodekaeder (als einziger nicht aus Dreiecken aufbaubar) das Weltall. Maße: Schatulle: 17,5 x 3,5 x 5 cm, Material: Holz, Platonische Körper: 2,5 cm, Material: Bergkristall, bruchsicher verpackt.



Das elegante Universum

DVD im Schuber

(8-5288-0)

12.99

Der Grundgedanke der String-Theorie ist faszinierend und wunderschön: Alles in unserer Welt, von den kleinsten Atomen bis zu den entferntesten Galaxien, ist aufgebaut aus unvorstellbar kleinen, schwingenden Fäden aus purer Energie, den Strings. Und es sind die unterschiedlichen Schwingungen der Strings, die alle Materie und alle Energien bestimmen – das Universum, eine kosmische Symphonie. Ca. 2 1/2 Stunden.



Th. Gray

Die Elemente

Bausteine unserer Welt

☎ (9-3085-9)

statt Originalausgabe

29.95 jetzt als

Sonderausgabe

nur **14.99**

„Die Elemente“ ist eine Kombination aus atemberaubender Bildsprache und verständlicher Wissenschaft. Angeordnet nach der Reihenfolge des herkömmlichen Periodensystems, bekommt jedes Element ein doppel-seitiges Schaufenster mit einer großflächigen Fotografie, die den 'Baustein unserer Welt' in seiner ursprünglichen Form zeigt. 240 Seiten, 500 Farbabbildungen, Format 25 x 25 cm, gebunden.



A.L.G.

Bayle:

La Médecine Pittoresque

Farbige Tafeln aus der Medizin

☎ (9-1555-4)

statt 29.95 nur **7.95**

Das legendäre Werk entstand 1834

unter der Leitung von Doktor A.L.G. Bayle und versammelt das anerkannte medizinische Wissen seiner Zeit in diesen prachtvollen Tafeln. Ein Klassiker von großem künstlerischem Wert. 192 Seiten, durchg. großformatige Farbtafeln, Format 29 x 39 cm, geb.

Sonderangebot

Science-Shop.de

bei Mail:Order:Kaiser

Postfach 80791 München

Tel. 0180 5 34 17 34*

Fax 0180 5 33 33 23*

info@science-shop.de

Name, Vorname

Straße

PLZ/Ort

Datum / Unterschrift SciNet13/2

Stück ☎ Bestellnummer/Titel

Stück	☎ Bestellnummer/Titel

Lieferung bequem per Rechnung (Bonität vorausgesetzt)

Versandkostenanteil: 4.95 € (in Deutschland)

Alle Preise in Euro inkl. MwSt. und zzgl. Versandkosten

Volles Rückgaberecht für 14 Tage



COMPUTERTECHNIK

Das wahre Auto-Mobil

Der Traum vom Auto, das auf Zuruf fahrerlos herbeieilt und seine Passagiere selbsttätig zum Ziel bringt, rückt näher. Noch fällt es einem solchen Roboter allerdings schwer, ein freundliches Handzeichen richtig zu interpretieren.

Von Raúl Rojas

Autonome Fahrzeuge sind zurzeit in aller Munde. Verschiedene Autofirmen haben in den letzten beiden Jahren neue Entwicklungsprogramme für Fahrassistenzsysteme gestartet, die speziell für die Autobahn oder auch die Stadt zugeschnitten sind und Menschen von der Mühe des Fahrens teilweise oder sogar vollständig entlasten würden. Manche Hersteller reden über den »Autopiloten«, der ab dem Jahr 2020 zur Verfügung stehen soll. Der Fahrer lehnt sich auf der Autobahn zurück und übergibt die komplette Steuerung an einen Bordcomputer. Das Auto hält zum Beispiel mit Hilfe von Videokameras und Radar die Spur ein und reguliert seine Geschwindigkeit in Anpassung an die des Vorausfahrenden. Sogar Spurwechsel sind möglich. Allerdings sollte der Fahrer an der Ausfahrt wieder die Kontrolle übernehmen. Solche Systeme scheinen mit der Technik von heute realisierbar.

Ein wirklich autonomes Fahrzeug ist jedoch ein deutlich anspruchsvolleres Konzept. Es handelt sich im Wesentlichen um ein Taxi, wobei der Taxifahrer ein Computer ist. Diese Vision eines selbstständig fahrenden Vehikels ist keineswegs neu. Bereits am Anfang des Autozeitalters, 1918, wurde sie in einem Artikel im »Scientific American« ausgebreitet (Bild rechts) – Jahrzehnte bevor man an dafür erforderliche Computer und Sensoren überhaupt denken konnte!

Die Einführung autonomer Fahrzeuge wird das Straßenbild der Städte radikal verändern. Im 19. Jahrhundert, als es

noch kaum Autos gab, waren die Straßen leer und für Fußgänger und Pferdekutschen reserviert. Im 20. Jahrhundert haben dann Autos eine immer größer werdende Fläche für sich beansprucht. Die Blechlawine ist aber nur zu einem geringen Teil in Bewegung, da ein Auto bis zu 95 Prozent der Zeit am Straßenrand oder in der Garage steht. Selbstfahrende Fahrzeuge könnten die Straßen wieder befreien.

Unsere Vision ist, dass ein Stadtbewohner weitestgehend auf das eigene Auto verzichtet. Stattdessen benutzt er öffentliche Verkehrsmittel und mietet nur bei Bedarf ein Auto oder auch nur einen Platz in einem solchen – im Prinzip wie bei den bereits eingeführten Car-Sharing-Organisationen, allerdings in viel größerem Maßstab. Vor allem muss er sein Fahrzeug nicht abholen oder zurückbringen – es kommt zu ihm und macht sich nach getaner Arbeit selbsttätig davon. Wer innerhalb der Stadt einen Weg zurücklegen möchte, bestellt mit einem Handy oder einem anderen Mobilgerät eine Fahrt unter Angabe von Standort und Ziel. Daraufhin holt ihn das nächste Fahrzeug ab, das dieselbe Route fährt und noch freie Plätze hat. Eine solche Dienstleistung wäre mit einer Flatrate (»Monatskarte«) zu bezahlen. Der Fahrgast müsste vielleicht gelegentlich umsteigen oder einen kleinen Zeitverlust in Kauf nehmen, weil sein Fahrzeug einen anderen Fahrgast abholt oder absetzt. Wer sich das ersparen und das Fahrzeug ganz für sich haben möchte, zahlt einen Aufpreis wie für die erste Klasse bei der Bahn.

Der Transportbedarf einer Großstadt wie London oder Paris wäre mit weniger als einem Viertel des heute vorhandenen Fuhrparks zu decken. Die Stadtbewohner würden keine Mobilität verlieren, im Gegenteil: Der Verkehr würde schneller fließen, und die Fahrzeiten wären insgesamt kürzer.

Ein autonomes Fahrzeug sollte im Prinzip ungefähr so viel kosten wie ein herkömmliches Auto und auch so aussehen; nur die Lenksäule wäre vielleicht nicht mehr vorhanden. Gegenüber dem heutigen Stand der Technik sind etliche Innovationen in den Bereichen Sensorik, Navigation und optimale Steuerung erforderlich. Neben der üblichen Fahrzeugmechanik braucht ein autonomes Fahrzeug:

AUF EINEN BLICK

BEFREIUNG VOM EIGENEN AUTO

1 Ein **autonomes Fahrzeug**, das sich ohne menschlichen Fahrer auch im Stadtverkehr sicher bewegt, fährt bereits als Prototyp durch Berlin.

2 Das Fahrzeug findet seinen Weg mit Hilfe von **GPS-Empfängern, Kameras** und **radarähnlicher Infrarotnavigation**.

3 Ein bisher ungelöstes Problem ist die **Erkennung von Intentionen und Gesten** der anderen Verkehrsteilnehmer.

- ein sehr genaues Positionierungssystem wie GPS oder Galileo;
- Sensoren für die Messung des Abstands zu anderen Fahrzeugen, zu Passanten und zu allen sonstigen Hindernissen, die unterwegs auftauchen könnten;
- die Fähigkeit, ein Kamerabild zumindest so weit zu interpretieren, dass es die Anzeige einer Ampel erkennen kann (»computer vision«);
- Telekommunikation mit anderen Fahrzeugen (»car-to-car«) und möglichst mit der Infrastruktur (»car-to-X«).

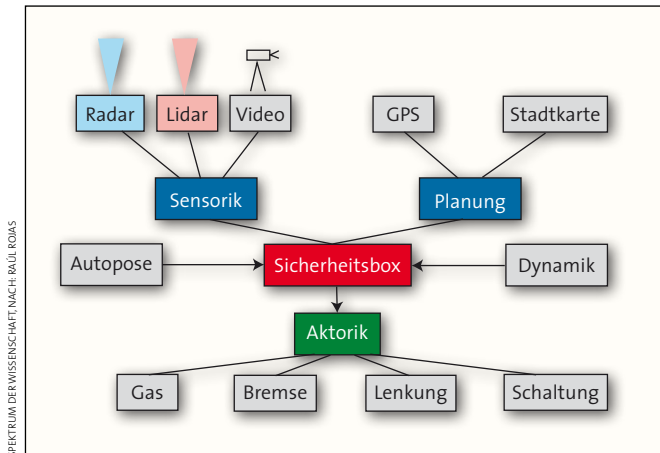
Für die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen gibt es prinzipiell zwei verschiedene Wege, die sich allerdings nicht grundsätzlich ausschließen. Entweder man stattet den im Auto eingebauten Computer mit menschenähnlichen Wahrnehmungs- (im Wesentlichen Seh-)Fähigkeiten aus und pro-

grammiert sein Fahrverhalten nach dem Vorbild eines menschlichen Fahrers. Oder man legt den Schwerpunkt auf die Kommunikation der Fahrzeuge untereinander und mit der Umgebung. Jedes Fahrzeug würde dann allen anderen in der Nähe seine gegenwärtige Position mitteilen, jede Ampel würde per Funk melden, ob sie rot oder grün ist, und kleine, im Bedarfsfall aufzustellende Sender geringer Reichweite könnten Baustellen ankündigen.

Im ersten Fall hätten die Besitzer der Autos, also in der Regel die Betreiber der Car-Sharing-Firmen, die Investitionen zu tragen, im zweiten Fall vorwiegend der Staat. Deswegen scheint momentan die erste Alternative realistischer, obgleich die zweite ungleich mehr und bessere Möglichkeiten bietet: Durch geschickt programmiertes Schwarmverhalten würden sich die Fahrzeuge ohne zentrale Steuerung so auf



Schon 1918 machte sich ein Autor namens C.H. Claudy im »Scientific American« Gedanken über ein selbsttätig fahrendes Vehikel, dessen Passagiere mit allem anderen als dem Straßenverkehr beschäftigt sind.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH RAULI ROMAS

Der Kontrollfluss für ein autonomes Fahrzeug. Die Meldungen der Positions- und Abstandssensoren und die Planungsdaten lösen nicht unmittelbar Aktionen aus. Vielmehr verarbeitet die Sicherheitsbox Informationen über die aktuelle Straßenlage (»Autopose«) sowie Geschwindigkeit und Beschleunigung (»Dynamik«) und greift ein, wenn Gefahr droht, zum Beispiel wenn bei hoher Geschwindigkeit eine starke Lenkbewegung geplant ist.

Das autonome Fahrzeug »MadelnGermany« ist ein VW Passat, dessen auffälligstes Merkmal der Laserscanner auf dem Dach ist. Zur Sicherheit sitzt ein Fahrer in Bereitschaft, rührt aber das Lenkrad – außer im Notfall – nicht an. Sein Beifahrer kontrolliert mit dem Laptop auf den Knien die Funktion des Systems.

die Straßen verteilen, dass ihr gegenseitiger Abstand und der Durchfluss (Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit) optimiert werden.

Abstandsmessung mit Radar hat in der Autoindustrie eine große Tradition. Ein Fahrzeug auf der Autobahn reflektiert Radarwellen so zuverlässig, dass das nachfolgende Auto daraus hinreichend genaue Informationen über dessen Position und Geschwindigkeit entnehmen kann. Viele Autofirmen experimentieren bereits mit mehreren Radargeräten, die rund um das ganze Auto verteilt sind und ihm dadurch eine Art Panoramablick verschaffen (Bild rechts unten).

Aus den Abständen und Geschwindigkeiten der benachbarten Fahrzeuge ermittelt der Bordcomputer das optimale Fahrverhalten für die nächsten Sekunden bis Minuten und setzt das in die Tat um, indem er durch Stellglieder (»Aktuatoren«) das Lenkrad sowie Gas- und Bremspedal betätigt. Die Information fließt nach dem Prinzip des Ethernet, mit dem Computer untereinander und mit Hilfsgeräten kommunizieren: Alle Geräte hängen an einer gemeinsamen Leitung, über die jeder Beteiligte Datenpakete schicken kann. Jeder liest nur die Pakete, die als erste Zeichen seine Adresse tragen.

Noch merken die Kunden es kaum; aber moderne Fahrzeuge, zumindest im oberen Preissegment, sind längst zu Robotern mutiert. So übermitteln häufig Brems- und Gaspedal ihre Stellung nicht mehr allein auf mechanischem Weg an die Bremse beziehungsweise den Motor. Vielmehr messen Drucksensoren die Stärke des Fußdrucks, woraufhin ein Mikrocontroller die notwendige Bremsstärke oder Kraftstoffmenge präzise einstellt. Es gibt auch schon Fahrzeuge, die mit Hilfe eines computergesteuerten Motors in der Lenksäule selbsttätig einparken können.

Im Flugzeug ist diese indirekte Form der Steuerung einschließlich der Möglichkeit für den Bordcomputer, korrigierend einzugreifen oder ganz die Kontrolle zu übernehmen, schon seit Jahren unter dem Namen »fly by wire« etabliert. Entsprechend heißt dieselbe Technik im Auto »drive by wire«. In wenigen Jahren werden damit ausgestattete Fahrzeuge die Mehrheit der Neuwagen ausmachen. Schon heute ist die gesamte Elektronik eines Fahrzeugs die aufwändigste Kompo-

nente, noch teurer als der Motorblock, mit dem sich bislang die Hersteller von der Konkurrenz abzusetzen pfliegen.

Um zu wissen, wo sie sind, arbeiten die meisten autonomen Fahrzeuge mit einem Global Positioning System (GPS). Dieses berechnet aus der Laufzeit der Funksignale von mehreren Satelliten, die auf bekannten Bahnen die Erde umkreisen, den Standort des Empfängers, allerdings typischerweise nur auf 10 bis 15 Meter genau und damit nicht präzise genug für eine robotische Navigation.

Auch der Computer fährt mit Navi

Verschiedene Maßnahmen verbessern die Genauigkeit:

- In der Nähe von Städten werden – vorrangig für Vermessungszwecke – immer mehr GPS-Bodenstationen installiert. Jede dieser Referenzstationen kennt naturgemäß ihre eigenen GPS-Koordinaten genau, misst durch Abgleich mit den empfangenen Satellitendaten Laufzeitunterschiede, die durch atmosphärische Störungen verursacht werden, und teilt sie über Funk den umliegenden GPS-Benutzern mit. Diese können mit Hilfe der erhaltenen Information ihren Positionsfehler auf einige Meter reduzieren (»differential GPS«).
- Ein verfeinerter Kilometerzähler zählt die Umdrehungen der Räder und bringt damit einen zusätzlichen Messwert in die Ortsberechnung ein.
- Beschleunigungssensoren und Gyroskope liefern weitere Daten.

Ein mathematisches Verfahren, das so genannte Kalman-Filter, findet durch Verknüpfen all dieser Messungen eine Position auf der Straße, die vielleicht weniger als einen Meter von der echten Position abweicht.

Über die präzise Ortsbestimmung hinaus braucht ein autonomes Fahrzeug eine Karte der Stadt, die jede Straße und jede Kreuzung mit ihren GPS-Koordinaten verzeichnet. Schon kleine Fehler in dieser Karte – etwa eine falsch eingetragene Linksabbiegerspur – wären für die autonome Navigation verheerend.

Hochgenaue GPS-Positionierung und präzise Karten sind notwendig, aber nicht hinreichend für die Steuerung eines Roboters in einer Stadt. Unsere Straßen und Parkplätze ent-

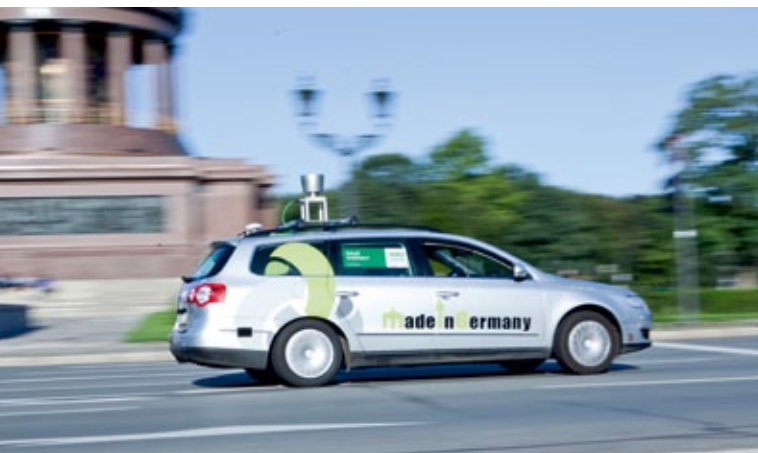


BILD: FOTOS: RAUL ROJAS

halten vor allem sichtbare Markierungen. Allgemein ist unsere Welt eine für Menschen visuell kodierte Umgebung. Daher braucht ein autonomes Fahrzeug auch Sehvermögen.

Sehen mit Infrarot

Das »Sehen« muss sich weder auf den sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums noch auf den passiven Empfang beschränken. Erfolgreich sind heute Systeme, die unsichtbare Infrarotimpulse aussenden und aus der Laufzeit von ausgehendem und reflektiertem Strahl die Entfernung des reflektierenden Objekts bestimmen – wie beim Radar, nur mit deutlich kürzerer Wellenlänge. In Analogie zu diesem heißt die Technik »Lidar« (light detection and ranging).

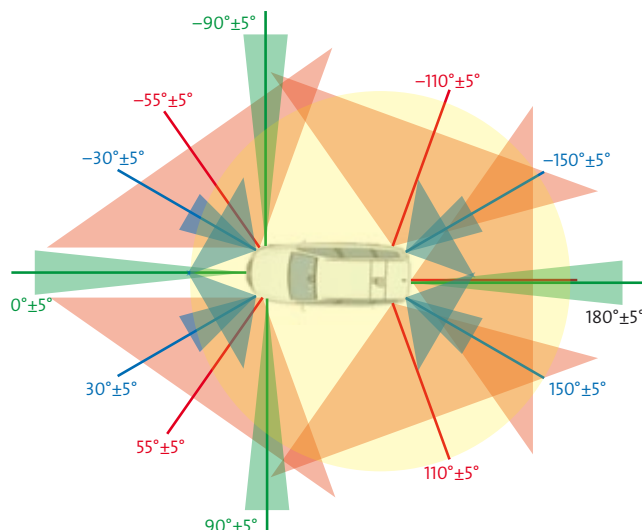
Ein Lidarsystem strahlt mit einer überschaubaren Anzahl von Infrarot-Laserdioden (LEDs) Pulse in so rascher Folge ab, dass man sie mit einem rotierenden Spiegel über einen großen Winkel verteilen kann – im Prinzip bis zu 180 Grad. Deswegen nennt man solche Geräte auch Laserscanner. Bis das Licht zurückkommt, ist der Spiegel nur so wenig weitergewandert, dass die Messung dadurch nicht gestört wird. Statt eines Spiegels kann man auch alle Laserdioden um eine zentrale Achse rotieren lassen. Diesen Ansatz verfolgt neben anderen die kalifornische Firma Velodyne Lidar, die Laserscanner mit 32 oder 64 LEDs produziert und damit 2007 bei der DARPA Urban Challenge, einem Wettbewerb für autonome Fahrzeuge, einen spektakulären Erfolg einfuhr.

Laserscanner geben dem Bordcomputer bis zu eine Million Messungen pro Sekunde zu interpretieren; so muss er aus einer großen Punktwolke eine zusammenhängende Fläche errechnen – die Rückseite des vorausfahrenden Fahrzeugs, die Hausmauer, die den Parkplatz begrenzt, oder einen Pasanten, den das System auch dann korrekt zu lokalisieren hat, wenn er dunkle Kleidung trägt. Lidarsysteme werden immer genauer, so dass Reichweiten von bis zu 100 Metern bei der Abstandsmessung nicht ungewöhnlich sind – bei Messfehlern im Zentimeterbereich. Sie sind allerdings blind für extrem nahe Objekte: Die entsprechend kurzen Lichtlaufzeiten kann das System nicht mehr korrekt bestimmen. Eine Kombination von Laserscanner und Radar bietet heute die besten

Fahrmöglichkeiten. Lidarsysteme haben eine sehr gute Winkelauflösung, so dass sie Hindernisse auf dem Fahrweg sehr gut lokalisieren können. Dagegen sind Radarsysteme besser bei der Bestimmung von Geschwindigkeiten. Aus beiden zusammen konstruiert der Computer eine genaue, dreidimensionale Karte der Umgebung, auf der die Position aller relevanten Hindernisse und ihre Geschwindigkeiten enthalten sind. Dabei kann er einen Großteil der Messungen gleich am Anfang wegwerfen: Da das autonome Fahrzeug seine Position kennt, braucht es Punktwolken außerhalb der Fahrbahn nicht zu beachten. Der Computer konzentriert sich auf die Objekte, die für die eigene Navigation notwendig sind.

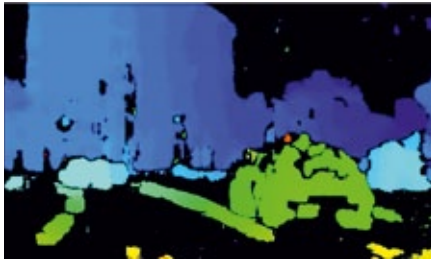
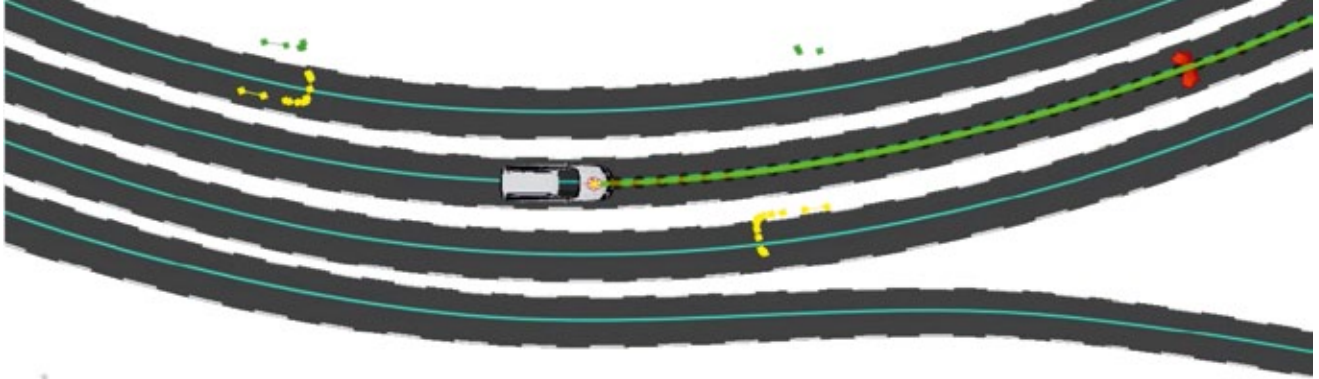
Spätestens wenn das Fahrzeug erkennen soll, ob eine Ampel Rot oder Grün zeigt, muss es auch über konventionelle

- Fernradar (Öffnungswinkel 12°)
- Nahradar (Öffnungswinkel 100° bei geringer Reichweite, 30° bei größerer Reichweite)
- Ibeo-Lux-Laserscanner (Öffnungswinkel 110°)
- Velodyne-Laserscanner (Rundumblick, 360°)



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: RAUL ROJAS

Durch Aussenden verschiedener Strahlungen verschafft sich das autonome Auto aktiv einen Überblick über seine Umgebung. Alle Reichweiten sind der Deutlichkeit zuliebe stark verkleinert dargestellt.



Das hat das autonome Auto »im Kopf«, wenn es durch den Stadtverkehr fährt: einen Blick nach vorn (unten links), eine durch Laser- und Lidarmessungen ermittelte Punktwolke aus potenziellen Hindernissen, farbkodiert nach Entfernungen (unten Mitte), die Ergebnisse der Ampelerkennungssoftware (unten rechts) und eine Karte der Umgebung mit der eigenen Position, der geplanten Trajektorie sowie anderen Verkehrsteilnehmern und der nächsten Ampel (oben).

Sehfähigkeiten verfügen (Kasten unten). Eigens für Ampeln hat unser Auto rechts und links von den mittleren Kameras zwei weitere; denn diese Aufgabe ist überraschend schwer. Unter ungünstigen Lichtverhältnissen, zum Beispiel wenn die Sonne von vorn ins Auto scheint, haben sogar Menschen Schwierigkeiten, die Farben einer Ampel zu erkennen, und eine Videokamera erst recht, denn ihr Dynamikbereich (Verhältnis von größter zu kleinster wahrnehmbarer Lichtintensität) ist geringer als der des menschlichen Auges. Außerdem braucht sie ein Weitwinkelobjektiv, denn an manchen Kreuzungen muss sie fast senkrecht nach oben schauen und gleichzeitig die seitlich gelegene Ampel im Blick behalten.

Alle diese Anforderungen machen Ampelerkennung zu einem der schwierigsten Probleme beim autonomen Fahren überhaupt. Natürlich würde es die Sache ungeheuer erleichtern, wenn jede Ampelanlage ihren aktuellen Zustand über Funk an ihre unmittelbare Umgebung übermitteln würde.

Die Praxis des autonomen Fahrens

Die beschriebene Ausrüstung haben wir in ein Versuchsfahrzeug namens »MadeInGermany« eingebaut (Bilder S. 91 oben). Dieses hat 2011 eine Ausnahmezulassung vom TÜV Nord erhalten und ist seit 2012 regelmäßig in Berlin unterwegs. Durch eine Kombination von Laserscanner, Radar und

Das sehfähige Auto

In unserem Fahrzeug **MadeInGermany** sind hinter der Windschutzscheibe fünf Videokameras angebracht. Die einzige Aufgabe der mittleren Kamera besteht darin, die Fahrspur zu erkennen. Ein eigens dafür eingebauter Rechner identifiziert die weißen Spurlinien; damit korrigiert das System die letzten Seitwärts-Fehler des »differential GPS« und zentriert das Fahrzeug in der Spur.

Zwei weitere Kameras links und rechts von der zentralen Kamera dienen zum stereoskopischen Sehen. Ein spezieller Algorithmus namens »semi-global matching« (SGM, siehe Spektrum der Wissenschaft 10/2013, S. 84, insbesondere S. 90/91) vergleicht die Bilder und errechnet aus den Disparitäten (parallaktischen Verschiebungen) einzelner Bildpunkte die Entfernung der zugehörigen Objektpunkte von den Kameras. Damit erzeugen die Kameras unabhängig von den Laserscannern eine

dreidimensionale Punktwolke in der Umgebung des Autos: Jeder Punkt ist ein potenzielles Hindernis. Die vierte und fünfte Kamera werden für die Ampelerkennung verwendet.

Darüber hinaus kann die angeschlossene Elektronik auch mit vergleichsweise geringem Aufwand die Bewegungen von Objekten in Bezug auf das Fahrzeug ermitteln und weitergeben. Dies ist der so genannte optische Fluss (SdW 7/2013, S. 88).

In der Kombination beider Methoden bestimmt das System mit großer Zuverlässigkeit sowohl die drei Koordinaten für den Ort eines externen Objekts als auch drei weitere für seine Geschwindigkeit. Daher hat die Firma Daimler dafür den Namen »6D-Vision« geprägt. Das Verfahren läuft heute in Echtzeit auf speziell dafür programmierten FPGA-Chips (SdW 8/1997, S. 44).

Videokameras erkennt das System Autos, Fahrräder und Passanten. Der Hauptrechner, ein Laptop, empfängt vorverarbeitete Informationen von untergeordneten Rechnern. Zum jeweiligen Gerät gehörige (»eingebettete«) Mikroprozessoren verarbeiten Lidar- und Kameradaten, erkennen Hindernisse, finden die eigene Spur oder erstellen eine 6-D-Ansicht der Straßenumgebung (Kasten links unten). Mit Hilfe all dieser Informationen berechnet der Zentralrechner anhand einer Karte des Stadtteils einen geeigneten Fahrweg (eine »Trajektorie«; Bild links oben).

Wie bei herkömmlichen Navigationssystemen hat der Computer vorher straßengenau eine Fahrtroute ausgewählt. Die Trajektorie im Detail berechnet er jedoch immer nur für die nächsten 200 Meter. Dafür berücksichtigt er die eigene Position, die Stadtkarte und die Position von Hindernissen. Die so berechnete Kurve ist aber nur ein Vorschlag für den Controller im Zentralrechner; dieser wird davon abweichen, wenn zum Beispiel ein anderes Fahrzeug zu nahe kommt. Dafür hält der Computer stets mehrere leicht unterschiedliche Trajektorien als Alternativen bereit. Diese werden nach Qualität bewertet; so gibt es Minuspunkte für zu große Nähe zu Hindernissen, für Zeitverluste und für unkomfortable Fahrweisen, zum Beispiel heftiges Beschleunigen, Bremsen und Lenken. Selbst ein Spurwechsel wird negativ bewertet, aber so gering, dass die Aussicht auf einen Zeitgewinn diesen Malus kompensieren kann. Unter allen vorbereiteten Trajektorien wählt der Computer stets die mit der besten Bewertung. Das ist, wenn nichts dagegenspricht, die »glatteste«, das heißt diejenige mit den geringsten Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen.

Noch muss auf unseren Fahrten ein Mensch hinter der Lenkung sitzen (ähnlich wie für Google in Kalifornien oder Nevada). Ein Kopilot hat die Berechnungen des Zentralrechners über eine visuelle Schnittstelle immer im Blick. Der menschliche Fahrer kann jederzeit durch leichtes Berühren der Bremse die Automatik ausschalten und selbst die Kontrolle übernehmen. Außerdem kann er im Bedarfsfall das Lenkrad gegen die – absichtlich nicht besonders stark ausgelegte – Kraft des Stellmotors bewegen oder einfach festhalten. Mit diesen Sicherheitsvorkehrungen hat unser Fahrzeug bereits Strecken von bis zu 80 Kilometern am Stück und insgesamt mehrere tausend Kilometer zurückgelegt.

Bei den autonomen Fahrten in Berlin haben wir wertvolle Erfahrungen für die zukünftige Entwicklung gewonnen. Was unser Fahrzeug noch nicht kann, ist improvisieren – zum Beispiel an Baustellen oder Umleitungen trotz veränderter oder fehlender Markierungen den richtigen Weg finden. Darin sind Menschen sehr gut. Wenn auf einer Autobahn Spurenmarkierungen fehlen, verteilen sich die Fahrer von allein und bilden »virtuelle Spuren«. Eine solche Fähigkeit zum Schwarmverhalten im Autoverkehr müssen wir unseren Fahrzeugen noch einprogrammieren.

Telekommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug könnte an dieser Stelle viel Arbeit sparen (Spektrum der Wissenschaft 9/2011, S. 86). Würden heute per Dekret alle Fahrzeu-

ge in der Stadt mit Elektronik und Telekommunikation ausgestattet, wäre das autonome Fahren viel einfacher, denn robotische Fahrzeuge können sich untereinander abstimmen. Aber wir müssen auf absehbare Zeit für eine Mischung aus robotischen und herkömmlichen Fahrzeugen planen. Damit das funktioniert, brauchen die Ersteren noch mehr Intelligenz.

Dazu gehört eine Leistung, die Computern im Gegensatz zu Menschen überaus schwer fällt: die Intentionen anderer Verkehrsteilnehmer zu erkennen. Auf lange Sicht muss ein autonomes Auto einem Menschen am Straßenrand ansehen, ob er gleich die Straße überqueren will, und das freundliche Winken eines anderen Autofahrers als die Nachricht »Ich bin bereit zu warten« interpretieren. Es gibt viele Gesten und Signale zwischen Fahrern und Passanten, die auch ein Computer zu verstehen lernen sollte.

Hier stoßen wir zurzeit noch an eine harte Grenze. Der Autopilot für die Autobahn im Jahr 2020 scheint deswegen realistisch, weil dort das Erkennen von Intentionen weniger dringend erforderlich ist. Für die autonome Navigation in Städten wie Berlin oder Rom muss die künstliche Intelligenz ihre aktuellen Grenzen noch überwinden.

Das wird aber geschehen. Am Ende des 21. Jahrhunderts werden sich die Stadtbewohner wundern, dass einmal so viel Blech am Straßenrand herumstand, nur weil die Fahrzeuge ihre Passagiere nicht selbstständig finden konnten. ∞

DER AUTOR



Raúl Rojas ist Professor für Informatik an der Freien Universität Berlin mit Spezialgebiet künstliche Intelligenz. Er hat das Bauprinzip des relaisgesteuerten Computers Z3 von Konrad Zuse rekonstruiert (Spektrum der Wissenschaft 5/1997, S. 54); mit seinem Team war er 2004 und 2005 Weltmeister im Roboterfußball.

QUELLEN

Thrun, S. et al.: Probabilistic Robotics. MIT Press, 2005
Winner, H. et al.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Vieweg Teubner, Wiesbaden 2009

LITERATURTIPP

Rojas, R.: Können Roboter lügen? E-Book, Heise, München 2013
Essays zu Robotik und künstlicher Intelligenz

WEBLINKS

Velodyne Lidar bei der DARPA Urban Challenge 2007:
<http://velodynelidar.com/lidar/hd/about/origins.aspx>

Ausführliche Beschreibung des Systems 6D-Vision:
www.6d-vision.de/

Diesen Artikel, weitere Literaturtipps und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1210967



Ulrich Kutschera
Design-Fehler in der Natur
 Alfred Russel Wallace
 und die Gott-lose Evolution
 LIT, Berlin 2013.
 378 S., € 19,90

EVOLUTIONS BIOLOGIE

Gegen die Gleichstellung von Glaube und Erkenntnis

Der Pflanzenphysiologe und Evolutionsbiologe Ulrich Kutschera verteidigt die Evolutionstheorie gegen den Kreationismus.

In der Natur passen Form und Funktion oft perfekt zusammen. Was nach wissenschaftlicher Beweislage das Ergebnis unentwegter Anpassung und Auslese ist, halten einige für gottgegeben. Der modernen Version des Kreationismus zufolge »muss Design einen Designer haben«. Demnach habe Gott die Welt und alle Lebewesen so, wie sie jetzt sind, vor wenigen tausend Jahren erschaffen. Anhänger des »Intelligent Design« – des Versuchs, Kreationismus als Wissenschaft darzustellen – versu-

Eisvögel, die beim ersten Fischzug ertrinken, oder an die geradezu jämmerliche Energieausbeute der Pflanzen. Letztere hat ihren Grund darin, dass Rubisco, das Schlüsselenzym der Photosynthese, oft Kohlendioxid mit Sauerstoff verwechselt. Nur durch massive Überproduktion dieses ineffizienten Enzyms können Pflanzen genügend Kohlendioxid aufnehmen, um zu wachsen. Solche »Design-Fehler« sind mit dem Wirken eines allwissenden, vorausschauenden Gottes unvereinbar.

Die zahlreichen »Design-Fehler« in der Natur sind mit dem Wirken eines allwissenden, planenden Gottes unvereinbar

chen beharrlich, ihre Auffassung als vermeintlich gleichberechtigte Alternative zur Evolutionstheorie zu etablieren. Doch der Evolutionsbiologe Ulrich Kutschera macht in seinem neuesten Buch deutlich, dass Intelligent Design nichts mit Wissenschaft zu tun hat.

Bei genauer Betrachtung spricht so ziemlich alles dagegen, dass die heutige Artenvielfalt in einem vorausschauenden göttlichen Plan entstanden ist. Warum sonst wäre so vieles an den Lebewesen offenkundig »schlecht entworfen« und denkbar ineffizient? Man denke etwa an den »idiotisch konstruierten« rückläufigen Kehlkopfnerve, an den »absurden Bauplan« des inversen Wirbeltierauges, an die vielen jungen

»Gäbe es in der Tat diesen übernatürlichen, imaginären »Designer-Gott« als Antrieb der biologischen Evolution, so wäre er ein Pfuscher, Bastler beziehungsweise Flickschuster, aber kein mit Intelligenz und Weisheit ausgestatteter Welten-Planer«, schreibt Kutschera.

Der Versuch, Naturwissenschaft und Glaube zu vereinen, entfacht oft unlösbare Debatten, die auf verschiedenen Ebenen geführt werden. Die einen halten sich an Fakten, welche die anderen notorisch in Zweifel ziehen. Kutschera stellt die Argumente beider Seiten vor und unterstützt dabei den naturwissenschaftlichen Standpunkt. Parallel dazu beleuchtet er die Entwicklung der deutschen Kreationistenbe-

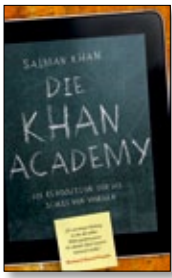
wegung und erzählt die interessante Lebensgeschichte des mittellosen Multitalents Alfred Russel Wallace (1923–1913), der unabhängig von Charles Darwin (1809–1882) richtungweisende Ideen zur Evolutionstheorie entwickelte und als deren »Zweitentdecker« gilt (siehe SdW 10/2013, S. 98).

Wallace, so erfahren wir in dem Buch, kam aus bescheidenen Verhältnissen, war Schulabbrecher und Autodidakt. Auf seinen Expeditionen sammelte er mehr als 1000 unbeschriebene Arten. 1858 schickte er ein Dokument an Darwin, in dem er Überlegungen formulierte, die auf das Prinzip der natürlichen Selektion hinausliefen. Noch im selben Jahr wurden beider Arbeiten zur Evolutionsbiologie gemeinsam vorgestellt. Wallace beschäftigte sich mit vielen Fragen der Lebenswissenschaften und wurde so zum Pionier auch der Biodiversitätsforschung, Wegbereiter der Anthropologie und Urvater der Astrobiologie. Absurderweise galt er später unter US-Kreationisten als Vordenker des Intelligent Design – warum, erfährt der Leser ebenfalls.

Ulrich Kutschera, Professor für Pflanzenphysiologie und Evolutionsbiologie an der Universität Kassel sowie Gastprofessor an der kalifornischen Stanford University, befindet sich schon seit Längerem im Schlagabtausch mit deutschen und amerikanischen Verfechtern des Intelligent Design. Eine Auseinandersetzung, die er nach eigener Aussage mitunter durchaus absichtlich provoziert. Mit seinem neuesten Werk hat er nicht nur ein sachkundiges, sondern auch persönlich geprägtes Buch geschrieben, in dem er seine Meinung deutlich zum Ausdruck bringt. Es versammelt zahlreiche Argumente gegen das Intelligent Design und kann so verhindern helfen, dass sich die Pseudowissenschaft in Deutschland ähnlich ausbreitet wie in den USA. Dort lehnen beinahe 50 Prozent der Bevölkerung die Evolutionstheorie ab.

Julia Heymann

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.



Salman Khan

Die Khan Academy

Die Revolution für die Schule von morgen

Aus dem Englischen von Joannis Stefanidis

Riemann, München 2013.

254 S., € 19,99

DIDAKTIK

Vom Hedgefondsmanager zum Lehrer der Menschheit

Die Lehrvideos von Salman Khan begeistern Millionen – es leuchtet nur nicht wirklich ein, warum.

Die Geschichte klingt wie eine typisch amerikanische Internet-erfolgsgeschichte. Salman Khan gibt seiner Cousine aus der Ferne Nachhilfe in Mathematik, zunächst ganz konventionell übers Telefon, dann per Videoclip – so erfolgreich, dass er auf die Idee kommt, seine Kurzlektionen auf Youtube der Allgemeinheit zugänglich zu machen. Die Kunde von den kostenlosen Nachhilfestunden via Internet spricht sich herum, die Klickzahlen wachsen, Khan gewinnt eine immer größere Schar von Begeisterten.

Da wird Bill Gates auf die Initiative aufmerksam. Microsoft spendiert eine ordentliche Anschubfinanzierung, und Khan vollzieht einen radikalen Wechsel vom ganz Bösen (Hedgefondsanalyst) zum ganz Guten (Lehrer der Menschheit). Aus seiner Ein-Mann-Initiative wird ein richtiges Unternehmen mit 46 Mitarbeitern (einschließlich Hund Toby, »Director of Wellness«), und www.khanacademy.org ist mit zwei Millionen Nutzern die weltweit meistaufgerufene kostenlose Internetlernseite. Begeisterte Mails aus aller Welt bestätigen Khan, dass er mit seinem Angebot in eine überaus schmerzlich empfundene Lücke gestoßen ist.

Beflügelt durch diesen Erfolg denkt er weiter. Hier sei die Chance, den Schulunterricht überhaupt radikal umzukrempeln. Wozu muss man heute noch ganzen Klassen denselben Stoff

zur selben Zeit eintrichtern? Und damit zwangsläufig größere Teile der Klasse über- oder unterfordern, da die Lerngeschwindigkeiten weit auseinandergehen? Hole sich doch jeder die Inhalte zu der Zeit aus dem Internet, die am besten zu seinen Vorkenntnissen, seinen persönlichen Vorlieben und seinem Lerntempo passt.

Übungen zum »Vorlesungsstoff« liefert Khan gleich mit, automatisch vom Computerprogramm erzeugt; das funktioniert in der Mathematik tatsächlich bis zu einem gewissen Grad. Mit einer ausreichenden Anzahl fehlerfrei am Stück gelöster Übungsaufgaben erhält man eine Erfolgsbescheinigung – und weg ist die Klassenarbeit mitsamt dem Termindruck und dem Drang zum »Bulimie-Lernen« (große Stoffmengen mit Gewalt in den Kopf pressen und nach der Klausur gleich wieder vergessen). Eine Note entscheidet nicht mehr über die Versetzung und schon gar nicht über das weitere Leben; wenn das Kind den Stoff nicht gleich begreift, dauert es eben ein bisschen länger.

Wo er schon einmal dabei ist, reißt Khan auch die restlichen Grundpfeiler des klassischen Schulsystems ein. Wozu ein Klassenverband? Jeder lernt in seinem Tempo, und es schadet nicht, wenn sich am Ende Schüler sehr verschiedenen Alters bei demselben Lernstoff wiederfinden. Wozu Sommerferien? Sollen die Kinder doch wie die Er-

wachsenen Urlaub machen, wann es ihnen – und ihren Eltern – am besten passt.

Dann könnte man ja gleich das Schulgebäude abschaffen und die Lernerei komplett ins eigene Jugendzimmer mit Internetanschluss verlagern? Das schlägt Khan nicht vor – vermutlich ist ihm klar, dass die meisten Leute so viel Selbstdisziplin nicht aufbringen. In seiner Idealvorstellung ist die Schule immer noch ein echtes Gebäude, aber sie besteht nicht mehr aus Klassenzimmern, sondern aus Nischen, in denen man allein oder zu mehreren seinen Lerninteressen nachgehen kann. Lehrer stehen stets bereit, wenn es Fragen gibt, und wie in der klassischen Schule werden die Fortgeschrittenen den Langsamen freundschaftlich unter die Arme greifen.

Das Konzept ist zunächst ungeheuer attraktiv – und so radikal, dass man es zuallererst gegen die üblichen Bedenkenträger verteidigen muss. Wo bleibt die Motivation, wenn die herkömmlichen Druckmittel wegfallen? Damit gab es in den Schulversuchen, von denen Salman Khan berichtet, anscheinend keine Probleme. Gleichwohl ist absehbar, dass die Umgewöhnungsschwierigkeiten gewaltig wären.

Aber bevor ich mich von der Begeisterung des Autors für sein Projekt mitreißen lasse, werfe ich einen Blick auf dessen Herzstück, die Lehrvideos – und bin ernüchtert. Da schreibt statt eines echten Lehrers ein Geisterfinger die Formeln an die Tafel; Khan selbst spricht die zugehörigen Erklärungen aus dem Off – er hat die weise Entscheidung getroffen, sich selbst nicht ins Bild zu setzen –, und nach ungefähr zehn Minuten ist die Lerneinheit schon wieder vorbei; so lang sei die typische Aufmerksamkeitsspanne eines Schülers. Ein klassischer Lehrervortrag, sachlich korrekt und so lebendig, mit Wiederholungen und Versprechern, wie bei einem echten Lehrer an der Tafel. Der krakelige Tafelanschrieb und die schiefen Handzeichnungen haben den Charme des Handgemachten und Authentischen; aber was hätte man mit den Möglichkeiten der modernen Com-

putergrafik nicht alles noch realisieren können! Bewegte Bilder von Funktionsgraphen, Sekanten, die gegen Tangenten streben, Gleichungen, die sich vor den Augen des Benutzers umformen Und natürlich hätte Khan seine Lernvideos inhaltlich untereinander verlinken können.

Wie erklärt sich dann der phänomenale Zuspruch, den die Website genießt? Vielleicht aus Khans Charisma? Eher nicht, da er sich bewusst zurück-

nimmt. Vielleicht fassen seine Schüler die Lerninitiative als eine Art Computerspiel auf. Tatsächlich kann man für richtig gelöste Aufgaben Punkte erhalten und von einem Level ins nächsthöhere aufsteigen. Oder – die zynische Erklärung – der Mathematikunterricht in der Schule ist so schrecklich, dass die Menschen beinahe jede Alternative als Verbesserung empfinden.

Ich würde mich sicher noch hemmungsloser für Khans Erfolg begeis-

tern, wenn ich die Gründe dafür besser nachvollziehen könnte.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Interview mit Salman Khan (auf Englisch):

http://www.mckinsey.com/insights/social_sector/education_for_everyone_an_interview_with_sal_khan?cid=other-eml-alt-mip-mck-oth-1309)



Henning Beck

Biologie des Geistesblitzes

Speed up your mind!

Springer Spektrum, Berlin 2013.

243 S., € 14,99

NEUROBIOLOGIE

Eine amüsante Reise ins Gehirn

Henning Beck, deutscher Meister im Science Slam, bringt seinen Lesern gekonnt die Hirnforschung nahe.

»Hier erwartet Sie die volle Dröhnung Neurobiologie!« Beck warnt gleich in der Einleitung, sein Buch sei kein Ratgeber, wie man kreativ werden könne – auch wenn der etwas alberne neudeutsche Untertitel dies suggerieren mag. Dem Ulmer Biochemiker geht es vielmehr um knallharte Wissenschaft, um die »Biologie des Geistesblitzes«.

Tatsächlich verspricht der Autor nicht zu viel. Detailliert erklärt er zunächst den Aufbau des Gehirns. Dann taucht er tief in die Zellbiologie ab, zerlegt Neurone in ihre biochemischen Einzelteile und widmet dabei auch den oft unterschätzten Helferzellen des Nervensystems ein Kapitel. Wie ein Neuron funktioniert und »rechnet«, erfährt der Leser im dritten Teil des Buchs. Ziemlich theoretisch wird es im vierten Teil, der die Netzwerk-Rechentricks unserer grauen Zellen sowie technische Methoden der Bildgebung beschreibt. Erst am Schluss geht Beck auf die Kreativität

ein – um schließlich doch ein paar Kniffe vorzustellen, mit denen sich das Gehirn besser nutzen lässt.

Ein nüchternes Sachbuch also? Nein. Denn Henning Beck ist nicht nur Biochemiker und Neurowissenschaftler, sondern auch deutscher Meister im Science Slam 2012 (der Begriff lehnt sich an »Poetry Slam«, Dichterwettbewerb, an). Bei diesem Vortragswettbewerb versuchen Wissenschaftler ihr Forschungsgebiet in zehn Minuten besonders verständlich, mitreißend und witzig zu präsentieren. Und so versteht sich die »Biologie des Geistesblitzes« auch als »Science Slam, der sich als Buch verkleidet hat«. Wir erfahren darin etwa, was das Gehirn, das mit seinem hohen Fettanteil einem »halbfesten Schnittkäse aus dem Supermarkt« ähnelt, in Wirklichkeit ist: »Ein selbstverliebter, fauler und eitler Haufen von divenhaften Nervenzellen.« Aufgelockert wird das Ganze – wie bei einem echten Science

Slam – durch »Zwischenrufe« wie: »Hilfe, ein Gen! Das ist doch gefährlich!«

Mit solch amüsantem Plauderton und witzigen Grafikbeschriftungen versteht es der Autor, sein Fach dem Leser nahezubringen. Auch wenn sich Beck für die »manchmal doch recht drastischen Simplifizierungen« entschuldigt, fehlt es seinem Werk nicht an Tiefgang. Ein Glossar erklärt die wichtigsten Fachbegriffe, und der hartgesotenen Leserschaft wünscht der Autor leicht ironisch »viel Spaß« beim Durchackern der im Literaturverzeichnis aufgeführten Fachartikel.

Trotz der lockeren Sprache dürfte mancher Leser Schwierigkeiten haben, im Dickicht der Neurobiologie den Durchblick zu behalten. Wer sich hiervon nicht abschrecken lässt, wird einiges über sein Denkorgan erfahren und etliche falsche Vorstellungen ablegen. So arbeitet das Gehirn eben nicht präzise wie ein Computer, sondern seine überragenden Leistungen beruhen vielmehr auf seiner Unvollkommenheit. Es besteht auch nicht – wie manche Grafik uns glauben macht – aus einem großen, leeren Raum mit ein paar schicken Neuronen dazwischen. Ebenso wenig ist »die rechte Hirnhälfte kreativ« oder »nutzt man nur zehn Prozent seiner Hirnfunktionen«. Mit solchen Irrtümern räumt Beck gründlich auf. Am Ende muss der Autor dennoch zugeben, dass das Gehirn auch für Hirnforscher großteils ein Rätsel bleibt.

Andreas Jahn

Der Rezensent ist promovierter Biologe und Redakteur bei »Gehirn und Geist«.



Sandra Geringer, Uta Halle (Hg.)

Graben für Germanien

Archäologie unterm Hakenkreuz

Theiss, Stuttgart, 2013.

216 S., € 29,95

GESCHICHTE

Rückblick in eine dunkle Zeit

Der Band »Graben für Germanien« klärt über die unrühmliche Rolle deutscher und österreichischer Archäologen während der Nazizeit auf.

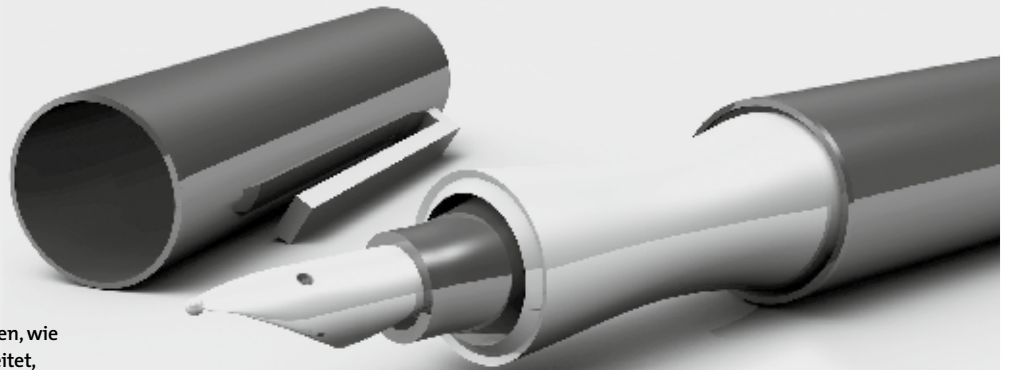
Selten stößt eine archäologische Ausstellung auf so große Resonanz wie die kürzlich zu Ende gegangene Schau »Graben für Germanien. Archäologie unterm Hakenkreuz« im Bremer Focke-Museum. Das Medienecho reichte bis

nach Österreich, wo sich die Tageszeitung »Der Standard« mit der österreichischen Archäologie zwischen 1938 und 1945 befasste. Hintergrund war ein Beitrag des Wiener Prähistorikers Otto Urban im Begleitband der Ausstellung.

Sex und Nazis verkaufen sich, könnte man abwertend meinen. In diesem Fall aber sind die Bremer seriös und völlig zu Recht ein äußerst finsternes Kapitel der deutschen und österreichischen Archäologie angegangen. So dunkel, dass die hiesigen Archäologen sich bis in die 1990er Jahre hinein scheuten, ihre Vergangenheit aufzuarbeiten.

Nach 1945 entstand eine Legende vom Konflikt zwischen zwei NS-Institutionen: Auf der einen Seite hätte das »Amt Rosenberg« propagandistische Zweckforschung betrieben, während auf der anderen Seite die Forschungsgemeinschaft Deutsches Ahnenerbe unpolitischer, seriöser Archäologie nachgegangen sei. Die meisten Fachwissenschaftler hätten sich deshalb letzterer Institution angedient, um dem Amt Rosenberg zu entgehen. »Graben für Germanien« stellt klar, dass dieser Mythos in keiner Weise aufrecht zu halten ist.

DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT



Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Weitere Informationen und Anmeldeöglichkeit

www.spektrum.de/schreibwerkstatt

Ort: Heidelberg

Teilnahmegebühr: € 99,-

Abonnenten unserer Magazine erhalten einen Rabatt von € 10,-



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

E-Mail: service@spektrum.com

www.spektrum.de/schreibwerkstatt

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Hugh Aldersey-Williams

Anatomien – Kulturgeschichten vom menschlichen Körper

Aus dem Englischen von Christophe Fricker

Hanser, München 2013. 357 S., € 24,90

Dieses Buch ist viel unterhaltsamer, als der Titel vermuten lässt. Wo immer man hinblättert, stößt man auf spannende Streifzüge durch schöngeistige Literatur, Naturwissenschaften und Kulturgeschichte. Der Autor, selbst Naturwissenschaftler und Kurator in Norfolk und London, berichtet kenntnisreich und oft vergnüglich vom Verhältnis zu unserem Körper und vom Wissen über ihn in verschiedenen Zeiten. Gleichzeitig nimmt er die Leser mit auf eine lehrreiche anatomische und medizinische Reise durch uns selbst. Die einzelnen Kapitel widmet er Fleisch und Knochen, inneren Organen, Sinnesorganen und der Haut. Zum Schluss diskutiert er »Erweiterungen« des Körpers – von Tätowierungen bis zur Prothese im Behindertensport. Empfohlen sei der Band allen literarisch, kulturhistorisch und anatomiegeschichtlich Interessierten.

ADELHEID STAHNKE



Manfred Berg

Geschichte der USA

Oldenbourg, München 2013. 233 S., € 24,80

Manfred Berg, Professor für Amerikanische Geschichte an der Universität Heidelberg, führt konzipiert und kompetent durch die US-Historie – von der ersten Kolonie über die amerikanische Revolution und den blutigen Bürgerkrieg bis hin zur atomaren Supermacht im 20. Jahrhundert und den gegenwärtigen Kriegen und Krisen. Im Mittelpunkt stehen neben dem politischen System der USA die »klassischen« Themen amerikanischer Geschichte: Kontakt und Konflikt mit den Ureinwohnern, Westexpansion, Sklaverei, Rassenbeziehungen und ethnische Vielfalt, Einwanderung, Pluralismus, Demokratiebildung, moderne Industrie- und Konsumgesellschaft. Der Autor behandelt aber auch jene stark religiös geprägte amerikanische Identität, die in der Überzeugung von einer gottgewollten Bestimmung der Nation als »Gods own country« gründet und sich tief ins kollektive Bewusstsein der Amerikaner eingepreßt hat. Ein sehr empfehlenswertes Buch für alle, die sich umfassend über die Geschichte der Vereinigten Staaten informieren wollen.

THEODOR KISSEL



Sven Plöger und Frank Böttcher

Klimafakten

Westend, Frankfurt am Main 2013. 167 S., € 12,99

Ein breites Themenspektrum rund um den Klimawandel behandeln die Wettermoderatoren Sven Plöger (ARD) und Frank Böttcher (Klassikradio): vom Unterschied zwischen Wetter und Klima über die Energiewende bis hin zur sauberen Luftfahrt. Jeden Bereich reißen sie in einem kurzen Kapitel an und stellen die wichtigsten Punkte heraus. So vermitteln sie einen kompakten, anschaulichen Überblick über Ursachen und Folgen der Klimaveränderungen. Allerdings sind die häufigen Wiederholungen recht aufdringlich, und die Fülle der präsentierten Zahlen nimmt manchmal überhand. Wegen des knapp bemessenen Platzes verzichtet das Werk auf tiefer gehende Auseinandersetzungen und die Darstellung von Kontroversen. Daher eignet es sich vor allem für Leser, die bisher nur ein bruchstückhaftes Wissen über den Klimawandel besitzen und dieses zu einem großen Ganzen zusammenfügen möchten.

FENJA SCHMIDT



Claudia Weingartner

Alles Mythos! 24 populäre Irrtümer über Weihnachten

Theiss, Darmstadt 2013. 224 S., € 16,95

Die Journalistin Claudia Weingartner geht 24 Ammenmärchen über Weihnachten auf den Grund. Sie trägt Wissenswertes und Amüsantes zusammen und wartet mit Überraschungen auf. So erfährt man etwa, wie schnell der Weihnachtsmann unterwegs sein müsste, um alle Kinder rechtzeitig zu beschenken, oder wie viele illegal gefällte Christbäume schätzungsweise in deutschen Wohnzimmern stehen. Zahlreiche Geschichten rund um das Fest prüft Weingartner auf ihren Wahrheitsgehalt – ob über den Nikolaus, die Heiligen Drei Könige oder Knecht Ruprecht. Auch wie Weihnachtsmärkte historisch entstanden sind, und woher der Brauch mit dem Baum kommt, erfährt der Leser. Wer dieses kenntnisreiche Buch gelesen hat, kann mit seinem Wissen ordentlich am Glühweinstand prahlen.

NELE LANGOSCH

Aus dem Buch geht zudem hervor, dass deutsche Vorgeschichts- und Laieforscher schon Jahrzehnte vor der Machtübernahme der Nationalsozialisten versucht hatten, eine angebliche rassische Überlegenheit der Germanen zu untermauern. So nannte der erste

Schon lange vor den Nazis versuchten deutsche Forscher, eine angebliche rassische Überlegenheit der Germanen zu belegen

deutsche Professor für Vorgeschichte, Gustaf Kossinna (1858–1931), die Vorgeschichtsforschung eine »hervorragend nationale Wissenschaft«. Bereits am 1. Mai 1933 waren etwa 70 Prozent der Fachwissenschaftler NSDAP-Mitglieder. Nach der Machtübernahme durch die Nazis dienten sie sich mit Forschungsprogrammen an und arbeiteten aktiv in NS-Parteiorganisationen mit. Davon profitierte die Frühgeschichtsforschung enorm: Die Zahl der Lehrstühle stieg von zwei im Jahr 1930 auf mehr als zwölf 1937, die der Landesämter für Bodendenkmalpflege von zwei 1933 auf vierzehn 1943. Wanderausstellungen wie »Lebendige Vorzeit«, großformatige Wandbilder für den Schulunterricht und Einrichtungen wie das Germanengehöft in Oerlinghausen sollten dem Publikum die Überlegenheit eines blonden, blauäugigen, tapferen Herrenvolks suggerieren. Damit legitimierten deutsche Vor- und Frühgeschichtler die nationalsozialistische Blut-und-Boden-Ideologie.

Mit dem Angriff auf Polen und 1941 auf die Sowjetunion rückten Archäologen schließlich in die besetzten Gebiete ein, um Kunst und Kulturgüter zu rauben. Zu ihnen gehörte Herbert Jankuhn (1905–1990), der ranghöchste Archäologe im »Deutschen Ahnenerbe«, mit seinem »Sonderkommando Jankuhn«. Der Band stellt auch das Fortleben des Germanenmythos, wissenschaftlicher Karrieren und rassistischer Denkweisen nach 1945 dar. Jankuhn etwa wurde als Professor an der Universität Göttingen zum akademischen Vater einer ganzen Wissenschaftlergeneration.

Ausstellung und Begleitband entstanden aus dem dreijährigen Projekt

»Vorgeschichtsforschung in Bremen unterm Hakenkreuz«, das von der Volkswagenstiftung gefördert wurde. Dennoch widmen sich nur 2 von 23 Aufsätzen diesem Thema. Hier hätten es gern mehr sein dürfen. Manches in dem Buch bleibt abstrakt oder wirkt le-

diglich angerissen. Keine 20 Seiten behandeln die lange Entwicklung des Germanenmythos seit dem 15. bis zum 20. Jahrhundert, das Aufkeimen rassistischer Theorien sowie die völkische Bewegung, die am Ende des 19. Jahrhunderts in der wilhelminischen Ära entstand und in vielerlei Hinsicht die Ideologie der Nazizeit vorwegnahm. Zu bemängeln ist daran vor allem, dass der Band die versprochene Aufklärung über das Entstehen des Germanenmythos nur unvollständig leistet.

Unklar bleibt auch, was denn nun dran ist an den Germanen, welchen

Wahrheitsgehalt viele Vorstellungen über sie haben. Beispielsweise berichteten etliche Medien, Germanen und Germanen habe es nie gegeben: Sie seien eine Erfindung römischer Schriftsteller und nationalistischer Ideologen. So weit gehen die Autoren nicht. Zwar legen sie dar, wie antike Autoren den Begriff »Germanen« für die Völker zwischen Rhein, Donau und Weichsel prägten – allen voran der berühmte Staatsmann und Feldherr Gaius Julius Cäsar (100–44 v. Chr.), aber auch Publius Cornelius Tacitus (zirka 58–120). Auch zeigen sie, dass schon die antike Vorstellung eines einheitlichen germanischen Großvolks auf Klischees und politischer Instrumentalisierung beruhte. Doch die Frage, wer oder was die Germanen wirklich waren, reißt der Band nur an. Trotz dieser Defizite gibt der Band insgesamt einen guten Überblick für ein breites Publikum.

Thomas Brock

Der Rezensent ist Archäologe, Autor und Museumspädagoge in Hamburg.



Karl-Heinz Göttert

Abschied von Mutter Sprache
Deutsch in Zeiten der Globalisierung

S. Fischer, Frankfurt am Main 2013.

367 S., € 22,99

SPRACHFORSCHUNG

Übertriebene Hysterie

Wer den Niedergang der deutschen Sprache bejammert, sitzt einem nationalistischen Mythos auf, meint der Literaturwissenschaftler Karl-Heinz Göttert.

Vor Kurzem war es wieder so weit: Der Verein Deutsche Sprache (VDS) verlieh den Preis »Sprachpanser des Jahres«, und zwar ausgerechnet dem Duden. Der nämlich »trage seit Jahren dazu bei, dass sich sprachliches Impioniergehabe im Glanze einer quasi amtlichen Zustimmung sonnen« dürfe.

»Soccer« für »Fußball« sei neuerdings dudenkonform, nicht aber »Klapprechner« für »Laptop«, obwohl dieser Begriff mehr als 34 000 Treffer bei Google erziele. Bundesfinanzminister Wolfgang Schäuble, der »durch sein Insistieren auf Englisch selbst in Anwesenheit von Dolmetschern allen Versuchen in

den Rücken falle, Deutsch als echte Arbeitssprache glaubhaft in der EU zu verankern«, musste sich mit dem zweiten Platz begnügen.

Steht es tatsächlich so schlimm um die deutsche Sprache? Wird sie, durch Anglizismen bis zur Unkenntlichkeit entstellt, künftig nur noch die Rolle eines Provinzdialekts spielen, den man lediglich aus Folkloregründen bewahrt? Und leistet tragischerweise genau jene Institution, die über das Deutsche zu wachen berufen ist, bei diesem sprachlichen Niedergang Schützenhilfe? Oder ist alles in Wahrheit halb so wild?

Ganz entschieden Letzteres, würde Karl-Heinz Göttert meinen, ehemals Professor für Ältere Deutsche Literatur

Schon Otto Sarrazin meinte die Selbstabschaffung Deutschlands zu erleben – so wie später sein Urgroßneffe Thilo

an der Universität zu Köln. Wer wissen will, warum, findet Antworten in Götterts neuem Buch »Abschied von Mutter Sprache«. Auf die allseits geschmähten Anglizismen kommt Göttert im zweiten Kapitel zu sprechen. Sein Fazit, das er mit Daten, Fakten und Zahlen solide untermauert, lautet, von einem überbordenden Einfluss der englischen Sprache könne keine Rede sein.

Sodann wendet sich der Autor der viel interessanteren Frage zu, welcher Art die Argumente wider die Anglizismen sind und aus welcher sozial- und

ideologiegeschichtlichen Ecke sie kommen. Dass die Anglizismen-Feindschaft viel mit Sprachnationalismus und dem Bürgertum als gefühltem Verlierer der Modernisierung zu tun hat, deutet Göttert bereits in Kapitel eins an, in dem er seine Leser auf einen kurzen Ritt durch die Geschichte des Deutschen schickt. Dort entlarvt er die Vorstellung von einer urwüchsigen »Reinheit« der Sprache als nationalistischen Mythos und das Hochdeutsche als »Kunstprodukt«. Auch führt er etliche Sprachreiner aus früheren Zeiten vor, unter anderem einen gewissen Otto Sarrazin, der offenbar auch schon der Ansicht war, die Selbstabschaffung Deutschlands zu erleben – so wie später sein Urgroßneffe.

Der Teufel, den der Verein Deutsche Sprache an die Wand malt, erweist sich also als reichlich angejahrter Popanz.

Bedeutet dies nun, mit der deutschen Sprache stehe alles zum Besten? Das nun auch nicht. Probleme gibt es, und sie werden debattiert. Sollen beispielsweise an deutschen Universitäten Vorlesungen auf Englisch gehalten werden? Alle? Manche? Falls ja, welche? Und wenn deutsche Muttersprachler sich auf einen Posten beim Europäischen Gerichtshof in Luxemburg bewerben und exzellente Kenntnisse in zwei Fremdsprachen vorweisen müssen – ist das nicht eine Benachteiligung gegenüber französischen oder englischen Muttersprachlern, denen man nur eine Fremdsprache abverlangt? Kurz: Welche Rolle können und sollen Nationalsprachen im Spannungsfeld zwischen Internationalisierung und Regionalisierung spielen? Oder noch kürzer: Wo stehen wir, und wohin soll die Reise gehen?

Mit solchen Fragen beschäftigt sich Göttert in den folgenden Kapiteln, welche die Rolle des Deutschen in der Welt, in den Wissenschaften, in den europäischen Institutionen und die Möglichkeiten einer europäischen Sprachenpolitik in den Blick nehmen. Hier zeigt sich denn auch durchaus Regelungs-

Handlungs- und gelegentlich auch, wie Göttert launig formuliert, »Unterlassungsbedarf«. Er macht eigene Vorschläge und glänzt dabei mit historischem, statistischem und anekdotischem Wissen. Besonders spannend wird es, wenn er aus dem Nähkästchen der Ausschüsse und Kommissionen plaudert – 2010 etwa sprach er als Sachverständiger in einem Bundestagsunterausschuss zum Thema »Deutsch als Wirtschaftssprache«. Er berichtet darüber nicht selten mit verhaltener Ironie und lässt den Leser ganz uneitel am eigenen Erkenntnisprozess teilhaben. Dabei nimmt er eine erfrischend pragmatische Position ein. Im Vordergrund steht für ihn die Frage, wie unter den Bedingungen der Globalisierung Verständigung erreicht werden kann.

Welche Lösung bietet Göttert an? Vor allem rät er, von überkommenen Vorstellungen abzurücken und den Nationalstaat nicht mehr als Sprach- und Abstammungsgemeinschaft zu verstehen (die er ohnehin nie war), sondern als Partizipations- und Kommunikationsgemeinschaft. Genau das meint der Buchtitel »Abschied von Mutter Sprache« – und eben nicht »Abschied von der Muttersprache«. Konkret fordert Göttert die Rückkehr zum mehrsprachigen Menschen aus der Zeit vor dem 19. Jahrhundert. Englisch für alle oder bunte Sprachvielfalt? Sowohl als auch!

Viele Leser werden sich nicht mit allen Standpunkten Götterts anfreunden können. Müssen sie aber auch nicht, um sein Buch als das zu nehmen, was es ist: eine kenntnisreiche und geradezu überfällige Diskussionsgrundlage für alle, die sich mit Sprache beschäftigen. Das Werk ist so locker und unpräzise geschrieben, dass bei der Lektüre keine Sekunde Langeweile aufkommt. Sprachpanschereien? »Dieses Buch empfiehlt Gelassenheit«, wie der Autor schreibt. Und die Rezensentin wiederum dieses Buch.

Vera Binder

Die Rezensentin hat Sprachwissenschaft und Philologie studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.





Masha Gessen

Der Beweis des Jahrhunderts

Die faszinierende Geschichte

des Mathematikers Grigori Perelman

Aus dem Englischen von Michael Müller

Suhrkamp, Berlin 2013.

321 S., € 22,95

MATHEMATIK

Einsames Genie

Die Journalistin Masha Gessen porträtiert den eigenwilligen Mathematiker Grigori Perelman.

Die hohe Mathematik rückt nur selten in den Blickpunkt der Öffentlichkeit. Denn nicht Worte, sondern Zahlen, Geometrien und Logik bestimmen ihre Sprache – eine schwer zugängliche Welt, in der sich nur wenige Menschen zurechtfinden. Vor einigen Jahren jedoch sorgte sie für Schlagzeilen. Dem russischen Mathematiker Grigori Perelman war es gelungen, eine Vermutung zu beweisen, die der Franzose Jules Henri Poincaré (1854–1912) im Jahr 1904 formuliert hatte. Würde sie von zweidimensionalen Flächen handeln, wäre sie kaum der Rede wert: Jede geschlossene Oberfläche ohne Loch ist topologisch, das heißt ohne Zerschneiden oder Zusammenkleben, zu einer Kugeloberfläche deformierbar.

Dabei meint »Loch« nicht etwa eine »Hautverletzung« der Oberfläche, sondern zum Beispiel das, was einen Torus (etwa einen Donut) von einem Luftballon unterscheidet. Poincaré meinte aber dreidimensionale »Oberflächen« (»Mannigfaltigkeiten« nennt sie der Mathematiker); die muss man sich im vierdimensionalen Raum liegend vorstellen. Hier versagt unser Vorstellungsvermögen – auch das der Fachleute. Selbst mit den abstraktesten Mitteln gelang es ihnen nicht, Poincarés Vermutung zu beweisen. Deshalb rechnet das Clay Mathematics Institute (CMI) in Cambridge (Massachusetts, USA) sie den berühmten »Millennium-Problemen« zu, einer Zusammenstellung ungelöster Fragen in der Mathematik. Für

den erfolgreichen Beweis der Vermutung hatte das CMI ein Preisgeld von einer Million Dollar ausgelobt.

Als Perelman die Lösung tatsächlich präsentierte und damit eine bahnbrechende Leistung ablieferte, bekam er das Geld folgerichtig zugesprochen. Doch er lehnte ab. Warum, versucht die russische Journalistin Masha Gessen in ihrem Buch »Der Beweis des Jahrhunderts« zu beantworten.

Gessen beschreibt die vom Kalten Krieg geprägte Atmosphäre in den sow-

Perelman scherte sich nicht um die Diskussion, die nach seiner bahnbrechenden Leistung losbrach

jetischen Mathematik-Klubs des früheren Leningrads (heute Sankt Petersburg). Dort sammelte sich ein buntes Volk zahlenversessener Jugendlicher – ein Umfeld, in dem auch der 1966 geborene Perelman aufwuchs. Diese Klubs gehörten zu den wenigen Orten, an denen er sich wohl fühlte und Freundschaften pflegte. Doch mit fortschreitendem Alter wurde Perelman immer einsamer. Schon während seiner Doktorarbeit an der Staatlichen Universität Sankt Petersburg verbarrikadierte er sich zunehmend in den eigenen vier Wänden. Niemand ahnte damals, dass er an einem der größten mathematischen Probleme tüftelte.

Eines Nachts im November 2002 publizierte er den ersten seiner drei wissenschaftlichen Aufsätze, die sich

mit der Poincaré-Vermutung befassen, über den Server der amerikanischen Cornell University. Eindringlich beschreibt Gessen die Aufregung, die daraufhin in Mathematikerkreisen losbrach. Es wurde hektisch geprüft und nachgerechnet, und schließlich kam man allgemein zu dem Schluss, dass Perelman den Beweis gefunden habe.

Schon bald traten andere Wissenschaftler auf den Plan und beanspruchten ihrerseits, die Poincaré-Vermutung bewiesen zu haben. Es kam zu einem Schlagabtausch um Forschungsergebnisse und Erstveröffentlichungen. Gessen schildert ihn detailreich, durchweg um Sachlichkeit bemüht, und gewährt den Lesern so einen tiefen Einblick in die Welt wissenschaftlichen Publizierens.

Perelman ließ die ganze Diskussion kalt. Er ging kaum aus dem Haus und kappte fast alle Verbindungen zur Außenwelt. Auch als man ihm 2006 eine der höchsten Auszeichnungen für Mathematiker, die Fields-Medaille, zusprach, verweigerte er die Annahme.

Gessen zeichnet ein stimmiges, eindringliches Bild von dem Mathematiker. Es zeigt einen verschlossenen Men-

schen, dessen Gedankenwelt geprägt ist von strengen Geometrien, Logik und Zahlen, und macht ein Stück weit greifbar, warum er sich so ungewöhnlich verhielt. Dabei stützt sich die Autorin auf Gespräche mit Mitschülern, Lehrern und Kollegen Perelmans. Stets versucht sie objektiv zu bleiben – auch wenn sie der Frage nachgeht, ob der Mathematiker am Asperger-Syndrom leiden könnte. Mit ihm selbst hat sie nie gesprochen. Das ist wenig überraschend, denn der ohnehin schon zurückgezogene Russe meidet Journalisten ganz besonders.

Thorsten Naeser

Der Rezensent ist Diplomgeograf und arbeitet am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in München.

AUS UNSEREM LESERSHOP

BILDKALENDER »HIMMEL UND ERDE 2014«

Sterne und Weltraum präsentiert 13 überragende astronomische Motive von Wissenschaftlern und Amateurastronomen: Vom Polarlicht über die ISS und den Asteroiden Vesta geht es zu Gasnebeln, dem Milchstraßenband, einem Kugelsternhaufen bis hin zu fernen Galaxien.

Zusätzlich bietet der Kalender wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2014 und erläutert ausführlich alle abgebildeten Objekte. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm.

Blättern Sie im Internet schon jetzt durch die Seiten.

€ 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,-
inkl. Inlandsversand.



KALENDER FÜR STERNFREUNDE 2014

Ahnerts Astronomisches Jahrbuch erscheint nun als **Kalender für Sternfreunde** mit überarbeiteter Struktur im DIN-A4-Format. Die Herausgeber und Autoren liefern alle grundlegenden Informationen über das Himmelsjahr 2014 und geben eine Fülle von praktischen Tipps für die Beobachtung astronomischer Phänomene. Wer die vielfältigen Erscheinungen am Sternenhimmel selbstständig erkunden möchte, wird auf dieses Standardwerk nicht verzichten wollen.

216 Seiten mit zahlreichen Abbildungen und Tabellen. € 12,90 (zzgl. Versand); als Standing Order € 10,- (inkl. Inlandsversand)



So einfach erreichen Sie uns:

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

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



Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!

1913

Die lebende Lampe

»Das Verdienst, als erster eine Bakterienlampe konstruiert zu haben, gebührt R. Dubois. Seine Lampe besteht aus einem großen Glasgefäß, das zum Teil mit Bouillon gefüllt ist, in der sich die Leucht-

bakterien befinden. Will man die Lampe aufleuchten lassen, so braucht man nur mittels einer Kautschukbirne von Zeit zu Zeit eine kleine Menge filtrierter Luft in die Bouillon einzuführen. Die Lampe hat den Nachteil, daß infolge der Bakterienatmung der von der Bouillon absorbierte Sauerstoff nach kurzer Zeit verbraucht ist, so daß das Licht erlischt.« *Prometheus* 1261, S. 197, 1913

Rennen für die Ahnen

»Daß Stonehenge nur als ein großartiges Grabdenkmal zu deuten sei, darüber kann kein Zweifel sein. [Der deutsche Archäologe C. Schuchhardt] geht noch weiter, indem er die ½ Stunde nördlich von Ost nach West verlau-

fende, rund 2700 m lange, durchweg 350 m breite und von einem Wall umgebene Straße für eine Bahn erklärt, auf der zu Ehren der verstorbenen Edlen Rennen zu Roß und zu Wagen abgehalten worden seien. Zuschauer waren auch die Seelen der Ahnen.« *Kosmos* 12, S. 461, 1913

Rätselhafter Riesenwuchs

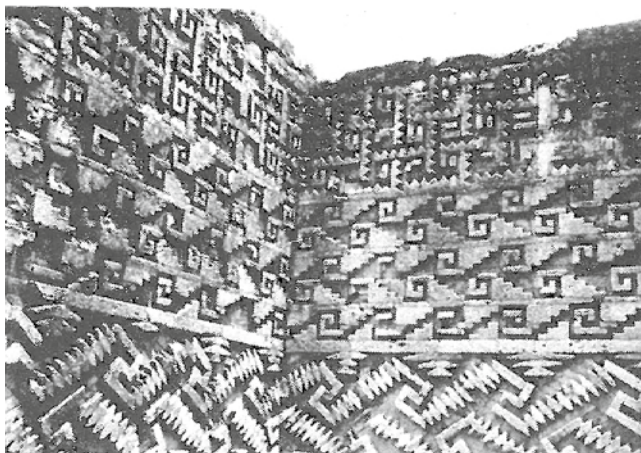
»Der angeborene partielle Riesenwuchs erstreckt sich zu meist auf Finger oder Zehen. Die Ursachen dieser Anomalien sind dunkel. Ein Teil derselben ist auf Fehler in der embryonalen Anlage zu beziehen. Für eine Reihe von Fällen gilt die mechanische Theorie, welche eine Druckwirkung während des embryonalen Lebens mit sekundären Stauungserscheinungen annimmt; oder es können fehlerhafte Kindslagen u. dgl. die Ursache der Blutstauung und des folgenden vermehrten Wachstums abgeben. Von anderen Forschern wird der Riesenwuchs auf Störungen im Zentralnervensystem zurückgeführt. Endlich werden auch Erkrankungen der Drüsen (Schilddrüse, Zirbeldrüse) und Entwicklungsfehler des Geschlechtsapparates zur Erklärung herangezogen.« *Die Umschau* 50, S. 1049, 1913



Die beiden betroffenen Finger wurden später amputiert, die Gebrauchsfähigkeit der Hand so verbessert.

Neuigkeiten aus dem alten Mexiko

»Bei einer Gesamtbetrachtung der Kulturentwicklung des Tales von Oaxaca kann man heute annehmen, daß mit dem Verlassen von Monte Albán durch die Zapoteken sich die kulturelle Entwicklung auf die mixtekischen Städte Mitla und Yagul verlagerte. Daß die Machtübernahme auf friedlichem Wege vor sich gegangen sein muß, ergibt sich durch das allmähliche Überleiten in den neuen Stil, der vor allem durch die Grabkeramik bestimmt wird.« *Umschau* 24, S. 780–781, 1963



Mosaik im Innenhof des Säulenpalasts von Mitla (Mexiko)

Mathe im Blut

»Die Anlage für mathematische Begabung ist mit der Blutgruppe 0 gekoppelt. Diesen Verdacht äußert Willy Wagner auf Grund von 400 Beobachtungen. Über dem Durchschnitt liegende mathematische Leistungen bei Gymnasiasten der Oberstufe und bei Gymnasiallehrern sollen danach an Träger der Blutgruppe 0 gebunden sein; doch sind umgekehrt nicht alle Träger der Blutgruppe 0 gute Mathematiker.« *Kosmos* 12, S. 454, 1963

Vögel rufen Partner herbei

»Viele Vogelarten besitzen offenbar die Fähigkeit, erlernte Laute anzuwenden, was im sozialen Leben eine wichtige Rolle spielt. Die in Gefangenschaft gehaltenen Tiere äußerten, wenn sie ihren Partner vermißten, Laute und Gesangsmotive, die sonst nur von diesem hervorgebracht wurden. Der so

besungene oder »benannte« Partner kehrte, wenn er konnte, sogleich zurück. Es scheint daraus hervorzugehen, daß diese persönliche Lautform zusammen mit der Fähigkeit, ein Objekt zu benennen, ein zweckgerichtetes Mittel des Paarzusammenhalts ist und somit auch eine sehr beachtliche soziale Funktion besitzt.« *Die Umschau* 23, S. 750, 1963

DIE SEUCHE

Schule des Lebens

VON KEN LIU

Ich bin im Fluss und fische mit Mutter. Gleich geht die Sonne unter, und die Fische sind träge. Ein leichter Fang. Der Himmel leuchtet purpurn, ebenso Mutter, das Licht schimmert auf ihrer Chaut, als hätte sie jemand mit Blut beschmiert.

Da plumpst ein großer Mann von einer Schilfinsel ins Wasser und verliert dabei ein langes Rohr mit Glas am Ende. Dann sehe ich, dass er gar nicht fett ist, wie ich erst dachte, sondern in einem dicken Anzug steckt, mit einer Glaskugel um den Kopf.

Mutter sieht zu, wie der Mann sich wie ein Fisch im Fluss windet. »Marnie, wir gehen.«

Aber ich will nicht. Nach einer Minute bewegt er sich kaum mehr. Er versucht die Rohre auf seinem Rücken zu erreichen.

»Er kriegt keine Luft«, sage ich.

»Du kannst ihm nicht helfen«, sagt Mutter. »Die Luft, das Wasser, alles hier draußen ist für solche wie ihn giftig.«

Ich gehe hin, hocke mich nieder und schaue durch das Glas, das sein Gesicht bedeckt. Es ist nackt. Überhaupt keine Chaut. Er kommt aus der Kuppel.

Furcht verzerrt seine scheußlichen Gesichtszüge.

Ich strecke die Hand aus und entwirre die Röhren auf seinem Rücken.

Hätte ich nur die Kamera nicht verloren. Wie das Licht des Lagerfeuers auf ihren glänzenden Körpern tanzt, das

lässt sich nicht mit Worten beschreiben. Ihre deformierten Glieder, ihre unterernährten Leiber, ihre grässliche Verstümmelung – all das scheint in den flackernden Schatten gegen eine Art von Vornehmheit zu verblassen, die mir das Herz schwer macht.

Das Mädchen, das mich gerettet hat, bietet mir eine Schale mit Essen an – Fisch vermutlich. Dankbar nehme ich es an.

Ich ziehe das Feldreinigungswerkzeug aus der Tasche und sprühe die Nanobots über das Essen. Sie sind so konstruiert, dass sie sich auflösen, nachdem sie ihren Zweck erfüllt haben – nicht wie das Grauen, das außer Kontrolle geriet und die Welt unwohnbar machte ...

Um sie nicht zu beleidigen, erkläre ich: »Gewürz.«

Das Mädchen anzuschauen ist wie der Blick in einen menschenähnlichen Spiegel. Nicht ihr Gesicht sehe ich, sondern eine verzerrte Reflexion meines eigenen. Es ist schwierig, aus den vagen Hebungen und Senkungen in dieser glatten Fläche einen Ausdruck zu erraten, aber ich vermute, sie ist verwirrt.

»Mota ssa Ess ngiff tichtich«, sagt sie, zischend und grunzend. Ich werfe ihr die rückentwickelten Foneme und die verkümmerte Grammatik nicht vor – ein krankes Volk, das sein elendes Dasein in der Wildnis fristet, wird nicht gerade Dichter und Denker hervorbringen. Aber ich verstehe, was sie meint:

»Mutter sagt, dieses Essen ist giftig für dich.«

»Gewürz macht es sicher«, gebe ich zur Antwort.

Als ich das gereinigte Essen in die Ernährungsröhre an der Seite des Helms presse, wellt sich ihr Gesicht wie ein Teich im Wind, und mein Spiegelbild zerfällt in bunte Flecken.

Ich glaube, sie lächelt.

Die anderen trauen dem Mann aus der Kuppel nicht, während er in seinem Anzug um das Dorf schleicht.

»Er sagt, die Kuppelbewohner fürchten sich vor uns, weil sie uns nicht verstehen. Er möchte das ändern.«

Mutter lacht; es hört sich an wie Wasser, das über Steine sprudelt. Ihre Chaut verändert sich und bricht das reflektierte Licht in gezackte Strahlen.

Den Mann faszinieren meine Spiele: Mit einem Stab ziehe ich Linien über Bauch, Schenkel und Brüste, während die Chaut sich dahinter wellt und wieder glättet. Er schreibt alles auf, was einer von uns sagt.

Er fragt mich, ob ich weiß, wer mein Vater ist.

Ich denke: Was für ein seltsamer Ort muss die Kuppel sein.

»Nein«, antworte ich. »Bei den Viertelfesten winden sich Männer und Frauen zusammen, und die Chaut lenkt den Samen, wohin sie will.«

Er sagt mir, es tut ihm leid.

»Was denn?«

Es fällt mir schwer, zu erraten, was er denkt, denn sein nacktes Gesicht spricht nicht wie unsere Chaut.

»Das alles«, er schwingt seinen Arm rundherum.

Als vor 50 Jahren die Seuche ausbrach, fraßen die außer Kontrolle geratenen Nanobots und Bioenhancer die menschliche Haut auf, das weiche Gewebe des Schlunds, die warmen, feuchten Membranen in jeder Körperöffnung.

Dann ersetzte die Seuche das zerstörte Fleisch und bedeckte die Menschen, innen und außen, wie eine Flechte aus winzigen Robotern und Bakterienkolonien.

Die Wohlhabenden – meine Vorfahren – verschanzten sich mit Waffen, bauten Kuppeln und sahen zu, wie die übrigen Flüchtlinge draußen starben.

Doch einige überlebten. Der Parasit wandelte sich und ermöglichte es seinem Wirt sogar, die mutierten Früchte zu essen, das giftige Wasser zu trinken und die mörderische Luft zu atmen.

In der Kuppel erzählt man sich Witze über die Verseuchten, und besonders Mutige treiben manchmal Handel mit ihnen. Doch niemand scheint sie noch für Menschen zu halten.

Manche behaupten, den Verseuchten ginge es gar nicht so schlecht. Das ist nichts als der scheinheilige Versuch, der Verantwortung zu entgehen. Durch Zufall bin ich in der Kuppel geboren,

während das Mädchen draußen zur Welt kam. Es ist nicht ihre Schuld, dass sie an ihrer entarteten Haut zupft, statt zu philosophieren; dass sie grunzt und zischt, statt wohlgesetzte Reden zu halten; dass sie statt familiärer Liebe nur eine instinkthafte, animalische Sehnsucht nach Zuneigung kennt.

Wir in der Kuppel müssen sie retten.

»Du möchtest mir meine Chaut wegnehmen?«, frage ich.

»Ja, um ein Heilmittel zu finden, für dich, für alle Verseuchten.«

Inzwischen kenne ich ihn gut genug, um zu wissen, dass er es ernst meint. Ihn kümmert nicht, dass die Chaut genauso zu mir gehört wie meine Ohren. Er glaubt, es ginge mir besser, wenn er mich verstümmelt, nackt auszieht.

»Wir haben die Pflicht zu helfen.«

Mein Glück deutet er als Elend, meine Nachdenklichkeit als Depression. Es ist schon komisch, dass ein Mann nur sehen kann, was er sehen will. Er möchte, dass ich so werde wie er, weil er glaubt, besser zu sein.

So schnell, dass er nicht reagieren kann, nehme ich einen Stein und zerschmettere die Glaskugel um seinen Kopf. Während er schreit, berühre ich sein Gesicht und sehe zu, wie die Chaut sich über meine Hand windet, um ihn zu bedecken.

Mutter hat Recht. Er ist nicht gekommen, um zu lernen, aber ich muss ihn trotzdem belehren. 🐜

DER AUTOR

Ken Liu ist Autor und Übersetzer von Sciencefiction. Auskunft über ihn und sein Werk gibt <http://kenliu.name>.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen in unserer neuen Rubrik erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 497, S. 402, 16. Mai 2013

Das frühe Ägypten

Pyramiden und Tempel prägen unser Bild Altägyptens. Doch wie entwickelte sich diese Hochkultur? Das Verblüffende: Schon in den ersten 1000 Jahren erlangte das Pharaonenreich eine derart effiziente organisatorische Struktur, dass sie weitere drei Jahrtausende fast unverändert überdauerte.



CAPTMONDO / PUBLICDOMAIN

Kinderstuben der Sterne

Zu Einzelgängern werden Sterne erst in späteren Lebensphasen. Ihre Kinderstuben sind Sternhaufen, wo sie sich in dichten Gruppen drängen. Eine neue Theorie versucht zu erklären, warum diese Gruppen meist schnell zerfallen, in seltenen Fällen aber auch hunderte Millionen von Jahren bestehen bleiben.

Einfacher Zugang zur Komplexität

Um das Verhalten eines großen Kollektivs vorherzusagen, braucht man nicht zu wissen, was die einzelnen Mitglieder tun. Das zeigt sich etwa in der Thermodynamik. Man kann das Prinzip aber auch auf viele andere vermeintlich komplexe Systeme anwenden – mit überraschenden Resultaten.



ROBERT SCHITNYK, KIT

Die Kunst des Versteckens

Mit Metamaterialien lassen sich Dinge unsichtbar machen. Doch kann man auch Töne, Vibrationen oder Ereignisse zum Verschwinden bringen – oder dafür sorgen, dass Gegenstände nicht zu ertasten sind? Bei all diesen Zauberticks wissen die Physiker inzwischen, wie es geht – im Prinzip zumindest.



VICTORIALINE

Sinfonie der Sinne

Unser Wahrnehmungsapparat funktioniert nicht als bloße Summe separater Sinneskanäle, sondern erweist sich als eng verflochtenes Netzwerk. Was wir hören, hängt in hohem Maß davon ab, was wir sehen und fühlen.

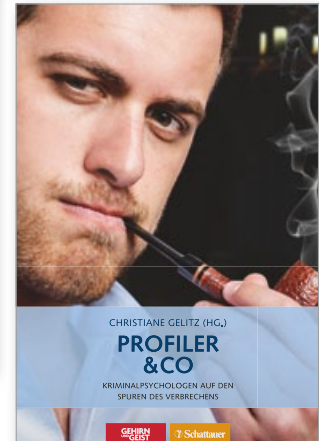
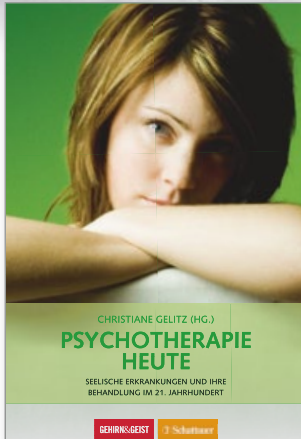
NEWSLETTER

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

GEHIRN UND GEIST



Christiane Gelitz (Hrsg.)

Psychotherapie heute

Seelische Erkrankungen und ihre Behandlung im 21. Jahrhundert

Was steckt hinter ADHS bei Erwachsenen, Computerspielsucht, sozialer Phobie und anderen psychischen Störungen, die durch die Medien geistern? Wann werden Alltagsprobleme zu Störungen und welche innovativen Therapien gibt es? Medizinjournalisten, Psychologen, Psychiater und Psychotherapeuten geben Antwort.

2012. 200 Seiten, 16 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A) | ISBN 978-3-7945-2867-7

Andreas Jahn (Hrsg.)

Wie das Denken erwachte

Die Evolution des menschlichen Geistes

Wie intelligent sind wir wirklich? Der Mensch ist ein Kind der Evolution. Wie und wieso wurden wir zu dem, was wir heute sind? Renommierete Verhaltensforscher, Genetiker, Psychologen, Philosophen und Biologen nehmen Sie mit auf eine faszinierende Entdeckungsreise zu unseren geistigen Ursprüngen.

2012. 158 Seiten, 26 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A) | ISBN 978-3-7945-2869-1

Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hrsg.)

Kinder brauchen Nähe

Sichere Bindungen aufbauen und erhalten

Dieses Buch ist kein Erziehungsratgeber im üblichen Sinn. Vielmehr präsentiert es wichtige Ergebnisse der Bindungsforschung und leitet daraus ab, wie sich eine vertrauensvolle Beziehung zu Kindern aufbauen lässt. Dabei ist eine sichere Bindung nicht nur entscheidend für eine gelingende Erziehung. Sie fördert auch nachweislich die seelische Gesundheit und den sozialen Erfolg im späteren Leben.

Vor diesem Hintergrund bietet „Kinder brauchen Nähe“ vertiefte Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in wissenschaftlich fundierten und gleichzeitig unterhaltenden Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.

2012. 160 Seiten, 27 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)
ISBN 978-3-7945-2872-1

Christiane Gelitz (Hrsg.)

Profiler & Co

Kriminalpsychologen auf den Spuren des Verbrechens

Im Dienste der Wahrheit arbeiten Polizei und Gerichte mit Psychologen und Hirnforschern zusammen. Wissenschaftler und Journalisten schildern, welche Methoden den Strafverfolgern beim Ermitteln helfen – Profiling, Computerprogramme, Verhörtechniken, Aussageanalyse, Lügendetektoren.

Fundiert und eindrücklich ergründen die Autoren Motive und Hintergründe von Verbrechen, erstellen psychologische Täterprofile und analysieren die Ursachen von Gewalt.

Auch die Bedeutung psychologischer und neurobiologischer Befunde für die Rechtsprechung wird beleuchtet. Wissenschaftler und Journalisten erzählen dazu wahre Geschichten aus der kriminologischen Forschung und Praxis.

2013. 172 Seiten, 16 Abb., kart.
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)
ISBN 978-3-7945-2962-9



Jetzt bestellen!

Internet: www.schattauer.de/shop
E-Mail: order@schattauer-shop.de

DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM
SPEKTRUM DER
WISSENSCHAFT-
**DIGITAL-
ABO***



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

*Für Printabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* kostenlos!

So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743

www.spektrum.de/digitalabo

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

Oder QR-Code
per Smartphone
scannen und
Angebot sichern!

