

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

 Gesellschaft 3.0

Die vernetzte Stadt

Smartphones und
Apps machen
unser Zusammen-
leben kreativer

APRIL 2012

KOGNITION

Wie Sprache
das Denken prägt

STROMVERSORGUNG

Speichertechnologien
für die Energiewende

EVOLUTION

Kultursprung
durch Großeltern

Quantengravitation

Die Suche nach der Weltformel



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



Unsere Neuerscheinungen



epoc 1/2012

»ROM – IMPERIUM DER INGENIEURE«

Gewaltige Gebäude, noch heute existierende Brücken, ein ausgeklügeltes Fernstraßensystem und Herstellungsverfahren auf höchstem Niveau: **epoc**, das Magazin für Archäologie, Geschichte und Kultur, befasst sich in seiner aktuellen Ausgabe mit den herausragenden Leistungen römischer Ingenieure, Techniker und Handwerker. Aus dem Inhalt:

- > Das römische Verkehrsnetz: Hunderttausend Kilometer Straße
- > Thermen: Badekultur dank effizienter Heiztechnik
- > Aquädukte: Die hohe Kunst der Landvermesser
- > Schlüsseltechnologie: Die ausgeklügelten Schließsysteme der Römer

epoc kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement für € 27,- (4 Ausgaben pro Jahr) inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 23,-) zu beziehen.



Gehirn&Geist Basiswissen 5:

»DIE VERMESSUNG DER SEELE«

Psychologie und Hirnforschung sind Wissenschaften mit kurzer Geschichte, aber langer Vergangenheit. In diesem Sonderheft, dem fünften Teil unserer Serie **Basiswissen**, präsentieren wir die besten G&G-Beiträge über Pionierleistungen aus fünf Jahrhunderten: Begleiten Sie Künstler, Gelehrte und Forscher bei ihren Erkundungen des menschlichen Geistes. Themen der Ausgabe sind unter anderem:

- > Innenansichten des Seelenorgans
- > Das Gehirn ist ein Irrtum
- > Einblicke in die Dynamik des Denkens
- > Hirnforschung und Psychologie – eine schwierige Beziehung

Das neue **Basiswissen** kostet € 8,90 zzgl. Versand und erscheint am 27.3. 2012. Alle Hefte der Reihe können auch unter www.gehirn-und-geist.de/basiswissen bezogen werden.

Die Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Auf der Suche nach der Weltformel

Auch die nüchternsten Physiker sind mitunter begeisterungsfähig wie kleine Kinder. Beim Betrachten der maxwellschen Gleichungen etwa geraten viele von ihnen ins Schwärmen. Mit diesen Formeln hatte der Schotte James Clerk Maxwell Anfang der 1860er Jahre das Kunststück vollbracht, zwei unterschiedliche Naturkräfte, Magnetismus und Elektrizität, elegant in einer gemeinsamen Theorie zu beschreiben. Seither versuchen seine Nachfolger, die verbliebenen vier Fundamentalkräfte – Elektromagnetismus, starke und schwache Kernkraft sowie Gravitation – nach Maxwells Vorbild als Spielarten einer einheitlichen Kraft zu erklären. Tatsächlich gelang es dem Amerikaner Sheldon Lee Glashow 1960, die elektromagnetische und die schwache Kernkraft zusammen zu fassen; das Standardmodell der Elementarteilchen, das in den 1970er Jahren Gestalt annahm, integriert zusätzlich die starke Kernkraft.

Einzig die Gravitation, vor beinahe 100 Jahren von Albert Einstein in seiner allgemeinen Relativitätstheorie als Geometrie der Raumzeit gedeutet, entzieht sich nach wie vor den Versuchen der Forscher, mit den anderen drei Fundamentalkräften gemeinsam verstanden zu werden. Bereits Einstein selbst scheiterte am Versuch, die »Weltformel« zu finden, und bis heute beißen sich die Forscher die Zähne daran aus. Würden sie auf der Suche nach einer schlüssigen, empirisch überprüfbaren Theorie der Quantengravitation fündig, wäre damit die wohl größte Suchaktion in der Geschichte der theoretischen Physik zu einem glücklichen Ende gebracht.

Immerhin gibt es bereits einige ernst zu nehmende Kandidaten für eine vereinheitlichte Theorie, welche die allgemeine Relativitätstheorie mit der Quantentheorie verbindet. Sie tragen Namen wie Quantengeometrodynamik, Schleifenquantentheorie, dynamische Triangulation und asymptotische Sicherheit. Wirklich umfassend im Sinne eines alle vier Fundamentalkräfte vereinenden Modells ist zudem die Stringtheorie, die allerdings einige mathematisch notwendige Überraschungen bereithält – etwa eine zehn- oder elfdimensionale Raumzeit. Ob man derlei Konzepte je experimentell wird überprüfen können? Der Kölner Physiker Claus Kiefer stellt die wichtigsten Ansätze auf dem Weg zu einer »Theorie von allem« ab S. 34 vor und erörtert ihre jeweiligen Stärken und Schwächen.

Eine anregende Lektüre wünscht
Ihr

Carsten Könneker

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die Paläoanthropologin **Rachel Caspari** erforscht das Leben der Menschen in der jüngeren Altsteinzeit. Sie fragt, wie alt Neandertaler und moderne Menschen in verschiedenen Phasen ihrer Existenz wurden – und seit wann drei Generationen gleichzeitig lebten (S. 24).



Die Psychologin **Lera Boroditsky** untersucht, wie unterschiedliche Sprachen das Denken prägen. Eine Fülle von Indizien zeigt, dass sprachliche Strukturen unsere Raum- und Zeitwahrnehmung sowie Erinnerungen und (Vor-)Urteile beeinflussen (S. 30).



Der Physiker **Claus Kiefer** wagt sich ab S. 34 an eine der größten Fragen seines Fachs: Können wir Quantentheorie und allgemeine Relativitätstheorie in einer gemeinsamen Theorie fassen?



24 Großeltern



72 Energiespeicher



52 Évariste Galois und endliche Körper



62 Urbane Netzwerke

BIOLOGIE & MEDIZIN

- ▶ **24 Kultursprung durch Großeltern**
Rachel Caspari
Erst sehr spät in unserer Evolution lebten drei Generationen nebeneinander – im Jungpaläolithikum. Dienten Oma und Opa als Motor für die kulturelle Entwicklung des modernen Menschen?
- ▶ **30 Wie die Sprache das Denken formt**
Lera Boroditsky
Menschen leben in unterschiedlichen Kulturen und sprechen die verschiedensten Sprachen. Deren Strukturen prägen die Art und Weise, wie wir die Welt wahrnehmen – in ungeahntem Ausmaß!

PHYSIK & ASTRONOMIE

- TITELTHEMA**
- ▶ **34 Quantengravitation**
Claus Kiefer
Seit Jahrzehnten ringen Physiker darum, die Gravitation mit der Quantenphysik zu vereinen. Was ist der Stand der Dinge?
- SCHLICHTING!**
- 44 Licht im Schatten**
H. Joachim Schlichting
Der Strahlenkranz eines Axicons scheint sogar einen Schatten durchdringen zu können
- PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN**
- 46 Die Ente muss raus!**
Thomas Rubitzko
Loriots unsterblicher Sketch von den Herren im Bad, physikalisch neu erzählt

MENSCH & KULTUR

- 52 200 Jahre Évariste Galois**
Antoine Chambert-Loir
Von der Mitternachtsformel über die Gruppentheorie und endliche Körper bis zur Kryptografie – der Geniestreich eines kaum 20-jährigen hat die Mathematik umgewälzt und wirkt bis heute fort
-  **Gesellschaft 3.0**
- ▶ **62 Die smarte Stadt**
Carlo Ratti und Anthony Townsend
Konzepte für die Stadt der Zukunft sollten Smartphones und soziale Netze miteinander verbinden: Denn diese liefern oft mehr Informationen als fest installierte Sensoren und fördern obendrein die Kreativität der Bürger

Quantengravitation

Die Suche nach der Weltformel



TECHNIK & COMPUTER



SERIE: DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



► 72 Energiespeicher

Ferdi Schüth

Wind, Wasserkraft und Sonnenenergie schwanken in ihrer Leistung erheblich. Wenn ihr Anteil am Energiemix steigt, wird es schwieriger, das Elektrizitätsnetz stabil zu halten. Hochleistungsfähige Energiespeicher könnten helfen, die Stromspitzen aufzufangen, um Angebot und Nachfrage im Netz anzugleichen

SONDERTEIL NACH SEITE 80



Herausforderung Klimawandel

- Wie hart trifft es Deutschland?
- Städte im Treibhaus
- Besserer Küstenschutz
- Climate Engineering als letzte Rettung?

Titelmotiv: MPI für Gravitationsphysik /
Milde Science Communications [M]

Die auf der Titelseite angekündigten
Themen sind mit ► gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

- 8 Rasende Diamanten • Springspinnen • Schutzpanzer gegen Piranhas • Langlebiges Mondmagnetfeld • Krebsmedikament kuriert Alzheimer • Superfolie lässt nur Wasser durch

BILD DES MONATS

- 11 Winzling mit Schuppen

FORSCHUNG AKTUELL

- 12 Supernova aus zwei Zwergen
Vorläufer einer Sternexplosion identifiziert
- 15 Der Sprung der Eidechse
Steuerung mit dem Schwanz
- 18 Ein Sudoku benötigt mindestens 17 Vorgaben
Eine Vermutung wurde Gewissheit
- 20 Dialog Mensch – Maschine
Tastempfindungen per Computer
- 22 Springers Einwürfe
Wissenschaftspublikation im Umbruch

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial
- 6 Leserbrief/Impressum
- 81 Rezensionen
F. Vahrenholt et al.: Die kalte Sonne
H. Johnson: Bäume
Worldwatch Institute (Hg.): Zur Lage der Welt 2011
S. Bär: Der Untergang des Hauses Rascher
A. Stanton (Regie): John Carter; u. a.
- 92 Wissenschaft im Rückblick
Vom *Triceratops*-Schädel zum Weltraumkeim
- 93 Exponat des Monats
Die Laufmaschen-Hebemaschine
- 94 Vorschau



Grenzen der Physik

Der Physiker Tony Rothman kritisierte seine Disziplin, die fundamentale Fragen auf altbekannten Forschungsgebieten nicht beantwortet hätte. (»Die Physik – ein baufälliger Turm von Babel«, Februar 2012, S. 61)

Prof. Dr. Wolfgang Kinzel, Würzburg:

Tony Rothmans Kritik an den Physikvorlesungen mag für das »Undergraduate«-Studium an seiner Universität in Princeton/USA zutreffen, aber für das Physikstudium an unserer Fakultät in Würzburg – und sicherlich überall in Deutschland – gilt das nicht.

Unsere Studentinnen und Studenten lernen, dass Physik keinen absoluten Wahrheitsanspruch hat, sondern auf Hypothesen beruht, die zwar experimentell äußerst gut bestätigt wurden,

die jedoch immer wieder kritisch hinterfragt und gegebenenfalls erweitert oder sogar ersetzt werden müssen. In den Vorlesungen wird keinesfalls verschwiegen, dass Physiker trotz universeller Gesetze auf Näherungen angewiesen sind, um diese Gesetze auf komplexe Systeme anzuwenden. Schwierigkeiten mit der Interpretation und dem anschaulichen Verständnis der Quantenmechanik, mit der Herleitung der statistischen Mechanik und ungelöste Probleme werden offen angesprochen. Rothmans Vorwürfe zu Schmutz, Schwindel, Unredlichkeit, ja sogar Betrügereien bei der Vermittlung der Physik sind daher haltlos.

Selbstverständlich verwenden wir nicht den Großteil unserer Vorlesungen, um ungelöste Probleme zu diskutieren. Wir wollen unsere Studierenden dafür begeistern, dass es einen Teil unserer Natur gibt, für den wir eine Vielzahl von messbaren Phänomenen durch einige wenige mathematische Gesetze erklären können. Wir verschweigen aber auch nicht, dass die Physik (noch?) keine Lösung zu einem großen Teil unserer Natur liefert.

Obwohl also die harte Kritik von Tony Rothman für unser Physikstudium nicht zutrifft, hat sein Aufsatz an

unserer Fakultät unter Studenten und Dozenten zu einer lebhaften Diskussion geführt. Brauchen wir mehr Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie im Physikstudium? Wird zu viel gerechnet und zu wenig verstanden? Müssen die Schwierigkeiten und Grenzen der Physik stärker betont werden? Sollen lösbare Probleme in den Übungen reduziert und mehr Wert auf Näherungsmethoden gelegt werden? Solche Diskussionen sind ein erfreulicher Effekt des Aufsatzes von Rothman, der damit zur ständigen Verbesserung des Physikstudiums beiträgt.

Herbert Kern, Dogern: Ein wohltuender Beitrag zum Zustand der Physik. Neue Entdeckungen werden meist mit dem Titel »Eine der letzten Fragen der Welt ist beantwortet ...« angekündigt, dabei sind viele grundlegende Fragen noch völlig offen. Dem Autor ist es hervorragend gelungen, den Physikern eine neue Bescheidenheit zu verordnen.

Gilbert Brands, Krummhörn: Wenn sich der Autor einmal klarmachen würde, dass es jenseits unserer körperlichen Sensorik (Augen, Ohren und so weiter) nichts gibt, was wir als Menschen im philosophischen Sinn »verstehen« kön-

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
 E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzmann, Claus Schäfer, Natalie Meyer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
 Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;
 Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Andrea Jungbauer, Christine Kemmet, 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
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / \$Fr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Marco Buch, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 2481, Fax 0211 887-2686

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

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preislite Nr. 33 vom 01.01.2012.
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 Zugäng-

lichmachung, 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: © 2012 (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 Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



nen, hätte er nicht diese Probleme. Alle so genannten Erklärungen für Phänomene sind Projektionen in unsere sensorische Welt und haben daher mit ursächlicher Erklärung nichts zu tun.

Die Physik will nichts erklären. Ihre Aussage besteht mehr oder weniger in Sätzen wie diesem: »Wenn du unter diesen Randbedingungen diesen Schalter umlegst, schlägt das Messgerät dort hinten bis zur Marke 5 aus.« Unter Einhaltung der Randbedingungen funktioniert die Physik ausgezeichnet. Die Mathematik ist für die Systematik zuständig, nicht für Erklärungen. Und auch das funktioniert ausgezeichnet.

Ich weiß nicht, warum der Autor die Physik offensichtlich auf das Niveau einer Geisteswissenschaft herunterziehen will, die schon einen völlig anderen Theoriebegriff besitzt (in den Naturwissenschaften dient eine Theorie zur Voraussage, in den Geisteswissenschaften in der Regel zur nachträglichen Begründung). Stört es ihn, dass es noch Wissenschaften gibt, deren Berechnungen und Vorhersagen in der Praxis eintreffen?

Kostenfrage

Matthias Popp stellte eine spezielle Form von Pumpspeicherkraftwerken zur Energiespeicherung vor. (»Ringwallspeicher für die Energiewende«, Februar 2012, S. 84)

Walter Weiss, Kassel: Leider sind die Riesenkosten, die diese Fantasiegebilde des Verfassers auslösen würden, absolut ungerechtfertigt, wenn man ganz simple andere Möglichkeiten gegenüberstellt, die sofort ohne nennenswerten Aufwand praktiziert werden könnten. Nur ein Beispiel: Um ein Kilowatt zu speichern, benötigt man bei Bleibatterien einen Platz von etwa 50 Litern. Bei einem Ringwallspeicher müsste man zur Speicherung der gleichen Menge Energie 4000 Liter Wasser zirka 100 Meter hochpumpen.

Antwort des Autors Matthias Popp:

Bei Ringwallspeichern handelt es sich nicht um Fantasiegebilde, sie verursachen auch keine Riesenkosten. Bleiak-

kumulatoren haben Kapazitäten von etwa einer Kilowattstunde und einen Preis von rund 100 Euro bei einer Lebensdauer von zirka fünf Jahren. Diese Akkus könnten durchaus Stromüberschüsse einer Fotovoltaikanlage vom Tag auf die Nacht übertragen. Das ist aber nicht die Herausforderung, um die es geht. Eine Industrienation benötigt auch dann eine zuverlässige Stromversorgung, wenn über längere Zeit kein Wind bläst, die Fotovoltaikanlagen zugeschneit sind oder Nebel herrscht.

Diese Situationen habe ich mit meinen Wetteruntersuchungen über einen fast 40-jährigen Zeitraum analysiert. Ergebnis ist, dass pro Kopf der Bevölkerung eine Speicherkapazität von 100 bis 250 Kilowattstunden benötigt wird, um auch die ungünstigen Wetterperioden sicher zu überbrücken.

Das wären dann pro Kopf der Bevölkerung 10 000 bis 25 000 Euro Kosten für Akkus, bei einer Lebensdauer von fünf Jahren also jährlich 2000 bis 5000 Euro. Im Vergleich dazu liegt die jährliche Stromrechnung eines Einfamilienhaushalts bei rund 700 Euro. Die Kosten für eine Kilowattstunde mit einem Ringwallspeicher können dagegen mit 10 bis 50 Euro veranschlagt werden, bei einer Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten.

Bei Ringwallspeichern, die mit Wind- und Fotovoltaik kombiniert werden, ist, je nach Auslegung und konkreten Verhältnissen, eine Energieamortisationszeit von unter drei Jahren zu erwarten. Bei Batteriesystemen läge diese Zeit deutlich höher.

Einfluss des Mondes

Konstruktionsfehler des Auges gehen zurück auf die frühe Entstehung vor mehr als 500 Millionen Jahren, so der australische Sinnesphysiologe Trevor Lamb. (»Das Auge – Organ mit Vergangenheit«, Februar 2012, S. 22)

Franz-Stephan Beyer, Dresden: Im Artikel wird richtig erklärt, dass zunächst simple Lichtsensoren die frühen Tiere über Tag und Nacht und die Jahreszeiten informierten. Es sei allerdings

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

daran erinnert, dass man schon immer das halbe Leben in der Nacht verbringt und dann der Mond mit seinen verschiedenen hellen Phasen leuchtet. Dieser Rhythmus informiert über die teilweise dramatischen Veränderungen der Gezeitenhübe an den Meeresküsten (Springtiden und Nipptiden), worauf die dort lebenden Tiere ihr Verhalten bis heute angepasst haben und sich dabei am Mondlicht orientieren. Also nicht immer nur an die Sonne denken, der Mond ist auch noch da.

Erratum

»Bakteriengemeinschaften im Darm«, Forschung aktuell, Januar 2012, S. 19
Auf S. 20 muss es statt 100 Trillionen Bakterienzellen 100 Billionen heißen. Wir bitten den Fehler zu entschuldigen.

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

GEOWISSENSCHAFTEN

Diamanten rasen zur Erdoberfläche empor

Diamant ist extrem hart – doch unter den Bedingungen, die in der tiefen Erdkruste herrschen, kann er sich binnen Stunden oder Tagen in Graphit umwandeln. Nur wenn das edle Mineral sehr rasch von seinem Entstehungsort im Erdmantel in höhere Lagen der Erdkruste aufsteigt, ist sichergestellt, dass es die Reise unbeschadet übersteht. Das gelingt den Diamanten, indem sie von emporrasenden Gesteinsschmelzen mitgerissen werden. Wie diese ihr hohes Tempo erreichen, haben Vulkanologen um James Russell von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) herausgefunden.

Tief aus dem Erdinnern kommend, steigt schweres, kohlenstoffreiches

Magma auf. Im oberen Mantel kommt es mit kieselsäurereichen Mineralen in Kontakt, etwa mit Orthopyroxenen. Die Forscher testeten im Labor, was dabei passiert. Demnach lösen sich die Orthopyroxene im Magma, wodurch dessen Fähigkeit abnimmt, Kohlendioxid zu speichern. Infolgedessen tritt flüssiges Kohlendioxid aus der Schmelze aus, was ihre Dichte verringert und ihr einen starken Auftrieb verschafft. Die kimberlitische Schmelze steigt nun rasch nach oben und reißt dabei Material aus dem Mantel mit sich – darunter Diamanten.

Während des Aufstiegs löst sich immer neues kieselsäurereiches Material im Magma, was dafür sorgt, dass noch mehr Kohlendioxid austritt und



FOTOLIA / ARTTONE, SERGIY POPOV

In der tiefen Erdkruste würden sich Diamanten rasch in Graphit umwandeln.

der Auftrieb sich weiter verstärkt. Auf diese Weise kann das Material innerhalb von drei bis acht Stunden aus 120 Kilometer Tiefe bis fast zur Erdoberfläche vordringen, wo es erstarrt und die Diamanten sicher einschließt.

Nature 481, S. 352–356, 2012

WAHRNEHMUNG

Springspinnen jagen nur bei Grünlicht gut

Die Spinne *Hasarius adansoni* ergreift ihre Opfer mit einem präzisen Sprung. Dazu muss sie die Distanz zur Beute genau einschätzen. Das gelingt ihr auch – allerdings nur bei grünem Licht.

Hasarius adansoni besitzt zwei Hauptaugen mit einer Netzhaut, die aus vier Schichten besteht. Die Lichtrezeptoren darin sprechen jeweils bevorzugt auf unterschiedliche Wel-

lenlängen an. Auffällig ist, dass die zweitunterste Schicht Rezeptoren enthält, die für grünes Licht empfindlich sind, obwohl die Augenlinse solches Licht überhaupt nicht dorthin fokussiert. Mit dieser Netzhautschicht nehmen die Spinnen also nur unscharfe Bilder wahr.

Genau das hilft ihnen aber beim Schätzen von Entfernungen, wie Forscher um Mitumasa Koyanagi von der Osaka City University (Japan) jetzt gezeigt haben. Offenbar vergleicht die Spinne das verschwommene Bild der zweituntersten Netzhautschicht mit dem scharfen Bild der untersten Netzhautschicht, auf die korrekt

fokussiert wird. Aus dem Ausmaß der Unschärfe ermittelt sie den hierzu umgekehrt proportionalen Abstand des Beutetiers.

Ein Experiment, bei dem die Spinnen unter verschiedenen Lichtverhältnissen jagten, bestätigte diese Hypothese. Unter natürlicher sowie monochromatisch grüner Beleuchtung gelang den Tieren stets ein präziser Sprung. Bei Rotlicht hingegen zielten sie immer zu kurz. Der Grund hierfür ist, dass ihre Augenlinse rote Strahlen weniger stark bricht als grüne. Daraus resultiert eine größere Unschärfe auf der zweituntersten Netzhautschicht, weshalb die Spinne den Abstand zum Beutetier unterschätzt. Unter natürlichen Bedingungen tritt dieser Fehler nicht auf, da grüne Wellenlängen im Sonnenlicht reichlich vorkommen und von den für Grün empfindlichen Rezeptoren auch am effektivsten absorbiert werden.

Science 335, S. 469–471, 2012



NAGATA, T. ET AL. / SCIENCE / AAAS

Die Springspinne *Hasarius adansoni* besitzt vier vorwärtsgerichtete Augen: zwei Hauptaugen (Pfeile) und zwei vordere Seitenaugen. Um die Entfernung zum Beutetier einzuschätzen, benötigt sie lediglich die ersteren.

BIOLOGIE

Schutzpanzer gegen Piranhas

A*rapaimas gigas* ist einer der größten Süßwasserfische der Erde. Er lebt im Amazonasbecken, wird zweieinhalb Meter lang und 200 Kilogramm schwer. Obwohl er häufig mit hungrigen Piranhas zusammentrifft, fällt er ihnen selten zum Opfer. Marc Meyers von der University of California in San Diego und seine Kollegen haben nun herausgefunden, warum: Seine bis zu zehn Zentimeter langen Schuppen trotzen den messerscharfen Zähnen der Räuber. Meyers und sein Team befestigten Piranha-Zähne in einer Art Beißautomat und versuchten damit, *Arapaimas*-Schuppen zu durchstoßen. Diese erwiesen sich in den Versuchen jedoch als beinahe undurchdringlich; mehrmals zerbrachen sogar die Zähne der Raubfische an ihnen. Mikroskopuntersuchungen zeigten, dass die Schuppen zwei Lagen aufweisen: Die innere besteht aus mehreren Schichten elastischer Kollagenfasern, die kreuzweise übereinanderliegen, die äußere aus einer steinharten Faserschicht, die viel Kalzium enthält. Dieses biologische Kompositmaterial besitzt eine geriffelte Oberfläche, wodurch es trotz seiner spröden Außenschicht biegsam bleibt.

Advanced Engineering Materials 14, B1–B10, 2012



Enorm widerstandsfähige Schuppen bewahren den Fisch *Arapaimas gigas* davor, von Piranhas zerfleischt zu werden. Die hell gefärbten Bereiche waren von darüberliegenden Schuppen bedeckt.

UCSD JACOBS SCHOOL OF ENGINEERING

ASTRONOMIE

Mondmagnetfeld ging erst spät verloren

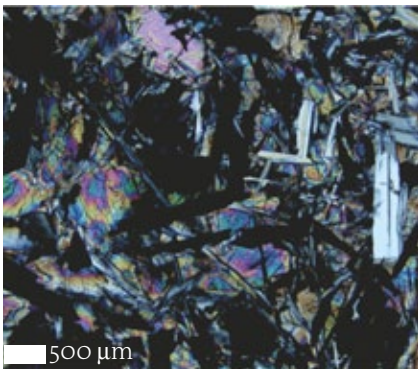
Im Unterschied zur Erde hat der Mond heute kein Magnetfeld. Vor langer Zeit war das anders: Der junge Trabant besaß noch einen flüssigen Kern aus geschmolzenem Eisen und Nickel, der über Konvektionsströme ein magnetisches Feld ähnlich dem irdischen erzeugte. Bislang waren

Forscher davon ausgegangen, dass der Mondkern vor rund 4,2 Milliarden Jahren erstarrte, wodurch das lunare Feld zusammenbrach. Nun hat ein Team um Erin Shea vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) Belege dafür gefunden, dass unser Trabant noch vor 3,7 Milliarden Jahren ein eigenes Magnetfeld aufwies.

Das Team untersuchte einen Basaltbrocken, den Apollo-11-Astronauten 1969 aufgesammelt hatten. Er gelangte als Lava an die Mondoberfläche und

erstarrte dort. Das geschah vor 3,7 Milliarden Jahren, wie die Forscher jetzt ermittelten, also rund 800 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde und ihres Begleiters. Der Stein enthält die Eisenverbindung Kamazit, die beim Erstarren magnetisiert wurde. Da sich Störeffekte wie die Stoßwelle eines Meteoriteneinschlags ausschließen lassen, kommt als Ursache für die Magnetisierung nur ein lunares Magnetfeld in Frage – das demzufolge fast dreimal so lange existierte wie bisher angenommen. Die damalige Flussdichte des Felds bestimmten die Forscher anhand der Eigenschaften des Brockens auf rund zwölf Mikrotelsa; das ist ein Viertel des heutigen Erdmagnetfelds in unseren Breiten.

Science 335, S. 453–456, 2012



Der Mondbrocken 10020 unter dem Mikroskop. Seine Magnetisierung erlaubt Rückschlüsse auf das frühere Magnetfeld unseres Trabanten.

SHEA, E. K. ET AL. / SCIENCE/AAAS

MEDIZIN

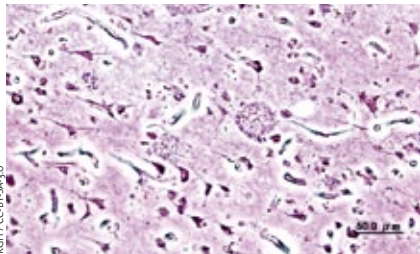
Krebsmedikament hilft gegen Alzheimer

Der Wirkstoff Bexaroten bewährt sich seit Jahren in der Krebstherapie. Offenbar hat er aber noch mehr Potenzial: Zumindest Mäuse kuriert er von den charakteristischen Anzeichen der Alzheimerkrankheit.

Im Gehirn von Alzheimerpatienten verklumpt der natürlich vorkommen-

de Eiweißstoff Beta-Amyloid und bildet unlösliche Ablagerungen, so genannte Plaques. Forscher machen diese verantwortlich für den fortschreitenden geistigen Verfall der Betroffenen. Genetisch veränderte Mäuse, die Beta-Amyloid nicht abbauen können, zeigen alzheimerähnliche Symptome: Sie folgen etwa nicht mehr ihrem Instinkt, Nester zu bauen, selbst wenn das Material dafür bereitsteht.

Als Forscher um Gary Landreth von der Case Western Reserve University in Cleveland (USA) solchen Tieren jedoch Bexaroten verabreichten, verhielten sich die Nager bereits nach wenigen Tagen wieder normal. In ihren Gehirnen war drei Tage nach Beginn der Behandlung fast die Hälfte der Plaques verschwunden; zwei Wochen nach



Mikroskopaufnahme von Eiweißablagerungen (Plaques) in der Großhirnrinde eines Alzheimerpatienten



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Aktuelle Spektrogramme
finden Sie täglich unter

www.spektrum.de/spektrogramm

Behandlungsbeginn waren es sogar drei Viertel. Selbst bei älteren Mäusen, die unter fortgeschrittener Demenz litten, führte die siebentägige Gabe von Bexaroten zu einem Rückgang der Plaques um 50 Prozent.

Bexaroten regt die Produktion des Apolipoproteins E (ApoE) an, von dem bekannt ist, dass es Beta-Amyloid abbauen hilft. Im nächsten Schritt wollen die Forscher nun an menschlichen Alzheimerpatienten untersuchen, ob das Medikament hier ebenfalls den Krankheitssymptomen entgegenwirkt.

Science 10.1126/science.1217697

MATERIALFORSCHUNG

Nur Wasser kommt durch

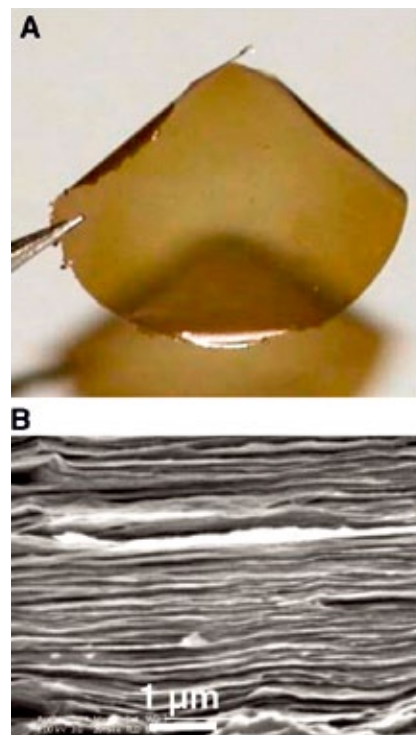
Eine Spezialfolie aus Graphenoxid hält verschiedenste Gase und Flüssigkeiten zurück, lässt Wasser aber ungehindert passieren. Das hat ein Team um den Physik-Nobelpreisträger Andre Geim von der University of Manchester gezeigt. Die Forscher konstruierten mikrometerdünne Membranen aus vielen aufeinandergeschichteten, überlappenden Graphenoxidblättern. Damit verschlossen sie spezielle Behälter, in die sie verschiedene Gase und Flüssigkeiten einfüllten. Anschließend beobachteten sie, wie schnell die Substanzen aus den Gefäßen entwichen.

Zur Überraschung der Wissenschaftler ließen die Membranen fast keinen der Stoffe durch. Weder Helium, Wasserstoff, Stickstoff oder Argon noch Ethanol, Hexan, Aceton oder Propanol gelangten während der mehrtägigen Versuche in messbarer Menge aus den Behältern. Wasser dagegen verdunstete

praktisch ungehindert, als wäre die Abdeckfolie nicht da. Die Forscher vermuten, dass die Membranen von winzigen Kanälen durchzogen sind, durch die sich nur Wassermoleküle bewegen können. Denn zwischen den einzelnen Graphenoxidblättern gibt es stellenweise Leerräume, die einige Zehntel Nanometer breit sind. Diese Leerräume verbinden sich zu einem Netzwerk aus Poren.

In wasserfreier Umgebung verengen sich die Kanäle, was die Membran undurchlässig macht. Eindringende H_2O -Moleküle dagegen erweitern die Poren etwas, so dass eine monomolekulare Wasserschicht darin Platz hat. Enorme Kapillarkräfte saugen diese Wasserschicht dann rasch durch die feinen Kanäle. Das Material könnte sich zum Beispiel dafür eignen, Wasser hochselektiv aus Stoffgemischen zu entfernen.

Science 335, S. 442–444, 2012



Die mikrometerdünnen Spezialfolien (A) lassen nur Wasser durch. Elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass sie aus vielen aufeinandergeschichteten Graphenoxidlagen bestehen (B).

WINZLING MIT SCHUPPEN



15 Millimeter von der Schnauze bis zur Schwanzspitze: Dieses Jungtier von *Brookesia micra* zählt zu den kleinsten Reptilien der Welt. Die Eltern erreichen keine drei Zentimeter Länge. Frank Glaw von der Zoologischen Staatssammlung München und seine Kollegen entdeckten die neue Chamäleonart und drei weitere winzige Verwandte im äußersten Norden Madagaskars sowie auf der vorgelagerten Insel Nosy Hara in vorwiegend bewaldeten, felsigen Gebieten. Klare Worte wählten die Forscher mit den weiteren Artnamen *B. desperata* und *B. tristis*: Ihr Lebensraum, obwohl Schutzgebiet, wird immer mehr zerstört.

PLoS ONE 7(2): e31314, 2012

Supernova aus zwei Zwergen

Bei der Rekonstruktion einer Supernova erlebten Astronomen eine Überraschung. Der gewaltigen Sternexplosion vor 400 Jahren ging die Verschmelzung zweier Weißer Zwerge voraus.

VON JAN HATTENBACH

Ende der 1990er Jahre stellten zwei Forscherteams Erstaunliches fest: Galaxien driften im Lauf der Zeit immer schneller voneinander fort – die Expansion des Kosmos beschleunigt sich also. Diese Entdeckung, heute einer der Gravitation entgegenwirkenden »Dunklen Energie« zugeschrieben, verhalf den Amerikanern Saul Perlmutter, Adam Riess und Brian Schmidt 2011 zum Nobelpreis für Physik (siehe SdW 12/2011, S. 12). Doch wie sicher können sie sich ihrer Erkenntnis sein? Die Distanzen der Galaxien von der Erde maßen die Forscher mit Hilfe von Supernovae des Typs Ia – Sternexplosionen, die so hell sind, dass man sie noch am

Rand des sichtbaren Universums sehen kann. Sie gelten als gute Entfernungsmarken – aber sind sie es auch?

Verwendet man geeignete Korrekturfaktoren, verhalten sich solche Supernovae wie »Standardkerzen« immer gleicher Helligkeit. Vergleichbar mit im Raum verteilten Glühbirnen bekannter Wattzahl sollten sie umso schwächer erscheinen, je weiter sie entfernt sind. Diese bemerkenswerte Eigenschaft erklären die Astronomen dadurch, dass bei solchen Ereignissen jeweils sehr ähnliche Objekte explodieren. Unter Generalverdacht standen schnell die Weißen Zwerge: Sternleichen, die durch Kernfusion keine Energie mehr gewin-

nen können. Sie sind etwa so groß wie die Erde, können aber mehr Material als die Sonne enthalten. Stabil sind sie jedoch nur bis zu etwa 1,4 Sonnenmassen. Wird dieser Wert überschritten, beginnen die Atomkerne in ihrem Inneren plötzlich und unkontrolliert zu verschmelzen, und die Zwerge explodieren als Supernovae.

Ein astronomischer Glücksfall

Doch streng genommen war dies bis vor Kurzem nur eine Hypothese. Immerhin hatten die Astronomen in den Spektren der Supernovae die Hauptbestandteile Weißer Zwerge gefunden: große Mengen Kohlenstoff und Sauerstoff. Wasserstoff und Helium, aus denen »normale« Sterne hauptsächlich bestehen, kamen hingegen nur in geringen Mengen vor. Auch Archivbilder lieferten Hinweise: Oft fanden die Forscher auf ihnen keine Objekte, die als Kandidat für eine Explosion in Frage kamen. Die Supernova-Vorläufer müssen also sehr klein gewesen sein.

Ein überzeugender Nachweis fehlte aber noch. Es war daher ein Glücksfall, als im August 2011 in der Galaxie M101 eine geeignete Typ-Ia-Supernova aufleuchtete, die nächstgelegene seit Jahrzehnten (Bild links). Nun hatte man einen Tatort praktisch um die Ecke, den man mit einem ganzen Arsenal modernster Teleskope untersuchen konnte. Schon elf Stunden nach der eigentlichen Explosion hatten verschiedene Teleskope M101 in den Blick genommen. So konnten die Forscher die auf den Namen SN 2011fe getaufte Supernova fast von Beginn an verfolgen.

Ein kleines, ferngesteuertes Teleskop auf Mallorca lichtete die Galaxie zufällig sogar acht Stunden vorher ab. Zu sehen war allerdings – nichts! Für Joshua

Im August 2011 leuchtete in der 21 Millionen Lichtjahre entfernten Spiralgalaxie M101 ein Stern hell auf. Bei dieser Explosion handelte es sich um SN 2011fe, die nächstgelegene Supernova des Typs Ia seit vielen Jahren. Das Bild entstand am 18. September, etwa zwei Wochen nach Erreichen der Maximalhelligkeit. Zu diesem Zeitpunkt war die Supernova bereits mit einem Fernglas zu sehen.





RÖNTGEN: NASA/CXC/SAO/RUTGERS; JACK HUGHES ET AL.; OPTISCH: NASA/ESA/STSCI

Bloom von der University of California in Berkeley und seine Kollegen ist genau das der lange gesuchte Beleg, dass hier ein Weißer Zwerg explodiert ist (*Nature*, 480, S. 348–350, 15. Dezember 2011). Ein größerer Stern hätte nämlich einen Lichtblitz erzeugt, der zu diesem Zeitpunkt vom Teleskop registriert worden wäre. Um letzte Zweifel auszuräumen, nahmen die Forscher auch theoretische Modelle explodierender Sterne zu Hilfe. »Es ist das erste Mal, dass wir sicher sagen können, was da genau explodiert ist«, sagt Blooms Kollege Ken Shen.

Flüchtende Helfersterne

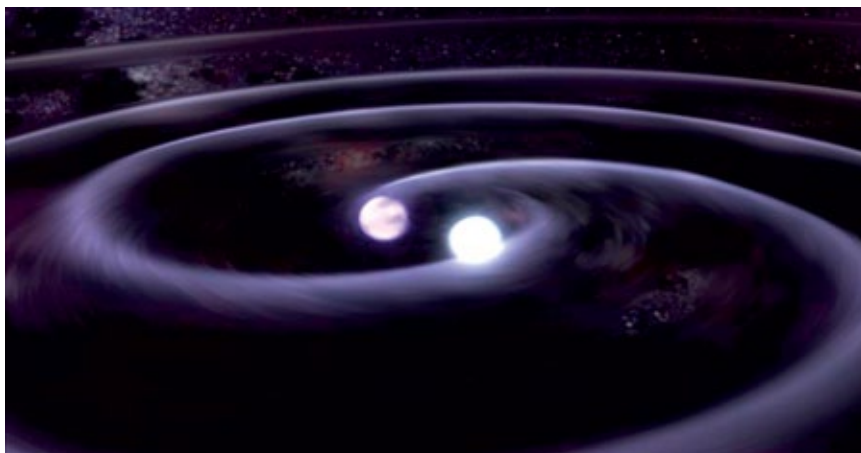
Damit scheinen die Weißen Zwerge zwar überführt. Doch ihr kriminalistischer Spürsinn ließ die Forscher nicht ruhen. Denn eine weitere, scheinbar simple Frage war offen geblieben. Wie erreicht ein Weißer Zwerg seine kritische Masse? Klar ist: Ein einzelnes solches Objekt macht noch keine Supernova – die meisten Zwerge liegen deutlich unter der so genannten Chandrasekhar-Grenze von 1,4 Sonnenmassen. Ohne einen den Zwerg in enger Um-

laufbahn umkreisenden »Materiespende-der« kann es also nicht zur Explosion kommen. Der Mittäter könnte ein normaler, sonnenähnlicher Stern sein, der Wasserstoff zu Helium verbrennt, ein gealterter Stern, der bereits Helium zu schwereren Elementen verarbeitet oder auch ein Roter Riese, also ein sterbender Stern in seinen letzten Lebensphasen. Selbst ein zweiter Weißer Zwerg ist denkbar. Wegen der vermuteten Seltenheit entsprechender Doppelsysteme rechneten die Forscher damit aber bislang eher nicht.

In fast allen Fällen würde Materie vom Begleitstern langsam in Richtung des Zwergs strömen, sich in einer so genannten Akkretionsscheibe um ihn

sammeln und langsam seine Masse vergrößern. Bei Erreichen der Chandrasekhar-Grenze explodiert der Zwerg dann. Die immer gleichen Umstände, insbesondere die exakt gleiche Explosionsmasse, machen dieses Akkretionsmodell zur besten Erklärung für Supernovae des Typs Ia. Der Spenderstern würde die Explosion sogar überleben, sich durch den Druck der Explosion jedoch schnell vom Ort des Geschehens entfernen.

Was aber, wenn kein rasch fliehender Helferstern zu finden ist? Dann kommt nur noch ein einziges Szenario in Frage: Falls das System aus zwei Weißen Zwergen bestünde, würden beide Beteiligten zu einem einzigen Objekt verschmel-



NASA, CSFC, TOD STROHMAYER / CHANDRA X-RAY OBSERVATORY / DANA BERRY

zen und bei der anschließenden Explosion vollständig vernichtet.

Die Suche nach sich rasch bewegendem Helfersterne ist schwierig, selbst M 101 ist dafür zu weit entfernt. Sicher sind sich die Forscher nur darin, dass es kein Roter Riese war, der die Lunte an den Vorläufer von SN 2011fe gelegt hat; es bleiben also noch die Möglichkeiten sonnenähnlicher Stern und Weißer Zwerg. Sie brauchen also einen weiteren Testfall: eine Supernova in noch geringerer Entfernung.

Alle Kandidaten scheiden aus – bis auf einen

Doch diese sind rar. In den vergangenen Jahrzehnten ereignete sich keine einzige Typ-Ia-Supernova in der Nähe der Milchstraße. Die sogar mit dem unbewaffneten Auge sichtbare Supernova von 1987 in der Großen Magellanschen Wolke war vom Typ II, hier explodierte ein massiver Stern, 17-mal so schwer wie die Sonne. 2004 immerhin fanden Astronomen andernorts einen möglichen Kandidaten für einen Helferstern. Das sonnenähnliche Exemplar könnte seinerzeit die Supernova des Jahres 1572 ausgelöst haben, die unter anderem der berühmte Astronom Tycho Brahe beobachtete. Andererseits könnte er auch nur zufällig in der Nähe der Explosion gewesen sein.

Jetzt gelang der Durchbruch. Erstmals scheint es Astronomen gelungen zu sein, alle Explosionsszenarien bis auf eines ausschließen zu können. Der Ort des Geschehens: wiederum die Gro-

ße Magellansche Wolke, 160 000 Lichtjahre entfernt, im Vergleich zu M 101 gerade vor der Haustür. Vor 400 Jahren zerriss es hier einen Weißer Zwerg, und dank Hubble und anderer Teleskope können Forscher die damalige Explosionszone heute im Detail studieren. Einen Stern in der Nähe des Zentrums der schalenförmigen Explosionswolke, die als SNR 0509-67.5 bezeichnet wird, konnten Bradley Schaefer und Ashley Pagnotta von der Louisiana State University aber auch nach intensiver Suche nicht finden (siehe Bild auf S. 13). Selbst wenn ein hypothetischer Begleiter durch den Explosionsschock mit hoher Geschwindigkeit fortgestoßen worden wäre, hätte er in 400 Jahren nicht weit genug kommen können, um sich den Blicken der Astronomen zu entziehen. Als Mittäter scheiden hier also ein Roter Riese ebenso wie ein sonnenähnlicher Stern aus.

Als einzige Erklärung bleibt daher das Szenario zweier verschmelzender Weißer Zwerge übrig. »Unsere Analyse folgt der Logik von Sherlock Holmes«, meinte Pagnotta im Januar auf der Jahrestagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft. »Wir haben alle unmöglichen Szenarien ausgeschlossen, was übrig bleibt, so unwahrscheinlich es auch sein mag, muss die Wahrheit sein!«

Zum ersten Mal wurde damit das Vorläufersystem einer Typ-Ia-Supernova identifiziert – und ausgerechnet das beliebte Akkretionsmodell scheidet aus. Ein Einzelfall? Pagnotta und Scha-

fer wollen bei sechs weiteren Explosionen nach möglichen Helfersterne fahnden, können dies mit ihrer Methode aber nur in der unmittelbaren Umgebung der Milchstraße tun, denn in fernen Galaxien lassen sich einzelne Sterne kaum ausmachen.

Ein anderes Verfahren verwendeten Akos Bogdan und Marat Gilfanov vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Ihre Überlegung: Bei der Akkretion von Materie auf den Weißer Zwerg sollte reichlich Röntgenstrahlung entstehen, nicht aber bei der Kollision zweier Zwerge. Gilfanov und Bogdan durchsuchten daher die von fernen Galaxien insgesamt abgegebene Röntgenstrahlung und verglichen diese mit der statistischen Anzahl von Typ-Ia-Supernovae in diesen Galaxien (*Nature* 463, S. 924–925, 18. Februar 2010). Ihr Resultat: Der Gesamtfluss der Röntgenstrahlung ist zu gering, als dass er alle Supernova-Explosionen in einer Galaxie erklären könnte. Nur wenige Prozent aller Supernovae vom Typ Ia wären demzufolge auf das Akkretionsmodell zurückzuführen. Andere Forschergruppen bezweifeln dieses Ergebnis zwar, doch Gilfanov sieht es durch Pagnottas und Schaefers Resultat gestützt.

Andererseits stießen Forscher auch auf Indizien, die für das Akkretionsmodell sprechen. So berichteten Rasmus Voss vom Max-Planck Institut für Extraterrestrische Physik in Garching und Gijs Nelemans von der Radboud-Universität in Nimwegen 2008 über Röntgenstrahlung, die tatsächlich aus der

Richtung einer späteren Supernova zu kommen schien.

Noch bleibt viel zu tun, doch allmählich zeichnet sich ein Bild ab: Zumindest einige, vielleicht sogar die meisten Supernovae vom Typ Ia entstehen bei der Kollision zweier Weißer Zwerge. Die Grundidee, dass alle diese Objekte genau dann explodieren, wenn sie 1,4 Sonnenmassen erreicht haben, lässt sich also kaum aufrechterhalten. Wenn sie verschmelzen, können sie schließlich ganz unterschiedliche Massen besitzen.

Steht damit die Eigenschaft der Supernovae als Standardkerzen in Frage, die unter anderem zur Entdeckung der Dunklen Energie geführt hat? Allzu beunruhigt muss man wohl nicht sein. Eine Forschergruppe um Rüdiger Pakmor vom Heidelberger Institut für Theoretische Studien berichtete im Januar, am Computer eine solche Zwergenkollision simuliert zu haben (*arXiv:1201.5123v1 [astro-ph.HE]*, 24. Januar 2012). Die resultierende Explosion besaß dabei recht genau die Eigenschaften, die man bei den meisten Supernovae vom

Typ Ia beobachtet. Die Dunkle Energie steht also nicht zur Disposition. Im Gegenteil: Wenn die Astrophysiker ihre Standardkerzen erst einmal richtig verstanden haben, werden sie die Expansion des Universums noch weit genauer vermessen können als bisher – und so sogar herausfinden, ob der Einfluss der Dunklen Energie konstant ist oder sich im Lauf der Zeit verändert.

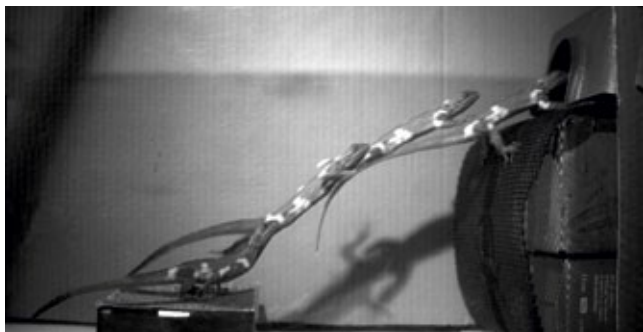
Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er bloggt auf www.scilogs.de/himmelslichter.

BIOPHYSIK

Springende Eidechsen, Dinosaurier und Roboter

Agamen-Eidechsen steuern beim Springen mit ihrem Schwanz – genauso wie früher einige Dinosaurier!

VON R. MCNEILL ALEXANDER



Eidechsen der Agamen-Familie können ziemlich gut springen und noch besser landen. Forscher um den Biologen Robert J. Full von der University of California in Berkeley filmten diese Schuppenkriechtiere, wie sie von einer waagrechten Plattform an eine senkrechte Wand hüpfen. Dabei steuerten sie ihre Flugbewegung mit dem Schwanz so, dass sie für die akrobatische Landung ihren Körper immer in die richtige Haltung brachten (*Nature* 481, S. 181–184, 2012).

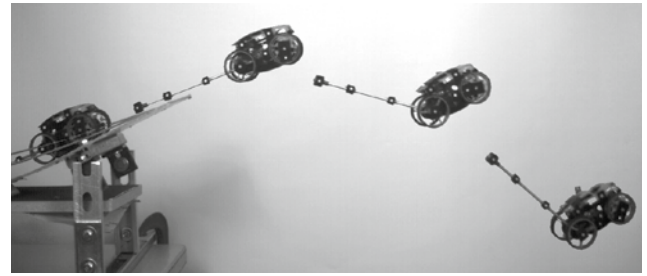
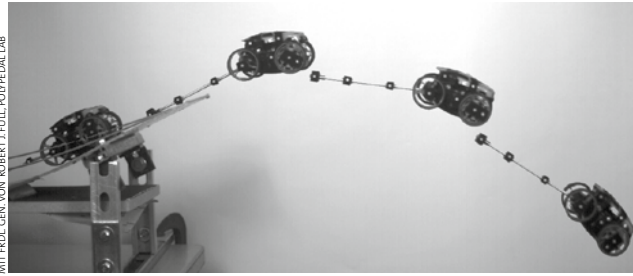
Jede Bewegung unterliegt dem Prinzip von der Erhaltung des Drehimpulses. Dieses besagt, dass der Drehimpuls eines Systems gleich bleibt, solange keine äußeren Kräfte darauf einwirken. So kann ein Seiltänzer sein Gleichgewicht

Diese Sequenzen zeigen die Eidechse beim Sprung über einen Zeitraum von 0,6 Sekunden. Links springt das Tier von einer griffigen, rechts von einer glatten Plattform ab. Man sieht, wie es den Schwanz einsetzt, um den Kopf für die Landung oben zu halten.

bewahren, indem er zum Ausgleich von Lageänderungen seines Körpers die Balancierstange in die entgegengesetzte Richtung neigt. Mit kleinen Ausgleichsbewegungen kann er also seinen Schwerpunkt dort behalten, wo er hingehört: genau über dem Seil. Lange, dünne Stangen funktionieren besser als kurze, dicke. Denn bei gleichem Gewicht überwiegt bei ersteren das Trägheitsmoment. Der Drehimpuls eines Körpers ist gleich seiner Winkelgeschwindigkeit multipliziert mit seinem Trägheitsmoment. Diese simple Regel

setzt nur voraus, dass seitliche Bewegungen so klein sind, dass das Trägheitsmoment des Tänzers um das Seil herum vernachlässigt werden kann.

Die kalifornischen Forscher fanden heraus: Drehte die Eidechse für eine sichere Landung an der glatten Wand beim Sprung Kopf und Körper nach oben, bog sie gleichzeitig auch ihren Schwanz nach oben (Zeitlupenaufnahmen verschiedener Sprünge finden Sie hier: www.physorg.com/news/2012-01-lizards-dinosaurs-message-robots-tail.html). Dadurch drehte sich der Schwanz



Spielzeugroboter im Hechtsprung: Dieses kleine Vehikel hat einen beweglichen Schwanz, den es über eine Elektronik aktiv steuern kann. Bei passivem Schwanz (links) neigt es sich nach unten, während es bei aktiver Steuerung seine Lage beibehält.

im Uhrzeigersinn und der Körper in entgegengesetzter Richtung, so dass der Gesamtdrehimpuls erhalten blieb.

Dann wollten die Biologen klären, ob die Eidechse mit dem Schwanz auch Bewegungsfehler beim Absprung nachkorrigieren kann. Dafür legten sie bei einigen Sprüngen eine glatte Folie auf die Plattform. Rutschte dem Tier beim Absprung ein Fuß weg, verkippte zwar sein Körper, es korrigierte aber sofort die Schiefelage durch eine passende Schwanzdrehung.

Full und sein Team entwickelten ein mathematisches Modell, um ihre Beobachtungen quantitativ nachzuvollziehen. Zu dessen Überprüfung bauten die Forscher ein Spielzeug: einen kleinen Roboter mit vier Rädern und einem Schwanz (Bilder oben). Wie ein Springspringer hechtet das Vehikel von einer Schanze. Dabei kippt es mit der Nase schon nach unten, während die Hinterräder noch auf dem Sprungbrett rollen. Bis zur Landung korrigiert das Gerät jedoch seine Schiefelage mit seinem Schwanz nach, dessen Orientierung mit Hilfe eines Gyroskops an Bord gesteuert wird. Der Roboter kompensiert also seine schlechte Absprunghaltung sogar besser als die Eidechsen, wie auch im Video zu sehen.

Bei jeder guten Forschungsarbeit werfen die Resultate neue Fragen auf. So betrachteten Wissenschaftler in ihrer Studie nur die Schwanzbewegung in der vertikalen Ebene, in der die Hauptbewegung der Eidechse – das Nicken – verläuft. Kann der Schwanz auch dazu dienen, die Seitenbewegung, das »Gieren«, sowie das Rollen, nämlich die Drehung um die Bewegungsrichtung, auszugleichen? Beim Sprung an die steile Wand dominiert das Nicken. Aber Sprünge in komplexem Gelände über Felsen oder Äste erfordern Anpassungen in drei Dimensionen. In einer vorherigen Publikation hatten die Kalifornier bereits die Selbstkorrekturbewegungen fallender Geckos untersucht, doch jetzt können sie das Phänomen mit der Computersimulation noch genauer studieren.

Pferde springen am höchsten

Eine Reihe anderer Tiere nutzt ebenfalls das Trägheitsmoment ihres oft körperlangen Schwanzes zur Bewegungssteuerung, etwa Lemuren, Kängururatten oder Katzen. Nach Ansicht der Biologen könnten auch einige Dinosaurierarten Sprünge in ihrem Bewegungsrepertoire gehabt haben, um damit wie die Agamen ihre Körperhaltung zu steuern. Falls das zutrifft, waren es wohl aber höchstens kleinere Dinos. Sehr große Tiere können einfach nicht weit springen. Denn bei ähnlicher Körpergeometrie wie bei den kleineren Verwandten steigt das Körpergewicht mit der dritten Potenz der Körperlänge, während die Stärke ihrer Muskeln und Knochen nur proportional zum Quer-

schnitt wächst, also etwa mit dem Quadrat der Körperlänge.

Pferde und Elandantilopen zählen mit je rund einer halbe Tonne Lebendgewicht zu den größten Tieren, die noch springen können. Berechnungen auf Basis von Dinosaurierknochen und geschätzter Muskelmasse lassen vermuten, dass die größeren Urzeitechsen nicht besonders beweglich waren.

Gibt es Hinweise darauf, dass zumindest kleine Dinosaurier Sprünge absolviert haben? Die Fleisch fressende Gattung *Deinonychus* könnte mit ihren mutmaßlichen 70 Kilogramm die Größe eines Leoparden gehabt haben – und war damit fürs Springen eigentlich wie geschaffen. Einige Fossilienfunde legen sogar nahe, dass *Deinonychus* sogar in Gruppen gejagt und so weitaus größere Dinos erlegt haben könnte. Das ist zwar umstritten, doch gilt als sicher, dass *Deinonychus* auf Rücken und Flanken ihrer Opfer sprang, um sich dort mit seinen riesigen Krallen festzuhalten. Heute nutzen Löwen und andere große Raubkatzen ihre scharfen Krallen, um ihre Opfer zu greifen und ihnen dann mit ihren Zähnen an die Gurgel zu gehen.

Im Internet existieren diverse Zeichnungen von *Deinonychus* mitten im Sprung auf ein Opfertier. Das mag im Einzelfall etwas übertrieben sein, aber bei einigen ist sehr schön zu sehen, wie sich dabei ihr Schwanz nach oben biegt – ganz ähnlich, wie es Hull und sein Team bei den Agamen-Eidechsen beobachtet haben.

R. McNeill Alexander arbeitet am Institute of Integrative and Comparative Biology an der University of Leeds.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 481, S. 181–184, 15. September 2011



MEHR WISSEN
BEI **Spektrum.de**



Die hier genannten
Experimente als Video auf

www.spektrum.de/eidechse



GEORG VON HOLTZBRINCK PREIS FÜR WISSENSCHAFTSJOURNALISMUS

AUSSCHREIBUNG 2012

Der Preis wurde anlässlich des 150jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen. Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine Jury. Deren aktuelle Mitglieder sind:

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

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

ULRICH BLUMENTHAL
Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,
Deutschlandfunk

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

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

PROF. DR. MATTHIAS KLEINER
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

DR. CARSTEN KÖNNEKER
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

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

ANDREAS SENTKER
Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT

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

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichten Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemeinverständlich sein und zur Popularisierung wissenschaftlicher Sachverhalte beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien vergeben. **Jeder Preis ist mit 5.000 EUR dotiert.** Erstmals wird ein Nachwuchspreis für Bewerber, die Jahrgang 1983 und jünger sind, ausgelobt. **Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 EUR dotiert.**

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

Bewerben Sie sich mit drei Arbeitsproben und einem Kurzlebenslauf bis zum 1. April 2012.

KONTAKT

Veranstaltungsforum
der Verlagsgruppe
Georg von Holtzbrinck GmbH

Taubenstraße 23
10117 Berlin

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

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

SCIENTIFIC
AMERICAN

nature

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Ein Sudoku benötigt mindestens 17 Vorgaben

Um diese Vermutung zu beweisen, haben Gary McGuire und seine Kollegen einen Supercomputer fast fünfzehn Milliarden Möglichkeiten durchprobieren lassen.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Das Knobelspiel Sudoku («einsame Zahlen») eroberte vor etlichen Jahren von Japan aus die Welt und hat auch nach dem Abflauen der ersten Begeisterungswoge immer noch einen festen Platz in Tageszeitungen und auf Internetseiten. Es geht darum, ein quadratisches Brett aus 9 mal 9 Feldern so mit den Zahlen von 1 bis 9 zu füllen, dass jede der Zahlen in jeder Zeile, jeder Spalte und in jedem Teilkästchen der Größe 3·3 genau einmal vorkommt (Spektrum der Wissenschaft 3/2006, S. 100). Die Belegung gewisser Felder ist vorgegeben.

Ein Sudoku-Rätsel ist nur dann richtig gestellt, wenn diese Vorgaben die Lösung eindeutig bestimmen. Es darf also zu ein und derselben Vorgabemenge keine zwei vollständig und regelgerecht ausgefüllte Sudoku-Bretter geben.

Weit entfernt von dem kreuzworträtselartigen Zeitvertreib aus der Tageszeitung wetteifern die harten Sudoku-Profis darum, aus möglichst wenigen Vorgaben die komplette Belegung zu erschließen. Im Prinzip ist ein Rätsel umso schwerer, je weniger Information es bereitstellt. Die härtesten unter ihnen fordern vom Löser, aus nur 17 Vorgaben zu erschließen, was in die restlichen 64 Felder gehört (Bild oben). Der muss lange Wege im Irrgarten der potenziellen Lösungen zurücklegen, darunter sehr viele Sackgassen. Nur rechnen mit den Zahlen auf den Feldern muss er nicht, denn die haben, außer dass sie verschieden sind, keine Bedeutung und wären ohne Weiteres durch andere Symbole ersetzbar.

Jahrelangen Bemühungen zum Trotz hat noch niemand ein eindeutig lösbares Sudoku gefunden, das mit weniger als 17 Vorgaben auskommt. Inzwischen wissen wir, warum: Es gibt keins.

Gary McGuire, Bastian Tugemann und Gilles Civario von der School of Mathematical Sciences des University College Dublin haben alle Möglichkeiten erschöpfend durchprobiert (<http://arxiv.org/abs/1201.0749>).

Ein solches mit »roher Gewalt« (englisch: brute force) erzielt Resultat hinterlässt unweigerlich einen schalen Nachgeschmack. Natürlich wäre ein eleganter mathematischer Beweis, der alle Einzelfälle auf einmal erledigt, viel schöner gewesen; aber auf den wartet die Welt bisher vergebens. Dagegen ist bemerkenswert, wie es McGuire und seinen Kollegen gelungen ist, den Aufwand für die erschöpfende Durchsuchung auf ein praktikables Maß zu reduzieren. Denn die Zahl der zu überprüfenden Möglichkeiten ist wahrhaft gigantisch.

An dieser »kombinatorischen Explosion« scheitert schon die naheliegendste Idee: Man streue 16 Zahlen irgendwie auf die 81 Felder und teste, ob es zu dieser Belegung eine und nur eine Lösung gibt; das wiederhole man für alle denkbaren 16er-Belegungen. Da ist der umgekehrte Weg bereits um viele Zehnerpotenzen kürzer: Man prüfe für jede vollständige regelgerechte Belegung aller Felder, ob es eine Teilbelegung mit 16 Feldern gibt, die nur diese Lösung zulässt.

Nutzung von Symmetrien spart einen Faktor 10^{12}

Die Anzahl sämtlicher möglichen Lösungen ist mit ungefähr $6,7 \cdot 10^{21}$ zwar immer noch jenseits des Vorstellbaren; aber man muss nicht alle durchprobieren. Es ändert nichts Wesentliches, wenn man die neun Zahlen permutiert, das heißt jede durch eine andere – oder auch sich selbst – ersetzt, aber nie zwei

			8		1			
						4	3	
5								
				7		8		
						1		
	2			3				
6							7	5
		3	4					
			2			6		

ALLE ABILDUNGEN DIESES ARTIKELS NACH: MCGUIRE G. ET AL., ARXIV:1201.0749V1 [CS.DS], 2012

Ein eindeutig lösbares Sudoku mit nur 17 Vorgaben

verschiedene Zahlen durch dieselbe. Denn wenn es zu einer Lösung eine eindeutig bestimmende 16er-Teilbelegung gibt, gilt das auch für die permutierte Version und umgekehrt. Darüber hinaus darf man, ohne dass sich etwas Wesentliches ändert,

- das ganze Brett transponieren, das heißt an der Diagonalen von links oben nach rechts unten spiegeln, so dass Zeilen zu Spalten werden und umgekehrt;
- Streifen vertauschen; dabei besteht ein Streifen aus drei neben- oder übereinander angeordneten 3·3-Kästchen;
- innerhalb eines Streifens Zeilen beziehungsweise Spalten vertauschen.

Eine Spiegelung an der waagerechten oder der senkrechten Mittelachse oder an der anderen Diagonale ist aus den genannten Transformationen zusammensetzbar und muss daher nicht eigens berücksichtigt werden.

Fasst man jeweils alle Lösungen, die einander in diesem Sinn gleichwertig sind, zu so genannten Äquivalenzklassen zusammen, dann muss man sich nur noch mit einem Vertreter aus jeder Klasse beschäftigen. Eine vollständige

Liste solcher Vertreter haben bereits 2006 Ed Russell und Frazer Jarvis bereitgestellt. Es sind nur noch lumpige 5,47 Milliarden Stück; mit geschickter Datenkompression passen sie sogar auf eine einzige DVD. Aber es wären immer noch pro Stück $3,4 \cdot 10^{16}$ Teilbelegungen mit 16 Feldern zu testen – viel zu viel Arbeit.

Auf der Suche nach einem geschickteren Verfahren kam den Mathematikern aus Dublin eine den Sudoku-Kennern geläufige Beobachtung zu Hilfe. Für ein fast gelöstes Sudoku mit nur noch vier freien Plätzen gibt es manchmal zwei verschiedene Ergänzungen; das ursprüngliche Rätsel ist dann nicht korrekt gestellt. So kann man im Bild unten die roten Felder so wie angegeben füllen oder unter Vertauschung der Zahlen 5 und 9. Ein korrekt gestelltes Sudoku, das diese Lösung haben soll, muss also mindestens eines der roten Felder durch eine Vorgabe festlegen, sonst ist die Eindeutigkeit dahin. Entsprechendes gilt für die grünen und die blauen Felder.

Die Mathematiker aus Dublin nennen eine Teilmenge wie zum Beispiel die der roten Felder eine »unvermeidliche Menge« (unavoidable set). Denn wegen der Eindeutigkeitsforderung ist

9	3	7	8	5	6	2	4	1
5	6	2	1	9	4	3	8	7
4	8	1	2	7	3	5	6	9
8	2	3	6	4	7	9	1	5
6	1	5	9	3	2	4	7	8
7	4	9	5	8	1	6	2	3
3	7	8	4	6	9	1	5	2
1	9	6	7	2	5	8	3	4
2	5	4	3	1	8	7	9	6

Diese Sudoku-Lösung bleibt eine gültige Lösung, wenn man in den vier roten Feldern die beiden Zahlen (hier 5 und 9) vertauscht, desgleichen in den blauen und den grünen Feldern. Ein Rätsel mit dieser Lösung, das nicht aus jeder Farbgruppe wenigstens eine Zahl festlegt, ist nicht mehr eindeutig lösbar.

es unvermeidlich, in mindestens ein Feld einer solchen Menge eine Vorgabe zu setzen. Stellen wir uns eine unvermeidliche Menge als ein beliebig dünnes Plättchen vor, wobei die einzelnen Felder durch sehr dünne Stege verbunden sind. Dieses Plättchen soll befestigt werden; dazu genügt es, wenn man an irgendeinem seiner Felder einen Nagel einschlägt, das heißt dort eine Vorgabe setzt.

Kann man 360 Plättchen mit nur 16 Nägeln festnageln?

Zu einer gegebenen Lösung gibt es sehr viele Plättchen – im Durchschnitt um die 360 Stück, wenn man sich auf Plättchen mit bis zu zwölf Feldern beschränkt (verschiedene Lösungen haben verschiedene Plättchensortimente). Neben den genannten Viererplättchen gibt es noch größere, darunter Neuner, die nicht nur einen, sondern zwei Nägel erfordern (Bild rechts oben). Mehrere Plättchen, die ein und dasselbe Feld bedecken, kann man alle auf einmal durch einen einzigen Nagel in dieses Feld fixieren; aber es stehen insgesamt nur 16 Nägel zur Verfügung.

Also kommt es darauf an, die Stellen zum Festnageln möglichst geschickt zu wählen. Wenn bei einer optimalen Wahl lose Plättchen übrig bleiben, kann es zu dieser Lösung kein Rätsel mit nur 16 Vorgaben geben. Sind genau 16 Nägel ausreichend, prüfe man nach, ob das so definierte Rätsel eine eindeutige Lösung hat. Das ist nicht von vornherein klar; es könnte ja noch andere Quellen der Mehrdeutigkeit geben als die gefundenen Plättchen. Kommt das optimale Verfahren mit weniger als 16 Nägeln aus, so ergänze man die bis dahin erstellte Menge an Vorgaben auf jede mögliche Weise zu einem 16er-Rätsel und teste jedes auf eindeutige Lösbarkeit. Selbst in diesem Fall reduziert sich der Aufwand noch um mehrere Zehnerpotenzen gegenüber dem blinden Durchprobieren.

Nun braucht man nur noch ein Verfahren zum Bestimmen des optimalen Nagelungsmusters – und zwar ein möglichst effizientes. Wer alle denkbaren Muster der Reihe nach durchprobiert,

1			4			7		
4			7			1		
7			1			4		

Nagelt man von diesen neun Feldern eines fest, dann sind die beiden Zahlen, die der Nagel nicht getroffen hat, immer noch miteinander vertauschbar.

findet zwar mit Sicherheit das optimale, gewinnt aber nichts an Rechenzeit.

Ein naheliegendes Verfahren geht folgendermaßen: Man schlage den ersten Nagel dort ein, wo er den größten Nutzen stiftet, das heißt die meisten Plättchen fixiert. Dann finde man das Feld, auf dem man die meisten der jetzt noch losen Plättchen festnageln kann, und so weiter. Ein solcher Algorithmus wird in der Fachsprache »gierig« (englisch: greedy) genannt: Nimm in jedem Moment so viel, wie du kriegen kannst, ohne Rücksicht auf die Zukunft. In diesem Fall ist Gier ein schlechter Ratgeber. Man kommt zwar mit ziemlich wenigen Nägeln aus, aber nicht unbedingt mit der geringstmöglichen Anzahl. McGuire und seine Kollegen fanden ein raffiniertes Verfahren mit gebremster Gier, das mit Sicherheit das Optimum findet und nie zweimal über dieselbe Teilvernagelung nachdenkt.

Viel Mühe verwandten sie schließlich darauf, den Auftrag an den Computer so zu formulieren, dass die Stärken der Hardware genutzt wurden. So gelang es ihnen, die erforderliche Rechenzeit auf bescheidene 7,1 Millionen Stunden zu drücken – Prozessorstunden wohlgemerkt, also die Zeit, die ein einzelner Rechner mit der Aufgabe zubringen würde. Wenn aber 320 Rechenknoten mit je einem Dutzend Prozessoren sich gleichzeitig an die Arbeit machen,

wird die Zeitspanne überschaubar. Nach den Testläufen begannen die Rechenarbeiten im Januar letzten Jahres und waren im Dezember beendet.

Wozu ist das Ganze nützlich? Selbst der hartgesottenste Sudoku-Spieler wird nicht behaupten, es diene dem Fortschritt der Menschheit, wenn man weiß, ob es eine extrem schwierige Form eines netten Zeitvertreibs gibt oder nicht. Diese Frage werden die drei

irischen Mathematiker auch schwerlich als Forschungsziel in ihren Antrag auf Rechenzeit geschrieben haben. Aber was dann?

Es traf sich günstig, dass während der Vorbereitung der europäischen Superrechnerverbund PRACE gegründet wurde (Spektrum der Wissenschaft 11/2011, S. 84). Da waren Übungsaufgaben gefragt: Probleme, an denen man die neuen, sehr verschiedenen Höchst-

leistungsrechner gegeneinander testen und die Programmierfähigkeiten schärfen konnte. Da kam das Sudoku-Problem gerade recht, denn es musste keinen Termin einhalten und ist gut auf viele parallele Rechner verteilbar: Zwei Prozessoren, die verschiedene Sudoku-Lösungen bearbeiten, brauchen sich ja nicht miteinander zu verständigen.

Darüber hinaus lässt sich die Aufgabe, die optimale Festnagelungsmenge (englisch: hitting set) zu finden, in ein Problem der Graphentheorie umformulieren. Das ist dann so abstrakt, dass eine Menge kombinatorischer Optimierungsprobleme in denselben formalen Rahmen passen, darunter auch ernstzunehmende. Auf diesem Umweg hat die Menschheit – vielleicht – doch etwas von der Lösung eines Spielproblems.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

6	3	9	2	4	1	7	8	5
2	8	4	7	6	5	1	9	3
5	1	7	9	8	3	6	2	4
1	2	3	8	5	7	9	4	6
7	9	6	4	3	2	8	5	1
4	5	8	6	1	9	2	3	7
3	4	2	1	7	8	5	6	9
8	6	1	5	9	4	3	7	2
9	7	5	3	2	6	4	1	8

Zu dieser Lösung gibt es 29 korrekt gestellte Rätsel mit nur 17 Vorgaben – mehr, als zu jeder anderen Lösung bekannt sind. Gäbe es zu einer Lösung ein korrekt gestelltes Rätsel mit 16 Vorgaben, dann könnte man dieses auf 65 verschiedenen Feldern zu einem korrekten 17er-Rätsel erweitern. Der große Unterschied zwischen 29 und 65 ist ein Indiz dafür, dass der Versuch, mit 16 Vorgaben ein Sudoku festzulegen, nicht nur knapp gescheitert ist.

NEUROWISSENSCHAFT

Dialog zwischen Mensch und Maschine

Eine neuartige Gehirn-Computer-Schnittstelle vermittelt Gelähmten Tastempfindungen. Das erlaubt beispielsweise die Entwicklung präzise arbeitender Neuroprothesen.

VON CHRISTIAN WOLF

Geräte wie eine Tastatur oder eine Prothese allein mit der Kraft der Gedanken zu steuern – um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, arbeiten Forscher schon seit Längerem an speziellen Schnittstellen zwischen Gehirn und Computer (Brain-Computer-Interfaces, Abkürzung BCI). Damit sollen etwa Menschen mit starken körperlichen Behinderungen eines Tages künstliche Gliedmaßen möglichst präzise bewegen können.

Die Gehirn-Computer-Schnittstellen nutzen dabei ein besonderes Phänomen: Wenn man sich eine Bewegung vorstellt, feuern Nervenzellen in ähnlichen Regionen der motorischen Groß-

hirnrinde wie bei ihrem tatsächlichen Ausführen. Um ein Brain-Computer-Interface zu verwenden, genügt es daher im Prinzip, an eine Handlung nur zu denken.

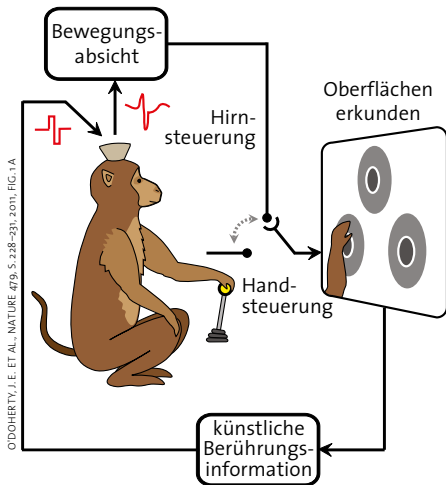
Entsprechend registrieren Forscher beim Einsatz solcher Schnittstellen grundsätzlich zunächst die elektrischen Hirnaktivitäten, die bei der mentalen Vorstellung von Bewegungen des Nutzers auftreten. Das geschieht über Elektroden, die auf der Kopfhaut angebracht oder in das Gehirn implantiert worden sind.

Ein Computer lernt während einer Trainingsphase, mittels mathematischer Algorithmen jene neuronalen Ak-

tivitätsmuster aus dem Datenstrom herauszufiltern, die für bestimmte Bewegungen relevant sind. Die derart gewonnenen Informationen lassen sich dann in Signale zum Steuern eines externen Geräts umwandeln.

Einbahnstraße vom Gehirn zum Computer

Doch bisher gleicht die Kommunikation zwischen Gehirn und Maschine nur einer Einbahnstraße, keinem Dialog: Die Daten gelangen ausschließlich vom Gehirn zum Computer. Ein herkömmliches Brain-Computer-Interface erlaubt zwar ein visuelles Feedback über einen Monitor. Das genügt, wenn



Bei diesem Gehirn-Computer-Gehirn-Interface registrieren Elektroden im primären Motorkortex Bewegungsabsichten, während simulierte Berührungsinformationen zum primären somatosensorischen Kortex gesendet werden.

den Nutzer etwa die Position eines Cursors oder eines Geräts interessiert. Bei neuronal gesteuerten Prothesen ist jedoch für eine präzise Koordination entscheidend, Berührungen zu empfinden und die Kraft zu registrieren, mit der die künstliche Gliedmaße zupackt. Nur Drucksignale sagen einem genau, ob man alles im Griff hat oder aber kurz davor ist, einen Gegenstand fallen zu lassen.

Eine solche dialogfähige Gehirn-Computer-Gehirn-Schnittstelle zu entwickeln, gelang kürzlich Forschern um Miguel Nicolelis von der Duke University in Durham, North Carolina (*Nature* 479, S. 228–231, 2011). Dieses Interface meldet Berührungsempfindungen und damit die Beschaffenheit von Objekten an den Nutzer zurück. Hierfür ließen die Wissenschaftler zwei Rhesusaffen drei visuell völlig identisch erschein-

nende Kreise auf einem Computermonitor mit einem virtuellen Arm erkunden. Die Tiere sollten den einen davon erkennen, der mit einer besonderen, lediglich mit Hilfe des Tastsinns zu erfassenden Oberflächenstruktur ausgestattet war.

Die beiden Affen bedienten den Arm auf dem Bildschirm zunächst mit einem Joystick und später ausschließlich über ihre Hirnaktivitäten. Zu diesem Zweck hatten die Forscher ihren tierischen Probanden Mikroelektroden in den primären motorischen Kortex eingesetzt – in jenes Hirnareal, das willkürliche Bewegungen steuert. Die Gehirn-Maschine-Gehirn-Schnittstelle registrierte darüber die Aktivität einer Gruppe von 50 bis 200 Nervenzellen in der rechten Hirnhälfte. Diese Neurone kontrollieren die Bewegungen der linken Hand, mit der die Affen den Steuerhebel bedienten.

Damit die Tiere die Oberflächenstruktur der Kreise erforschen konn-

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



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

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Einen Preisnachlass beim Bezug von Spektrum.de-Premium, mit unserer wöchentlichen Digitalzeitung »Die Woche«



Wissenschaftspublikation im Umbruch

Macht das Internet Verlage überflüssig?

Früher blätterte ich in den Heften von »Nature« und Science«, um mich über naturwissenschaftliche Entwicklungen zu informieren; heute lese ich Wissenschaftsjournale online auf dem Bildschirm. Der mediale Paradigmenwechsel vom Druck zum Netz verändert aber nicht nur das Leseverhalten, sondern ist offenbar auch dabei, den Status von Redaktionen und Verlagen umzukrempeln.

Das geht nicht immer friedlich ab. Seit Kurzem boykottieren tausende Forscher den weltgrößten Verlag für Wissenschaftszeitschriften. Sie werfen dem niederländisch-britischen Konzern Elsevier vor, für seine Publikationen überhöhte Preise zu verlangen und den amerikanischen »Research Works Act« (RWA) zu unterstützen, der den freien Zugang zu Forschungsergebnissen einschränken soll (*New Scientist* 2852, S. 4, 2012). Noch ist offen, wie diese Auseinandersetzung zwischen öffentlich geförderter Forschung und privatwirtschaftlich organisierter Publikation ausgehen wird. Elsevier hat inzwischen in einem Punkt nachgegeben und sich vom RWA distanziert.

Der Konflikt wirft die Frage auf, ob wir in der Internetära überhaupt noch herkömmliche Wissenschaftsverlage brauchen. Physiker publizieren bereits das meiste online über arXiv.org. Doch wenn ich mich über neue Trends informieren möchte, rufe ich nicht arXiv auf, denn in der dort immer weiter anschwellenden Artikelflut würde ich schlicht ertrinken. Auch reichen die Kenntnisse eines Einzelnen längst nicht aus, um die Spreu vom Weizen zu trennen. Wissenschaftsredaktionen organisieren zu diesem Zweck eine Qualitätskontrolle durch den Peer-Review-Prozess: Fachkollegen bewerten die eingereichten Arbeiten und fordern meist Ergänzungen, bis nach oft mehrmaligem Hin und Her der Artikel schließlich erscheint.

Wir brauchen auch in der Netzära das Peer Reviewing, wenn wir nicht ausnahmsweise zu einer kleinen Gemeinde hoch spezialisierter Fachkollegen gehören – der erwähnte Boykott ging von Mathematikern aus. Tatsächlich entsteht für den Bereich der Teilchenphysik ein Modell, welches das Open-Access-Prinzip – den freien Zugang zu Forschungsarbeiten per Internet – mit der Begutachtung durch Fachkollegen kombiniert. Es nennt sich SCOAP³, für »Sponsoring Consortium for Open Access Publishing in Particle Physics«. Forschungsinstitute, Universitäten und Förderorganisationen finanzieren über ein internationales Konsortium das Peer Reviewing durch die Verlage. Diese gewähren dafür freien Zugang zu den Artikeln. Das Copyright verbleibt – anders als bisher – bei den Autoren (*Physik Journal* 11, S. 3, 2012).

Für reine Fachpublikationen ist das ein großer Fortschritt – doch für interdisziplinäre Zeitschriften wie »Science« und »Nature« reicht solch ein Modell, das die Redaktionsarbeit nur auf Qualitätskontrolle beschränkt, nicht aus. In vielen Wissenschaftssparten bleibt eine redaktionelle Vorauswahl der online publizierten Artikel unumgänglich. Sonst gehen wir Leser – und ebenso die Peer Reviewer – in einem Wust von Texten unter. Die Kanalisierung der Informationsflut erfordert auch künftig Wissenschaftsredaktionen. Sie sorgen dafür, dass ich beispielsweise in »Science« oder »Nature« eine überschaubare, nach Inhalt und Relevanz vorsortierte Menge von Artikeln vorfinde.

So wird man auf vielen Gebieten zwar künftig ohne gedruckte Zeitschriften auskommen, aber – insbesondere im unübersehbaren Bereich der Bioforschung – nicht ohne Lotsen auf dem Meer der Onlineinformationen. Ein verallgemeinertes SCOAP³-Modell müsste darum nicht nur Peer Reviewer einbeziehen, sondern auch Fachredakteure. Diese werden daher, wie ich vermute, den bevorstehenden Paradigmenwechsel von der gedruckten Zeitschrift zur Onlinepublikation überleben.



Michael Springer

ten, ermöglichten die Forscher ihnen eine Art taktiles Feedback: Sie sorgten über weitere implantierte Mikroelektroden dafür, dass der primäre somatosensorische Kortex der Affen Signale erhielt, wenn auf dem Monitor der virtuelle Arm die Objekte berührte. Diese Hirnregion verarbeitet normalerweise Informationen, die von den berührungsempfindlichen Rezeptoren in der Haut einlaufen. In dem Experiment signalisierten elektrische Impulsreihen mit unterschiedlichen Frequenzen jeweils verschieden beschaffene Objekte.

Berührungsinformationen entschlüsseln – ohne Haut

Mit Hilfe des Feedbacks lernten die Affen schnell, die derart simulierten Oberflächenstrukturen zu unterscheiden. Sie reagierten dabei laut den Forschern innerhalb einiger hundert Millisekunden auf die künstliche taktile Rückmeldung. Das entspreche dem Zeitrahmen, in dem normalerweise auch Berührungseize auf der Haut interpretiert werden.

Er und seine Kollegen wüssten natürlich nicht, was die Tiere in dem Versuch tatsächlich wahrgenommen hätten, so Nicolelis. Aber es handle sich offensichtlich um eine künstlich erzeugte Empfindung. Demnach könne das Gehirn auch ohne Beteiligung der Haut taktile Informationen entschlüsseln, wenn der somatosensorische Kortex direkt stimuliert wird.

Das Wissenschaftlerteam sieht in dieser Art von Feedback einen entscheidenden Baustein zukünftiger, effektiver Neuroprothesen. Mit Hilfe solcher Gehirn-Computer-Gehirn-Schnittstellen könnten beispielsweise querschnittsgelähmte Patienten eines Tages nicht nur Prothesen mit Gedankenkraft bewegen, sondern auch die Beschaffenheit von Objekten feinfühlig erspüren – eine unabdingbare Voraussetzung für jegliches kontrollierte und koordinierte Arbeiten mit Ersatzgliedmaßen.

Christian Wolf ist promovierter Philosoph und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Liebe Leser von Spektrum der Wissenschaft:

Weil nur ein breites Spektrum Wissen schafft.

Tatsachen, Analysen und Hintergründe aus Politik, Wirtschaft und Forschung & Technik – jeden Montag im FOCUS.

Jetzt am Kiosk oder im Abo:
focus.de/abo





Erst im Jungpaläolithikum – der jüngeren Altsteinzeit – lebten Menschen lange genug, um sich an der Erziehung ihrer Enkel zu beteiligen.

MENSCHENEVOLUTION

Kultursprung durch Großeltern

Erfahrene Alte traten erst erstaunlich spät in der Menschheitsgeschichte nennenswert in Erscheinung. Zur gleichen Zeit entstand die moderne Kultur. Förderte die Lebensweisheit der Älteren diese Entwicklung?

Von Rachel Caspari

Als ich meine Urgroßmutter kennen lernte, war sie fast 100 Jahre alt und ich sechs. Es war in den Sommerferien des Jahres 1963. Wir lebten in Philadelphia und besuchten sie und andere Verwandte in Los Angeles. Meine Großmutter mütterlicherseits, ihre Tochter, kannte ich gut. Sie half meiner Mutter oft mit ihren drei kleinen Kindern. Die Frauen erzählten damals viel von früher – zum Beispiel davon, was die Familie am Ende des Amerikanischen Bürgerkriegs und in der bewegten Zeit des Wiederaufbaus danach erlebt und durchgemacht hatte. Durch die spannenden Geschichten erfuhr ich von meinen Wurzeln und dem vier Generationen umfassenden Netz von Familienmitgliedern, zu dem auch ich gehörte. Auf ähnliche Weise geben überall auf der Welt ältere Menschen ihr Wissen an Kinder und Enkel oder andere Verwandtschaft weiter. Und wie meine Großmutter stehen viele von ihnen den jüngeren Generationen materiell und mit Tatkraft zur Seite. Beides sind wesentliche Züge unserer Gesellschaften.

Allerdings war es wohl nicht immer so, dass eine größere Anzahl der Menschen ein Alter erreichte, in dem sie Enkelkinder hatten. Vielmehr dürften Großeltern als Regelfall in der Menschheitsgeschichte sogar eine ziemlich junge Erscheinung sein, kaum älter als einige zehntausend Jahre. Anscheinend handelt es sich dabei um eine Errungenschaft des so genannten modernen Menschen. Der Umschwung fiel zeitlich etwa mit der Phase zusammen, als sich im Jungpaläolithikum, also im letzten Abschnitt der Altsteinzeit, so genanntes modernes Verhalten etablierte – als sich unter anderem eine ausgefeilte symbolhafte Kommunikation durchsetzte, wie sie auch zu Kunst und Sprache gehört.

Hängen die beiden Entwicklungen wohl miteinander zusammen? Denkbar ist, dass die Zahl der Menschen deutlich anwuchs, als mehr von ihnen ein höheres Alter erreichten. Die größeren Populationen wiederum dürften den sozialen Austausch verstärkt und selbst die Evolution mancher genetischen Merkmale vorangetrieben haben. Erklärt sich durch die Vorteile dieses Wechselspiels womöglich auch der Untergang archaischer Frühmenschen wie des Neandertalers?

Aber der Reihe nach. Um festzustellen, seit wann mehr ältere Menschen lebten, müsste man die Altersstruktur der Populationen erfassen: den Anteil von Kindern, Erwachsenen im fortpflanzungsfähigen Alter sowie potenziellen Großeltern. Doch Paläontologen finden niemals ganze Populationen fossil vor, sondern meist einzelne Individuen, und auch von denen oft nur wenige Knochenfragmente. Zudem lässt sich selbst bei gut erhaltenen Überresten das Alter der Geschlechtsreife nicht leicht abschätzen. Wir wissen nicht genau, wie schnell die Kinder früherer Menschenformen heranwuchsen und in welchem Alter sie erwachsen wurden. Sogar bei heutigen Bevölkerungen ist das ja durchaus unterschiedlich.

Einige wenige Fundstätten enthielten immerhin in derselben Schicht ausreichend viele menschliche Fossilien, um Rückschlüsse auf das Todesalter einzelner Individuen ziehen zu können. Zu den berühmtesten zählt eine Karsthöhle bei Krapina in Nordkroatien. Der Paläontologe Dragutin Gorjanović-Kramberger (1856–1936) fand dort 1899 und in den Folgejahren Fossilien von etwa 70 Neandertalern, die meisten davon in einer zirka 130 000 Jahre alten Sedimentschicht. Manche der Knochen weisen gleiche erbliche Merkmale auf, die man sonst von Neandertalern so nicht kennt.

AUF EINEN BLICK

DIE EVOLUTION DES ALTWERDENS

1 Heute erleben die meisten Männer und Frauen die **Generation ihrer Enkel**. Doch noch vor wenigen zehntausend Jahren wurden nur wenige Menschen dafür alt genug.

2 Für die **Australopithecinen** wie für die **Neandertaler** in Europa waren lebende **Großeltern** etwas Außergewöhnliches – und zunächst auch für den modernen **Homo sapiens**. Erst seit etwa 30 000 Jahren wird ein größerer Teil der Menschen älter als 30 Jahre.

3 Die immer höhere **Anzahl älterer Menschen** könnte eine wichtige Triebkraft für neuartige Werkzeuge und **Kunstformen** gewesen sein – zwei Entwicklungen, die sich gegenseitig förderten. Offenbar hatten die Neandertaler und andere archaische Menschen dieser kulturellen Beschleunigung nichts entgegensetzen.

Es scheint sich hierbei um Mitglieder ein- und derselben Population zu handeln.

Wie so oft haben sich auch in Krapina Zähne am besten erhalten. Das kommt einer Altersanalyse zugute, nicht nur wegen der äußeren Abnutzungsspuren, sondern auch weil sich innere Zahnstrukturen altersabhängig verändern.

Was Zähne erzählen

Schon 1979 veröffentlichte der Paläoanthropologe Milford H. Wolpoff von der University of Michigan in Ann Arbor eine Studie zum erreichten Lebensalter der Krapina-Neandertaler. Er orientierte sich dabei am Durchbruch der drei hinteren Backenzähne (Molaren) und ihrem Abnutzungsgrad. Sie pflegen nacheinander mit größerem zeitlichem Abstand zu erscheinen. Als Anhaltspunkt nahm der Forscher eines der schnellsten Durchbruchsschemata beim heutigen Menschen. Nach seinen Analysen bekamen jene Neandertalerkin der ersten hinteren Backenzahn mit ungefähr 6 Jahren, den zweiten mit 12 und den dritten mit 15.

Daraus folgt auch: Wenn der zweite hintere Backenzahn durchbricht, wurde der erste schon sechs Jahre lang benutzt, und so weiter. Zeigt ein erster Backenzahn 15 Jahre Abrieb, dürfte das Individuum ungefähr 21 Jahre alt geworden sein. War der zweite so lange in Gebrauch gewesen, zählte es 27 Jahre, beim dritten entsprechend etwa 30. Weil die Abnutzung recht gleichmäßig erfolgt, beträgt die Unsicherheit nur rund ein Jahr nach oben und unten. Am zuverlässigsten sind solche Analysen für eine Population, wenn Zahnfossilien von vielen Kindern und Jugendlichen verglichen werden können. Für Krapina trifft das zu: Wolpoff vermutete, dass die Überreste sämtlich von jungen Menschen stammten. Viele ältere Kinder waren dabei sowie junge Erwachsene, aber offenbar keine älteren Leute jenseits Ende 20.

Allerdings eignet sich diese Methode bei stark abgenutzten Zähnen nicht mehr gut zur Altersbestimmung älterer Individuen. Hatte Wolpoff darum womöglich etwas übersehen? Nachdem ich mich schon einige Jahre lang mit dem Lebensalter von frühen Menschen befasst hatte, beschloss

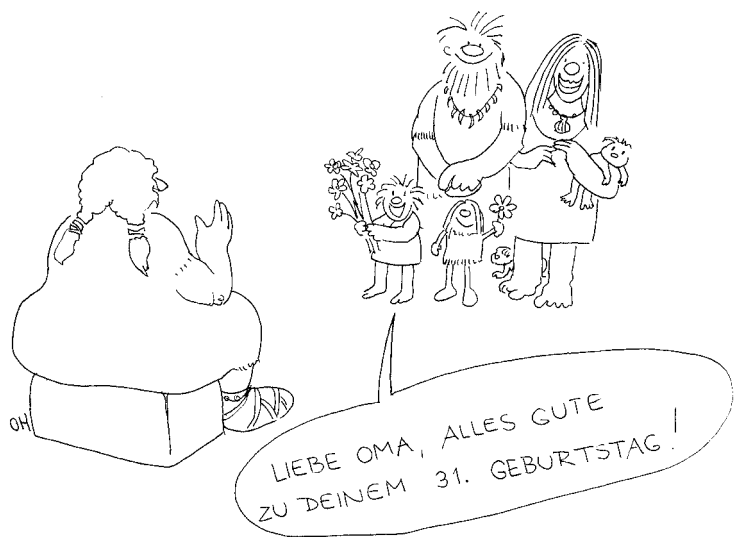
ich 2005, mir das Krapina-Material nochmals mit einer neuen Methode anzusehen. Als Mitarbeiter gewann ich Jakov Radović vom Kroatischen Naturkundemuseum in Zagreb sowie an meiner Universität die Forscher Steven A. Goldstein, Jeffrey A. Meganck, Dana L. Begun und einige Studenten. Wir nutzten hochauflösende 3-D-Mikrocomputertomografie, die fossiles Material nicht zerstört.

Unser Augenmerk galt insbesondere dem Sekundärdentin, der harten Hauptmasse im Innern eines Zahns. Dieses Zahnbein bildet sich lebenslang, weshalb seine Menge auch bei abgenutzter Krone Rückschlüsse auf das Alter des Trägers erlaubt. Unsere ersten Ergebnisse – ergänzt von Scans des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig – bestätigten Wolpoffs Befund. Somit wurde wohl tatsächlich keiner der Krapina-Neandertaler mehr als 30 Jahre alt. Das muss aber nicht bedeuten, dass Neandertaler niemals länger lebten: Einige wenige Individuen von anderen Fundorten dürften etwa ein Alter von 40 Jahren erreicht haben.

Trotzdem: Eine so geringe Lebenserwartung können wir uns heute kaum vorstellen. Mit 30 befinden wir uns gerade in der Blüte des Lebens. Auch Angehörige von Naturvölkern werden in der Regel über 30 Jahre alt. Doch unter den frühen Menschen stehen die Neandertaler von Krapina nicht allein da. Zu den wenigen anderen Fossilstätten mit vielen Individuen gehört die Sima de los Huesos (Knochengrube) von Atapuerca in Nordspanien, wo zahlreiche Überreste eines mutmaßlichen Neandertalervorläufers entdeckt wurden. Die dortigen Fundschichten reichen teils 600 000 Jahre zurück, und das Altersprofil der ausgegrabenen Frühmenschen ähnelt dem von Krapina. Viele von ihnen starben als Jugendliche oder junge Erwachsene. Die wenigsten erreichten das dortige Höchstalter von Mitte 30.

Nun könnten solche Fundsituationen auf Katastrophen zurückgehen – oder die Fossilierungsbedingungen verhinderten, dass Überreste älterer Personen erhalten blieben. Allerdings finden wir das charakteristische Altersmuster auch dann wieder, wenn wir ein größeres Spektrum des Fossilmaterials einbeziehen, also auch Orte mit Knochen von ganz wenigen Individuen. Demnach war jung zu sterben damals durchaus die Regel. Frei nach einem dem britischen Philosophen Thomas Hobbes (1588–1679) zugeschriebenen Spruch war das Leben der Vorzeit offenbar hart, grausam und kurz.

Schon vor diesen Dentinuntersuchungen, die eine recht genaue Altersaufschlüsselung erlauben, hatte ich zusammen mit der Anthropologin Sang-Hee Lee von der University of California in Riverside ein Forschungsprojekt begonnen, bei dem wir nach Anzeichen für unterschiedliche Lebenserwartungen im Verlauf der Menschenevolution fahnden wollten. Auch bei dieser Studie analysierten wir Zähne. Und zwar bewerteten wir deren Abnutzung – die zu der Zeit am besten geeignete Methode. Nach reiflicher Überlegung beschlossen wir, nicht die erreichten Lebensjahre zu ermitteln – das absolute Alter der Personen –, sondern die Fossilien grob bestimmten Alterskategorien zuzuordnen. Denn je weniger Individuen ein- und dieselbe Fundstelle und -schicht birgt,



umso schwerer lässt sich anhand des wenigen Materials das genaue Sterbealter abschätzen. Deswegen fragten wir einfach, ob eine Person das Großelternalter erreicht hatte – und welches Muster sich ergab, wenn man nach unserem Schema Zahnfossilien aus verschiedenen Phasen der Menschenevolution betrachtete. Als »alt« bezeichneten wir potenzielle Großeltern, als »jung« junge Erwachsene und ermittelten deren Zahlenverhältnis. Also: Welcher Anteil der Erwachsenen wurde zu verschiedenen Zeiten der Evolution »alt«?

Junge Großeltern der Steinzeit

Praktischerweise für unsere Studie brechen die dritten hinteren Backenzähne (unsere Weisheitszähne) bei Primaten ungefähr bei Eintritt der Geschlechtsreife durch – also wenn die Tiere erwachsen werden. Auch für Menschen galt das in der jüngeren Vergangenheit noch. Anhand von Befunden an Neandertalern und heutigen Naturvölkern schlossen wir, dass Frühmenschen ihre dritten hinteren Backenzähne mit rund 15 Jahren bekamen. Ungefähr in dem Alter mögen sie folglich auch ihr erstes Kind gehabt haben. Und mit etwa 30 konnten sie unter Umständen schon Großeltern werden.

Folglich zählten wir jedes Individuum, das mindestens 30 Jahre alt geworden war, als »alt«. An sich war das genaue Lebensalter für unsere Erhebungsmethode aber nicht so wichtig. Es kam uns ja nur darauf an, den Eintritt ins Erwachsenen- und ins Großelternalter zu erkennen – und das konnten wir, egal ob die Geschlechtsreife bei 10 oder bei 20 Jahren einsetzte. Die Vorgehensweise erlaubte uns, eine beträchtliche Anzahl von Fossilien auch aus weniger umfangreichen Fundstellen zu untersuchen. Auf diese Weise bestimmten wir anhand von Zahnfossilien bei insgesamt 768 Individuen die Kategorie des erreichten Lebensalters. Wir ordneten die Fossilien vier Gruppen, sprich Evolutionsepochen zu.

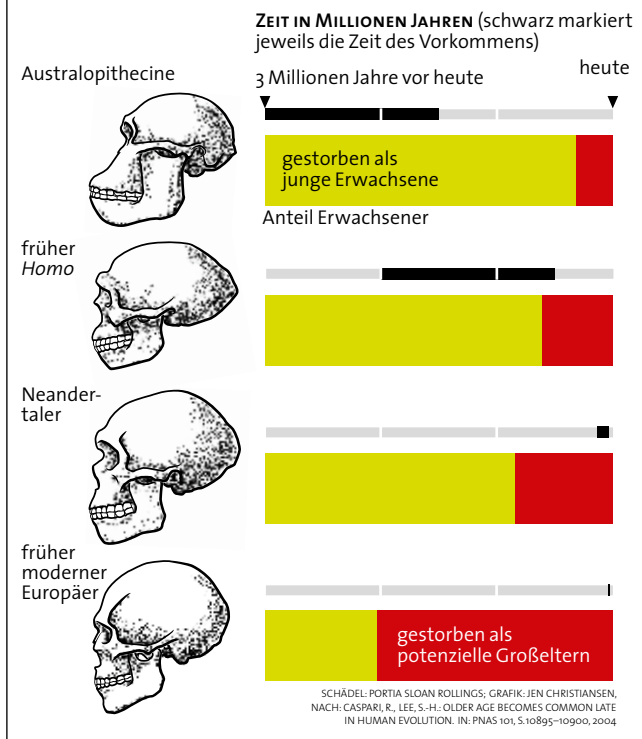
Die erste enthielt die jüngeren Australopithecinen von vor rund 3 bis vor 1,5 Millionen Jahren – Vormenschen von Ost- und Südafrika aus der Verwandtschaft von »Lucy«. Eine zweite Gruppe bildeten frühe Vertreter der Gattung *Homo*, die vor 2 Millionen bis vor 500 000 Jahren in Afrika, Asien und Europa lebten. Die dritte Gruppe umfasste die europäischen Neandertaler, 130 000 bis 30 000 Jahre alte Fossilien. Als vierte Gruppe betrachteten wir moderne Europäer der frühen jüngeren Altsteinzeit (des frühen Jungpaläolithikums) von vor rund 30 000 bis vor 20 000 Jahren – also Menschen, die bereits Zeugnisse einer hochstehenden Kultur hinterließen.

Mit einer Zunahme der Lebenserwartung hatten wir zwar gerechnet, aber das Ergebnis verblüffte uns doch. Denn nur zwischen den ersten drei Gruppen verzeichneten wir ein leicht ansteigendes durchschnittliches Sterbealter. Zwischen Neandertalern und europäischen Jungpaläolithikern gab es dagegen einen regelrechten Sprung: Das Verhältnis »alt« zu »jung« der Erwachsenen zum Zeitpunkt ihre Todes stieg plötzlich bei den Menschen den jüngeren Altsteinzeit um das Fünffache. Bei den Neandertalern gab es neben zehn Personen, die als junge Erwachsene gestorben waren, nur vier, die älter als 30 Jahre wurden. Ganz anders die Jungpaläolithiker:

Seit wann gibt es Großeltern?

Die Darstellung zeigt den Anteil der Erwachsenen (farbige Balken) der jeweiligen Evolutionsstufe (schwarz in der Zeitleiste), die nach Analysen von Zahnfossilien erst als potenzielle Großeltern (rot) starben, das heißt mit über 30 Jahren.

Die Australopithecinen, also Vormenschen, wurden fast nie so alt. Auch unter Frühmenschen (zweite Zeile) waren Großeltern noch selten. Selbst die Neandertaler starben meist recht jung – auch wenn sich beim Fossilvergleich schon eine etwas höhere Lebenserwartung der Erwachsenen abzeichnet. Beim modernen Menschen kehrt sich das Verhältnis um. Plötzlich tauchen – allerdings erst vor rund 30 000 Jahren, bei der frühen modernen Bevölkerung Europas – wesentlich mehr Fossilien von betagten Personen auf als von jungen Erwachsenen.



Auf zehn »jung« Gestorbene kamen nun gleich 20 potenzielle Großeltern. Zuerst fragten wir uns, ob die vielen Grabfunde von modernen Menschen aus der jüngeren Altsteinzeit das Bild verfälscht hatten. Aber eine neue Berechnung ohne die Fossilien aus Bestattungen ergab Ähnliches. Offenbar wurde ein höheres Lebensalter tatsächlich erst sehr spät in der Menschheitsgeschichte von der Ausnahme zur Regel.

Wie mag sich dieser dramatische Wandel erklären? War das so deutlich längere Leben der Jungpaläolithiker etwa eine genetisch gesteuerte, rein biologische Eigenschaft, die sich mit dem modernen Menschen herausbildete? Oder verdankte es sich einem erst später erfolgten Verhaltenswandel?

Als der anatomisch moderne Mensch vor weit über 100 000 Jahren in Afrika entstand, hatte er noch lange nicht

das kulturelle Niveau wie viel später in Europa. Vielmehr stand er über Jahrzehntausende etwa auf der gleichen – der mittleren Altsteinzeit (dem Mittelpaläolithikum) zugerechneten – Technologiestufe wie der Neandertaler. Beide scheinen sich zwar gelegentlich an höherer Kultur versucht zu haben, und speziell der moderne Mensch besaß diesbezüglich offenbar ein lange unterschätztes Potenzial (siehe SdW 12/2009, S. 66 und 12/2010, S. 58). Aber vor der jüngeren Altsteinzeit waren das wohl eher Randerscheinungen.

Um zu entscheiden, ob der Sprung hin zu einem längeren Leben kulturell oder genetisch bedingt war, mussten wir anatomisch moderne Menschen untersuchen, die aber noch kein modernes Verhalten besaßen, sondern der mittleren Altsteinzeit zuzurechnen waren. Lee und ich nahmen uns dazu Mittelpaläolithiker vor, die vor rund 110 000 bis vor 40 000 Jahren in Vorderasien gelebt hatten. Wir verglichen sie mit Neandertalern derselben Region und desselben Zeitraums, die eine entsprechende, einfache Werkzeugindustrie besaßen – die somit unter ähnlichen geografischen und klimatischen Bedingungen lebten und auch in ihrer kulturellen Komplexität ähnlich waren. Tatsächlich ergab die statistische Auswertung diesmal zwischen Neandertalern und modernen Menschen keinen nennenswerten Unterschied im Verhältnis der beiden Sterbekategorien. Genauer gesagt enthielten beide Gruppen einen ungefähr gleich hohen Anteil an jung wie an betagt verstorbenen Erwachsenen. Damit wurden in Vorderasien also mehr Neandertaler »alt« als in Europa – und bei den modernen Menschen weniger. Ein rein biologischer Grund für den auffälligen Zuwachs der Lebensdauer bei den europäischen Jungpaläolitikern im Vergleich zu archaischen Menschenformen schied somit aus.

Moderne und archaische Menschen in Vorderasien

Dass es bei den Neandertalern des Orients verhältnismäßig mehr ältere Leute gab als unter ihren zeitgenössischen Verwandten in Europa, erstaunt nicht wirklich. Denn im Nahen Osten herrschte damals ein gemäßigteres, viel angenehmeres Klima als im eiszeitlichen Europa, was das Leben vermutlich leichter machte. Umso mehr beeindruckt allerdings die Langlebigkeit der frühen modernen Europäer in ihrer harschen Umwelt. Immerhin war das Verhältnis von alt zu jung verstorbenen Erwachsenen bei ihnen trotz des widrigen Klimas mehr als doppelt so hoch wie vorher bei modernen Menschen der mittleren Altsteinzeit in Südostasien.

Welche kulturellen Neuerungen diese Entwicklung ermöglichten, wissen wir nicht genau. Unzweifelhaft wirkte sich aber nun das Vorhandensein von mehr Älteren seinerseits auch günstig auf die Lebensumstände aus. Denn zumindest bei heutigen Jäger-und-Sammler-Völkern spielen Großeltern eine bedeutende Rolle. Nach wissenschaftlichen Erhebungen an traditionell lebenden Menschengruppen, wie sie etwa die Anthropologen Kristen Hawkes von der University of Utah in Salt Lake City und Hillard Kaplan von der University of New Mexico in Albuquerque durchführten, unterstützen Großeltern ihre erwachsenen Nachkommen in

Kulturrevolution in der Altsteinzeit

Der große kulturelle Wandel von der mittleren zur jüngeren Altsteinzeit in Europa könnte darauf zurückzuführen sein, dass dort der Anteil älterer Menschen seit etwa 30 000 Jahren erheblich wuchs. Die hier gezeigte repräsentative Auswahl an Artefakten lässt klar erkennen: Vorher besaßen die Menschen eine vergleichsweise einfache Technologie; im Jungpaläolithikum fertigten sie hingegen viel komplexere Gerätschaften und schufen zudem Schmuck und Kunst.

der Regel ökonomisch wie auch sozial nach Kräften. Das erlaubt diesen, selbst mehr Nachwuchs in die Welt zu setzen. Dank der Hilfe steigen zudem die Überlebenschancen der Enkel.

Aber Großeltern fördern und stärken ebenfalls in besonderem Maß komplexe Beziehungsgeflechte – so wie es meine Oma und meine Uroma taten, wenn sie mir von unserer weitläufigen Verwandtschaft erzählten. Unsere engeren sozialen Strukturen und unser Miteinander beruhen wesentlich auf solchem Wissen. Senioren vermitteln auch auf vielen anderen Gebieten Sachverstand und Erfahrungen. Das reicht bei traditionellen Kulturen vom Umgang mit Umweltbedingungen bis hin zu technischem Knowhow. Die Alten kennen sich zum Beispiel mit giftigen Pflanzen und mit Wasserstellen für Dürrezeiten aus. Sie wissen um die besten Tricks beim Körbeflechten oder Fertigen von Steinmessern.

Nach Untersuchungen eines Teams um den Mathematiker Pontus Strimling von der Universität Stockholm trägt das Wiederholen entscheidend zur Weitergabe von Regeln und Gepflogenheiten – also zur Tradierung – in einer Kultur bei. Deswegen werden wichtige Zusammenhänge besser überliefert, wenn mehrere Generationen zusammenleben und dieselben Sachverhalte immer wieder zur Sprache kommen. Schon in der Steinzeit könnte das außerdem bedeutet haben: Weil die älteren Menschen gern dafür sorgten, dass ihr soziales Wissen über Verwandtschaftsbeziehungen wie auch andere soziale Netze nicht verloren ging, stärkten sie immer wieder das Bewusstsein der jüngeren Generationen hierfür. Das förderte vermutlich die Pflege solcher Beziehungen – und dies war nicht zuletzt ein Rahmen für gegenseitige Hilfeleistungen, wenn Not am Mann war. Solcher Beistand mag seinerseits mit ein Grund dafür gewesen sein, dass mehr Menschen älter wurden.

Die gestiegene Lebenserwartung brachte vermutlich einen Populationszuwachs mit sich – nicht nur wegen der jetzt stark vergrößerten Altersgruppe der Senioren, sondern auch dadurch, dass die potenziellen Großeltern oft noch selbst im fortpflanzungsfähigen Alter waren. Und eine große Bevölke-

MITTLERE ALTSTEINZEIT (MITTELPALÄOLITHIKUM)



JÜNGERE ALTSTEINZEIT (JUNGPALEOLITHIKUM)



SPITZE UND SCHABER: NATURAL HISTORY MUSEUM, LONDON; ZWEIFELTIGER SCHABER: DAVID L. BRILL; WOLFSZAHN: RANDALL WHITE; KNOCHENFLÖTE: GETTY IMAGES/AFIP; KERAMISCHE FRAUENFIGUR: MUSEUM DE TOULOUSE; STICHEL: DIDIER DISCOUINS / MUSEUM DE TOULOUSE; VÄNSTEN: GETTY IMAGES/DAVID L. BRILL

rungszahl kann eine Triebfeder für neue Verhaltensmuster sein. Ob kulturelle Komplexität bestehen bleibt, hängt – laut Adam Powell vom University College London und seinen Kollegen – unter anderem von der Populationsdichte ab, die dafür hoch genug sein muss. Größere Populationen begünstigen demnach ausgedehnte Handelsnetze und verzweigte Kooperationssysteme. Zugleich scheint es die Menschen dann danach zu verlangen, ihre individuelle sowie ihre Gruppenidentität etwa durch Schmuck oder Körperbemalung auszudrücken. So deuten Anthropologen auch die vorübergehenden, durchaus bemerkenswerten frühen kulturellen Aufschwünge im südlichen Afrika.

Charakteristisch für die Menschen der jüngeren Altsteinzeit waren nun gerade Phänomene wie der verbreitete Gebrauch von Symbolen oder Werkzeuge aus besonderen, vor Ort nicht vorhandenen Materialien. Dass solches Verhalten damals so rasant zunahm, mag sehr wohl eine Auswirkung der anwachsenden Bevölkerung gewesen sein.

Möglicherweise beschleunigte die Populationszunahme sogar die menschliche Evolution. Nach Untersuchungen von John Hawks von der University of Wisconsin in Madison treten in einer größeren Bevölkerung mehr Mutationen auf, und vorteilhafte genetische Abweichungen können sich in den Folgegenerationen leichter ausbreiten. Solche Effekte dürften in unserer jüngeren Vergangenheit sogar noch gravierender geworden sein. Die Zahl der Menschen stieg deutlich, als vor 10 000 Jahren die Landwirtschaft einsetzte und die ersten Pflanzen domestiziert wurden. Damit gingen Ernährungsumstellungen einher. Neuerungen wie diese – oder auch Ortsveränderungen in klimatisch andere Gebiete – sorgten immer wieder dafür, dass andere Genvarianten Vorteile boten und sich darum in den betreffenden Populationen bald durchsetzten. Gregory Cochran und Henry Harpending von der University of Utah in Salt Lake City beschrieben viele solche genetischen Befunde. Das Spektrum reicht von Erbanlagen für die Hautfarbe bis hin zu neuen Genen für Verdauungsenzyme, etwa für Milchzucker (siehe auch SdW 3/2011, S. 28). Lebensdauer und kulturelle Neuerungen haben

sich höchstwahrscheinlich schon in der jüngeren Altsteinzeit gegenseitig angetrieben. Vielleicht wurden die Menschen zunächst als Begleiteffekt irgendeines kulturellen Wandels etwas älter. Doch irgendwann bildete die Großelterngeneration schließlich ein festes Kennzeichen dessen, was Anthropologen unter Modernität und modernem Verhalten verstehen. Die damit einhergehenden Innovationen trugen ihrerseits zum Ansehen der Älteren bei – die möglichst lange leben sollten. Die Bevölkerung wuchs an, mit allen bekannten Folgen für Kultur und Erbausstattung. So gehören Alter und Weisheit eben doch zusammen. ~

DIE AUTORIN



Rachel Caspari ist Professorin für Anthropologie an der Central Michigan University in Mount Pleasant. Sie forscht über Neandertaler, die Anfänge des modernen Menschen und die Entwicklung der höheren Lebenserwartung.

QUELLEN

Caspari, R., Lee, S.-H.: Older Age Becomes Common Late in Human Evolution. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 101, S. 10 895–10 900, 27. Juli 2004

Caspari, R., Lee, S.-H.: Is Human Longevity a Consequence of Cultural Change or Modern Human Biology? In: American Journal of Physical Anthropology 129, S. 512–517, April 2006

LITERATURTIPP

Die Evolution der Evolution. Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2009
Mit Artikeln über die heutige Menschenevolution, die Evolution menschlichen Denkens und Verhaltens sowie über den menschlichen Stammbaum

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142714

Wie die Sprache das Denken formt

Menschen leben in unterschiedlichen Kulturen und sprechen die verschiedensten Sprachen. Deren Strukturen prägen in ungeahntem Ausmaß die Art und Weise, wie wir die Welt wahrnehmen.

Von Lera Boroditsky

Pormpuraaw ist eine kleine Siedlung der Aborigines am Westrand der Halbinsel Cape York in Nordaustralien. Ich bitte ein fünf Jahre altes Mädchen, nach Norden zu zeigen. Ohne zu zögern, deutet sie in eine bestimmte Richtung. Mein Kompass bestätigt: Sie hat Recht. Nach meiner Rückkehr in die USA stelle ich dieselbe Frage in einem Hörsaal der Stanford University. Vor mir sitzen angesehene, mehrfach ausgezeichnete Gelehrte; manche besuchen seit 40 Jahren Vorträge in diesem Saal. Ich bitte sie, die Augen zu schließen und nach Norden zu zeigen. Viele weigern sich, weil sie keine Ahnung haben, wo Norden liegt. Die Übrigen denken eine Weile nach und deuten dann in alle möglichen Richtungen. Ich habe diesen Versuch nicht nur in Harvard und Princeton wiederholt, sondern auch in Moskau, London und Peking – stets mit demselben Resultat.

Eine Fünfjährige aus einer bestimmten Kultur bringt ohne Weiteres etwas fertig, was angesehene Forscher einer anderen Kultur überfordert. Was ist der Grund für die höchst unterschiedliche kognitive Fähigkeit? Die überraschende Antwort lautet: die Sprache.

Die Idee, dass Sprachunterschiede die Kognition beeinflussen, ist an sich jahrhundertealt; in Deutschland vertraten sie vor allem Johann Gottfried Herder (1744–1803) und Wilhelm von Humboldt (1767–1835). Seit den 1930er Jahren wird sie oft den amerikanischen Linguisten Edward Sapir (1884–

1939) und Benjamin Lee Whorf (1897–1941) zugeschrieben. Die beiden untersuchten die Grammatik nordamerikanischer Indianer und mutmaßten: Wenn Menschen grundverschieden sprechen, dann denken sie auch unterschiedlich. Zwar fand die Idee zunächst großen Anklang, doch empirische Belege fehlten fast völlig.

In den 1970er Jahren verblasste der Ruhm der Sapir-Whorf-Hypothese. Sie wurde fast völlig zu Gunsten einer neuen Theorie aufgegeben, der zufolge Sprache und Denken universelles menschliches Gemeingut sind. Doch nun, Jahrzehnte später, liegen endlich überzeugende Indizien dafür vor, wie Sprache das Denken formt. Sie stürzen das lange herrschende Dogma von den Sprachuniversalien und liefern faszinierende Erkenntnisse über den Ursprung des Wissens und die Konstruktion der Wirklichkeit.

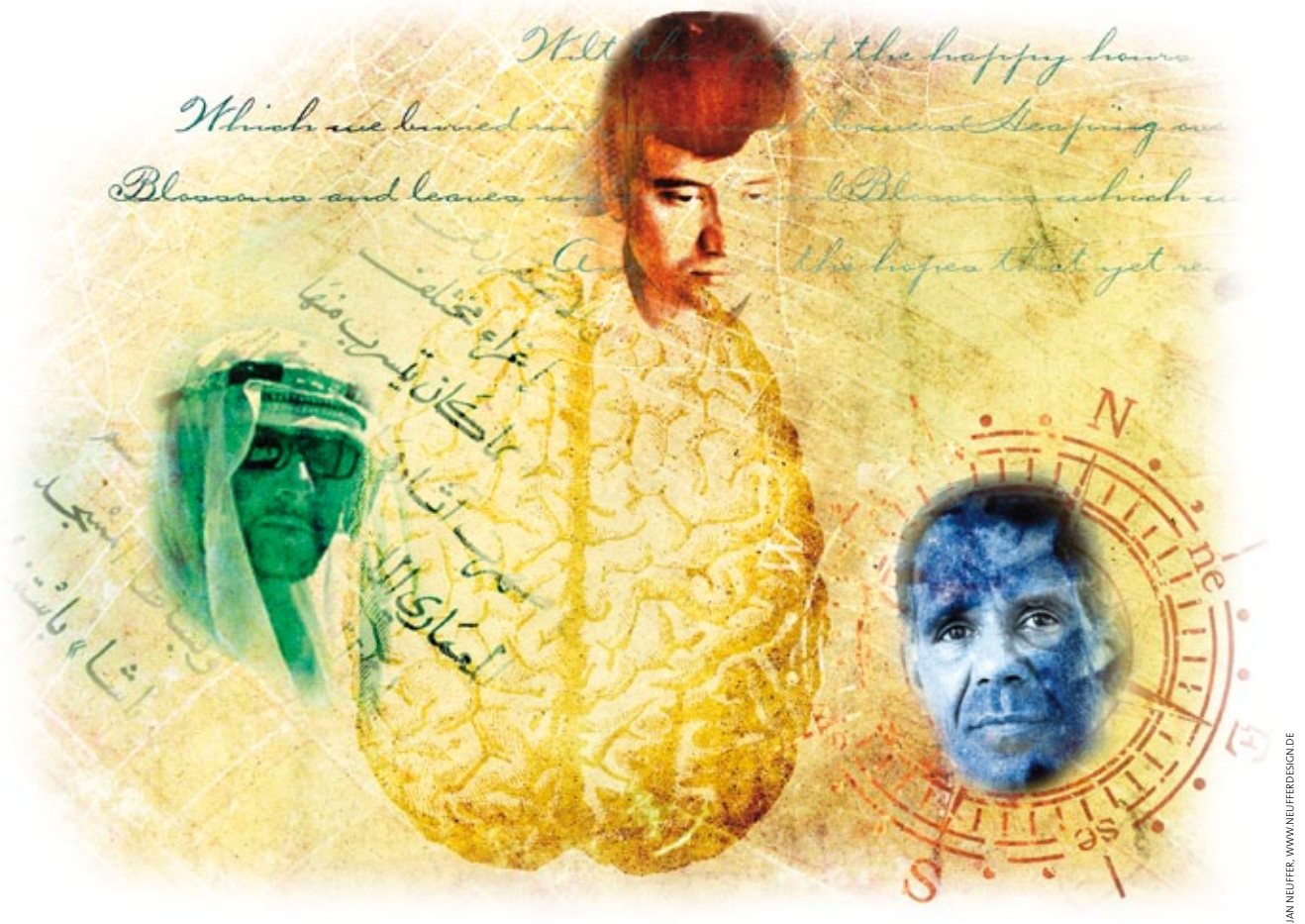
Der Einfluss der Wörter

Rund um den Globus kommunizieren Menschen miteinander auf vielfältige Weise, und jede der schätzungsweise 7000 Sprachen verlangt von denen, die sie verwenden, ganz unterschiedliche Leistungen. Angenommen, ich möchte Ihnen mitteilen, dass ich Anton Tschechows Drama »Onkel Wanja« auf einer Bühne in der 42. Straße New Yorks gesehen habe. Auf Mian, das in Papua-Neuguinea gesprochen wird, würde das Verb aussagen, ob das Stück soeben, gestern oder vor langer Zeit gespielt wurde. Das Indonesische dagegen gibt damit nicht einmal preis, ob die Aufführung bereits stattfand oder noch bevorsteht. Auf Russisch enthüllt das Verb mein Geschlecht. Wenn ich Mandarin verwende, muss ich wissen, ob Onkel Wanja ein Bruder der Mutter oder des Vaters ist und ob er blutsverwandt oder angeheiratet ist, denn für jeden dieser Fälle gibt es einen speziellen Ausdruck. Tatsächlich besagt die chinesische Übersetzung eindeutig, dass Wanja ein Bruder der Mutter ist. Und mit Pirahã, einer in Amazonien beheimateten Sprache, könnte ich »42. Straße« gar nicht ausdrücken, weil es darin keine exakten Zahlwörter gibt, sondern nur Bezeichnungen für »wenige« und »viele«.

AUF EINEN BLICK

SPRECHEN, WAHRNEHMEN, DENKEN

- 1** Gelehrte diskutieren seit Langem, ob verschiedene Muttersprachen **unterschiedliche kognitive Fähigkeiten** nach sich ziehen.
- 2** In den letzten Jahren mehren sich empirische Indizien dafür, dass das Idiom der Muttersprache das Denken über viele Aspekte der Welt prägt – zum Beispiel über **Raum und Zeit**.
- 3** Nach neuesten Erkenntnissen werden auch unsere **Wahrnehmungen, Erinnerungen und Vorurteile** dadurch beeinflusst, welche Sprache wir jeweils verwenden.



JAN NEUFFER, WWW.NEUFFERDESIGNS.DE

Sprachen unterscheiden sich auf unzählige Arten voneinander, aber das muss nicht automatisch heißen, dass die Sprecher auch unterschiedlich denken. Lange war unklar, ob der Gebrauch von Mian, Russisch, Indonesisch, Mandarin oder Pirahã wirklich zu jeweils eigenen Wahrnehmungen, Erinnerungen und Überlegungen führt. Doch zahlreiche Forschungen – unter anderem in meinem Labor – haben inzwischen gezeigt, dass die Sprache sogar die grundlegenden Dimensionen menschlicher Erfahrung prägt: Raum, Zeit, Kausalität und die Beziehung zu anderen.

Kehren wir nach Pormpuraaw zurück. Anders als Englisch oder Deutsch enthält die dort gesprochene Sprache Kuuk Thaayorre keine relativen Raumausdrücke wie links und rechts. Wer Kuuk Thaayorre spricht, gebraucht absolute Hauptrichtungen wie Norden, Süden, Osten, Westen und so weiter. Zwar geschieht das auch im Deutschen, aber nur bei großen Entfernungen. Wir würden beispielsweise nie sagen: »Diese Banausen platzieren die Suppenlöffel südöstlich von den Gabeln!« Doch auf Kuuk Thaayorre werden immer Himmelsrichtungen verwendet. Darum sagt man etwa »Die Tasse steht südöstlich vom Teller« oder »Der südlich von Maria stehende Knabe ist mein Bruder«. Um sich in Pormpuraaw verständlich auszudrücken, muss man daher immer die Windrose im Kopf haben.

Sprache und Zeit: Für Europäer, die von links nach rechts zu schreiben gewohnt sind, liegt »früher« links von »später«; Araber ordnen die Zeit von rechts nach links; für australische Aborigines liegt »früher« im Osten.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten haben Stephen C. Levinson vom Max-Planck-Institut für Psycholinguistik in Nimwegen (Niederlande) und John B. Haviland von der University of California in San Diego nachgewiesen, dass Menschen, die Sprachen mit absoluten Richtungen verwenden, auffallend gut in unbekannten Gegenden oder Gebäuden zurechtkommen. Sie orientieren sich besser als Personen, die dort zu Hause sind, aber nicht solche Sprachen sprechen – ja sogar besser, als die Forscher dies für menschenmöglich gehalten hatten. Die Erfordernisse dieser Sprachen erzwingen und trainieren demnach eine erstaunliche kognitive Fertigkeit.

Wer anders über den Raum denkt, hat vielleicht auch eine andere Zeitvorstellung. Meine Kollegin Alice Gaby von der University of California in Berkeley und ich legten daher Kuuk Thaayorre sprechenden Aborigines Bildfolgen vor, die Zeitabläufe zeigten: Ein Mann altert, ein Krokodil wächst, eine Banane wird verspeist. Dann baten wir sie, die durchmischten Fotos zeitlich zu ordnen.

Wir führten den Test je zweimal durch, wobei die Person jedes Mal in eine andere Himmelsrichtung schaute. Jemand, der englisch oder deutsch spricht, ordnet die Bilder so, dass die Zeit von links nach rechts fortschreitet. Hebräisch oder arabisch Sprechende legen die Karten eher von rechts nach links. Dies zeigt, dass die Schreibrichtung beeinflusst, wie wir Zeit organisieren. Doch die Aborigines sortierten die Karten weder grundsätzlich von links nach rechts noch umgekehrt, sondern stets von Osten nach Westen. Wenn die Testperson so saß, dass sie nach Süden schaute, verliefen die Karten von links nach rechts. Schaute sie nach Norden, ordnete sie die Bilder von rechts nach links. Hatte die Person Osten vor sich, lief die Kartenfolge auf den Körper zu, und so weiter. Dabei sagten wir den Probanden nie, welche Himmelsrichtung sie vor sich hatten – die Aborigines wussten das ohnehin.

Zeit wird je nach Kultur ganz unterschiedlich dargestellt. Wir zum Beispiel betrachten die Zukunft als »vorn« und die Vergangenheit als »hinten«. Im Jahr 2010 entdeckte Lynden Miles von der University of Aberdeen (Schottland), dass englisch Sprechende unwillkürlich ihren Körper vorwärtsneigen, wenn sie an die Zukunft denken, und rückwärts bei Gedanken an die Vergangenheit. Aymara, eine in den Anden verbreitete indigene Sprache, verlegt die Vergangenheit dagegen nach vorne und die Zukunft nach hinten. Dem entspricht auch die Körpersprache: Wie Raphael Núñez von der University of California in San Diego und Eve Sweetser von der University of California in Berkeley 2006 feststellten, deuten die Aymara vor sich, wenn sie über die Vergangenheit reden, und hinter sich, wenn sie die Zukunft meinen.

Fassetten der Erinnerung

Die Sprache beeinflusst auch, wie Menschen Ereignisse beschreiben – und wie gut sie sich daran erinnern, wer was getan hat. Vorgänge darzustellen ist stets kompliziert, selbst wenn sie nur Sekundenbruchteile dauern, denn wir müssen sie rekonstruieren und deuten. Nehmen wir als Beispiel den Jagdunfall, bei dem der frühere US-Vizepräsident Dick Cheney seinen Freund Harry Whittington verletzte. Man könnte sagen »Cheney schoss auf Whittington«, wobei Cheney die unmittelbare Ursache ist, oder »Whittington wurde von Cheney angeschossen«, wodurch Cheney etwas in den Hintergrund tritt, oder »Whittington bekam eine Schrotladung ab«, wobei Cheney ganz aus dem Spiel bleibt. Der Vizepräsident selbst sagte: »Letztlich bin ich derjenige, der den Abzug betätigte, welcher die Ladung abfeuerte, die Harry traf.« Damit stellte er eine lange Ereigniskette zwischen sich und das Resultat. Eine noch raffiniertere Reinwaschung gelang Präsident George Bush mit dem Ausspruch: »Er hörte eine Wachtel auffliegen, drehte sich um, drückte ab und sah, dass sein

Freund verwundet war.« Der Satz verwandelt Cheney vom Täter zum bloßen Zeugen.

Unsere Öffentlichkeit lässt sich von solchen sprachlichen Tricks allerdings kaum beeindrucken, denn Passivkonstruktionen wirken ausweichend – typisch für Drückeberger und Politiker. Wir bevorzugen sogar für ein Missgeschick meist aktive Transitivkonstruktionen wie »Hans zerbrach die Vase«. Hingegen erwähnt man im Japanischen oder Spanischen den Verursacher eher ungern. Auf Spanisch sagt man lieber »Se rompió el florero«, was übersetzt heißt: »Die Vase zerbrach sich.«

Wie meine Studentin Caitlin M. Fausey und ich 2010 herausgefunden haben, beeinflussen solche linguistischen Unterschiede die Rekonstruktion von Ereignissen, was beispielsweise Konsequenzen für Zeugenaussagen hat. Wir ließen englisch, spanisch und japanisch sprechende Personen

Videos betrachten, auf denen zwei Männer entweder absichtlich oder unabsichtlich Luftballons zerstachen, Eier zerbrachen und Getränke verschütteten. Später mussten die Versuchspersonen einen Gedächtnistest bestehen. Für jedes Ereignis, das sie beobachtet

hatten, sollten sie den Täter identifizieren – wie bei einer polizeilichen Gegenüberstellung. Eine andere Gruppe von englisch, spanisch und japanisch sprechenden Personen beschrieb dieselben Vorkommnisse. Was kam dabei heraus? Vertreter aller drei Sprachen beschrieben absichtliche Ereignisse aktiv – etwa »Er zerstach den Ballon« –, und alle erinnerten sich im Mittel gleich gut daran, wer diese Taten begangen hatte. Das zeigte auch, dass keine der Gruppen ein grundsätzlich schlechteres Gedächtnis aufwies. Doch wenn es um unabsichtliche Missgeschicke ging, ergaben sich deutliche Unterschiede. Spanisch und japanisch Sprechende waren weniger geneigt als englisch Sprechende, die Unfälle aktiv zu beschreiben – und sie erinnerten sich auch schlechter an die Verursacher.

Darüber hinaus beeinflusst die Struktur einer Sprache auch, wie leicht es ist, etwas Neues zu lernen. Zum Beispiel geben die Zahlwörter in manchen Sprachen die Dezimalstruktur eingängiger wieder als im Englischen, Deutschen oder Französischen; so gibt es im Mandarin keine Ausnahmen wie 11 oder Zifferndreher wie 13 oder 21. Darum lernen chinesische Kinder schneller, mit dem Dezimalsystem umzugehen. Und: Je nachdem, wie viele Silben die Zahlwörter haben, fällt es leichter oder schwerer, eine Telefonnummer zu behalten oder Kopfrechnungen auszuführen.

Von der Sprache hängt sogar ab, wie schnell Kinder herausfinden, ob sie Jungen oder Mädchen sind. Im Jahr 1983 verglich Alexander Guiora von der University of Michigan in Ann Arbor drei Gruppen von Kindern, die Hebräisch, Englisch oder Finnisch als Muttersprache hatten. Das Hebräische



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Sprache«
finden Sie unter

www.spektrum.de/sprache&denken

bezeichnet das Geschlecht ausgiebig – sogar das Wort »du« variiert dementsprechend –, Finnisch macht keine solchen Unterschiede, und Englisch liegt dazwischen. Dementsprechend finden hebräische Kinder ihr eigenes Geschlecht rund ein Jahr früher heraus als finnische; englische nehmen dies bezüglich einen Mittelplatz ein.

Was formt was?

Aber rufen nun Sprachunterschiede unterschiedliches Denken hervor – oder ist es eher umgekehrt? Wie sich zeigt, trifft beides zu: Unsere Denkweise prägt die Art, wie wir sprechen, aber der Einfluss wirkt auch in der Gegenrichtung. Bringt man Menschen zum Beispiel neue Farbwörter bei, verändert dies ihre Fähigkeit, Farben zu unterscheiden. Lehrt man sie, auf eine neue Weise über Zeit zu sprechen, so beginnen sie, anders darüber zu denken.

Man kann sich der Frage auch anhand von Menschen nähern, die zwei Sprachen fließend sprechen. Nachweislich ändern bilinguale Personen ihre Weltsicht je nachdem, welche Sprache sie gerade verwenden. Wie zwei Studien 2010 zeigten, hängen sogar grundlegende Vorlieben und Abneigungen von der Sprache ab, in der danach gefragt wird. Teams um Oludamini Ogunnaike an der Harvard University sowie um Shai Danziger an der Ben-Gurion University of the Negev (Israel) studierten arabisch-französische Bilinguale in Marokko, spanisch-englische Zweisprachler in den USA und arabisch-hebräische in Israel. Dabei testeten sie die unausgesprochenen Neigungen der Teilnehmer. Beispielsweise forderten sie arabisch-hebräische Zweisprachler auf, unter verschiedenen Bedingungen auf Wörter mit einem schnellen Knopfdruck zu reagieren. Die Teilnehmer einer Gruppe sollten »M« drücken, sobald sie einen jüdischen Namen wie »Yair« oder eine positive Eigenschaft wie »gut« oder »stark« sahen; bei einem arabischen Namen wie »Achmed« oder einem negativen Wort wie »schlecht« oder »schwach« sollten sie »X« drücken. Bei anderen Probanden wurde die Paarung vertauscht, so dass nun jüdische Namen und negative Eigenschaften denselben Knopfdruck verlangten, während arabische Namen und positive Bewertungen zusammengehörten. Die Forscher maßen, wie schnell die Teilnehmer unter den beiden Bedingungen reagieren konnten.

Diese Aufgabe dient dazu, unwillkürliche oder automatische Voreingenommenheiten zu messen: etwa, wie selbstverständlich positive Eigenschaften und bestimmte ethnische Gruppen im Kopf der Leute zusammengehören. Je besser für die Menschen die beiden Vorstellungen harmonisierten, bei denen sie auf denselben Knopf drücken sollten, desto schneller erfolgte die Reaktion.

Überraschenderweise verschoben sich bei den Zweisprachlern diese unwillkürlichen Vorurteile je nach der Sprache, in der die Tests durchgeführt wurden. Wenn die arabisch-hebräischen bilingualen Teilnehmer auf Hebräisch getestet wurden, zeigten sie gegenüber Juden eine positivere Grundhaltung als bei den gleichen Tests auf Arabisch. Anscheinend spielt die Sprache eine viel größere Rolle für unser

geistiges Leben, als die Wissenschaftler früher annahmen. Selbst wenn Menschen einfache Aufgaben lösen – etwa Farbflecken unterscheiden, Punkte auf einem Bildschirm zählen oder sich in einem kleinen Raum orientieren –, brauchen sie die Sprache. Wie meine Kollegen und ich herausgefunden haben, sinkt die Fähigkeit, solche Aufgaben auszuführen, wenn man den Zugriff auf die Sprachfertigkeit einschränkt. Dies lässt sich bewerkstelligen, indem man die Versuchsperson zugleich mit einer anspruchsvollen verbalen Aufgabe wie dem Wiederholen einer Nachrichtensendung konfrontiert.

All diesen Forschungsergebnissen zufolge wirken die Kategorien und Unterscheidungen, die in speziellen Sprachen existieren, stark auf unser geistiges Leben ein. Was die Forscher »Denken« nennen, ist offenbar in Wirklichkeit eine Ansammlung linguistischer und nichtlinguistischer Prozesse. Demnach dürfte es beim Erwachsenen kaum Denkvorgänge geben, bei denen die Sprache keine Rolle spielt.

Ein Grundzug menschlicher Intelligenz ist ihre Anpassungsfähigkeit – die Gabe, Konzepte über die Welt zu erfinden und so abzuändern, dass sie zu wechselnden Zielen und Umgebungen passen. Eine Folge dieser Flexibilität ist die enorme Vielfalt der Sprachen. Jede enthält eine Art und Weise, die Welt wahrzunehmen, sie zu begreifen und mit Bedeutung zu füllen – ein unschätzbare Reiseführer, den unsere Vorfahren entwickelt und verfeinert haben. Indem Wissenschaftler erforschen, wie die Sprache unsere Denkweise formt, enthüllen sie, wie wir Wissen erzeugen und die Realität konstruieren. Diese Erkenntnis wiederum hilft uns zu verstehen, was uns zu Menschen macht. ~

DIE AUTORIN



Lera Boroditsky ist Assistant Professor für kognitive Psychologie an der Stanford University (Kalifornien) und Chefredakteurin der Fachzeitschrift »Frontiers in Cultural Psychology«. Ihr Labor erforscht weltweit den Einfluss der Sprache auf die Kognition.

QUELLEN

- Boroditsky, L., Gaby, A.:** Remembrances of Times East: Absolute Spatial Representations of Time in an Australian Aboriginal Community. In: *Psychological Science* 21, S. 1635–1639, 2010
- Danziger, S., Ward, R.:** Language Changes Implicit Associations between Ethnic Groups and Evaluation in Bilinguals. In: *Psychological Science* 21, S. 799–800, 2010
- Fausey, C.M. et al.:** Constructing Agency: The Role of Language. In: *Frontiers in Cultural Psychology* 1, Artikel 162 (online), 2010

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/feb2011/language
Weitere Quellen (englisch)

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142708

Auf dem Weg zur Quantengravitation

Sie ist die letzte große Lücke im Gebäude der Physik: eine Theorie, welche die Quantenphysik mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vereint. Doch es gibt verschiedene Ansätze, wie das Problem gelöst werden könnte.

Von Claus Kiefer

Im Januar 1957 trafen sich Forscher an der University of North Carolina in Chapel Hill zu einer aufregenden Konferenz. Fast alle bedeutenden Gravitationsphysiker jener Zeit hatten sich versammelt, um eine Bestandsaufnahme ihres Fachgebiets zu versuchen. Die eine Hälfte der Tagung befasste sich mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Das ist die moderne Theorie der Gravitation, in der diese Wechselwirkung nicht mehr als Fernwirkungskraft zwischen Objekten mit Masse, sondern als Geometrie von Raum und Zeit gedeutet wird. Die Relativitätstheorie beschreibt alle mit der Schwerkraft verknüpften makroskopischen Erscheinungen: von unserer direkten Umgebung über Sonnensystem, Sterne und Galaxien bis hin zum Universum als Ganzem.

Die zweite Hälfte der Tagung befasste sich mit Verallgemeinerungen von Einsteins Theoriegebäude unter Einbeziehen der Quantentheorie. Eine solche erweiterte Theorie versehen Fachleute mit dem Etikett Quantengravitation. In gewissem Sinn vereint sie Mikro- und Makrokosmos, da die Quantentheorie hauptsächlich für die Beschreibung von Molekülen, Atomen und Elementarteilchen zuständig ist

und die Gravitation für das Große und Ganze, etwa die gegenseitige Anziehung ganzer Galaxien. Doch trotz intensiver, jahrzehntelanger Bemühungen konnte bis heute noch keine allgemein anerkannte Theorie der Quantengravitation entwickelt werden. Allerdings existiert dafür eine Reihe mehr oder weniger aussichtsreicher Kandidaten, von denen ich die wichtigsten im Folgenden vorstellen werde.

Warum sollten wir uns überhaupt mit Quantengravitation befassen? Den vielleicht wichtigsten Grund erläuterte Richard Feynman (1918–1988) auf der Chapel-Hill-Konferenz. Der US-amerikanische Physiker benutzte dazu ein Gedankenexperiment in Anlehnung an den berühmten Stern-Gerlach-Versuch in der experimentellen Atomphysik (siehe Grafik S. 36). In diesem erstmals 1922 von Otto Stern und Walther Gerlach durchgeführten Versuch werden Elektronen durch ein Magnetfeld geschickt. Elektronen besitzen einen inneren Drehimpuls, den man Spin nennt und der in ihrem Fall lediglich die Werte $+\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$ in Bezug auf die Richtung des Magnetfelds annehmen kann. Je nach Orientierung des Elektronenspins werden die Teilchen unterschiedlich abgelenkt – etwa nach unten, wenn der Spin parallel zum Magnetfeld zeigt, oder nach oben, wenn der Spin antiparallel zum Magnetfeld orientiert ist. Dies lässt sich im Experiment durch ober- und unterhalb angebrachte Detektoren nachweisen.

Gemäß der etwas merkwürdigen Gesetze der Quantenmechanik kann sich das Elektron anders als klassische Partikel aber auch in einer Überlagerung (»Superposition«) beider Zustände befinden, also von Spin oben und Spin unten. Wie der Formalismus lehrt, entspricht das einem Zustand, in dem der Spin in eine Richtung senkrecht zum Magnetfeld weist. Feynman betrachtete nun einen solchen Überlagerungszustand: Er besteht aus einem Beitrag für den Weg nach oben sowie einem gleich großen Beitrag für den Weg nach unten.

Nun erweiterte der amerikanische Theoretiker den Stern-Gerlach-Versuch: Die beiden Detektoren werden mit einer Kugel makroskopischer Dimension verbunden. Durch einen

AUF EINEN BLICK

SCHWIERIGE SUCHE

1 Seit Jahrzehnten versuchen theoretische Physiker, Einsteins **allgemeine Relativitätstheorie** mit der **Quantentheorie** zu verknüpfen – bisher nur mit mäßigem Erfolg.

2 Es gibt mehrere Kandidaten für eine Lösung: Zu den direkten Quantenversionen von Einsteins Theorie zählen **Quantengeometrodynamik**, **Schleifentheorie**, **dynamische Triangulation** sowie **asymptotische Sicherheit**. Die **Stringtheorie** versucht, sämtliche Wechselwirkungen in einer Theorie zu vereinen.

3 Eine **experimentelle Prüfung** der bisherigen Theorien scheint zwar in weiter Ferne zu liegen. Doch erwarten Physiker Aufschluss aus Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung etwa vom Satelliten Planck.

eingebauten Mechanismus bewegt sich die Kugel im Fall des nach oben weisenden Spins nach oben sowie für den nach unten weisenden Spin nach unten. Bei einer Überlagerung von Spin oben und Spin unten würde sich demnach eine makroskopische Überlagerung ergeben, in der sich die Kugel gleichzeitig nach oben und unten bewegt – vorausgesetzt, die Quantentheorie gilt auch auf diesen Skalen. Da die Kugel stets ein Gravitationsfeld hat, erhält man also eine Überlagerung von messbar verschiedenen Gravitationsfeldern. Ein solcher Zustand, so Feynman, könne jedoch nicht mehr durch Einsteins (klassische) Relativitätstheorie beschrieben werden, sondern erfordere unweigerlich eine Quantentheorie der Gravitation.

Bei seinem Gedankenexperiment handelt es sich um eine Variation von Schrödingers Katze, die, sperrt man sie in einen Kasten, gleichzeitig tot und lebendig sein kann – in Abhängigkeit zu einem radioaktiven Teilchen, das gemäß Quantentheorie als »noch nicht zerfallen« und »bereits zerfallen«

zu gelten hat, solange kein Experimentator nachschaut und misst. Feynmans Gedankenexperiment führt uns vor Augen, dass bei universeller Gültigkeit der Quantentheorie die Superposition verschiedener Gravitationsfelder unausweichlich ist. Dass man makroskopische Überlagerungen wie diese aber nicht tatsächlich beobachten kann, liegt an dem Phänomen der so genannten Dekohärenz. Es entsteht durch die unvermeidbare Wechselwirkung des Systems (etwa Schrödingers Katze) mit der Umgebung, wobei die quantenmechanischen Überlagerungen des Zustands aufgehoben werden. Aber auch die Dekohärenz beruht auf dem Superpositionsprinzip der Quantentheorie.

Natürlich erwähnte Feynman die Möglichkeit, dass die Quantentheorie auf diesen Skalen womöglich nicht mehr

Die Raumzeit könnte unter dem Mikroskop eine Quantenstruktur enthüllen, die sich aus winzigen Raumzeitstücken zusammensetzt.



MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / MILDE SCIENCE COMMUNICATIONS

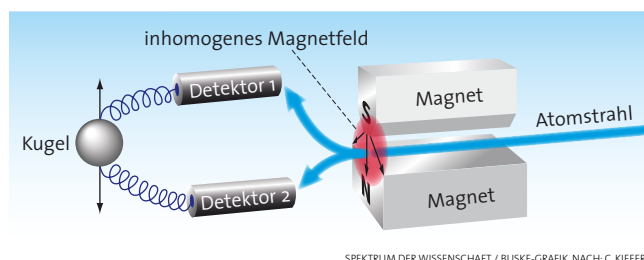
gültig ist und ein »Kollaps der Wellenfunktion« die Überlagerung vorher zerstört – eine Möglichkeit, die ihm offensichtlich nicht geheuer war. Physiker wie Lajos Diósi vom Forschungsinstitut für Teilchen- und Kernphysik in Budapest oder Roger Penrose von der University of Oxford versuchten solche Theorien für die Gravitation zu entwickeln, in denen die Wellenfunktion kollabiert. Die überwältigende Mehrheit der Physiker, die sich mit diesen Themen befassen, bevorzugt jedoch eine Theorie der Quantengravitation, in der das Superpositionsprinzip uneingeschränkt gilt. Das trifft auch für alle hier diskutierten Ansätze zu.

Das Problem der Quantengravitation treibt die Physiker schon seit dem Ende der 1920er Jahre um. Nachdem die Pioniere der Quantentheorie Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli erste Schritte zu einer Quantentheorie des elektromagnetischen Felds unternommen hatten, beauftragte Pauli seinen Assistenten Léon Rosenfeld, eine solche auch für die Gravitation zu konstruieren. »Mit der Quantelung (des Gravitationsfelds) ist Rosenfeld zur Zeit hier beschäftigt. Leider sind noch mathematische Schwierigkeiten ungelöst ... Wir hoffen aber damit noch fertig zu werden«, schreibt Pauli Ende 1929 in einem Brief an seinen Kollegen Pascual Jordan, der damals gerade an die Universität Rostock berufen worden war. Fertig geworden sind die Theoretiker mit diesem Problem bis heute nicht. Warum ist Quantengravitation so schwierig?

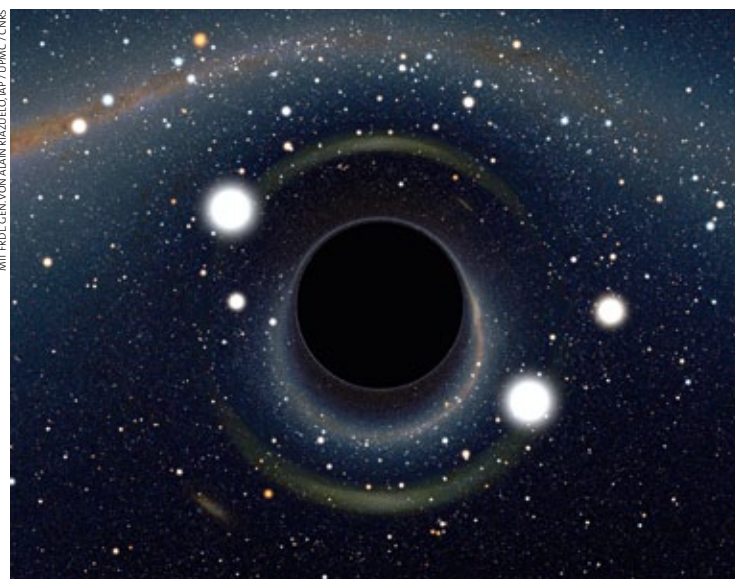
Einstein hatte mit seiner allgemeinen Relativitätstheorie unsere Vorstellungen von Raum und Zeit grundlegend verändert. Bildeten beide seit Newton einen starren Rahmen für die Dynamik von Teilchen und Feldern, so sind sie hier in ihrer Vereinigung zur vierdimensionalen »Raumzeit« selbst Akteure im Geschehen geworden. Das neue Konstrukt beschreibt Geometrie und Gravitation gleichzeitig und ist deshalb ein eigenes dynamisches Gebilde.

Verzerrungen der Raumzeit

Eine Quantentheorie der Gravitation wäre dann konsequenterweise auch eine Quantentheorie der Raumzeit, da Gravitation und Raumzeitgeometrie in diesem Rahmen ein und dasselbe sind. Bei den Quantentheorien der anderen Wechselwirkungen (etwa des Elektromagnetismus) konnten die Forscher immer davon ausgehen, dass die Quantenfelder »auf« einer vorgegebenen Raumzeit definiert sind. Diese



Der Stern-Gerlach-Versuch in der Variante von Richard Feynman: Eine Kugel bewegt sich nach oben oder unten, je nachdem, durch welchen Detektor ein »Teilchen« fliegt – ein Fall für die Quantentheorie der Gravitation.



Ein Schlüssel zur Quantengravitation stellen womöglich Schwarze Löcher dar (hier in einer Computeranimation).

fungiert mit ihren festen räumlichen und zeitlichen Dimensionen quasi als fester Hintergrund, der für die Formulierung solcher Theorien sogar mathematisch zwingend erforderlich war. Im Gegensatz dazu muss aber eine Quantentheorie der Gravitation »hintergrundunabhängig« sein. Das bedeutet eine große mathematische Herausforderung, die zum Teil neue Methoden für die Entwicklung einer solchen Theorie benötigt.

In einer ersten Näherung kann man schwache Gravitationsfelder allerdings auf einem vorgegebenen Hintergrund behandeln wie die anderen Naturkräfte auch. Eine wichtige Anwendung solcher Näherungen sind die von Einsteins Theorie vorhergesagten Gravitationswellen: Verzerrungen der Raumzeit, die sich wie elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Zumindest indirekt haben Astronomen ihre Existenz nachgewiesen, da sie in Doppelsystemen die Bahnperiode schrumpfen lassen. Ein direkter Nachweis mit Hilfe von Laserinterferometern wird zwar an mehreren Orten auf der Erde versucht beziehungsweise geplant, unter anderem am GEO600-Experiment in der Nähe von Hannover, ist aber noch nicht geglückt.

Die Quantentheorie lehrt, dass elektromagnetische Wellen auch als Teilchen betrachtet werden können, die man Photonen nennt und die einen Spin mit dem Wert 1 besitzen. Entsprechend gehören zu Gravitationswellen Teilchen mit dem Spin 2 – die so genannten Gravitonen. Solange man die Wechselwirkung der Gravitonen untereinander vernachlässigt, lässt sich eine Theorie der Quantengravitation analog zur experimentell gut bestätigten Quantenelektrodynamik formulieren: der Quantenphysik elektromagnetischer Felder. Ein Problem entsteht jedoch, wenn die Wechselwirkung der Gravitonen ins Spiel kommt. Richard Feynman hat eine allgemeine Methode entwickelt, um damit fertigzuwerden.



Der Theoretiker Stephen Hawking erprobte 2007 auf einem Parabelflug, wie es sich anfühlt, schwerelos zu sein.

Während dies bei Theorien wie der Elektrodynamik gut funktioniert, stößt man bei der Gravitation allerdings auf eine zusätzliche, grundsätzliche mathematische Schwierigkeit, die man als Nichtrenormierbarkeit bezeichnet. Quantentheorien für Felder enthalten in der Regel mathematisch unendliche Größen, die also über alle Grenzen anwachsen können. Fachleute sagen dann: Sie divergieren. Die Unendlichkeiten rühren daher, dass in den Berechnungen beliebig kleine Abstände zwischen den Teilchen sowie beliebig große Impulse auftreten. Da jede physikalische Theorie aber nur endliche Größen enthalten sollte, versuchen Forscher die Unendlichkeiten durch bestimmte mathematische Tricks zu beseitigen. Wenn das klappt, nennen sie die Theorie renormierbar.

Wo die Relativitätstheorie »zusammenbricht«

Wie gehen die Experten dabei vor? Dazu muss ich etwas auf das Handwerk des Feldtheoretikers eingehen. Renormierbare Theorien sind dadurch gekennzeichnet, dass man alle ihre Unendlichkeiten in eine endliche Zahl von experimentell zu bestimmenden Parametern stecken kann. In der Elektrodynamik sind das Ladung und Masse des Elektrons. Indem sie die Unendlichkeiten absorbieren und so aus den mathematischen Formeln entfernen, werden sie renormiert. Das klingt zwar wie Formelzauberei, klappt aber im Fall des elektromagnetischen Felds ausgezeichnet. Doch bei der Gravitation scheitert dieses Verfahren leider. Die in den Gleichungen auftretenden Unendlichkeiten sind beim Gravitationsfeld derart vielgestaltig, dass man zu deren Beseitigung ebenso unendlich viele Messparameter wie Ladung oder Masse bräuchte.

Ein mögliches Schlupfloch aus der Nichtrenormierbarkeit bietet eine neuartige Symmetrie: die Supersymmetrie, nach

der am LHC des CERN in Genf gefahndet wird. Ansonsten gibt es nur die Alternative, eine Quantengravitation direkt zu konstruieren, ohne Bezug auf die divergenten Formeln in der Wechselwirkung von Gravitonen untereinander – mehr dazu unten.

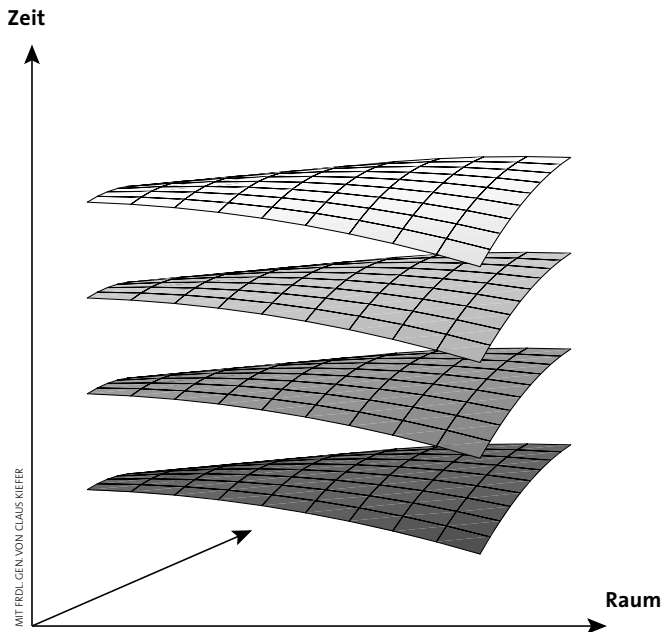
Physik ist eine experimentelle Wissenschaft, und in diesem Zusammenhang fällt auf, dass es bisher noch keine eindeutigen Beobachtungen oder Experimente gibt, die zu ihrer Erklärung zwingend auch eine Theorie der Quantengravitation benötigen. Somit drängt sich die Frage auf, ob wir diese überhaupt brauchen. Reicht es vielleicht einfach aus, Einsteins Theorie in friedlicher Koexistenz mit der Quantentheorie zu betrachten? Leider geht das nicht – ein solches Zusammenleben würde irgendwann zu Widersprüchen führen. Darauf weist schon Feynmans Argument mit dem Stern-Gerlach-Experiment hin. Ein anderer Schwachpunkt ist in Forscherkreisen als das »Problem der Zeit« bekannt.

In der allgemeinen Relativitätstheorie bilden Raum und Zeit eng miteinander verknüpfte, dynamische Objekte. Die Quantenmechanik beruht dagegen auf Newtons absoluter Zeit. Selbst die modernere relativistische Quantenfeldtheorie kommt nicht ohne einen absoluten, unveränderlichen Hintergrund aus. Denn sie definiert die Felder auf dem starren Gerüst der vierdimensionalen Raumzeit der speziellen Relativitätstheorie. Da die Zeit auf fundamentalem Niveau aber nicht gleichzeitig dynamisch und absolut sein kann, können allgemeine Relativitätstheorie und Quantentheorie nicht beide exakt gültig sein. Dabei spielt es keine Rolle, dass unsere derzeitigen Beobachtungsmöglichkeiten noch nicht weit genug greifen, um den Widerspruch beider Theorien experimentell zu belegen.

Mit der Natur von Raum und Zeit verbindet sich noch ein weiteres Argument. Theoretiker haben schon vor Längerem gezeigt, dass Einsteins Theorie unweigerlich, also unter sehr allgemeinen physikalischen Umständen, die Existenz von Singularitäten voraussagt. Darunter versteht man Grenzen in der Raumzeit, hinter denen diese Theorie wegen mathematischer Divergenzen ihre Gültigkeit verliert, sozusagen zusammenbricht. In Singularitäten werden etwa die Krümmung der Raumzeit (ein Maß für die Stärke der Gravitation), die Temperatur oder die Dichte der Materie unendlich groß. Die einschlägigen mathematischen Theoreme haben Roger



Ein Maß für die Entropie eines Schwarzen Lochs: Bits, die symbolisch auf seinem Ereignishorizont verteilt sind – ein Bit pro Planck-Fläche



Penrose, Stephen Hawking von der University of Cambridge und andere in den 1960er Jahren bewiesen.

Anwenden lassen sich diese Resultate auf das Geschehen im Inneren von Schwarzen Löchern sowie auf den Anfang des Universums (und vielleicht auch auf sein Ende). Da die Theorie dort Singularitäten voraussagt, sind Einsteins Gleichungen für diese Ränder der Raumzeit nicht mehr anwendbar. Um solche bedeutsamen Situationen dennoch beschreiben zu können, benötigt man einen umfassenderen Rahmen, etwa die Quantengravitation.

Die Suche nach der Quantengravitation zählt somit zu den größten Problemen der theoretischen Physik. Erschwert wird sie durch das Fehlen eindeutiger experimenteller Hinweise. Doch auf welcher Größenordnung sollte man Effekte einer solchen Theorie überhaupt erwarten? Max Planck (1858–1947) hat 1899 die später nach ihm benannten Einheiten vorgestellt, die heute als Skala der Quantengravitation gelten. Er hat die drei wichtigsten Konstanten der Physik zu fundamentalen Einheiten einer Länge, einer Zeit und einer Masse verknüpft:

- die Planck-Länge mit rund 10^{-35} Meter,
- die Planck-Zeit mit etwa 10^{-44} Sekunden sowie
- die Planck-Masse mit zirka 10^{-5} Gramm, was dem 10^{19} -fachen der Protonmasse entspricht.

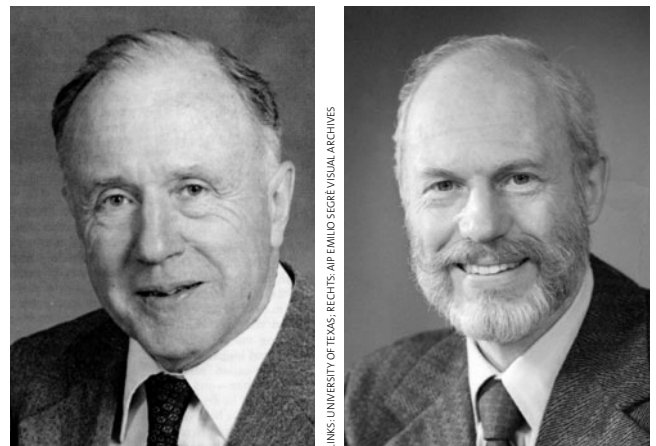
Bei den Konstanten, aus denen sich diese Planck-Einheiten herleiten, handelt es sich um das für die Quantentheorie zentrale Wirkungsquantum (das Planck selbst erst ein Jahr später offiziell einführen sollte), außerdem die Lichtgeschwindigkeit und die Gravitationskonstante. Die Planck-Länge kann mit heutigen Methoden nicht direkt gemessen werden; das Gleiche gilt für die Planck-Zeit. Um ein Teilchen mit der Planck-Masse an einem herkömmlichen Beschleuniger wie dem Large Hadron Collider zu erzeugen, müsste dieser die wenig realistische Größe unserer Milchstraße haben. Die planckschen Skalen liegen also weitab jeder technischen Erreichbarkeit.

Vierdimensionale Raumzeiten lassen sich in eine Folge von dreidimensionalen Teilräumen auffächern. Der Quantenzustand des Universums wird auf solche »Raumschnitte« bezogen.

Vielleicht lässt sich die Quantengravitation aber über Umwege testen, nämlich über die Schwarzen Löcher (siehe SdW 3/2012, S. 38). Es handelt sich um Gebiete der Raumzeit, in denen die Gravitation so stark ist, dass nichts, nicht einmal Licht, aus ihnen entweichen kann. Diese Gebiete sind von ihrem Außenbereich »kausal abgekoppelt«, sie werden damit für einen Beobachter im Außenbereich nie Teil seiner Vergangenheit, sehr wohl aber seiner Zukunft sein können: einmal im Schwarzen Loch, immer im Schwarzen Loch. Die Grenze zu ihrem Außenbereich, in dem wir uns aufhalten, nennen Fachleute den Ereignishorizont. Für das Innere wird, wie Hawking und Penrose zeigten, eine Singularität vorhergesagt, ein Bereich unendlich großer Krümmung der Geometrie.

Diese seltsamen Objekte sind, wie Stephen Hawking 1974 verkündete, nicht vollkommen schwarz, sondern geben Wärmestrahlung ab. Insbesondere werden die Gebilde durch Abstrahlung immer heißer. Daher erwartet man am Ende seiner Verdampfung eine gewaltige Explosion mit hochenergetischer Gammastrahlung. Die Details dazu liegen allerdings noch im Dunkeln, da Hawkings »halbklassische Rechnung«, also mit Quantenfeldern auf einer klassischen Raumzeit, in der Endphase eben eine Theorie der Quantengravitation benötigt. Andererseits besteht die prinzipielle Möglichkeit, das Phänomen zu beobachten: Aus kosmischer Urzeit stammende (»primordiale«) Schwarze Löcher mit einer Anfangsmasse von etwa 10^{15} Gramm (das entspricht der Masse eines kleinen Asteroiden) hätten gerade die passende Lebensdauer, um beim gegenwärtigen Alter des Universums zu verdampfen.

Aus der Thermodynamik wissen wir, dass mit der Temperatur eines Körpers auch eine Entropie verknüpft ist. Etwas salopp als Maß seiner Unordnung bezeichnet, entspricht die Entropie der Zahl der Mikrozustände, die mit demselben Makrozustand verbunden sind. Bei einem idealen Gas etwa



Die Erfinder einer berühmten Gleichung: John Archibald Wheeler (1911–2008, links) und Bryce S. DeWitt (1923–2004)

wird der Makrozustand durch Druck, Volumen und Temperatur bestimmt, während der Mikrozustand durch die Zahl der Gasmoleküle (typischerweise 10^{23} pro Kubikzentimeter) gegeben ist. Befinden sich etwa in einem Kasten mit einer gegebenen Zahl von Gasmolekülen alle Teilchen in einer Ecke des Kastens, so liegt ein unwahrscheinlicher Zustand mit niedriger Entropie vor. Sind alle Partikel gleichmäßig über den Kasten verteilt, entspricht das einem wahrscheinlichen Zustand mit hoher Entropie.

Da Schwarze Löcher eine Temperatur haben, sollten sie auch eine Entropie haben. Thermodynamische Betrachtungen haben nahegelegt, dass dieser Wert proportional zu der Oberfläche des Ereignishorizonts wächst; Fachleute sprechen von der Bekenstein-Hawking-Entropie, benannt nach Stephen Hawking und dem israelischen Physiker Jacob Bekenstein, die diese Entropie in der ersten Hälfte der 1970er Jahre als Erste diskutierten. Doch was bedeutet sie bei so einem ungewöhnlichen Objekt? In welchem Sinn könnte ein Schwarzes Loch Mikrozustände aufweisen?

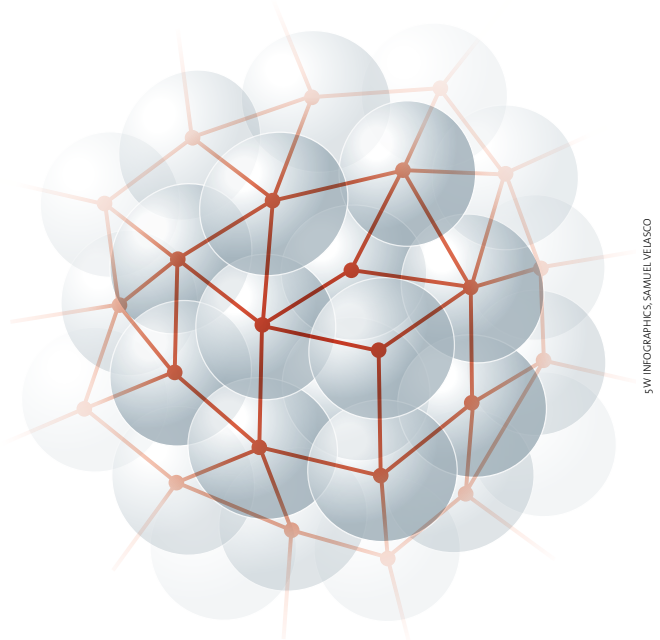
Nach einem mathematischen Theorem der Relativitätstheorie ist der Makrozustand eines Schwarzen Lochs durch maximal drei Parameter gekennzeichnet: Masse, Drehimpuls und elektrische Ladung – wobei in der Natur vorkommende Löcher vermutlich elektrisch neutral sind. Die Relativisten sprechen deshalb gerne auch von der »Haarlosigkeit« der Schwarzen Löcher (»no hair theorem«). Um die zugehörigen Mikrozustände zu kennen, bräuchten wir eine Theorie der Quantengravitation.

Reparatur einer mathematischen Problemzone

Der US-amerikanische Theoretiker John Archibald Wheeler stellte sich die unbekannten Mikrozustände eines Schwarzen Lochs so vor: Er teilte den Ereignishorizont in kleine Parzellen der Größe einer Planck-Länge im Quadrat ein und versah sie mit den Zahlen 0 und 1, also Bits (siehe Grafik S. 37). Die Entropie ist dann ein Maß für die Anzahl der Möglichkeiten, Nullen und Einsen über alle Zellen des Ereignishorizonts zu verteilen. Was sich hinter den Bits verbirgt, wusste freilich auch Wheeler noch nicht. Unterm Strich lässt sich sagen: Wegen der mikroskopischen Interpretation der Entropie Schwarzer Löcher und der möglicherweise beobachtbaren Endphase ihrer Entwicklung kommt diesen Objekten eine Schlüsselrolle bei der Suche nach der Quantengravitation zu.

Auf welche Weise versuchen Physiker nun eine Lösung zu finden? Auf Grund der mathematisch diffizilen Renormierbarkeit bereitet, wie bereits geschildert, auch eine Störungstheorie im üblichen Sinn für die Quantengravitation den Theoretikern Probleme. Welche Alternativen gibt es dazu?

Ein gewöhnliches Teilchen wird in der klassischen Mechanik durch seine Bahn beschrieben, eine Abfolge von Orten in der äußeren Zeit. In der Quantenmechanik gibt es jedoch keine solchen Bahnen mehr; das »Teilchen« wird dort mathematisch durch eine so genannte Wellenfunktion beschrieben, die den einzelnen Orten, wo es sein könnte, nur noch eine Wahrscheinlichkeitsamplitude zuordnet. Zusätzlich hängt

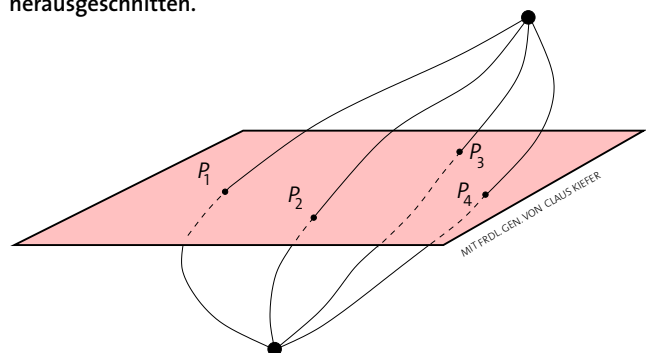


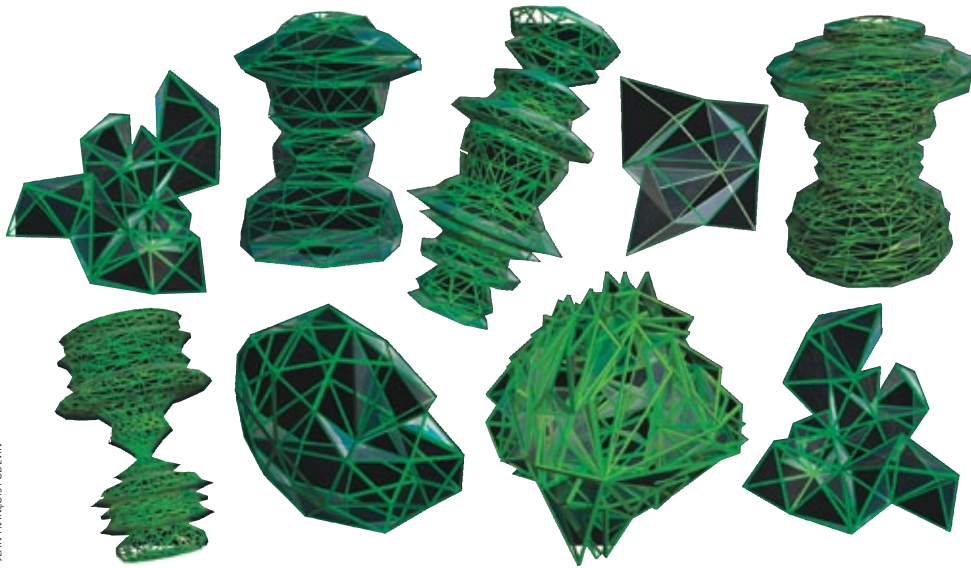
Was sind die Urelemente der Raumzeit? Vielleicht bestehen sie aus »Spin-Netzwerken«. Als »Atome« des Raums könnten sie unser bekanntes Universum in einer Näherung ergeben.

diese Wellenfunktion von der äußeren Zeit ab, die sie von der newtonschen Mechanik geerbt hat; ihre zeitliche Entwicklung wird durch die berühmte Gleichung beschrieben, die Erwin Schrödinger 1926 aufstellte. Der Teilchenbahn in der Mechanik entspricht in der allgemeinen Relativitätstheorie die vierdimensionale Raumzeit. Letztere kann man sich wie in einem Film als Abfolge dreidimensionaler Räume (den Verallgemeinerungen der Teilchenorte) vorstellen. Diese Auffächerung der Raumzeit in Räume ist in der Grafik links gezeigt; sie kann auf unendlich viele Weisen vollzogen werden. Im Unterschied zur Mechanik gibt es hier aber keine äußere Zeit mehr.

Wendet man den Formalismus der Quantentheorie auf Einsteins Theorie an, so verschwindet die vierdimensionale Raumzeit analog zur Teilchenbahn. Es verbleibt nur eine Wellenfunktion, die auf Basis der Menge aller möglichen dreidimensionalen Räume definiert ist. Die wichtigste Konsequenz

Aus Netzen wird Raum: Mit den Punkten P_1 bis P_4 , wo die Linien des Spin-Netzwerks die Fläche durchstoßen, wird ein »Quantum« herausgeschnitten.





Zusammenbau von quantisierten Zellen zu Raumzeiten in der Theorie der dynamischen Triangulation: Die elementaren Tetraeder müssen nach bestimmten Regeln zusammengesetzt werden, damit die Überlagerung (Superposition) den Beobachtungen entspricht.

quenz: Da es in dieser Theorie keine äußere Zeit mehr gibt, spielt sie in der Quantengravitation auch keine Rolle – ein erstaunliches Resultat.

Der gleiche Weg, auf dem Schrödinger zu seiner Gleichung fand, führt hier zu einer Gleichung für die Quantenzustände des Gravitationsfelds. Nach wichtigen Vorarbeiten durch Paul Dirac (University of Cambridge), Peter Bergmann (Syracuse University), Asher Peres (Technion, Haifa) und andere wurde diese Gleichung 1967 von den damals an der University of Texas in Austin forschenden Physikern John Archibald Wheeler und Bryce S. DeWitt aufgestellt; man spricht deshalb von der Wheeler-DeWitt-Gleichung. Die Gleichung enthält keinen Zeitparameter mehr, sie beschreibt also nichts anderes als eine statische Wellenfunktion bezüglich der Menge aller dreidimensionalen Räume. Da die Vorgehensweise die von Einstein benutzte geometrische Beschreibung in die Quantentheorie überträgt, ist sie auch als Quantengeometrodynamik bekannt.

So paradox es klingt: Das Problem der Zeit hat sich in der Quantengravitation mit ihrem Verschwinden von selbst gelöst. Doch wie kann das sein? Schließlich scheint uns nichts selbstverständlicher als die Zeit. Die Sache verhält sich ungefähr so wie das Lesen dieses Textes. Er liegt gedruckt in zeitloser Form vor, und dennoch stellt sich bei der Lektüre die Illusion eines zeitlichen Vorgangs ein, bewirkt durch die Korrelation des Bewusstseins mit den Sätzen, die nacheinander gelesen werden. Auf ähnliche Art folgt unser üblicher Zeitbegriff aus der Wheeler-DeWitt-Gleichung. Die Schrödinger-Gleichung ergibt sich aus ihr als Näherung, jedoch korrigiert um Terme, welche Effekte der Quantengravitation beschreiben. Solche Effekte versuchen Astrophysiker zu beobachten.

Für den größten Teil der »klassischen« kosmischen Entwicklung, in der Quanteneffekte der Raumzeit kaum eine Rolle spielen, ist die Existenz der Zeit eine gute mathematische Näherung. Insofern ist auch das Standardmodell der Kosmologie in einer Theorie der Quantengravitation als Näherung enthalten. Obwohl die Quantengeometrodynamik

sich auf natürliche Weise aus der Kombination von Quantenphysik und Einsteins Relativitätstheorie herleitet, gibt es mathematische Schwierigkeiten, die einem vollen Verständnis der exakten Wheeler-DeWitt-Gleichung im Weg stehen. Forscher haben deshalb nach Alternativen gesucht, welche zwar die grundlegende Struktur dieser Theorie beibehalten, aber andere Variablen benutzen. Die wichtigste Alternative ist heute als Schleifenquantengravitation bekannt (englisch: loop quantum gravity).

Wie der Raum aus Elementarschleifen entsteht

Wie der Name andeutet, spielen hier eindimensionale geschlossene Wege (Loops oder Schleifen), die innerhalb des dreidimensionalen Raums verlaufen, eine Rolle. Statt Variablen, die an jedem Punkt im Raum separat sitzen, benutzt man hier einerseits Größen, die direkt auf einer Schleife definiert sind, und andererseits Größen, die dem Fluss eines Felds durch die von der Schleife umrandete Fläche entsprechen; letztere sind analog zum Fluss des elektrischen Felds in der Elektrodynamik. Das hat den Vorteil, dass die mathematischen Schwierigkeiten, die mit einzelnen Raumpunkten verknüpft sind, hier vermieden werden. Statt ausdehnungsloser Punkte legt man der Theorie jetzt eindimensionale Schleifen und zweidimensionale Flächen zu Grunde. Die neuen Variablen heißen entsprechend »Schleifenvariablen«.

Tatsächlich geht die Vorstellung aber über das Bild von Schleifen in einem vorgegebenen dreidimensionalen Raum weit hinaus. Vielmehr soll – und das ist das Revolutionäre an dem Konzept – der Raum selbst erst aus diesen Strukturen entstehen. Es gibt eben keinen Hintergrund mehr, der als fester Raumzeit-Rahmen für die physikalischen Felder dienen könnte. Es geht darum, den Raum aus einzelnen, voneinander verschiedenen (»diskreten«) Graphen aufzubauen. Graphen sind abstrakte Strukturen, deren Objekte Knoten bilden, die über Kanten in einem Netzwerk miteinander verbunden sind.

Die Idee, Graphen als Ausgangsstruktur zu benutzen, hatte bereits Roger Penrose im Jahr 1971. Der britische Theoreti-

ker schuf dafür so genannte Spin-Netzwerke. Das sind spezielle Graphen, deren einzelne Abschnitte mit ganz- oder halbzahligen Werten charakterisiert werden (siehe Grafik S. 39 oben). Solche Gitternetze entwarf Penrose analog zum Spin von Teilchen in der Quantenmechanik. Allerdings handelt es sich dabei nicht um Teilchen im üblichen Sinn, sondern um fundamentale »Freiheitsgrade« des Gravitationsfelds. Die Spin-Netzwerke bilden in diesem Konzept die elementaren Bausteine, aus denen der Raum aufgebaut ist.

Der Charme von Penroses Spin-Netzwerken besteht darin, dass sie sich auf sozusagen natürliche (mathematische) Weise aus der Schleifentheorie ableiten lassen. Wie die Vertreter dieser Theorie gezeigt haben, können die Quantenzustände der Theorie aus solchen Netzwerken aufgebaut werden. Aus der diskreten Struktur dieser Schleifen folgt, dass der daraus entstehende Raum in gewissem Sinn ebenfalls eine diskrete Struktur, und damit eine bestimmte Körnigkeit, aufweist.

Ein Beispiel: Angenommen, eine gewöhnliche (zweidimensionale) Fläche wird von einem Teil eines Spin-Netzwerks durchstoßen (siehe Grafik S. 39 unten). Das ordnet ihr einen Flächeninhalt zu, der sich aus der Anzahl der Durchstoßpunkte ergibt und ein Vielfaches eines elementaren Flächenquantums beträgt; der Inhalt dieses Flächenquantums entspricht ungefähr der planckschen Länge im Quadrat, also unglaublich winzigen 10^{-66} Quadratzentimetern. In einer quantisierten dreidimensionalen Welt hat demnach die kleinste physikalisch sinnvolle Volumeneinheit eine Größe von etwa 10^{-99} Kubikzentimetern. Physikalisch spürbar ist diese Körnigkeit freilich nur auf kleinsten Maßstäben, eben im Bereich der Planck-Länge – fern jeder direkten Messbarkeit. Für größere Skalen, also etwa schon im atomaren Bereich, liegen die möglichen Werte so dicht beisammen, dass für alle Beobachter der Eindruck eines Kontinuums entsteht.

Bei den Spin-Netzwerken könnte es sich nun um die gesuchten mikroskopischen Freiheitsgrade handeln, aus denen die Entropie eines Schwarzen Lochs folgt. Dazu betrachtet man – wie in dem genannten Beispiel – die Durchstoßpunkte des Netzwerks mit der Horizontoberfläche des Objekts. Durch ein ausgeklügeltes Abzählverfahren lässt sich nun tatsächlich eine Formel finden, die der gesuchten Entropie von



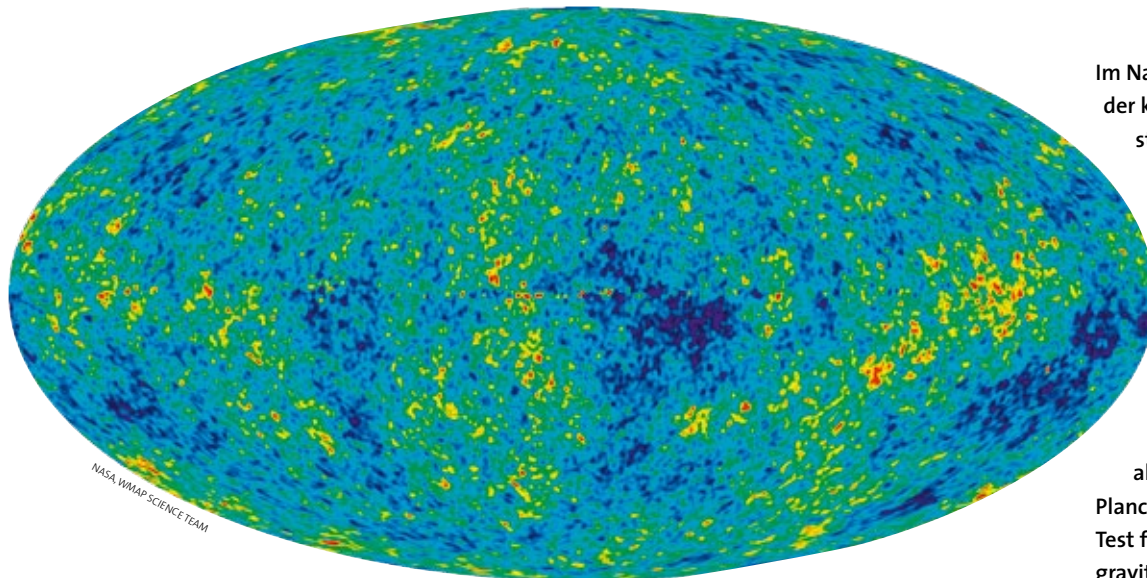
Hawking und Bekenstein ähnelt. Im Hinblick auf die Natur der Zeit teilt die Schleifentheorie die entsprechende Eigenschaft der Geometrodynamik: Auch ihre grundlegenden Gleichungen sind zeitlos. Darüber hinaus entwirft die Schleifentheorie das faszinierende Bild einer mikroskopischen Welt, in der es keinen kontinuierlichen Raum mehr gibt, sondern nur eine Vielzahl von diskreten Strukturen. Wie sich hieraus im Einzelnen unsere beobachtete makroskopische Welt ergibt, ist bislang offen. Obwohl sie das gleiche Ziel vor Augen hat, ist die Theorie damit komplementär zur Quantengeometrodynamik. Dort ist der Bezug zur beobachteten Welt klar, die Details ihrer mikroskopischen Beschaffenheit entziehen sich jedoch noch unserem Blick; in der Schleifentheorie ist es gerade umgekehrt.

Richard Feynman hat in den 1940er Jahren einen ausgeklügelten Formalismus entwickelt (das feynmansche Pfadintegral), in dem sich die quantenmechanische Wellenfunktion als Summe über alle möglichen fiktiven Pfade ausdrücken lässt, welche etwa Elektronen oder Moleküle durchlaufen können. Das ist wohlgeordnet ein mathematischer Trick, denn gemäß der Quantenmechanik gibt es ja keine Bahnen. Feynmans Formalismus ist elegant und erfreut sich einer Vielzahl von Anwendungen, unter anderem in der Festkörper- und Elementarteilchenphysik. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass er auch Eingang in die Quantengravitation findet. Dort summiert man nicht über alle möglichen Teilchenpfade, sondern über alle möglichen vierdimensionalen Raumzeiten, die dann so fiktiv sind wie vorher die Teilchenpfade.

Im Pfadintegralzugang zur Quantengravitation muss man also über alle möglichen Geometrien der vierdimensionalen Raumzeit summieren, um zu dem gewünschten Quantenzustand zu gelangen – selbst für Experten kein einfaches Unterfangen. Im Wesentlichen hat man die Wahl zwischen groben Näherungen und aufwändigen numerischen Rechnungen. Im zweiten Fall gab es in jüngerer Zeit interessante Entwicklungen mit der Methode der »dynamischen Triangulation«, wie sie vor allem in Arbeiten der Theoretiker Jan Am-



Der Physiker Martin Reuter von der Universität Mainz befasst sich mit einer Theorie der Quantengravitation, die »asymptotische Sicherheit« genannt wird und auf den amerikanischen Physiker Steven Weinberg zurückgeht. Die Idee: eine Quantentheorie zu konstruieren, die auch noch bei kürzesten Längen ihre Vorhersagekraft behält.



Im Nachleuchten des Urknalls, der kosmischen Hintergrundstrahlung (hier in einer Aufnahme des Satelliten WMAP), könnten Forscher auf Spuren von Quanteneffekten stoßen. So sollten bestimmte Anisotropien der Strahlung (gelbe und blaue Flecken), wie sie aktuell vom Satelliten Planck vermessen werden, als Test für die Quantengravitation dienen.

bjørn von der Universität Kopenhagen, Jerzy Jurkiewicz (Universität Krakau) und Renate Loll (Universität Utrecht) entwickelt worden sind. Dabei wird zunächst nicht die Raumzeit, sondern der dreidimensionale Raum in Tetraeder zerlegt, wie in der Grafik S. 35 gezeigt (siehe ihren Artikel in SdW 2/2009, S. 24). Diese dreidimensionalen Teilstücke werden dann von einem diskreten Zeitpunkt zum nächsten verbunden, wodurch vierdimensionale Simplizes (also kleine Stücke der Raumzeit) entstehen. Um aus diesen Teilstückchen den gesamten Quantenzustand zu erhalten, summiert man dann bei festgehaltenen Seitenlängen über alle möglichen Kombinationen der Teilgebilde.

Wie viele Dimensionen hat der dreidimensionale Raum?

Der Haken an der Sache: Wegen möglicher Interferenzen in dieser Summe ist es denkbar, dass im klassischen Grenzfall eine Raumzeit herauskommt, deren Dimension von vier abweicht. Doch Entwarnung! Bei der dynamischen Triangulation ergaben die Berechnungen makroskopisch tatsächlich die gewohnten vier Dimensionen – drei für den Raum und eine für die Zeit. Dennoch erlebten die Forscher eine herbe Überraschung: Sobald sie sich mathematisch den kleinen Skalen näherten, zumal der Planck-Länge, wurde der Raum effektiv eindimensional.

Das klingt verwirrend. Doch das gleiche Ergebnis ergibt sich auch in einem anderen Zugang zur Quantengravitation, den die Erfinder »asymptotische Sicherheit« nannten. Er wurde in den 1970er Jahren vom US-Physiker Steven Weinberg (University of Texas in Austin) entworfen und im letzten Jahrzehnt hauptsächlich von Martin Reuter und seinen Mitarbeitern von der Universität Mainz ausgearbeitet. Nimmt man noch die Indizien aus der Schleifentheorie hinzu, so ergibt sich ein erstaunliches Bild der Raumstruktur im Mikrokosmos: Von den drei klassischen Raumdimensionen auf makroskopischer Ebene bleibt dann nur noch eine übrig.

Die erwähnten Vorgehensweisen gehen in der Regel von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie aus. Die jeweilige Quantengravitation ist also zunächst einmal eine Quantentheorie des Gravitationsfelds. Weitere Felder und Materie kommen zwar auch vor, werden aber nicht grundlegend anders beschrieben als in den gängigen Quantentheorien. Insbesondere führen diese Zugänge, und das ist ihr großes Manko, noch nicht zu einer Vereinheitlichung aller Wechselwirkungen inklusive der Schwerkraft.

Eine grundsätzlich andere Sichtweise bietet die Stringtheorie (siehe SdW 12/2010, S. 34). Hier geht man nicht von den bekannten Wechselwirkungen aus. Die fundamentalen Freiheitsgrade sind eindimensionale Objekte, also Saiten (englisch: strings), deren Wechselwirkung durch eine Quantentheorie konsistent beschrieben wird. Altbekannte Kräfte wie Gravitation oder Elektromagnetismus folgen erst aus den Anregungen der Strings, gewissermaßen als Obertöne der elementaren Objekte. Das Obertonspektrum liefert eine große Vielfalt an Teilchen, wozu Gravitonen und Photonen, aber auch noch unbekannte Partikel zählen.

Es gibt einen weiteren Unterschied zu den bisher besprochenen Theorien der Quantengravitation. Während sich diese direkt in vier Raumzeitdimensionen formulieren lassen, benötigt die Stringtheorie der mathematischen Konsistenz halber sechs oder sieben zusätzliche Raumdimensionen; die Raumzeit wäre dann fundamental zehn- oder elfdimensional. Unter günstigen Umständen erwarten die Experimentatoren, dass sich am LHC in Genf Hinweise auf die Existenz dieser zusätzlichen Dimensionen ergeben. Es ist zwar spekulativer, doch zumindest denkbar, dass dort sogar winzige Schwarze Löcher entstehen und verdampfen könnten. Aber auch darauf gibt es bis jetzt keine Hinweise.

Die Stringtheorie bietet zumindest im Prinzip die Möglichkeit, eine vereinheitlichte Beschreibung aller Wechselwirkungen zu liefern. Sie dürfte dafür nur wenige freie Parameter enthalten, woraus sich dann alle wesentlichen Eigen-

schaften unserer Welt ergeben sollten (deshalb häufig auch »Weltformel« genannt). Leider wird sie diesem Anspruch bisher nicht gerecht, obwohl Forscher nun schon seit mehreren Jahrzehnten daran arbeiten. Die Theorie enthält drei dimensionsbehaftete Parameter: Zu Lichtgeschwindigkeit und Wirkungsquantum gesellt sich noch die fundamentale Stringlänge. Alle anderen Größen (etwa die Massenwerte der beobachteten Teilchen), ja selbst die planckschen Einheiten, sollten sich daraus berechnen lassen.

Dass dies bisher nicht funktioniert, liegt vor allem an den zusätzlichen sechs oder sieben Raumdimensionen. Die Möglichkeiten, von der höherdimensionalen Welt zu den beobachteten und uns vertrauten vier Raumzeitdimensionen zu gelangen, sind ziemlich willkürlich und derart vielgestaltig, dass jede Vorhersagekraft zu entschwinden scheint. Stringforscher haben abgeschätzt, dass es mindestens 10^{500} Kandidaten für unser Universum gibt, eine Zahl, die unvorstellbar viel größer ist als selbst die Gesamtzahl der Protonen im sichtbaren Universum von 10^{80} .

Der Urknall als Quantenzustand

Obwohl ursprünglich nur auf Strings basierend, hat sich gezeigt, dass die Stringtheorie auch höherdimensionale Objekte postuliert, für die sich der Begriff »Branen« eingebürgert hat (inspiriert vom Beispiel der Membran). Vielleicht etwas unerwartet, bieten gerade die Branen die erhofften mikroskopischen Freiheitsgrade für die Berechnung der Entropie Schwarzer Löcher. In speziellen Fällen führt das Abzählen dieser Mikrozustände tatsächlich zur gewünschten Formel von Bekenstein und Hawking. Das betrifft allerdings nur gewisse exotische Schwarze Löcher, wie sie von der Stringtheorie ebenfalls vorausgesagt werden. Die im Weltall beobachteten Schwarzen Löcher, darunter das im Zentrum unserer Milchstraße, zählen nicht dazu.

Einen weiteren Prüfstein für jede Quantentheorie und ihren Sonderzweig, die Quantenkosmologie, liefert die kosmische Hintergrundstrahlung – ein Überbleibsel des heißen, frühen Universums. Sie hat sich etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall von der Materie gelöst und breitet sich seither ungehindert im All aus. Dabei hat sie sich bis auf etwa drei Kelvin abgekühlt. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist annähernd isotrop, das heißt, sie besitzt in jeder Richtung dieselbe Temperatur. Es gibt nur kleine Unregelmäßigkeiten (Anisotropien) von der Größenordnung hunderttausendstel Kelvin. Sie entsprechen Dichtefluktuationen zur Zeit der Strahlungsfreisetzung und bildeten nach allgemeiner Auffassung die Keime heutiger Galaxien und ihrer Haufen.

Was hat das mit Quantengravitation zu tun? Wenn sie tatsächlich gültig ist, sollte sie auch für das Universum als Ganzes gelten. Dort ist aber die Schwerkraft die dominierende Wechselwirkung. Kosmologen benötigen also eine Theorie der Quantengravitation, um Quantenkosmologie zu betreiben. Sowohl Geometrodynamik als auch Schleifen- und Stringtheorie lassen sich auf das gesamte Universum anwenden. Idealerweise könnten sich daraus Vorhersagen für die

Anisotropien der Hintergrundstrahlung ergeben, die von den Vorhersagen ohne Quantengravitation abweichen. Dies betrifft vor allem die Strukturen auf großen Skalen. Die vorhergesagten Abweichungen sind naturgemäß winzig klein, und ihr Nachweis stellt eine große Herausforderung für die Beobachter dar. Deren Hoffnung ruht derzeit auf dem Satelliten Planck. Der Trabant, den die Europäische Weltraumbehörde ESA im Mai 2009 startete und der im Januar 2012 seine Messungen abschloss, hatte die Aufgabe, die Hintergrundstrahlung mit bisher unerreichter Genauigkeit zu erfassen. Die Auswertungen werden noch bis 2013 dauern. Ob sie für die Theorie einen Durchbruch bringen werden, bleibt abzuwarten.

Die Quantenkosmologie dient freilich nicht in erster Linie dazu, kleine Effekte im Anisotropiespektrum aufzuspüren. Sie soll vor allem die Anfangsbedingungen des Universums und seine großräumige Struktur erklären. Wir haben ja gesehen, dass Einsteins Theorie bei der Beschreibung des kosmischen Anfangs notgedrungen zu einer Singularität führt, sie jenen Anfang also gar nicht selbst erklären kann. Die Singularität bedeutet zum Zeitpunkt null einen Zustand unendlich großer raumzeitlichen Krümmung. Gelingt es der Quantengravitation, diese Probleme zu vermeiden? Die Antwort ist derzeit ein vorsichtiges Ja. Das heißt, es gibt zumindest einfache Modelle, in denen das bereits gelingt.

Welche der hier diskutierten Zugänge zur Quantengravitation der richtige ist, wissen die Forscher noch nicht. Sie wissen nicht einmal, ob der richtige schon darunter ist – ja ob es einen solchen überhaupt gibt. Klar ist aber, dass eine Quantengravitation zu einem tieferen Verständnis von Zeit und Universum führt – mit aufregenden Konsequenzen. ~

DER AUTOR



Claus Kiefer studierte Physik und Astronomie an den Universitäten Heidelberg und Wien und promovierte 1988 in Heidelberg über den Begriff der inneren Zeit in der kanonischen Quantentheorie der Gravitation. Nach Aufenthalt an den Universitäten Heidelberg, Zürich und Freiburg, wo er 1995 habilitierte, wurde er 2001 Professor für theoretische Physik an der Universität zu Köln. Seine Arbeitsgebiete betreffen Quantengravitation, Kosmologie, Schwarze Löcher und Grundlagen der Quantentheorie.

QUELLEN

Kiefer, C.: Der Quantenkosmos. Fischer, Frankfurt am Main 2008
Reise durch das Quantenuniversum. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 2/2010

Zeh, H.-D.: Feynman's Interpretation of Quantum Theory. Online unter <http://arxiv.org/abs/arXiv:0804.3348>

WEBLINKS

www.thp.uni-koeln.de/gravitation
Informationen zum Autor und seiner Arbeitsgruppe

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142715

Licht im Schatten

Der Strahlenkranz eines Axicons scheint den Schatten der eigenen Hand ungehindert durchdringen zu können.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Undurchsichtige Gegenstände lassen kein Licht passieren – daran gibt es nichts zu rütteln. Auch durch den Schatten eines solchen Gegenstands wird kein Licht treten. Ein Blick auf das Foto (rechts) wirft aber Zweifel auf. Hier scheint der Schatten einer Hand eben doch strahlendes Licht hindurchzulassen. Die Frage lautet: Wie kommt es dorthin?

Das Foto entstand, als wir das Beugungsverhalten einer Musik-CD untersuchten. Ihre metallische Beschichtung hatten wir zuvor entfernt. Dann benutzten wir die feinen Spurrillen als Reflexionsgitter, mit dem wir das durch ein Fenster in den Raum fallende Sonnenlicht an eine weiße Wand projizierten (siehe »Verwirrende Beugung«, SdW 5/2011, S. 54). Doch bei der Suche nach einem geeigneten Reflexionswinkel drehte der Experimentator die CD-Scheibe versehentlich ein Stück zu weit. Das Licht fiel daher plötzlich durch die CD hindurch, die Scheibe war damit unversehens zu einem Transmissionsgitter geworden. Sie beugte die Strahlen und brachte sie auf der

Wand zu farbiger Interferenz. Allerdings landete Licht eben auch dort, wo man es nicht erwartete – nämlich mitten im Schatten der Hand.

Die blauen Lichtspeichen des Strahlenkranzes weisen ungefähr in Richtung der Fingerzwischenräume. Dies erlaubt die Vermutung, das Licht könnte von jenen Teilen der CD stammen, die nicht von Fingern abgedeckt sind, und von dort zur Mitte hin gelenkt werden. Diese Hypothese lässt sich leicht überprüfen. Ein solches System müsste ja eine Brennweite besitzen, also einen Abstand zwischen CD und Wand, bei der der Brennpunkt genau auf der Wand liegt und das Zentrum des Strahlenkranzes darum besonders scharf erscheint.

Variieren wir also den Abstand zwischen CD und Projektionswand. Auf einen Brennpunkt stoßen wir dabei erstaunlicherweise nicht, sondern vielmehr auf etwas, was eher einer senkrecht zur CD verlaufenden Brennlinie ähnelt. Offenbar können wir nämlich den Abstand zur Wand um bis zu 15 Zentimeter verändern, ohne dass sich

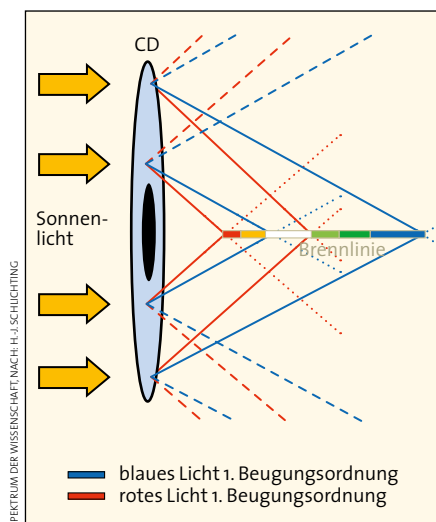
Aber vor allem ist er sichtbar,
indem er undurchsichtig ist.

Hans Blumenberg (1920–1996)

die Schärfe des Bilds verändert. Das wäre bei Abbildungen mit Linsen nicht zu erreichen. Auch strukturierte Objekte lassen sich mit großer Tiefenschärfe abbilden – Hauptsache, sie leuchten von selbst, wie etwa eine Lichterkette.

Und noch etwas fällt auf. Dass die CD teilweise verdeckt ist, verschlechtert die Abbildung nicht etwa, sondern lässt sie sogar hervortreten. Denn könnte Licht direkt durch das Loch in der Mitte der CD gelangen, würde es das Bild schlicht überstrahlen. Beim Experimentieren empfiehlt es sich daher, das rillenfreie »inaktive« Zentrum der CD kreisförmig abzudecken. Auf diese Weise kann man übrigens doch noch einen Brennpunkt finden. Deckt man nämlich, von innen beginnend, mehr und mehr Spuren der CD ab, so verkürzt sich die Brennlinie entsprechend. Dies kann man so lange weitertreiben, bis nur noch wenige Spuren zur Abbildung beitragen. Dann ist die Brennlinie zum Brennpunkt geschrumpft.

Wie kommt nun der Strahlenkranz zu Stande? Ursache ist die Beugung des Lichts an der spiralförmig verlaufenden Spur. Diese bildet näherungsweise ein System aus Ringen mit nahezu identischen Abständen. Aus Symmetriegründen wird das Licht einerseits zur optischen Achse hin (siehe Grafik links, durchgezogene Linien) und andererseits von der optischen Achse weg gebeugt (gestrichelte Linien). Daher lässt sich sagen, dass die CD das Licht sowohl fokussiert als auch defokussiert. Zu dem von uns untersuchten Phänomen trägt nur das Licht bei, dessen Weg mit durchgezogenen Linien markiert ist. Überdies ist hier nur Licht der 1. Beugungsordnung dargestellt, denn allein dieses liefert Beiträge zur Brennlinie.



Um ein Axicon zu erzeugen, kann man Sonnenlicht auf eine CD fallen lassen, deren metallische Beschichtung entfernt wurde. Die CD beugt das Licht so, dass es sich in einer Brennlinie überlagert. Definiert ist ein Axicon als optisches Element (die CD), das einen Punkt (die punktförmig gedachte Sonne) in ein Liniensegment längs der optischen Achse verwandelt (die Brennlinie). Lichtstrahlen sind als blaue und rote Linien symbolisiert. Gestrichelte Linien tragen nicht zu dem Phänomen bei. Strahlen, die gepunktet dargestellt sind, lassen einen Lichtkranz um den Schnittpunkt der Brennlinie mit der Wand entstehen.



FOTOS: H.-J. SCHLICHTING

Der Schatten einer Hand, die eine CD umfasst, scheint von einem Strahlenkranz durchleuchtet zu werden (links). Ursache ist ein Axicon. Das ungewöhnliche Beugungsphänomen entsteht nur, wenn die metallische Beschichtung der CD entfernt wurde, so dass ihre Spurrillen als Transmissionsgitter dienen können.

Neben der Lichtbeugung kann auch der Effekt der Lichtbrechung helfen, ein Axicon zu erzeugen. Im Fall des Fotos rechts wurden Rillen in ein Glas geritzt. Auch hier scheint der Finger von Licht durchstrahlt zu werden. Allerdings kommt es hier nicht zu einer Aufspaltung der Spektralfarben wie im linken Foto.

Die Brennlinien höherer Ordnung würden eine weitere winzige Brennlinie zur CD bilden. Diese ist aber zu lichtschwach, um ohne Weiteres erkannt zu werden.

Im weißen Licht sind alle Spektralfarben gemischt, doch zur Brennlinie trägt jede Farbe einzeln bei. In der Grafik ist zur besseren Anschauung darum rotes Licht – also elektromagnetische Wellen am langwelligen Ende des sichtbaren Spektrums – als rote Linie dargestellt. Dieses wird unter dem größten Winkel gebeugt und kennzeichnet den Beginn der Brennlinie; blauviolett Licht dagegen unter dem kleinsten Winkel, es markiert das Ende.

Dies erklärt auch folgende Beobachtung: Hält man die Scheibe dicht vor die Wand, sieht man dort, wo sich Brennlinie und Wand schneiden, einen roten Punkt. Vergrößert man den Abstand, wechselt dessen Farbe über Gelb nach Weiß, Grün und schließlich Blau (siehe Grafik links). Dabei tritt Weiß erst dann auf, wenn auch noch das blauviolette Licht aus den innersten Rillen hinzutritt.

Die Brennlinie erstreckt sich nicht isoliert im Raum, sondern ist von farbigem Licht viel geringerer Intensität umgeben. Denn nachdem das gebeugte Licht 1. Ordnung sich in der Brennlinie auf der optischen Achse gekreuzt hat,

läuft es wieder auseinander (Grafik links, gepunktete Linien) und erreicht ebenfalls die Wand.

Neu ist das hier vorgestellte Phänomen allerdings keineswegs. Vielmehr handelt es sich um ein so genanntes Axicon, das wohl erstmals von John H. McLeod 1954 im »Journal of the Optical Society of America« beschrieben wurde. Nach McLeods Definition ist ein Axicon ein optisches Element, das einen Punkt – etwa die Sonne als näherungsweise punktförmige Lichtquelle – in ein Liniensegment längs der optischen Achse verwandelt. Genau das ist hier zu beobachten: Der zentrale weiße Fleck im Strahlenkranz – der Schnittpunkt der an dieser Stelle zufällig weißen Brennlinie mit der Wand – ist das von farbigem Streulicht umgebene Abbild der Lichtquelle. Es wird aber über einen auffallend großen Bereich hinweg scharf abgebildet. Dem Vorteil der enormen Tiefenschärfe steht entgegen, dass die Qualität der Abbildung geringer ist als bei konventionellen, linsenbasierten Methoden.

Lässt sich ein Axicon vielleicht auch mit Hilfe von Lichtbrechung an Stelle von -beugung erzeugen? Das geht tatsächlich. Auf die Farbaufspaltung des Lichts muss man dabei allerdings verzichten. Man bringe Schmirgelpapier mit Hilfe einer Bohrmaschine zum Ro-

tieren und ritze damit Rillen in eine alte Glasscheibe. Das Resultat ist zwar nicht besonders gleichmäßig (siehe Foto oben rechts), erfüllt seinen Zweck aber gut: Lässt man nämlich Sonnenlicht durch das Glas fallen und hält dahinter einen Finger in den Strahlengang, wird auch hier der Schatten des Fingers durch das Licht des Axicons aufgehellt.

Heute haben Axicon-»Linsen« übrigens längst Anwendung in Forschung und Technik gefunden. Dabei bleibt nicht einmal die Faszination auf der Strecke: Spezielle Anordnungen schaffen es sogar, Laserstrahlen in Lichtringe zu verwandeln. ~

DER AUTOR



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

QUELLE

McLeod, J.: The Axicon: A New Type of Optical Element. In: Journal of the Optical Society of America 44, S. 592–597, 1954

Die Ente muss raus!

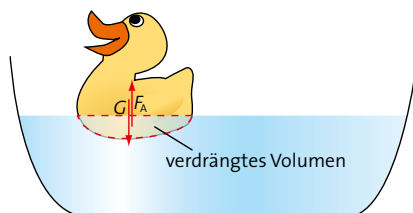
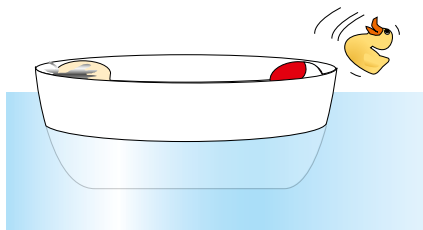
Wie ändert sich der Wasserspiegel eines Sees, wenn aus einer darauf schwimmenden Wanne Dinge hineingeworfen werden?

VON THOMAS RUBITZKO

Vicco von Bülow, der Altmeister des deutschen Humors, besser bekannt als Lorient, ist am 22. August letzten Jahres gestorben. Seine Sketche aber werden ihn überleben, darunter Klassiker wie »Die Nudel« und »Herren im Bad« – Anlass genug, den letzteren ein bisschen anders zu erzählen: physikalischer.

»Die Ente bleibt draußen!«, beharrt Herr Müller-Lüdenscheidt in seinem Streitgespräch mit Herrn Dr. Klöbner. Was den Herren bei ihrer Auseinandersetzung entgangen ist: Auf Grund eines Rohrbruchs ist das Badezimmer zur Hälfte voll Wasser gelaufen, das seinerseits die Wanne samt den Insassen aus der Verankerung gehoben hat. Jetzt treiben sie in ihrer Wanne auf einem künstlichen See und hätten eigentlich allen Anlass, darüber nachzudenken, wie sie ihrer misslichen Lage entrinnen könnten.

Aber unsere Prinzipienreiter denken überhaupt nicht daran. Ihnen ist das Wichtigste die Quetscheente, die Herr Dr. Klöbner gegen Herrn Müller-Lüdenscheidts erbitterten Protest gerade noch rechtzeitig vor dem Abheben ins Boot geholt hat. Da die Herren relativ schwer sind, schwappt das Wasser bereits bedrohlich am Wannenrand. Würde sich die Wanne vielleicht ein Stück aus dem Wasser heben, wenn die Ente über Bord geworfen würde? Und würde sich dadurch der Wasserspiegel im Badezimmer – nach oben oder unten – verändern?



Die Auftriebskraft F_A hat stets den gleichen Betrag wie die Gewichtskraft G der verdrängten Flüssigkeit.

»Herr Dr. Klöbner, die Ente muss raus!«

»Gemach, gemach, Herr Müller-Lüdenscheidt. Lassen Sie uns alles zuerst theoretisch betrachten. Ich entsinne mich an einen Herrn, der in der Wanne saß, dadurch Badewasser verdrängte, worauf er plötzlich eine Erleuchtung bekam, herausprang und ...«

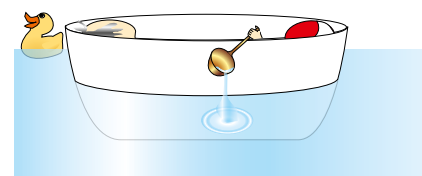
»Das ist eine hervorragende Idee, Herr Dr. Klöbner. Selbstverständlich steht es Ihnen frei, die Wanne zu verlassen. Es ist ja meine Wanne.«

»Nein, nein, es war genau umgekehrt. Er saß in der wassergefüllten Wanne und sprang ins Trockene. Und dann rannte er auf die Straße und rief »Heureka!«, weil ihm gerade die Lösung des Problems gekommen war.«

Nach dem Prinzip des Archimedes hat die Auftriebskraft, die auf einen Körper in einer Flüssigkeit wirkt, den gleichen Betrag wie die Gewichtskraft, die das Flüssigkeitsvolumen erfährt, welches der Körper unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche einnimmt (Bild oben). Da Schwimmen ein Zustand der Ruhe ist, muss ein Kräftegleichgewicht vorliegen. Der Körper taucht also so weit ein, dass die nach oben wirkende Auftriebskraft genauso groß ist wie die nach unten auf den Körper wirkende Gewichtskraft.

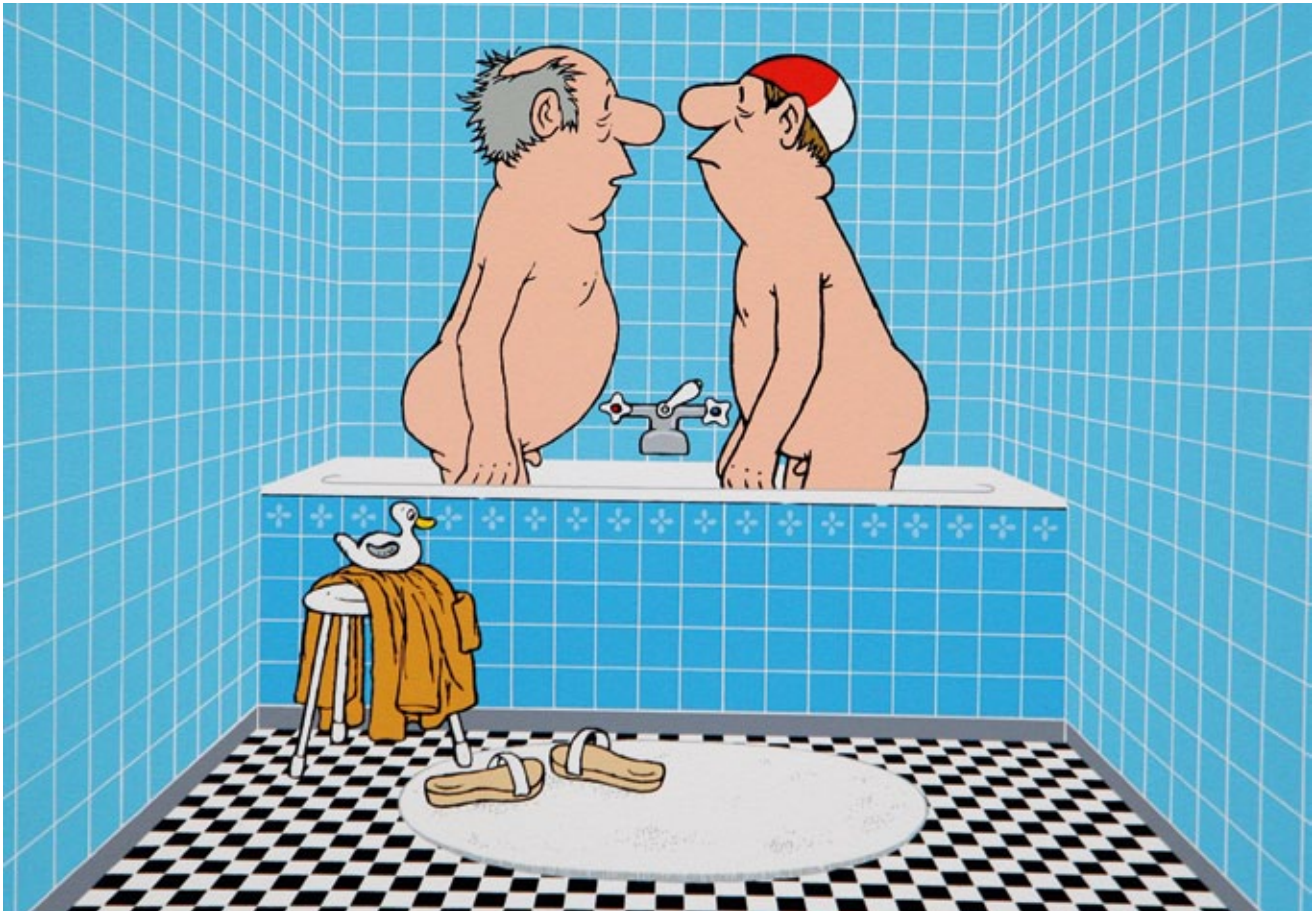
Sitzt die Ente in der Wanne, addiert sich ihr Gewicht zu dem der Wanne samt Inhalt. Nach Archimedes verdrängt sie dabei mittels Wanne ein Flüssigkeitsvolumen, das genauso viel wiegt wie sie selbst. Schwimmt sie dagegen direkt auf dem See, verdrängt sie – genauso viel Wasser. Am Wasserspiegel des Sees ändert sich durch ihren Rauswurf nichts, abgesehen von einem vorübergehenden Absinken während der Flugphase. Dies gilt für alle schwimmenden Festkörper wie beispielsweise auch für ein Stück Fichtenholz (Bild a, S. 48).

»Ein Stück Holz? Wie langweilig, dann könnten Sie gleich Wasser ins Wasser kippen ...«



Das ist in der gegenwärtigen Situation eine hervorragende Idee, denn das in die Wanne geschwappte Wasser steht den Herren – nun, nicht gerade bis zum Hals, aber doch unkomfortabel bis zur Oberkante des großen Zehs. Man schöpft einträchtig, die Wanne hebt sich merklich, aber der Wasserspiegel draußen bleibt unverändert (b). Zwar verdrängt die Wanne nun weniger Volumen, doch gleicht das zusätzliche, hinausgeschöpfte Wasser das genau aus. Wasser schwebt in Wasser; auch hier haben Auftriebskraft und Gewichtskraft den gleichen Betrag.

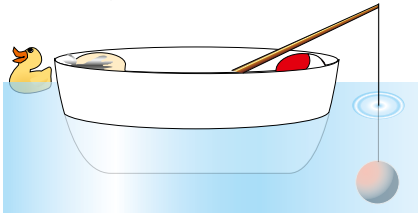
Was könnten die Herren über Bord werfen, um die Flutung des Badezimmers merklich zu mindern – gesetzt den Fall, sie hätten sich vorher entsprechend ausgerüstet, was die Originalgeschichte an Absurdität noch übertreffen würde? Unterstellen wir einfach,



PICTURE ALLIANCE / EVENTPRESS RADKE. ALE ÜBRIGEN ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: THOMAS RUBITZKO

Über der Auseinandersetzung um die Sitzrechte in der Badewanne und die Besitzrechte an der Quetscheente vernachlässigen die Herren Dr. Klöbner (links) und Müller-Lüdenscheidt (rechts) die wesentlich bedeutsameren physikalischen Fragen.

Herr Dr. Klöbner und Herr Müller-Lüdenscheidt seien bereit gewesen, der physikalischen Erkenntnis zuliebe die merkwürdigsten Dinge an Bord zu nehmen: Eisenkugeln, Eiskwürfel sowie größere Mengen an Salz, Öl und Alkohol.



Um den Wasserspiegel deutlich zu senken, muss es schon etwas richtig Schweres sein – etwas richtig Dichtes, um genau zu sein: Eisenkugeln zum Beispiel (●). Die sinken im Wasser, denn der Auftrieb, den eine Eisenkugel dort erfährt, ist geringer als ihr Gewicht. Am Boden des Sees verdrängt sie genau ihr Volumen; das ist kleiner als

das Volumen, welches sie zuvor mittels Wanne schwimmend verdrängt hat. Also sinkt der Wasserstand.

Eine Eisenkugel mit einem Volumen von einem Liter verdrängt an Bord mittels Wanne etwa 7,9 Liter Wasser (siehe Tabelle rechts), im Wasser dagegen nur ihr eigenes Volumen. Das Füllvolumen des Sees verringert sich also um immerhin fast sieben Liter, wenn solch eine Kugel über Bord geht.

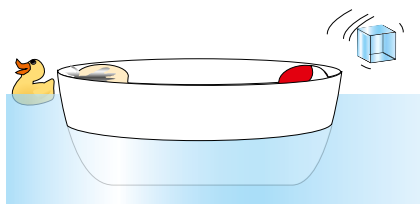
Es kommt übrigens nicht darauf an, ob die Eisenkugel sich innerhalb oder außerhalb der Wanne befindet, sondern nur, ob sie eine Kraft auf dieselbe ausübt. Nehmen wir an, einer der Herren hängt die Eisenkugel mittels einer Angel nach draußen. Damit sie nicht herunterfällt, muss er eine aufwärtsgerichtete Kraft aufwenden, die gleich dem Gewicht der Kugel ist. Dem entspricht – es herrscht wieder Kräfte-

gleichgewicht – eine gleich große abwärtsgerichtete Kraft, die der Angler mangels festen Standpunkts auf den Boden der Wanne ausübt.

Bis jetzt sind Tiefgang der Wanne und Wasserspiegel noch unverändert. Lässt der Angler die Kugel nun ins Wasser, ohne sie auf dem Seeboden abzusetzen, so verspürt er eine gewisse Erleichterung, und das Boot steigt, aber der Wasserspiegel bleibt unverändert.

DICHTE TABELLE	
Was über Bord geht	mittlere Dichte in Kilogramm pro Liter
Ente	≈ 0,1
Fichtenholz	≈ 0,5
Kochsalz	2,2
Wasser	1,0
Alkohol	0,79
Eisen, zum Beispiel Blechbadewanne	7,9
Dr. Klöbner inklusive Schwimmflügel	≈ 0,9
Olivenöl	0,91
Eis	≈ 0,9

Denn die Kugel verdrängt jetzt einen Liter Wasser im See; gleichzeitig verringert sich dank Auftrieb die Kraft, mit der sie mittels Angler das Boot abwärtszieht, um das Gewicht ebendieses Liters Wasser. Erst wenn die Kugel nicht mehr an der Angelschnur zieht, weil diese zum Beispiel durchgeschnitten oder lang genug abgerollt ist, geht es nochmals aufwärts mit dem Boot – und erstmals abwärts mit dem Wasserspiegel.



Was geschieht, wenn die Herren einen Eiswürfel über Bord werfen? Da die Dichte von Eis geringer ist als die von Wasser, verhält es sich zunächst so wie mit einer Quetscheente: Der Wasserspiegel ändert sich nicht. Und wenn er schmilzt? Immer noch nicht, obwohl der feste Würfel ein Stück aus dem Was-

ser schaut, was der geschmolzene offensichtlich nicht tut.

Die Wassermenge, die der Eiswürfel unterhalb der Wasserlinie verdrängt, hat nämlich das gleiche Gewicht wie der ganze Würfel. Dieses ändert sich nicht durch Schmelzen. Wenn also das feste Wasser flüssig wird, verliert es genau so viel Volumen, wie zuvor über die Wasseroberfläche ragt.

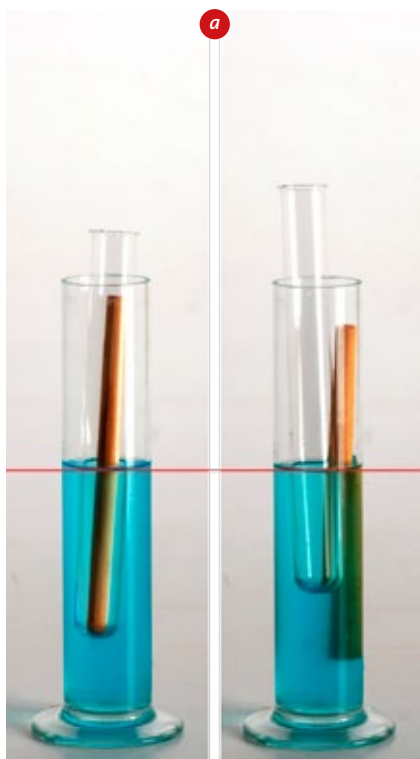
Wie war das mit dem Anstieg des Meeresspiegels, weil infolge des Klimawandels die Eisberge schmelzen? Die Eisberge, die ohnehin schon im Meer schwimmen, sind nicht das Problem, wie wir soeben gesehen haben. Aber es gibt große Mengen Eis auf dem Festland; dessen Abschmelzen ist es, das wir zu fürchten haben.

Zurück vom Weltklima zu den Herren in der Wanne! Wir haben vernachlässigt, dass das Eis die Temperatur des Sees absenkt. Durch den Kühlungseffekt zieht sich das Wasser zusammen, und der Wasserspiegel sinkt, allerdings sehr geringfügig. Dabei haben wir un-

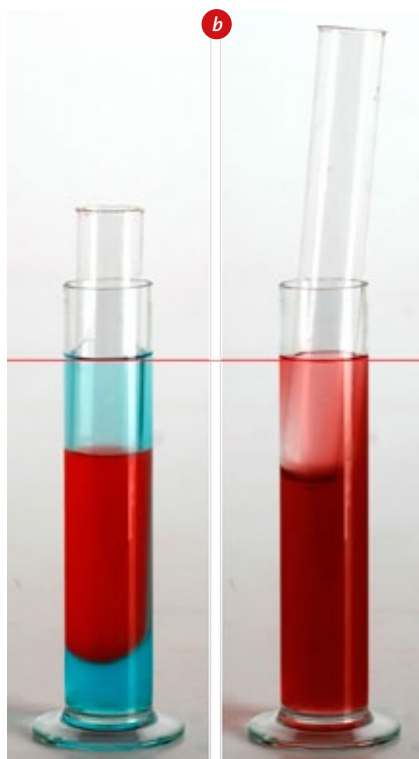
terstellt, dass die Temperatur des Sees vorher wie nachher über vier Grad Celsius liegt – was wir im Interesse von Herrn Dr. Klöbner und Herrn Müller-Lüdenscheidt hoffen wollen.

Was ändert sich, wenn man einen Eiswürfel ins Wasser wirft, der einen mit Luft und einer Eisenkugel gefüllten Hohlraum enthält? Nehmen wir an, dass er zunächst schwimmt, dass also Eis und Luft mit ihrer geringen Dichte die große Dichte des Eisens kompensieren. Solange das Eis nicht geschmolzen ist, ändert sich der Wasserspiegel nicht. Schmilzt das Eis, so entweicht die Luft, und die Eisenkugel sinkt.

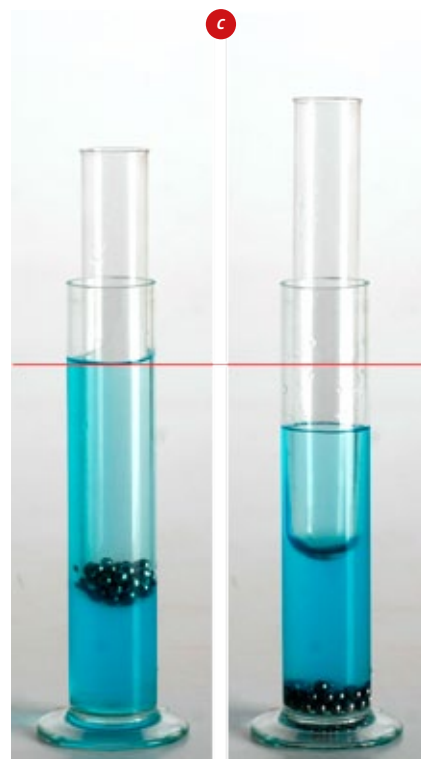
Einzeln betrachtet verdrängt das geschmolzene Eis das gleiche Volumen wie vorher, die Luft gar keins und die sinkende Kugel viel weniger als zuvor. Insgesamt sinkt der Wasserstand deutlich, und zwar umso mehr, je mehr Eisen und damit auch Luft sich im Eiswürfel befanden. Ein allein mit Luft gefüllter Eiswürfel verändert den Wasserspiegel übrigens gar nicht.



Wirft man einen (zum Beispiel hölzernen) Gegenstand, dessen Dichte geringer ist als die des Wassers, aus der Wanne (Reagenzglas) in den See (großes Becherglas), ändert sich dadurch der Wasserspiegel im See nicht. Allerdings ragt die Wanne höher aus



der Wasseroberfläche heraus als zuvor (a). Ob das (rot gefärbte) Wasser im Reagenzglas ist oder gemeinsam mit dem umgebenden (blau gefärbten) Wasser im Becherglas, macht für den Wasserspiegel im letzteren keinen Unterschied (b). Im Reagenzglas verdrän-



Das archimedische Prinzip am Beispiel der Badewanne

Wie beeinflussen die geometrischen Verhältnisse von Badewanne und See die Veränderung des Wasserspiegels? Wenn das Einwerfen eines Kilogramms Eisen den Wasserspiegel um einen Millimeter absinken lässt, sind es bei zwei Kilogramm dann zwei Millimeter? Hier führen einfache mathematische Beschreibungen rasch zum Ziel.

Bezeichnen wir mit V das Gesamtvolumen unterhalb des Wasserspiegels (See und eingetauchter Teil der Wanne). Es ergibt sich aus dem Wasservolumen V_{Wasser} plus dem eingetauchten Volumen der Wanne V_{Wanne} : $V = V_{\text{Wasser}} + V_{\text{Wanne}}$.

Werfen wir nun einen Festkörper der Masse m aus der Wanne heraus, so vermindert sich das eingetauchte Wannenvolumen nach dem Prinzip des Archimedes um das Volumen des Wassers, welches die gleiche Masse hat wie der geworfene Gegenstand, also um m/ρ_{Wasser} , wobei ρ_{Wasser} die Dichte von Wasser ist.

Nach dem Auftreffen des Wurfobjekts auf dem See zählen wir zum Volumen V_{Wasser} auch das, was der Körper zum Wasservolumen beiträgt, also $m/\rho_{\text{Körper}}$, wenn er absinkt, und m/ρ_{Wasser} (wieder archimedisches Prinzip), wenn er schwimmt. Im letzteren Fall ändert sich der Wasserspiegel überhaupt nicht. Für den abgesunkenen Körper ergibt sich

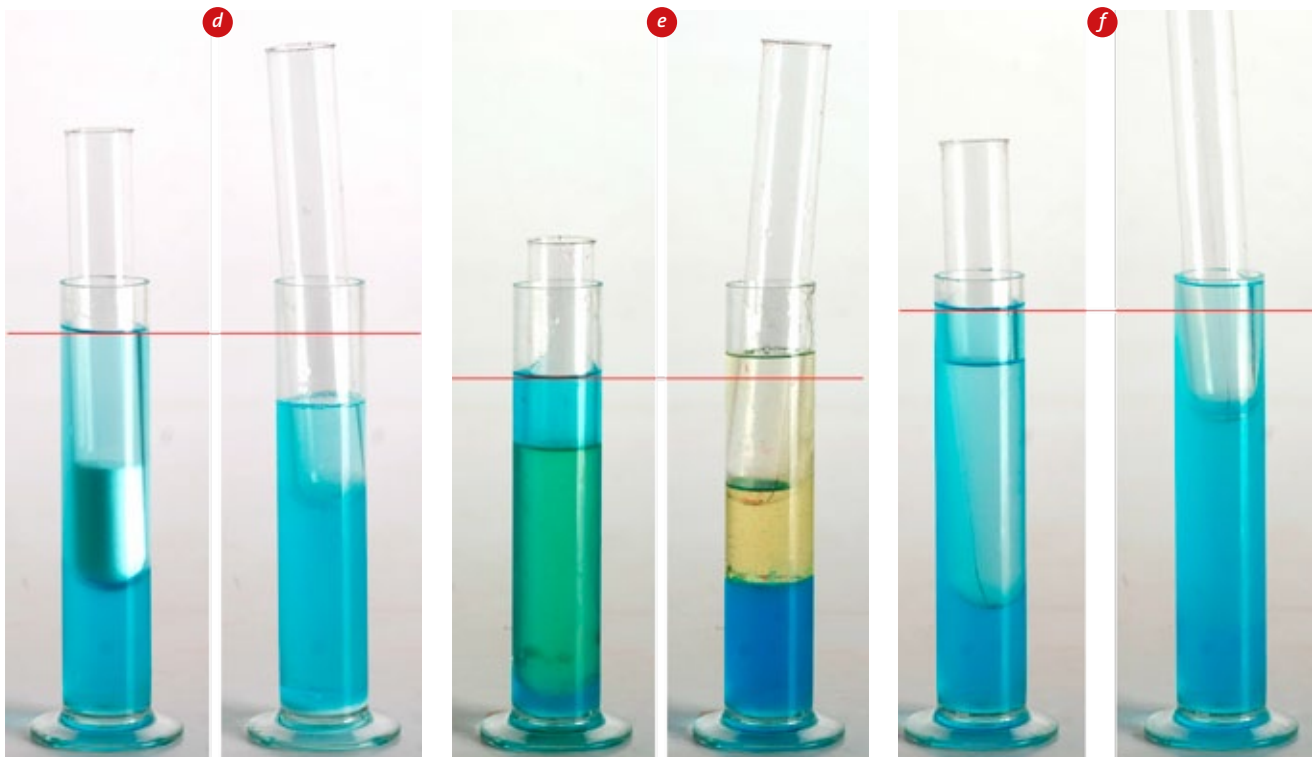
$$V = V_{\text{Wanne}} - m/\rho_{\text{Wasser}} + V_{\text{Wasser}} + m/\rho_{\text{Körper}}.$$

Was sagt uns das über die Höhe h des Wasserspiegels über Grund? Denken wir zunächst an einen See mit senkrechten Wänden (das wassergefüllte Badezimmer) und Grundfläche A . Dann gilt $V = Ah$ und damit

$$h = \frac{V_{\text{Wanne}}}{A} - \frac{m}{A\rho_{\text{Wasser}}} + \frac{V_{\text{Wasser}}}{A} + \frac{m}{A\rho_{\text{Körper}}} \\ = \frac{m}{A} \left(\frac{1}{\rho_{\text{Körper}}} - \frac{1}{\rho_{\text{Wasser}}} \right) + \frac{1}{A} (V_{\text{Wanne}} + V_{\text{Wasser}}).$$

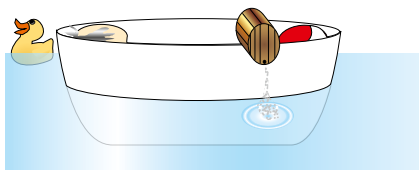
Die Änderung des Wasserspiegels ist also proportional zur eingeworfenen Masse – unabhängig von der Form der Wanne. Diese Linearität geht verloren, wenn, wie bei einem gewöhnlichen See, die Wasseroberfläche A von der Höhe h abhängig ist. Dann nämlich ist V das Integral über A von 0 bis h .

Bei einer Ein-Kilogramm-Eisenkugel würde der Wasserspiegel in einem Badezimmer mit einer Grundfläche von sieben Quadratmeter immerhin um 0,1 Millimeter absinken. Im Bodensee mit seiner Fläche von über 500 Quadratkilometern würde der Unterschied gerade noch fünf Tausendstel eines Atomdurchmessers ausmachen.



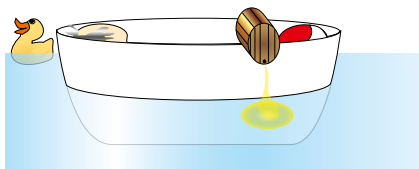
gen die Eisenkugeln so viel Wasser, wie ihrem Gewicht entspricht, im Wasser selbst nur so viel, wie ihrem Volumen entspricht; das ist deutlich weniger (e). Bei Salz an Stelle von Eisen kommt hinzu, dass die Dichte des Wassers durch den Salzgehalt zunimmt (d).

Gießen die Insassen der Wanne genügend Öl auf die Wogen, so schwimmen sie möglicherweise hinterher nur noch im Öl (e). Alkohol (farblos), aus der Wanne ins Wasser (blau gefärbt) gegossen, lässt den Wasserspiegel steigen wie bei Öl (f).



Im Gegensatz zu einer Eisenkugel löst sich Salz im Wasser. Es verdrängt dann nicht sein gesamtes Volumen, sondern etwas weniger. Damit sinkt der Wasserspiegel noch mehr als bei einem nichtlöslichen Feststoff gleicher Dichte.

Ein weiterer Effekt kommt hinzu: Da die Dichte der Flüssigkeit – jetzt eine Salzlösung – angestiegen ist, muss die Wanne weniger davon verdrängen, um ihre Gewichtskraft mit dem Auftrieb auszugleichen. Das heißt, der Wasserspiegel fällt noch zusätzlich (a).



Kippen die beiden Herren Öl über Bord, überschichtet dieses das Wasser. Damit gilt es zwei Flüssigkeitsspiegel zu beobachten, nämlich die Oberfläche des Wassers und die des Öls.

Betrachten wir zuerst die Grenzfläche zwischen Wasser und Öl. Da die Wanne nun weniger Flüssigkeit verdrängt als zuvor, taucht sie weniger tief ins Wasser ein, und der Wasserspiegel fällt. Außerdem wird ein Teil des benötigten Auftriebs durch das Öl übernommen, was zu einem weiteren Absinken des Wasserspiegels führt. Unter geeigneten geometrischen Verhältnissen schwimmt die Wanne plötzlich nur noch in Öl, und das Wasser sinkt so stark, dass es gar keinen Kontakt mehr zur Wanne hat (e).

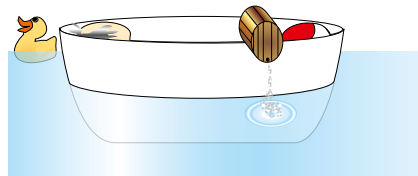
Wie aber verhält sich die ursprüngliche Wasseroberfläche zur Höhe der späteren Öloberfläche? Hier sind zwei Phasen des Prozesses zu unterscheiden: In der ersten schwimmt die Wanne mit ihrem unteren Ende noch in Wasser und oben schon in Öl, in der zweiten Phase nur noch in Öl.

Phase 2 ist relativ einfach zu verstehen: Schwimmt die Wanne vollständig in Öl und wird weiter Öl in den See ge-

gossen, so ist die Situation die gleiche, wie wenn aus der Wanne Wasser in den See voller Wasser gegossen wird. Der Flüssigkeitsspiegel ändert sich also nicht mehr. Allerdings ist er jetzt höher als zu dem Zeitpunkt, als das gesamte Öl noch an Bord war.

Vorher war in dem Gesamtvolumen unterhalb des Wasserspiegels (See plus eingetauchter Teil der Wanne) auch das vom Öl in der Wanne verdrängte Wasservolumen enthalten. Hinterher ist das Wasservolumen immer noch dasselbe. In der Wanne verdrängt aber das Öl, da es eine geringere Dichte hat als Wasser, weniger Wasservolumen, als es auf der Seeoberfläche einnimmt. Außerdem schwimmt nun die Wanne nicht mehr in Wasser, sondern in Öl. Deshalb muss sie dort mehr Flüssigkeit verdrängen (ein Kilogramm Öl hat ein Volumen von ungefähr 1,1 Liter) und taucht tiefer ein. Das heißt, der Flüssigkeitsspiegel steigt zusätzlich.

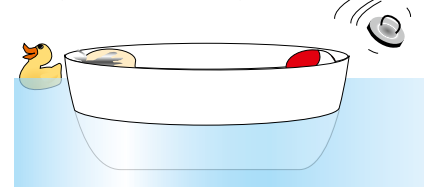
Phase 1 ist nun leicht erklärt: Vom Zeitpunkt des ersten eintröpfelnden Öls bis zu dem Punkt, an dem die Wanne vollständig in Öl schwimmt, muss der Flüssigkeitsspiegel kontinuierlich ansteigen.



Bei Alkohol ist die Angelegenheit noch verzwickter. Vorsichtig ins Wasser gekippt, überschichtet er dieses, und die Verhältnisse sind genau wie beim Öl: Der Flüssigkeitsspiegel steigt so lange, bis die Wanne vollständig in Alkohol schwimmt, und ändert sich danach nicht mehr.

Nun mischt sich aber durch Rühren oder, sehr viel langsamer, durch natürliche Diffusion der Alkohol mit dem Wasser. Dabei geschieht zweierlei. Der durch Wasser verdünnte Alkohol ist, so paradox das klingt, dichter als der reine; dadurch taucht die Wanne weniger tief ein, und der Flüssigkeitsspiegel sinkt. Zudem hat die Alkohol-Wasser-Mischung ein kleineres Volumen als die zuvor getrennten beiden Flüssigkeiten

zusammen. Das senkt den Wasserspiegel zusätzlich noch etwas. Beide Effekte zusammen können allerdings das ursprüngliche Ansteigen des Flüssigkeitsspiegels nicht aufwiegen (f).



»Herr Dr. Klöbner, ziehen Sie den Stöpsel!«

Was jetzt geschehen würde, ist inzwischen klar. Da die Wanne aus Eisen besteht, geht sie wie die Eisenkugel im Wortsinn zu Grunde. Die Herren dagegen, mit Schwimmflügeln ausgestattet, verhalten sich analog zur Ente und finden – hoffentlich – schwimmend den Weg zur Tür. Die Luft, die vorher unterhalb der Wasserlinie war, entweicht und verdrängt nun kein Volumen mehr. Damit sinkt auch hier schlussendlich der Wasserspiegel.

Aber bevor das geschieht, finden die Herren zurück zu den unsterblichen Worten Loriots: »Es gibt Wichtigeres im Leben.«

»Was denn?«

»Ehrlichkeit, Toleranz ...«

»Ja.«

»Mut, Anstand ...«

»Ja. Ja.«

»Hilfsbereitschaft ...«

»Jetzt ziehen Sie endlich den blöden Stöpsel ...« ~

DER AUTOR



Thomas Rubitzko lehrt Physik und Physikdidaktik an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg. Er hat von 1995 bis 2006 das Preisträtsel für »Spektrum der Wissenschaft« bearbeitet.

QUELLE

Epstein, L.C.: Denksport Physik. Deutscher Taschenbuch-Verlag, München 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142719

Astronomie ist unsere Passion. Schon seit 50 Jahren.



Jetzt
im Miniabo
kennen
lernen!

Fordern Sie drei aktuelle Ausgaben
von **Sterne und Weltraum** für nur
€ 15,30 (statt € 23,70 im Einzelkauf) an:*



06221 9126-743



service@spektrum.com



sterne-und-weltraum.de/miniabo

KOMPETENT: Das Magazin entsteht in
enger Kooperation mit führenden Wissen-
schaftlern des Max-Planck-Instituts

INFORMATIV: Sie erhalten tiefe
Einblicke in die aktuellsten nationalen und
internationalen Forschungsprojekte

UMFASSEND: Neben Sternkunde
bieten wir Ihnen alles über Raumfahrt,
Satelliten und Planetensonden

JETZT IM HANDEL:
Heft 4/2012 mit großem Jubiläumsgewinnspiel
und der Erstausgabe von 1962!

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



online: sterne-und-weltraum.de



E-Mail: service@spektrum.com



Tel.: 06221 9126-743



Fax: 06221 9126-751



Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

* Wenn ich innerhalb von 10 Tagen nach Erhalt des dritten Hefts nichts von mir hören lasse, erhalte ich Sterne und Weltraum zum Vorzugspreis von nur € 85,20 inkl. Inlandsversand im Jahresabonnement (12 Ausgaben). Ermäßigter Preis (auf Nachweis) für Schüler und Studenten € 64,-. Ich kann das Jahresabonnement jederzeit kündigen, zu viel gezahltes Geld erhalte ich zurück. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-743, Fax 06221 9126-751, service@spektrum.com, www.spektrum.com

Von der Mitternachtsformel zur modernen Kryptografie – 200 Jahre Évariste Galois

Die Entdeckungen dieses impulsiven jungen Mannes haben die Mathematik nachhaltig beeinflusst. Dazu zählen insbesondere jene algebraischen Strukturen, die man heute endliche Körper nennt.

Von Antoine Chambert-Loir

Die vielfach erzählte Geschichte ist so voller Herzschmerz, Liebe, Tod und unverstandenem Genie, als wäre einem mittelmäßigen Romanautor die Fantasie durchgegangen: Genialer Jüngling folgt kompromisslos seinen politischen Idealen, scheitert aber an der Staatsmacht, die ihn zu der einen Schule nicht zulässt und von der anderen wegen seiner revolutionären Gesinnung verweist. Die etablierte Wissenschaft verwirft seine revolutionären Erkenntnisse, unfähig, ihre Tragweite zu verstehen. Er verliebt sich unglücklich in ein Mädchen, stellt sich ihretwegen unter dubiosen Umständen einem Duell, wird in den Bauch geschossen und stirbt tags darauf in den Armen seines Bruders. Noch in der Nacht vor dem tödlichen Zweikampf schreibt er in fieberhafter Eile einen Brief an einen Freund, in dem er den Entwurf einer völlig neuen Theorie zu Papier bringt. Auch dieses Werk wird von der Nachwelt

zunächst verkannt und erst elf Jahre nach seinem Tod gewürdigt.

Das Erstaunliche ist: Die Geschichte ist wahr – bis auf kleine Korrekturen (Spektrum der Wissenschaft 6/1982, S. 104): Évariste Galois ist an der Aufnahmeprüfung zur École polytechnique nicht aus politischen Gründen gescheitert, sondern wegen mangelnder Vorbereitung (die ihrerseits politische Gründe gehabt haben mag). Und in jener schicksalhaften Nacht kann er schwerlich das sorgfältig ausgearbeitete Manuskript angefertigt haben, das der Nachwelt überliefert ist. Einige Korrekturen und die Randbemerkung »Ich habe keine Zeit« lassen darauf schließen, dass er in dieser Nacht das Manuskript nur überarbeitet hat.

Das tut jedoch der wissenschaftlichen Bedeutung seines Werks, das gerade einmal 60 Seiten umfasst, keinen Abbruch. Galois hat die Mathematik seiner Zeit revolutioniert, und seine Errungenschaften wirken bis heute fort. Im Folgenden will ich einige von ihnen näher vorstellen. An dieser Stelle kann ich die Themen nur mit – später zu klärenden – Fachausdrücken umreißen:

- die Lösungstheorie für polynomiale Gleichungen,
- das Rechnen mit Kongruenzen modulo einer Primzahl,
- die Theorie der endlichen Körper und
- ihre Anwendung in der Kryptografie, die so genannte asymmetrische Verschlüsselung.

Die einfachsten polynomialen Gleichungen sind ein Standardthema der Schulmathematik: die quadratischen Gleichungen. Sie haben die Form $ax^2 + bx + c = 0$. Dabei sind a , b und c Zahlen, die man als bekannt voraussetzt; die Zahl x ist die »Unbekannte« in der Gleichung. Gesucht sind Zahlen, die, für x eingesetzt, ein korrektes Ergebnis liefern. Man nennt sie die Lösungen oder auch Wurzeln der Gleichung.

AUF EINEN BLICK

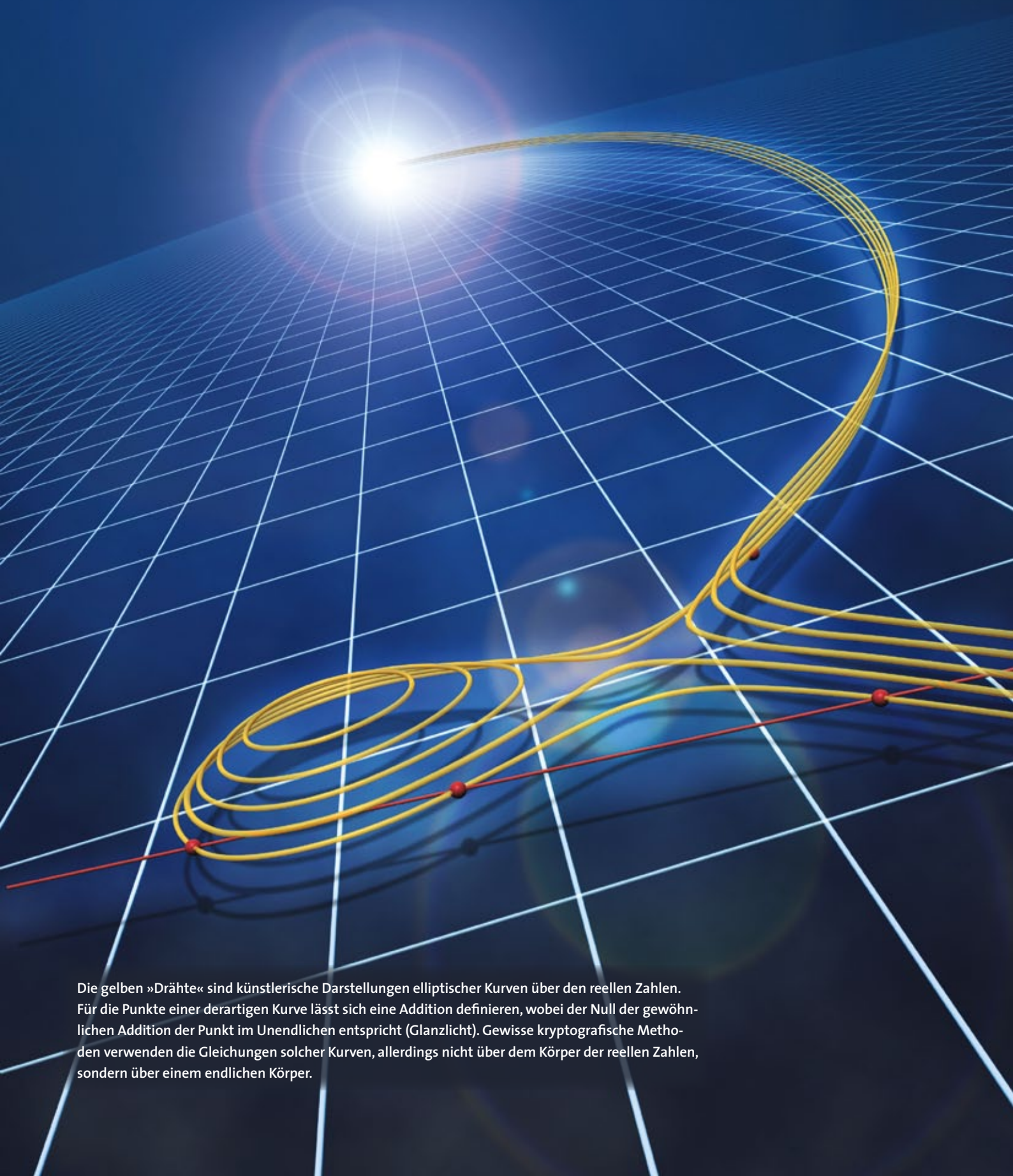
EIN GENIESTREICH UND SEINE FOLGEN

1 Évariste Galois (1811–1832) war ein genialer, zu Lebzeiten unverstandener Mathematiker. Er starb jung unter tragischen Umständen.

2 Galois entdeckte ein wichtiges Kriterium, mit dem man feststellen kann, ob eine **Polynomgleichung** durch Anwendung der Grundrechenarten und der Wurzelfunktionen lösbar ist.

3 Sein Werk steht am Anfang der **Gruppentheorie** und der **Theorie der endlichen Körper**.

4 Galois' mathematisches Erbe durchzieht zahlreiche Gebiete und hat Anwendungen beispielsweise in der **Kryptografie**.



Die gelben »Drähte« sind künstlerische Darstellungen elliptischer Kurven über den reellen Zahlen. Für die Punkte einer derartigen Kurve lässt sich eine Addition definieren, wobei der Null der gewöhnlichen Addition der Punkt im Unendlichen entspricht (Glanzlicht). Gewisse kryptografische Methoden verwenden die Gleichungen solcher Kurven, allerdings nicht über dem Körper der reellen Zahlen, sondern über einem endlichen Körper.

Évariste Galois, ein tragischer Held der Mathematik



PUBLIC DOMAIN

Évariste Galois wird am 25. Oktober 1811 in Bourg-la-Reine südlich von Paris geboren. Im Alter von 20 Jahren stirbt er am 31. März 1832 an den Folgen eines Duells, dem er »sich nicht entziehen kann«. Nach seinen eigenen Worten ging es um »eine infame Kokette und zwei von dieser Koketten Betrogene«.

Ab seinem 16. Lebensjahr wird die Mathematik neben

der Politik eine seiner Leidenschaften. Schlecht vorbereitet, fällt er bei der Aufnahmeprüfung zur École polytechnique, der angesehensten Hochschule seiner Zeit, zweimal durch. Er wird in die École préparatoire, die spätere École normale supérieure, aufgenommen, jedoch 1831 wieder von dieser verwiesen. Kurze Zeit später reicht er der Pariser Académie seine Abhandlung »Sur les conditions de résolubilité des équations par radicaux« (»Über die Bedingungen der Lösbarkeit von Gleichungen durch Wurzeln«) ein. Der Text geht zunächst in der Académie verloren und wird später von den Gutachtern Sylvestre François Lacroix (1765–1843) und Siméon Denis Poisson (1781–1840) verworfen.

Das mathematische Werk von Galois bleibt unbeachtet, bis sein Bruder Alfred und sein Freund Auguste Chevalier es Joseph Liouville (1809–1882) vorlegen. Liouville erkennt die Bedeutung der Arbeiten, stellt sie 1843 der Académie vor und veröffentlicht sie ab 1846.

Im Allgemeinen steht auf der linken Seite einer Polynomgleichung eine Summe von Termen, die aus einer bekannten Zahl mal einer Potenz von x bestehen, zum Beispiel $2x^4 + 8x^3 - 6x^2 + 7x - 5 = 0$. Der größte dabei auftretende Exponent (in diesem Beispiel 4) heißt Grad der Gleichung.

Polynomiale Gleichungen vom Grad 1 sind sehr einfach zu lösen. Ein Beispiel: In der Gleichung $3x - 5 = 0$ bringe man die Fünf auf die rechte Seite und dividiere beide Seiten der Gleichung durch 3. Schon ergibt sich die Lösung $x = 5/3$.

Für Polynomgleichungen zweiten Grades – besser bekannt als »quadratische Gleichungen« – gibt es eine Lösungsformel. Seit etwa 400 Jahren schreibt man sie in der Form

$$x = \frac{1}{2a} \left(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac} \right).$$

Eigentlich eine große kulturelle Errungenschaft, hat sie unter deutschen Schülern den wenig schmeichelhaften Namen »Mitternachtsformel«, weil man sie, aus mitternächtlichem

Tiefschlaf gerissen, auf der Stelle auswendig herbeten können soll. Im Beispiel der Gleichung $x^2 - x - 1 = 0$ liefert die Mitternachtsformel die Lösungen $x = (1 \pm \sqrt{5})/2$. Diejenige mit dem positiven Vorzeichen, also $x = (1 + \sqrt{5})/2$, ist übrigens das Verhältnis des goldenen Schnitts.

In der Zahlentheorie ist der Fall, dass die Koeffizienten a , b und c ganze Zahlen sind, von besonderem Interesse. Unter dieser Bedingung sind die Lösungen der Gleichung genau dann rationale Zahlen, wenn die so genannte Diskriminante $b^2 - 4ac$ das Quadrat einer natürlichen Zahl ist; dann und nur dann nämlich ergibt sich beim Wurzelziehen eine ganze Zahl. Ist die Diskriminante negativ, so muss man eine Wurzel aus einer negativen Zahl ziehen. Das ist unmöglich, jedenfalls innerhalb der gewohnten reellen Zahlen, denn das Quadrat einer solchen Zahl kann nie negativ sein.

Zahlen erschaffen aus dem Nichts

Aus dieser Sackgasse befreiten sich die Mathematiker auf eine sehr fachtypische Weise. Sie sagten »Es werde i «, das heißt, sie definierten eine Zahl namens i mit der Eigenschaft, dass $i^2 = -1$ ist. »Und es ward i «, aber nicht kraft göttlicher Allmacht, sondern weil dieser scheinbare Akt der Willkür weder auf einen Widerspruch noch in die totale Beliebigkeit führt – was selbstverständlich erst bewiesen werden musste. Mit dieser Wurzel aus -1 , der »imaginären Einheit« i , kann man Zahlen der Form $x + yi$ bilden, wobei x und y gewöhnliche reelle Zahlen sind: die »komplexen Zahlen« (Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 54).

Komplexe Zahlen kann man addieren: Die Summe von $x + yi$ und $x' + y'i$ ist $(x + x') + (y + y')i$. Man kann sie auch multiplizieren. Rechnet man das Produkt der beiden obigen Zahlen nach den gängigen Regeln aus, so ergibt sich $(x + yi) \cdot (x' + y'i) = xx' + (yx' + xy')i + yy'i^2 = (xx' - yy') + (yx' + xy')i$, denn $i^2 = -1$. Ein wenig weiteres Nachrechnen liefert die Gewissheit, dass die üblichen Rechenregeln auch für die Addition und die Multiplikation komplexer Zahlen gelten; die Umkehrungen dieser Operationen, also die Subtraktion und die Division, sind stets durchführbar und ergeben wieder komplexe Zahlen – ausgenommen natürlich die Division durch null.

Mittlerweile nehmen die komplexen Zahlen einen zentralen Platz in der Mathematik und zahlreichen anderen Gebieten der Naturwissenschaften ein. Das liegt nicht zuletzt daran, dass nicht nur jede quadratische, sondern allgemein jede polynomiale Gleichung in den komplexen Zahlen genau so viele Lösungen hat, wie ihr Grad angibt. Dabei schadet es nicht, wenn die Koeffizienten der Gleichung $-a$, b , c und so weiter – selbst komplexe Zahlen sind; es ist aber auch nicht erforderlich. Es gibt Gleichungen mit reellen Koeffizienten, die nur komplexe Lösungen haben, zum Beispiel $x^2 + 1 = 0$.

Nun ist es zwar schön zu wissen, dass es diese Lösungen gibt; aber damit kann man sie noch nicht ausrechnen. Die Mitternachtsformel ist auch im Komplexen anwendbar; aber wie steht es mit den Gleichungen höheren Grades?

Im 16. Jahrhundert fanden die Italiener Geronimo Cardano (1501–1576), Nicolo Tartaglia (1500–1557) und Lodovico

Gruppen und Körper

Eine Gruppe ist eine Menge, auf der eine Verknüpfung mit gewissen Eigenschaften definiert ist. Das heißt: Zu je zwei Elementen a und b einer Gruppe gibt es genau ein Element der Gruppe, das man je nach Kontext als

- ab (Produkt von a und b),
- $a+b$ (Summe von a und b) oder auch
- $a \circ b$ (Komposition oder Hintereinanderausführung von a und b)

bezeichnet. Für diese Verknüpfung (im Folgenden als $\circ$ geschrieben) gelten folgende Regeln (die Gruppenaxiome):

- $(a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c)$ (Assoziativität);
- Die Gruppe enthält ein neutrales Element e mit der Eigenschaft $a \circ e = e \circ a = a$ für alle Gruppenelemente a . Statt e schreibt man im Allgemeinen 1, wenn die Gruppenverknüpfung als Multiplikation dargestellt wird, und 0 bei additiv geschriebenen Gruppen.
- Zu jedem Gruppenelement a gibt es ein inverses Element, das als a^{-1} (in der additiven Schreibweise: $-a$) bezeichnet wird, mit der Eigenschaft $a \circ a^{-1} = a^{-1} \circ a = e$.

Klassische Beispiele für Gruppen sind die Menge der ganzen Zahlen mit der Addition als Verknüpfung, die Menge der rationalen Zahlen ungleich null mit der Multiplikation als Verknüpfung und die Menge aller Permutationen der Zahlen von 1 bis n . Hier ist $a \circ b$ die Permutation, die sich ergibt, wenn man zuerst b , dann a anwendet.

Ein Körper ist eine (additiv geschriebene) Gruppe mit der Eigenschaft, dass alle seine Elemente außer der Null auch eine (multiplikativ geschriebene) Gruppe bilden. Dabei stehen Addition und Multiplikation durch die Regel

- $(a+b) \cdot c = a \cdot c + b \cdot c$ (Distributivität der Multiplikation bezüglich der Addition)

in Beziehung. Zusätzlich soll sowohl für die Addition als auch für die Multiplikation

- $a+b=b+a$ beziehungsweise $ab=ba$ (Kommutativität) gelten. Klassische Beispiele für Körper sind die Menge der rationalen, der reellen und der komplexen Zahlen. Die Quaternionen und die Oktonionen (Spektrum der Wissenschaft 10/2011, S. 54) bilden keine Körper, weil sie einige der Axiome nicht erfüllen.

Die Subtraktion und die Division muss man nicht eigens definieren: $a-b$ ist eine Kurzschreibweise für $a+(-b)$ (verknüpfe a mit dem Inversen von b). Entsprechend ist $a/b = ab^{-1}$.

Ein Körper muss nicht unendlich viele Elemente haben. Es müssen allerdings mindestens zwei sein, nämlich die beiden neutralen Elemente. Das genügt auch:

Die Menge $\{0, 1\}$ wird mit Hilfe der nebenstehenden Tabelle zu einem Körper. Hierbei ist die Gleichung $1+1=0$ die einzige, die nicht unmittelbar durch die Axiome vorgeschrieben ist.

+	0	1
0	0	1
1	1	0

·	0	1
0	0	0
1	0	1

Allgemein könnte man auf die Idee

kommen, für eine beliebige natürliche Zahl $n \geq 2$ die Menge $\{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ zu einem Körper zu machen, indem man festlegt, dass die Summe zweier Elemente gleich dem Rest ist, den die gewöhnliche Summe der beiden Zahlen bei Division durch n lässt, ebenso für das Produkt. Das ergibt jedoch im Allgemeinen nur eine Struktur minderer Qualität, einen so genannten Ring. Es existiert nämlich nicht zu jedem Element ungleich null ein Inverses bezüglich der Multiplikation.

Nur wenn n eine Primzahl ist, wird die Menge $\{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ zu einem Körper. Derartige Strukturen hat Carl Friedrich Gauß im Detail in seinen »Disquisitiones arithmeticae« von 1798 (gedruckt 1801) studiert.

Ferrari (1522–1565) Lösungsformeln für Gleichungen dritten und vierten Grades. Allerdings wäre es aussichtslos, deren mitternächtliches Rezitieren einzufordern: Sie enthalten nicht nur – unvermeidlich – dritte beziehungsweise vierte Wurzeln, sondern sind auch überaus kompliziert.

Mehr geht nicht. Für Gleichungen höheren Grades gibt es zwar Lösungsformeln in Spezialfällen; so ist es nicht schwer, zu der Gleichung $x^5 - a = 0$ die Lösung $x = \sqrt[5]{a}$ anzugeben. Aber es kann keine allgemeine Formel nach dem Vorbild der Mitternachtsformel geben.

Für die Gleichungen fünften Grades entdeckte das im 19. Jahrhundert der norwegische Mathematiker Niels Henrik Abel (1802–1829). Eine der größten Leistungen von Galois besteht in der Erklärung, warum dem so ist.

Zu diesem Zweck griff Galois auf die Tatsache zurück, dass man über die »Wurzeln«, das heißt die Lösungen, einer Gleichung gewisse algebraische Aussagen machen kann, ohne die Wurzeln selbst zu kennen. Die einfachsten Aussagen die-

ser Art lernen die Schüler im Gefolge der Mitternachtsformel. Bezeichnen wir die beiden Lösungen der quadratischen Gleichung $x^2 + px + q = 0$ mit x_1 und x_2 . Nach dem Wurzelsatz von Vieta (François Viète, 1540–1603) gilt dann $x_1 + x_2 = -p$ und $x_1 x_2 = q$. Diese algebraischen Beziehungen ändern sich nicht, wenn man x_1 und x_2 vertauscht. Ähnliche Wurzelsätze gibt es auch für Gleichungen höheren Grades.

Wenn über solche stets gültigen Sätze hinaus gewisse Wurzeln einer Gleichung eine besondere Beziehung zueinander haben, genauer gesagt: wenn zwischen ihnen eine algebraische Gleichung mit rationalen Koeffizienten gilt, dann könnte man diese Beziehung nutzen, um zumindest für diese speziellen Wurzeln eine explizite Lösungsformel anzugeben. Genau dann aber könnte man, wie sich herausstellt, nicht beliebige andere Wurzeln derselben Gleichung an die Stelle der speziellen Wurzeln setzen. Es wären also nicht beliebige Vertauschungen (»Permutationen«) der Wurzeln untereinander zulässig.

Auf diese Weise führte Galois die Frage nach der Auflösbarkeit einer Gleichung auf die Zulässigkeit von Permutationen der Wurzeln zurück. Alle denkbaren Permutationen bilden eine Gruppe; das ist eine mathematische Struktur, in der man je zwei Elemente derart miteinander verknüpfen kann, dass wieder ein Gruppenelement entsteht (Kasten S. 55).

Nicht nur die Menge aller Permutationen von – zum Beispiel – fünf Elementen ist eine Gruppe, sondern auch die Menge der im oben genannten Sinn zulässigen Permutationen; man nennt sie heute die Galois-Gruppe der Gleichung. Die Gruppentheorie, die Galois aus Anlass dieser Fragestel-

lung in den Grundzügen entwickelte, gestattet nun eine Fülle allgemeiner Aussagen über Gruppen von Permutationen. So konnte Galois beweisen, dass man die Lösungen einer Gleichung dann und nur dann mit Hilfe einer expliziten Formel berechnen kann, wenn die Galois-Gruppe der Gleichung eine bestimmte Eigenschaft namens »Auflösbarkeit« hat.

Die Gruppe aller Permutationen von fünf Elementen ist nicht auflösbar. Galois musste schließlich nur noch zeigen, dass es eine Gleichung fünften Grades gibt, deren Galois-Gruppe tatsächlich alle Permutationen enthält. Das gelang ihm, ohne dass er die Wurzeln der Gleichung kennen musste. In der Tat ist die Nichtauflösbarkeit unter den Gleichungen fünften Grades der Regelfall und die Auflösbarkeit die Ausnahme.

Potenzen schnell berechnen

Um die Potenz x^a zu berechnen, muss man eigentlich nur a -mal x mit sich selbst multiplizieren. Wenn aber a eine 600-stellige Binärzahl ist, wie in der Kryptografie üblich, würde der Zeitaufwand dafür das Alter des Universums weit übersteigen.

Es gibt jedoch eine Abkürzung. Sie beruht auf der Binärdarstellung der natürlichen Zahl a und der Tatsache, dass $x^a = (x^2)^{a/2}$ ist, falls a gerade ist, und dass $x^a = x(x^2)^{(a-1)/2}$ ist für ungerades a . Beispielsweise gilt $x^{19} = x(x^2)^9$, wobei sich x^{16} durch viermaliges Quadrieren berechnen lässt: $x^{16} = (((x^2)^2)^2)^2$. So erhält man eine rekursive Berechnungsmethode, die statt 2^{600} nur etwa $2 \cdot 600$ Multiplikationen erfordert.

Von den Kongruenzen zu den endlichen Körpern

Eine andere bedeutende Entdeckung Galois' sind die endlichen Körper, die im Englischen auch »Galois fields« (Galois-Körper) heißen. Sie sind Thema der kurzen Abhandlung »Sur la théorie des nombres« (»Zur Zahlentheorie«) aus dem Jahr 1830. In modernen Begriffen ausgedrückt, stellte sich Galois hier die Aufgabe, die Theorie der Polynomgleichungen und das Rechnen mit den Resten bei der Division durch eine natürliche Zahl n miteinander in Beziehung zu setzen. Für Letzteres ist der Fachausdruck »Kongruenz modulo n « gebräuchlich. Was bedeutet das?

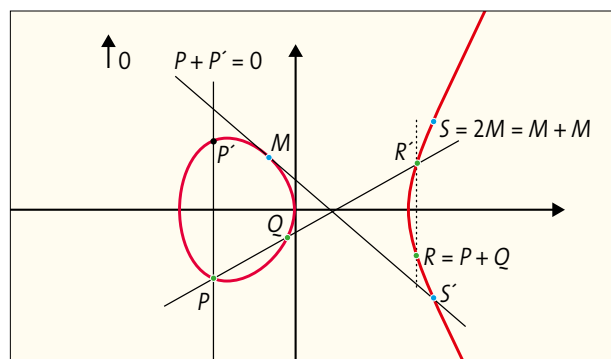
Im chinesischen »Sun Tzu Suan Ching« (Arithmetisches Handbuch von Meister Sun), das auf ungefähr das 5. Jahr-

Addition auf einer elliptischen Kurve

Elliptische Kurven sind keine Ellipsen. Sie tragen ihren Namen, weil ihre Gleichungen bei der Berechnung der Bogenlänge von Ellipsen eine Rolle spielen. Eine elliptische Kurve wird definiert durch eine kubische Gleichung der Form $y^2 = x^3 + ux + v$. Dabei sind u und v reelle Zahlen mit der Eigenschaft, dass $4u^3 + 27v^2$ ungleich null ist (anderenfalls hätte die Kurve einen singulären Punkt).

Bemerkenswerterweise kann man für die Punkte einer elliptischen Kurve E eine Addition erklären. Die Summe zweier Kurvenpunkte P und Q wird folgendermaßen definiert: Die Gerade durch die Punkte P und Q trifft die Kurve stets in einem dritten Punkt; nennen wir ihn R' . Dann ist der Punkt $R = P + Q$ das Spiegelbild von R' bezüglich der x -Achse, die zugleich die horizontale Symmetrieachse der Kurve ist. Verläuft die Gerade durch P und Q vertikal, so betrachtet man R als unendlich; der unendlich ferne Punkt wird als die Null der Addition definiert. Fällt P mit Q zusammen, so definiert die Tangente an die Kurve im Punkt P den Punkt $R = P + P = 2P$. Insbesondere ist die Summe dreier Punkte P, Q und R genau dann gleich null, wenn diese drei Punkte auf einer Geraden liegen.

Versehen mit dieser Addition bilden die Punkte der elliptischen Kurve eine additive Gruppe (Kasten S. 55).



Man kann eine elliptische Kurve auch über einem anderen Körper als dem der reellen Zahlen betrachten (Bild S. 57 oben, unteres Teilbild), zum Beispiel einem endlichen Körper F . In diesem Fall sind die Parameter u und v Elemente von F ; die elliptische Kurve besteht aus allen Lösungen (x, y) der Gleichung $y^2 = x^3 + ux + v$, betrachtet über dem Körper F , plus der Null.

Elliptische Kurven spielen eine zentrale Rolle in dem Beweis von Andrew Wiles für den »großen Satz von Fermat«: Die Gleichung $a^n + b^n = c^n$ hat für $n > 2$ keine Lösung mit natürlichen Zahlen a, b und c (Spektrum der Wissenschaft 8/1993, S. 14).

hundert datiert wird, findet sich folgende Aufgabe: »Wir haben eine unbekannte Zahl von Dingen. Zählen wir diese zu dreien ab, so bleiben zwei übrig, zählen wir sie zu je fünfen, so ergibt sich als Rest drei, zählen wir sie zu je sieben, bleibt ein Rest von zwei. Finde die Anzahl der Dinge.«

Nennen wir die unbekannte Anzahl x , so besagt der zentrale Satz der Aufgabenstellung dreierlei: x ist die Summe aus 2 und einem (unbestimmten) Vielfachen von 3; x ist gleich 3 plus ein Vielfaches von 5 und gleich 2 plus ein Vielfaches von 7. Diese Gleichheit bis auf Vielfache einer gewissen natürlichen Zahl nennt man Kongruenz. Man sagt, dass x kongruent 2 modulo 3, kongruent 3 modulo 5 und kongruent 2 modulo 7 ist, und schreibt das in der Form $x \equiv 2 \pmod{3}$, $x \equiv 3 \pmod{5}$, $x \equiv 2 \pmod{7}$. Die natürlichen Zahlen 3, 5 und 7 heißen Module dieser Kongruenzen.

Das »Sun Tzu Suan Ching« gibt zur Aufgabe auch ein Lösungsverfahren. Der zugehörige mathematische Satz heißt heute »chinesischer Restsatz«. Man addiere $2 \cdot 70$, $3 \cdot 21$ und $2 \cdot 15$ (das macht $140 + 63 + 30 = 233$) und ziehe davon so oft 105 ab, bis das Ergebnis kleiner als 105 ist. Woher kommen diese merkwürdigen Faktoren? 70 ist ein gemeinsames Vielfaches von 5 und 7 und obendrein kongruent 1 modulo 3 (denn $70 = 23 \cdot 3 + 1$). 21 ist ein Vielfaches von 3 und 7, das kongruent 1 modulo 5 ist ($21 = 4 \cdot 5 + 1$), und 15 ist ein Vielfaches von 3 und 5, das kongruent 1 modulo 7 ist. Außerdem ist $105 = 3 \cdot 5 \cdot 7$. Also findet man in unserem Beispiel, dass x kongruent 23 modulo 105 ist. Damit sind die drei einzelnen Kongruenzen modulo der Primzahlen 3, 5 und 7 zu einer einzigen zusammengefasst, deren Modul 105 gleich dem Produkt der einzelnen Module 3, 5 und 7 ist.

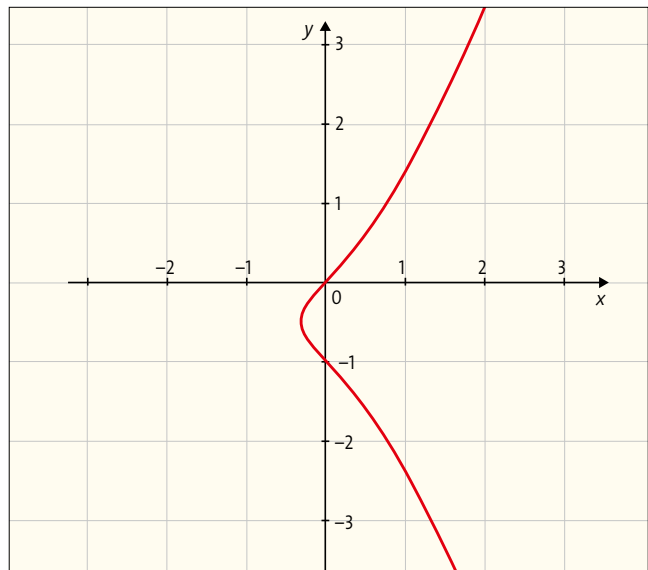
Es stellt sich heraus, dass man beim Rechnen mit Kongruenzen die unbestimmten Vielfachen des Moduls komplett vernachlässigen kann. Bei Bedarf setzt man sie einfach gleich null. So gilt modulo 13 beispielsweise $6 \equiv -7$, weil $6 - (-7) = 13 \equiv 0 \pmod{13}$ ist, und $5 \cdot 7 = 35 \equiv 3 \cdot 13 - 4 \equiv -4$.

Man kann auch Gleichungen mit Kongruenzen lösen. Ein Beispiel: $3x - 5 \equiv 0 \pmod{7}$. Multipliziert man beide Seiten mit 2, so erhält man $6x - 10 \equiv 0 \pmod{7}$. Da aber $6 \equiv -1 \pmod{7}$ und $-10 \equiv -14 + 4 \equiv 4 \pmod{7}$ ist, ergibt sich $-x + 4 \equiv 0 \pmod{7}$ und daraus $x \equiv 4 \pmod{7}$. Die Probe bestätigt das Ergebnis: Aus $x \equiv 4$ folgt $3x \equiv 12 \equiv 5 \pmod{7}$.

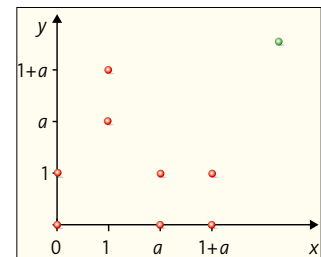
Es sind allerdings gewisse Feinheiten zu beachten. So sind 2 und 3 nicht kongruent 0 modulo 6, wohl aber ihr Produkt. Das Produkt zweier Zahlen kann (bezüglich eines bestimmten Moduls) kongruent zu null sein, ohne dass einer der beiden Faktoren es ist.

Damit bricht ein wesentlicher Teil der Struktur zusammen. Wenn $2 \cdot 3 \equiv 0$ ist – wie soll man dann noch dividieren können? Null geteilt durch 3 gleich 2? Das führt auf der Stelle auf hoffnungslose Widersprüche. Ein Produkt ist genau dann null, wenn einer seiner Faktoren null ist; an dieser elementaren Tatsache hängt die Existenz der Division.

Nur dann, wenn der Modul eine Primzahl ist – und genau dann –, können die fatalen »Nullteiler« nicht vorkommen. Aus diesem Grund sind die Kongruenzen modulo einer Prim-

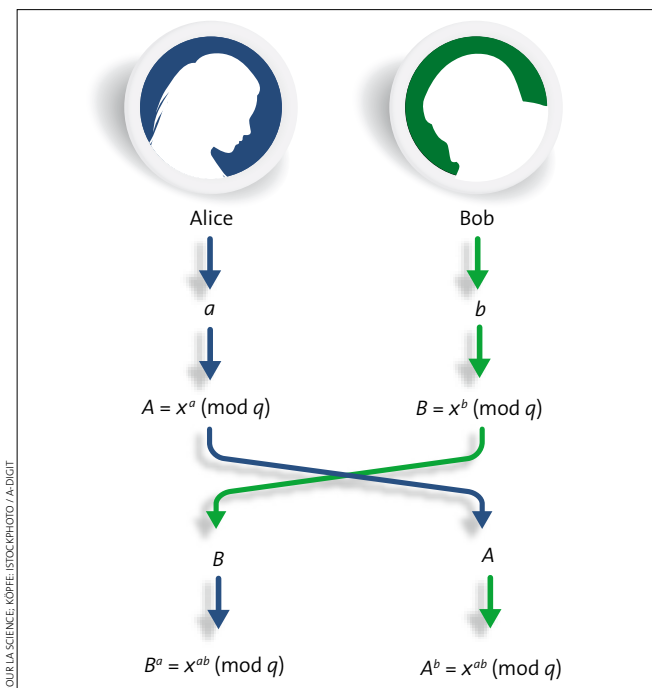


Die Gleichung einer ebenen Kurve hat die Form $f(x, y) = 0$. So ist die Gleichung der oben gezeigten elliptischen Kurve $y + y^2 = x^3 + x^2 + x$. Eine derartige Gleichung lässt sich nicht nur über dem Körper der reellen Zahlen, sondern auch über einem endlichen Körper betrachten. Ein Beispiel hierfür ist der Körper mit $4 = 2^2$ Elementen ($p = 2, d = 2$), dessen Elemente die Polynome $0, 1, a$ und $1 + a$ sind (wobei $1 + 1 = 0$ und $a^2 = a + 1$ gilt). Die entsprechende elliptische Kurve besteht aus acht Punkten (untere Grafik), zu denen noch der unendlich ferne Punkt als Nullelement hinzukommt (grün).



zahl die fundamentalsten in der Mathematik. Die Menge $\{0, 1, 2, \dots, n-1\}$ der Reste modulo einer Primzahl n ist ein Körper – das heißt, man kann in ihm die Grundrechenarten mit denselben Rechenregeln anwenden wie in den gewöhnlichen (rationalen oder reellen) Zahlen (Kasten S. 55). Nur das Ergebnis einer solchen Rechnung ist im Allgemeinen anders.

Insbesondere kann man in einem solchen Körper auch Polynomgleichungen lösen. Nehmen wir als Beispiel die Gleichung des goldenen Schnitts $x^2 - x - 1 = 0$ modulo 7 oder modulo 11. In der klassischen Algebra würden wir $x^2 - x$ zu dem vollständigen Quadrat $x^2 - x + 1/4 = (x - 1/2)^2$ ergänzen, danach alles, was an konstanten Termen übrig bleibt, auf die rechte Seite der Gleichung schaffen und auf beiden Seiten der Gleichung die Wurzel ziehen. (Dies ist die Vorgehensweise, die hinter der Mitternachtsformel steckt.) Aber Dividieren geht modulo 7 anders als gewohnt: $1/2 = 4$ und $1/4 = 2$, denn $4 \cdot 2 = 8 \equiv 1 \pmod{7}$. Deswegen schreiben wir $0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 8x - 1 \equiv (x - 4)^2 - 17 \equiv (x - 4)^2 - 3 \pmod{7}$. Jetzt müsste man die Wurzel aus 3 ziehen, das heißt, eine ganze Zahl zwischen 0 und 6 finden, deren Quadrat $\equiv 3 \pmod{7}$ ist. Probieren wir's durch: $0^2 = 0$, $1^2 = 1$, $2^2 = 4$, $3^2 = 9 \equiv 2$, $4^2 \equiv (-3)^2 = 2$, $5^2 \equiv (-2)^2 = 4$



Das Austauschprinzip ermöglicht es den beiden Partnern Alice und Bob, sich ein gemeinsames Geheimnis, nämlich $x^{ab} \pmod{q}$, zuzulegen. Selbst ein Lauscher, der die öffentlichen Daten x und q sowie die zwischen beiden übermittelten Nachrichten x^a und x^b kennt, kann das Geheimnis nicht erschließen. Dabei ist q die Anzahl der Elemente eines endlichen Körpers und x eine primitive Wurzel dieses Körpers.

Unbekannte, sondern als eine Lösung der Gleichung $F(x) \equiv 0 \pmod{p}$. Diese neue Zahl fügen wir unserem Primzahlkörper hinzu. Damit man in dem so erweiterten Körper uneingeschränkt rechnen kann, muss man dann auch gleich sämtliche Zahlen der Form $a_0 + a_1x + \dots + a_{d-1}x^{d-1}$ hinzufügen. Jeder der Koeffizienten $a_0, a_1, \dots, a_{d-1}$ ist aus dem Primzahlkörper, also eine natürliche Zahl zwischen 0 und $p-1$. Das macht p^d verschiedene Zahlen, die Elemente des ursprünglichen Körpers eingeschlossen.

Diese Zahlen lassen sich addieren und subtrahieren: Man fasse eine Summe beziehungsweise Differenz zweier Zahlen der Form $a_0 + a_1x + \dots + a_{d-1}x^{d-1}$ nach Potenzen von x zusammen; zu einem sich so ergebenden neuen Koeffizienten muss man möglicherweise noch ein Vielfaches von p addieren, damit er wieder in den Bereich von 0 bis $p-1$ gerät. Überraschender ist es vielleicht, dass man die neuen Objekte auch multiplizieren kann. Das Produkt zweier Zahlen der Form $a_0 + a_1x + \dots + a_{d-1}x^{d-1}$ enthält zwar auch Potenzen von x , deren Exponent größer als $d-1$ ist. Aber indem wir die definierende Gleichung $F(x) \equiv 0 \pmod{p}$ einsetzen, können wir x^d durch eine zulässige Zahl ersetzen, ebenso x^{d+1} und so weiter.

Ist zum Beispiel $F(x) = x^3 + 2x - 1 \equiv 0 \pmod{5}$ die definierende Gleichung, so folgt $x^3 \equiv -2x + 1 \equiv 3x + 1 \pmod{5}$. Also ersetzen wir x^3 überall, wo es vorkommt, durch $3x + 1$. Insbesondere ergibt sich daraus $x^4 \equiv 3x^2 + x \pmod{5}$, $x^5 \equiv 3x^3 + x^2 \equiv 3(3x + 1) + x^2 \equiv x^2 + 9x + 3 \equiv x^2 + 4x + 3 \pmod{5}$, und so weiter. Schließlich kann man auch durch jede Zahl ungleich null dividieren. Hier geht die Bedingung ein, dass F irreduzibel ist.

und $6^2 \equiv (-1)^2 \equiv 1$. Es stellt sich heraus: Modulo 7 gibt es keine Wurzel aus 3 und damit keine Lösung für unsere Gleichung.

Modulo 11 schreibt man entsprechend: $0 = x^2 - x - 1 \equiv x^2 - 12x - 1 \equiv (x - 6)^2 - 37 \equiv (x - 6)^2 - 4 \pmod{11}$. Folglich muss gelten: $(x - 6)^2 \equiv 4 \equiv 2^2$. Hieraus schließt man (wie gewohnt), dass $x - 6 = \pm 2$ sein muss. Also findet man modulo 11 die beiden Lösungen $x = 4$ und $x = 8$.

Polynomiale Gleichungen und Kongruenzen

Wo eine Wurzel nicht existiert – wie die Wurzel aus 3 modulo 7 –, da erschafft der Mathematiker sich eine; das hat ja schon mit der Wurzel aus -1 hervorragend funktioniert. Galois machte sich zur Aufgabe, derartige Zahlen – die er wieder imaginär nannte – zu finden, während seine Vorgänger sich mit der Nichtexistenz gewisser Wurzeln begnügt hatten.

In den Fußstapfen von Galois betrachten wir ein beliebiges Polynom $F(x)$ vom Grad d mit ganzzahligen Koeffizienten. Dabei sollen alle Rechnungen im Körper der Zahlen modulo einer Primzahl p stattfinden. Der Koeffizient des höchsten Glieds x^d soll nicht null modulo p sein – sonst wäre das Polynom in Wirklichkeit vom Grad $d-1$ oder weniger. Zudem soll das Polynom »irreduzibel« sein, das heißt nicht zerlegbar in Faktoren niedrigeren Grades, ähnlich wie eine Primzahl nicht in kleinere Faktoren zerlegbar ist – sonst würde es genügen, diese Faktoren zu betrachten. Diese Bedingung schließt etwa das Polynom $F(x) = x^2 + 1$ modulo 13 aus, denn $x^2 + 1 \equiv (x - 5)(x - 8) \pmod{13}$. Dagegen ist $F(x) = x^2 + 1$ irreduzibel modulo $p = 11$, ebenso $F(x) = x^2 - 2$ modulo $p = 13$ und $F(x) = x^2 - x - 1$ modulo $p = 7$.

Das Symbol i wurde eingeführt, um eine der Wurzeln der Gleichung $x^2 + 1 = 0$ zu bezeichnen. Mit diesem ließ sich dann in ganz natürlicher Weise rechnen. Genauso geht es auch hier: Wir behandeln den Buchstaben x nicht mehr als eine



Im Ergebnis erhält man einen Körper (Kasten S. 55) mit endlich vielen, nämlich p^d Elementen. In seiner Abhandlung erläutert Galois anschließend einige Eigenschaften dieser endlichen Körper. Zuerst zeigt er, dass für jedes Element a eines endlichen Körpers mit p^d Elementen die Gleichung $a^{(p^d)} \equiv a$ gilt. Damit verallgemeinert er den »kleinen Satz von Fermat«, der für jede natürliche Zahl a und jede Primzahl p die Aussage $a^p \equiv a \pmod{p}$ macht. Weiter zeigt Galois, dass die Gleichung $a^{(p^d)} = a$ eine primitive Wurzel besitzt. Anders ausgedrückt, es gibt ein Element a mit der Eigenschaft, dass die Folge $0, 1, a, a^2, \dots, a^{(p^d-2)}$ exakt alle Elemente des Körpers durchläuft.

Will man nach der Methode von Galois einen endlichen Körper mit genau p^d Elementen konstruieren, so muss man von einem modulo p irreduziblen Polynom $F(x)$ vom Grad d ausgehen. Galois bewies, dass jedes derartige Polynom ein Faktor des Polynoms $x^{(p^d)} - x$ ist. Wenig später zeigte der französische Mathematiker und Astronom Joseph Serret (1819–1885), dass man einen derartigen Faktor immer finden kann. Also existiert zu jeder Potenz p^d einer Primzahl p ein endlicher Körper mit p^d Elementen. Dieser ist sogar eindeutig bis auf Isomorphie. Das heißt: Zwischen je zwei endlichen Körpern mit gleich vielen Elementen (die man beispielsweise erhält, indem man die Konstruktion von Galois für zwei Polynome F_1 und F_2 durchführt) existiert eine umkehrbar eindeutige Zuordnung, die mit den Rechenregeln kompatibel ist.

Von den endlichen Körpern zur Kryptografie

In den folgenden Jahrzehnten vervollständigten mehrere Mathematiker die Arbeiten von Galois; insbesondere formalisierten sie den Begriff des Körpers im modernen Sinn (Kasten S. 55). Im Nachlass von Carl Friedrich Gauß (1777–1855) fand sich ein unveröffentlichtes achtes Kapitel für seine »Disquisitiones arithmeticae« von 1797 und darin eine Theorie, die der von Galois gefundenen sehr ähnlich ist. Erst 1863 machte Richard Dedekind (1831–1916) den Text der Öffentlichkeit zugänglich.

Heute ist die Theorie der endlichen Körper ein wichtiges Werkzeug der Mathematik. Sie spielt selbst in scheinbar entlegenen Gebieten eine Rolle wie etwa in der Theorie der automorphen Funktionen und dem Langlands-Programm, einem größeren Ensemble von Vermutungen, die Algebra, Funktionen- und Zahlentheorie verknüpfen (Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 98).

Endliche Körper finden sich auch im Kern der modernen Telekommunikation und des Internets, insbesondere bei allem, was mit der Sicherheit des Onlinehandels zu tun hat. Kauft man im Internet ein Buch, eine CD oder einen Fotoapparat, so kommt unweigerlich das Formular, in das man zum Zahlen die Geheimnummer seiner Bank- oder Kreditkarte eingeben muss. Selbstverständlich will der Käufer sicher sein, dass kein Unbefugter Kenntnis von dieser Nummer erlangt – was dieser ja zu seinem Vorteil verwenden könnte. Das ist ein klassisches Problem der Kryptografie: eine Nachricht so zu übermitteln, dass nur der legitime Empfänger sie lesen kann.

Alle bis 1975 bekannten kryptografischen Verfahren, von der historischen Chiffre des Julius Cäsar bis zum heute noch verwendeten Data Encryption Standard (DES), sind symmetrisch: Sender und Empfänger einigen sich auf einen geheimen Code, der sowohl zum Verschlüsseln als auch zum Entschlüsseln einer Nachricht verwendet wird. Ein derartiges Vorgehen ist für den Onlinehandel ungeeignet, weil eine Internetseite mangels materiellen Kontakts mit dem potenziellen Kunden keine Gelegenheit hat, einen geheimen Code mit ihm zu vereinbaren. 1976 schlugen die Amerikaner Whitfield Diffie, Martin Hellman und Ralph Merkle jedoch eine neuartige Vorgehensweise vor, die heute als asymmetrische Kryptografie bezeichnet wird (Spektrum der Wissenschaft 10/1979, S. 92).

Bei diesem Schema gibt es zwei Schlüssel: einen, den der potenzielle Empfänger geheimer Nachrichten veröffentlicht, und einen, den er geheim hält. Jeder beliebige Absender kann seine Nachricht mit dem öffentlichen Schlüssel verschlüsseln, und nur der Empfänger kann sie wieder lesbar machen.

Wie können sich Alice (links) und Bob (rechts) über eine unsichere Verbindung, die ein Bösewicht (Mitte) permanent abhört, ein gemeinsames Geheimnis zulegen?



1978 erfanden Ronald Rivest, Adi Shamir und Leonard Adleman am MIT eine Realisierung dieses Prinzips. Das Verfahren wird seither nach den Anfangsbuchstaben der drei Namen als RSA-Protokoll bezeichnet und heute breit verwendet, unter anderem auch in Spielkonsolen.

Mathematisch gesehen ist Verschlüsseln die Anwendung einer umkehrbar eindeutigen Abbildung (Funktion) von der Menge aller denkbaren Zeichenketten – einer festgelegten Länge – auf sich selbst. Entschlüsseln ist die Anwendung der Umkehrfunktion. Diese ist durch die Funktion eindeutig bestimmt und demnach aus ihr berechenbar – im Prinzip. Damit aber ein asymmetrisches Protokoll überhaupt seinen Zweck erfüllt, muss die Verschlüsselungsfunktion einfach anwendbar sein, die Ermittlung der Umkehrfunktion dagegen so mühsam, dass alle Computer und alle Zeit der Welt dafür nicht ausreichen – es sei denn, man verfügt über den geheimen Schlüssel.

Elliptische Kurven

Um ein Funktionenpaar mit solch ungewöhnlichen Eigenschaften zu finden, leisten die Algebra im Allgemeinen und die Theorie der endlichen Körper im Besonderen nützliche Dienste (Spektrum der Wissenschaft 5/1995, S. 46). Mit ihrer Hilfe können zwei Partner das Verfahren von Diffie und Hellman realisieren und sich auf einen geheimen Kode einigen, selbst wenn ein Bösewicht ihre gesamte Kommunikation belauscht.

Hierzu wählen unsere beiden Freunde – man nennt sie traditionell Alice und Bob – einen endlichen Körper mit q Elementen sowie eine primitive Wurzel x , also ein Element des Körpers mit der Eigenschaft, dass die Folge $0, 1, x, x^2, x^3, \dots, x^{q-2}$ alle Elemente des Körpers liefert. Alice und Bob wählen dann jeder für sich und im Geheimen eine Zahl zwischen 1 und $q-1$. Nennen wir die Zahl, die Alice gewählt hat, a und Bobs Wahl b . Alice teilt dann Bob den Wert x^a mit, während Bob seiner Partnerin den Wert x^b übermittelt. Auch für sehr große a lässt sich die Potenz x^a sehr schnell berechnen (Kasten S. 56 oben). Anschließend berechnet Alice $(x^b)^a$ und Bob $(x^a)^b$. Somit haben beide das Element x^{ab} berechnet: ihr gemeinsames Geheimnis (Grafik S. 58).

Stellen wir uns vor, ein Bösewicht habe den gesamten Austausch zwischen Alice und Bob abgehört; folglich kennt er x , x^a und x^b . Die Sicherheit des Systems beruht darauf, dass niemand weiß, wie man aus diesen Angaben effizient x^{ab} berechnen kann. Dafür würde genügen, wenn der Abhörer a aus x^a ermitteln könnte. Das nennt man das »Problem des diskreten Logarithmus«, denn unter den gewöhnlichen Zahlen wäre a der Logarithmus von x^a zur Basis x . Man könnte nacheinander die Potenzen $x^2, x^3, \dots$ berechnen, bis sich der Wert x^a ergibt. Aber für hinreichend große a besteht keine Hoffnung, a auf diesem Weg zu finden, bevor unsere Sonne erlischt.

Es gibt allerdings etwas geschicktere Verfahren. Damit das System auch ihnen standhält, muss $q-1$ mindestens einen sehr großen Primfaktor enthalten.

Man gewinnt noch etwas mehr an Eleganz und Sicherheit, wenn man von endlichen Körpern zu komplizierteren, aber nach wie vor endlichen algebraischen Strukturen übergeht. Es handelt sich um elliptische Kurven über einem endlichen Körper (Bilder S. 53 und S. 57, Kasten S. 56; siehe auch SdW 1/2009, S. 62). Man geht von einem hinreichend großen endlichen Körper F aus. Dann definiert man durch eine Gleichung, deren Koeffizienten aus F stammen, eine elliptische Kurve, genauer gesagt eine Menge von Punkten oder auch Paaren von Zahlen aus F . Das Interessante an diesen Kurven ist, dass man für ihre Punkte eine Addition definieren kann. Wie oben wählen Alice und Bob zwei natürliche Zahlen a und b und berechnen zu einem vorgegebenen Punkt P der elliptischen Kurve den Wert aP (Alice) beziehungsweise bP (Bob); ihr gemeinsames Geheimnis ist dann der Punkt $(ab)P$ der Kurve.

Derartige Protokolle finden sich in allen modernen Telekommunikationssystemen; sie belegen die Aktualität des Werks von Galois. Sein Erbe geht jedoch über die Kryptografie und die Verschlüsselung von Daten weit hinaus. Was man heute Galois-Theorie nennt, ist ein komplexes Gebäude, dem ein beachtlicher Teil der modernen mathematischen Forschung Anregungen verdankt: von der Zahlentheorie bis hin zu den Differenzialgleichungen über die algebraische Geometrie und das Langlands-Programm, dessen Nebenprodukt der Beweis des berühmten fermatschen Satzes ist. $\approx$

DER AUTOR



Antoine Chambert-Loir ist Professor für Mathematik an der Université de Rennes.

QUELLEN

- Bewersdorff, J.:** Algebra für Einsteiger: Von der Gleichungslösung zur Galois-Theorie. Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2007
Ehrhardt, C.: Évariste Galois. La fabrication d'une icône mathématique. Éditions de l'École Pratique des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris 2011
Pesic, P.: Abels Beweis. Springer, Berlin 2005

WEBLINKS

- www.galois-group.net/galois.pdf
 Bernd Klein (www.bklein.de): Évariste Galois oder das tragische Scheitern eines Genies. Biografie, 132 Seiten
http://de.wikiversity.org/wiki/Kurs:K%C3%B6rper-_und_Galoistheorie_%28Osnabr%C3%BCck_2011%29
 Holger Brenner: Vorlesung über Körper- und Galoistheorie (Osnabrück 2011)
http://fr.wikisource.org/wiki/Œuvres_mathématiques/5
 Évariste Galois: Sur la théorie des nombres. 1830. Neu gesetzte Originalarbeit
 Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142720

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Gibt es eine Klimaformel?
Wie verlässlich sind Klimamodelle?
Können wir das Klima der Zukunft errechnen?

MI 11.04.2012 / 19.00 / HANNOVER

KLIMAMODELLE—

Wie berechenbar ist die Zukunft?

MIT **Prof. Dr. Mojib Latif** Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, **Dr. Gabriele Gramelsberger** Freie Universität Berlin, **Dr. Paul Becker** Deutscher Wetterdienst, **Dr. Thorsten Mauritsen** Max-Planck-Institut für Meteorologie
MODERIERT VON **Dr. Reinhard Breuer** Editor-at-Large Spektrum der Wissenschaft

VERANSTALTUNGSORT Kleiner Sendesaal, NDR Landesfunkhaus Niedersachsen, Hannover

ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de

MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Die smarte Stadt der Zukunft

Um den Verkehr oder das Müllmanagement zu optimieren, benötigt jede Stadtverwaltung Informationen. Smartphones und andere Kommunikationsmittel bieten dabei in vielen Fällen Vorteile gegenüber Sensoren – und soziale Netzwerke fördern sogar die Kreativität der Bürger.

Von Carlo Ratti und Anthony Townsend

Am 6. Januar 2011 wurde der tunesische Blogger Slim Amamou als Regimekritiker verhaftet. Doch über das soziale Netzwerk »Foursquare« informierte er Freunde und Journalisten. Foursquare basiert auf einer Applikation, kurz: App, für Mobiltelefone. Weil es den im Gerät eingebauten GPS-Sensor nutzt, um dem Netzwerk beim Log-in automatisch den Standort zu melden, konnte Amamou im Gefängnis von Tunis geortet werden. Die Festnahme fand weltweit ihren Nachhall in der Presse – und entfachte weitere Aufstände. So trug die Generation Internet dazu bei, dass Präsident Zine el-Abidine Ben Ali acht Tage später nach Saudi-Arabien floh.

Keine zwei Wochen darauf entbrannten auch auf Kairo Straßen die Proteste gegen das dort herrschende Regime. Wieder kam den modernen Kommunikationsmedien eine wichtige Rolle zu. Zwar ließ die Regierung alsbald sowohl den Internetservice als auch das Mobilfunknetz des Landes außer Betrieb nehmen. Doch via Facebook, Twitter und Chatrooms hatten sich bereits Millionen Menschen miteinander solidarisiert. Weil die Wirtschaft des Landes Schaden zu nehmen drohte, wurden die Medien wieder frei gegeben. Die Massenproteste hielten an, Präsident Hosni Mubarak dankte am 11. Februar ab.

Soziale Netzwerke, Internet und Handys schaffen offenbar bereits heute Rahmenbedingungen, unter denen urbane Gesellschaften ihre Lebenswelten verändern. Viele Stadtpla-

ner beschränken sich jedoch in ihren Konzepten von »Smart Citys« – mit informationsverarbeitenden Technologien ausgestatteten Städten – auf die Optimierung einzelner Prozesse. Als Flaggschiff solcher Projekte kann Masdar in den Vereinigten Arabischen Emiraten gelten, eine für 50 000 Bewohner aus der Wüste gestampfte Stadt. Dort ist jedes Gebäude und Fahrzeug, ja sogar jede Straßenlaterne mit Hightechzubehör ausgestattet, um den Energieverbrauch auf ein Minimum zu reduzieren. Das Gleiche gilt für New Songdo City in Südkorea und PlanIT Valley in Portugal.

Solche von Planern, IT-Firmen und Behörden strukturierten und somit den Bürgern aufgezwungenen »Top-down«-Konzepte sind jedoch problematisch. Nach fünf Jahren und mehr als einer Milliarde Dollar Kosten wird beispielsweise Masdar bereits neu überdacht. Wirklich smarte Städte sollten einem Vogel- oder Fischschwarm gleichen, in dem jedes Individuum auf subtile Weise auf seine Nachbarn reagiert. Hunderttausende von Menschen erstritten auf Kairois Tahrir-Platz nicht deshalb eine Veränderung, weil ihnen das von einem Team von »Demokratieplanern« verordnet worden wäre, sondern weil Freunde und Bekannte sie via SMS und Twitter dorthin gerufen haben. Die beste Option, urbane Zentren zukunftsfähig zu machen, ist demnach ein Bottom-up-Ansatz. Wie immer die Ziele lauten, ob »Nachhaltigkeit in der Energieversorgung« oder »weniger Staus« – mit der richtigen technischen Unterstützung könnten die Stadtbewohner effektiver dazu beitragen als bei zentralisierten Konzepten. Mehr noch: Durch virtuelle soziale Netzwerke entstünde eine neue Form realer Geselligkeit und urbaner Kreativität.

Tatsächlich genießen Smart Citys derzeit hohe Aufmerksamkeit. Der IT-Konzern IBM prognostiziert weltweit einen Zehn-Milliarden-Dollar-Markt auf diesem Gebiet bis zum Jahr 2015. Ein wenig erinnert das an die Veränderungen im Formel-1-Geschäft vor zwei Jahrzehnten. War der Erfolg auf der Rennstrecke bis dahin vorwiegend von der Mechanik des Autos und den Fähigkeiten des Fahrers abhängig, wurden die Boliden nun in regelrechte Computer verwandelt, die in Echtzeit die Informationen einer Vielzahl von Sensoren ver-

AUF EINEN BLICK

URBANE NETZWERKE

- 1** Der Siegeszug moderner Kommunikationsgeräte wie Smartphones eröffnet ungeahnte Möglichkeiten für die Stadtplanung.
- 2** Die »smarte Stadt der Zukunft« baut auf die Vernetzung von Mensch und Technik, um effizienter, innovativer und auch lebendiger zu werden.
- 3** Um die Bürger möglichst effektiv in die urbanen Prozesse einzubinden, sollten die Planer Bottom-up-Ansätze verfolgen.

Großstädte wie New York sind eine Ressource für Innovationen – vorausgesetzt, die Kreativität der Bürger wird geweckt. Ein Beispiel sind die »BigApp Challenges«, ein Wettbewerb um die besten Ideen, durch Smartphone-Apps das Leben in der Stadt angenehmer zu gestalten.



ISTOCKPHOTO / PAWEŁ GAUL

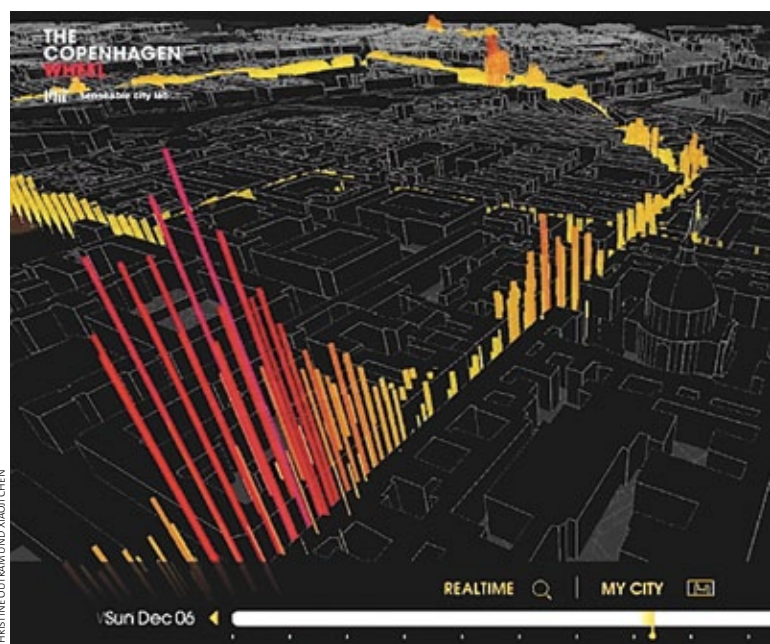
arbeiteten, um das Fahrzeug den Bedingungen des Rennens ständig neu anzupassen.

Seit dem letzten Jahrzehnt durchdringen digitale Technologien auch unsere Städte. Breitbandnetze und Mobilfunkstationen verbinden Handys, Smartphones und Tablet-PCs, die zudem erschwinglicher werden. Datenbanken bieten Informationen, die oft von öffentlichen Displays abrufbar sind. Hinzu kommt ein stetig wachsendes Netzwerk von Sensoren, mit denen beispielsweise Verkehrsströme oder die Luftverschmutzung erfasst werden können.

Dem Müll auf der Spur

Die riesige Datenmenge, die dadurch entsteht, bildet die Grundlage einer »Programmierung der Infrastruktur«. In Stockholm nehmen Kameras automatisch die Nummernschilder der Autos auf, die ins Stadtzentrum fahren; die Halter werden ermittelt und ihre Konten je nach Tageszeit belastet, mit maximal 60 Kronen (knapp sieben Euro) pro Tag. Das hat die Zahl der Fahrten durch die Innenstadt reduziert und damit die Stauzeiten um 50 Prozent, die umweltrelevanten Emissionen um 15 Prozent gesenkt.

Drei Projekte, die vom SENSEable City Laboratory am Massachusetts Institute of Technology in Boston entwickelt wurden, zeigen weitere Möglichkeiten auf. »Trash Track« soll den Weg des Mülls durch das Abfallsystem einer Stadt auskundschaften, um die Entsorgungskette zu optimieren. Dazu erhalten Abfallstücke elektronische Labels, die Informationen an das Mobilfunknetz senden. In einem in Seattle durchgeführten Test verfolgte das Labor so den Weg von mehr als 2000 solcher Markierungen an Wiederverwertbarem ebenso wie an Sondermüll und Elektrogeräten. Einige der Objekte reisten quer durch die Vereinigten Staaten! Den Rekord stellte eine Druckerpatrone auf, die 6152 Kilometer bis zur Entsorgung zurücklegte. Zudem endeten nicht alle Labels an

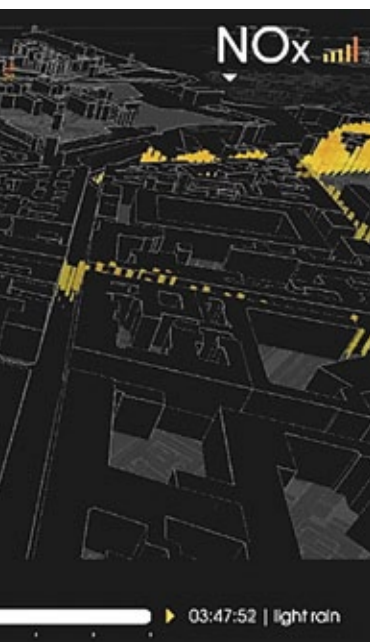


legalen Endpunkten. Die Ergebnisse zeigten Möglichkeiten auf, die mit dem Transport einhergehenden Kohlendioxidemissionen zu verringern. Seattle könnte die Informationen dazu nutzen, um seine Bürger stärker zum Recycling beziehungsweise zur sachgerechten Entsorgung anzuregen.

Zum Klimagipfel 2009 in Kopenhagen entwickelte das Labor das »Copenhagen Wheel« (Bild oben rechts), mit dem sich Fahrräder zum intelligenten E-Bike aufrüsten lassen. Der Einbau am Hinterrad speichert nämlich nicht nur die beim Bremsen sonst verlorene Energie in einem Akku und treibt damit einen Elektromotor an. Es registriert auch über Sensoren Daten zu Luftverschmutzung, Temperatur und Feuchtigkeit. Via Smartphone können diese weitergesendet oder spä-



Die Massenproteste auf dem Tahrir-Platz in Kairo machten 2011 offenbar, wie stark moderne Kommunikationstechnologien das Leben bereits verändert haben: Soziale Netzwerke und Handys ersetzen eine zentrale Organisation der Proteste.



MIT SENSEABLE CITY LAB / MAX TOMASINELLI

ter ausgewertet werden, um die tägliche Radstrecke zu optimieren. Über Handy lässt sich das Bike auch abschließen.

Das dritte Projekt, LIVE Singapore, benutzt die von der Myriade an Kommunikationswerkzeugen, Mikrokontrollern und Sensoren aufgezeichneten Echtzeitdaten, um den Puls einer Stadt von Moment zu Moment zu erfassen. Eine für alle zugängliche Software ermöglicht es sämtlichen Bürgern, Apps zu entwickeln, welche diese Daten auswerten. Derzeit entsteht beispielsweise ein Informationssystem für Berufspendler, das ihren Heimweg verkürzen soll; eine Analysewerkzeug zur Senkung des Energieverbrauchs und eine elektronische Hilfe, ein Taxi zu bekommen, wenn wieder mal ein Regensturm über die Insel zieht. Das Potenzial smarter Infrastruktur ist gewaltig. Es verwundert daher nicht, dass viele große Konzerne wie etwa IBM, Cisco Systems, Siemens, Accenture, Ferrovial und ABB ihr Augenmerk auf den städtischen Raum richten.

Planungsziel: Die lebendige Stadt

Doch die Gefahr ist groß, dass sie vor allem in Top-down-Konzepte investieren. Denn Wert und Bedeutung einer Stadt lassen sich nicht allein an ihrer Effizienz und auch nicht nur an ihrer Nachhaltigkeit bemessen, sondern vielmehr am Grad der »Sociability«. Der schwer ins Deutsche zu übersetzende Begriff umschreibt die Lebendigkeit eines sozialen Systems. Und selbst wenn es Bauwerke von Stararchitekten sind, die unser Bild von Metropolen prägen – man denke etwa an den Eiffelturm in Paris oder das Empire State Building in New York –, sind Straßen und Stadtteile doch das Werk gewöhnlicher Menschen. Der Städtebau ist ein dezentraler Prozess, bei dem aus einer kollektiven Anstrengung kommunale Architektur entsteht.

Dieses organische Wachstum klassischer Metropolen sollten die Planer smarter Städte bedenken. Wer der künftigen

Das »Copenhagen Wheel« (rote Scheibe) enthält einen Elektroantrieb und diverse Sensoren. Damit werden etwa die Stickoxidemissionen (links) in der dänischen Hauptstadt gemessen.

Gemeinschaft ein starres Design aufzwingt, scheitert oft dabei, ihre Bedürfnisse zu erfüllen, ihre Kultur widerzuspiegeln und jene Vielfalt an Aktivitäten und Angeboten zu ermöglichen, die das Leben in gewachsenen Städten so attraktiv macht. Auch so manches Projekt, ein smartes Haus zu kreieren, misslang, weil die Entwickler falsche Annahmen darüber machten, wie die Bewohner die angebotenen Technologien im Alltag nutzen wollen – eine Anpassung der Konfiguration an das reale Leben hatten sie nicht vorgesehen.

Top-down-Visionen vernachlässigen überdies das innovative Potenzial der Menschen. Nehmen wir etwa die Flut von Ideen, die Wettbewerbe wie die »BigApp Challenges« der Stadt New York hervorbringen, bei dem die zehn besten Vorschläge für urbane Apps ausgezeichnet werden. 2011 gehörten zu den Siegerideen: eine farbkodierte Karte der Parkmöglichkeiten, eine Sammlung von Freiwilligeninitiativen, eine Datenbank zu Fahrradunfällen, um sichere Radrouten zu entwerfen. Verglichen damit nehmen sich Versprechungen über die Vorteile von Videokonferenzen in New Songdo City deutlich schwächer aus.

Ein ausschließlicher Fokus auf effiziente Abläufe ignoriert fundamentale bürgerliche Ziele wie Lebensqualität, Demokratie und Rechtsstaatlichkeit. Sociability durch Technik zu fördern hingegen trifft diese Anforderungen – und eröffnet gleichzeitig neue Herangehensweisen an die Effizienz. Ein Beispiel unter vielen: die Smartphone-App »Dopplr«, eine Art Tagebuch und Planungswerkzeug für Fernreisende. Weil alle Einträge für einen vom Nutzer bestimmten Personenkreis einsehbar sind, können sich Bekannte an einem Ort ver-

Ein Beispiel für reaktionsfähige Architektur: Sensoren und Regler des digitalen Wasserpavillons auf dem Gelände der Expo 2008 im spanischen Saragossa registrieren, wenn sich Fußgänger nähern (im Foto links einer der Autoren, Carlo Ratti) – und stellen selektiv den Wasservorhang ab, der das Kennzeichen des Pavillons ist. Computergesteuerte Düsen und Lichter zaubern außerdem Muster und Texturen auf die nasse Leinwand, auch das in Reaktion auf das Publikum (rechts).



MIT FROLGEN VON DIGITAL WATER PAVILION / CARLO RATTI ASSOCIATI

abreden und einander etwa Reisetipps geben. Und da das Programm auch die durch eine Reise verursachten Kohlendioxidemission abschätzt, besteht die Möglichkeit, dass soziale Interaktion ein umweltfreundlicheres Verhalten fördert.

Wie ließe sich also eine Smart City entwerfen, bei der die Förderung der Sociability Vorrang hat? Ein idealer Anfang ist es, die wachsende Zahl von Smartphones zum Vorteil der Gemeinschaft zu nutzen: indem ihre Besitzer als Sensoren fungieren. Die Verkehrsfunktion auf Google Maps ist ein gutes Beispiel dafür. Anstatt ein teures Netzwerk von Messfühlern entlang der Straßen zu installieren, fragt Google permanent den Standort von Mobilfunkgeräten ab, die einer Schar von Freiwilligen gehören. Daraus berechnen Computer, wo der Verkehr gut fließt, wo es nur langsam vorangeht oder sich gar staut. Diese Information wird via App an Autofahrer weitergegeben – als farbig kodierte Verkehrsgeschwindigkeit, als Angabe zur geschätzten Fahrzeit beziehungsweise der sich ergebenden Verzögerungen oder durch den Vorschlag alternativer Routen.

Google ist sicher keine Bottom-up-Plattform, doch dieser Service illustriert, wie Sensordatenteilung das Management einer urbanen Infrastruktur unterstützen kann. Jeder Nutzer sucht sich die beste Strecke auf Grund der Beobachtungen einer Gruppe.

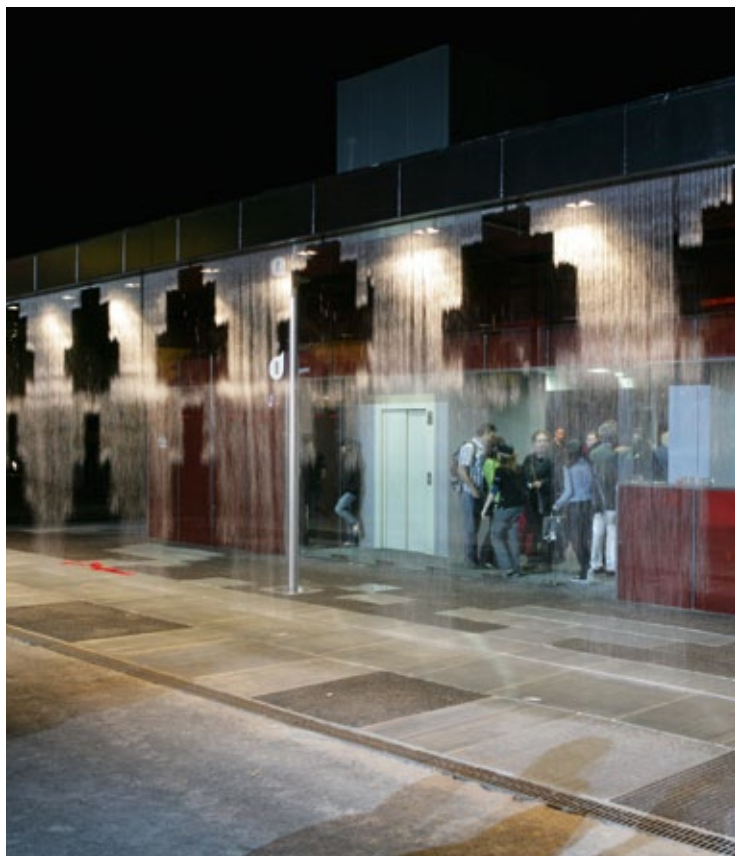
Eine von der Basis aus errichtete smarte Stadt bleibt stets eine Baustelle, ein chaotisches Labor für urbane Innovationen

Freilich bedarf es nicht mobiler Alleskönner im Handyformat, um Bottom-up-Ansätze zu realisieren. 2009 verteilten das Green Watch Project und die Internetfirma Ping in Paris insgesamt 200 Geräte, die lediglich den Ozongehalt der Luft sowie den Geräuschpegel bestimmten, während die Projektteilnehmer ihren Beschäftigungen nachgingen und die Daten weitersandten: Diese wurden über das Kartensystem Citypulse veröffentlicht. Zuvor hatte die Metropole Paris weniger als ein Dutzend Ozonmessstationen betrieben. Im ers-

ten Versuch kamen in einem einzigen Stadtteil mehr als 130 000 Messungen zusammen – und zwar zu einem Bruchteil der Kosten fester Installationen. Das Experiment zeigte auch, dass sich die Bürger in Umweltfragen

gern engagieren. Zukünftig könnten Sensoren für solche Basisnetzwerke in diverse Alltagsobjekte eingebaut werden, selbst in Kleidungsstücke.

Und es geht noch ein ganzes Stück einfacher. Heute haben viele Gemeinden in den Vereinigten Staaten unter der Nummer 311 Telefonhotlines eingerichtet, die Bürger schnellen Zugang zu Informationen und Dienstleistungen der Stadtverwaltungen geben sowie die Möglichkeit, Meldungen zu erstatten. Diese sind dann über eine entsprechende App auch anderen zugänglich. Zum Beispiel reagierte ein Bewohner Bostons über eine 311-App namens »Citizen's Connect«



MIT FOLGEN VON DIGITAL WATER PAVILION / MAX TOMASINELLI

auf den Hilferuf eines anderen Bewohners, dem ein streunendes Opossum in die Mülltonne geraten war. Er konnte das Tier innerhalb einer halben Stunde befreien – lange bevor städtische Angestellte auch nur eine Antwort auf den Hilferuf geschickt hatten – und hinterließ im 311-System die Information, dass die Angelegenheit erledigt sei. Solche Werkzeuge werden sich zu wikiähnlichen Informationsspeichern entwickeln, die es Bürgern ermöglichen, sich zu organisieren und gegenseitig zu helfen. Freilich dürfen die Verwaltungen dies nicht als Möglichkeit ansehen, ihre Verpflichtungen abzugeben und Kosten zu sparen. Aber selbst dagegen ist ein smartes Kraut gewachsen: Internetnachrichtenseiten wie »EveryBlock« berichten über lokale Themen und überwachen Verwaltungen viel genauer als Zeitungen oder Fernsehen.

Bottom-up-Verfahren nutzen überdies die Sociability als Hebel, um Aktivitätsmuster zu ändern. Das anfangs erwähnte soziale Netzwerk »Foursquare« kann beispielsweise das Ausgehen zu einer Art urbanem Spiel machen: Es weiß, wer ein Café, eine Bar oder ein Restaurant am häufigsten besucht, und verleiht ihm einen Ehrentitel (Mayor). Derart öffentlich gemachte Personen geben dem Netzwerk einen persönlichen Anstrich, ohne den selbst eine Hightechstadt nicht auskommt.

Das lässt sich auch auf andere Art unterstützen – durch Technik, die auf den Menschen reagiert. Ein prominentes Beispiel ist der digitale Wasserpavillon auf dem Gelände der Expo 2008 in Saragossa (Spanien). Seine »Wände« bestehen

aus Wasservorhängen, die aus mehr als 3000 computer-gesteuerten Düsen gespeist werden. Sensoren melden die Gegenwart von Menschen, und das Gebilde verändert sich: Ein Durchgang in das Gebäude wird frei gegeben, Muster und Bilder entstehen.

Neuartige Computerschnittstellen werden auch Menschen unterstützen, die sich mit Technik schwertun. So hat etwa das Institute for Creative Technologies der University of Southern California in Los Angeles ein gestengesteuertes Eingabegerät für das Programm Gmail entwickelt, das zusammen mit Sprachsynthese- und -erkennungsprogrammen auch Analphabeten, Älteren und Behinderten die Benutzung eines E-Mail-Programms und des Internets ermöglichen könnte. Bleibt abzuwarten, welche Impulse solche Technologien auslösen, wenn sie dereinst in den Armenvierteln der großen Metropolen zur Verfügung stehen, wie etwa in den mehr als 600 Internetcafés der Pontos de Cultura (Kulturtreffpunkte) in den Favelas Brasiliens.

Obwohl Top-down-Konzepte wie Masdar zu einseitig ausgerichtet sind, zeichnet sie doch eines aus: Ihr Ziel ist klar definiert. Eine von der Basis aus errichtete smarte Stadt hingegen bleibt stets eine Baustelle, ein chaotisches Labor für urbane Innovationen. Es fehlt noch an Methoden zu Analyse und Evaluation. An dieser Stelle können Architekten, Planer und Technologen effektiv bei der Gestaltung smarter Städte mitwirken – indem sie die Ingenieursressourcen mit den Aktivitäten der Basis abstimmen. Die Stadtverwaltungen von New York City, London, Singapur und Paris unternehmen gerade die ersten vorsichtigen Schritte in diese Richtung, indem sie ihre Datenbanken öffentlich zugänglich machen. Damit können auch Unternehmen Apps anbieten, die diese Informationsquellen nutzen, um die Bedürfnisse der Bürger zu befriedigen.

Denn schließlich ist es Aufgabe einer Administration, auf ihre Bürger zu hören und mit ihnen zusammen Visionen zu entwickeln. Zwar führen manche Experimente zu Musterlösungen für alle, doch jede Gemeinde hat einzigartige Bedingungen und Ressourcen. ~

DIE AUTOREN



Carlo Ratti (links) ist Architekt, Ingenieur und Leiter des SENSEable City Laboratory am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, USA. Er arbeitet als Architekt und Städte designer in Turin, Italien.

Anthony Townsend ist Forschungsleiter am Institute for the Future in Palo Alto, Kalifornien, einer Ideenschmiede, die strategische Voraussagen und Szenarien entwickelt.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142721



Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hg.)
KINDER BRAUCHEN NÄHE
Sichere Bindungen aufbauen
und erhalten

2011, 120 S., ca. 20 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3468
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

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. Denn eine sichere Bindung ist 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* profunde Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in forschungsbasierten und zugleich unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.



Devora Zack
**NETWORKING FÜR
NETWORKING-HASSER**
Sie können auch allein essen
und erfolgreich sein!

2012, 170 S., geb., Gabal

Bestell-Nr. 3527
€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Gehören Sie auch zu den Menschen, die lieber ruhige Face-to-Face-Unterhaltungen mögen statt turbulente Massenevents? Devora Zack nimmt sich der »verstaubten alten Regeln« des Networkings an und stellt sie auf den Kopf. Niemand muss zum leutseligen Extrovertierten mutieren, um erfolgreicher Networker zu sein. Mit viel Humor und Sachverstand vermittelt das Buch, wie exakt die Eigenschaften, die uns zu Networking-Hassern machen, uns helfen können, Networking zu betreiben, das unserem Temperament entspricht.

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



Christoph Burger
**KARRIERE
OHNE SCHLEIMSPUR**
Wie Sie Charakter zeigen und
trotzdem Erfolg haben

2012, 184 S., kart., Linde

Bestell-Nr. 3528
€ 19,90 (D), € 19,90 (A)

Karriere – das hieß früher: Aufstieg um jeden Preis. Heute geht es für viele kompetente Fach- und Führungskräfte jedoch darum, erfolgreich zu sein, ohne sich dafür zu verbiegen. Sie wollen sich treu bleiben und ihre Persönlichkeit auch im Job einbringen. Doch in vielen Unternehmen gelten noch immer die klassischen Gesetze der Karrieremechanik. Welche Lösungen sind praktikabel? Dieses Buch zeigt, wie engagierte Menschen ihren eigenen Kopf bewahren, das ideale Unternehmen für sich finden und beruflich erfolgreich sind.



Robert Yarham
LANDSCHAFTEN LESEN
Die Formen der Erdoberfläche
erkennen und verstehen

2012, 256 S. m. zahlr. farb. Abb.,
geb., Haupt

Bestell-Nr. 3529
€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Anhand sorgfältig ausgewählter Fotos und Illustrationen erklärt dieses reich illustrierte Buch die Entwicklung der Landschaften und die Entstehung ihrer Formen. Dieser nützliche Reisebegleiter unterstützt beim »Lesen« der Landschaft, zeigt, wie das, was wir in der Landschaft sehen, zu deuten ist und erklärt die wichtigsten Prozesse, die die Landschaftsformen vor unseren Augen geschaffen haben.



Immanuel Birmelin
VON WEGEN SPATZENHIRN!
Die erstaunlichen Fähigkeiten
der Vögel

2012, 204 S. m. 45 Farbb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3530
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Ihr Gehirn ist nicht größer als eine Nuss, und dennoch sind ihre geistigen Fähigkeiten mit denen von Schimpansen oder Wale vergleichbar. Krähen tricksen ihre Artgenossen bewusst aus, um sich den größten Futteranteil zu sichern. Und Kohlmeisen verstehen und lösen komplizierte Aufgaben schneller als Hund und Katze. Mit Respekt, Witz und Bewunderung berichtet der bekannte Verhaltensforscher von den geistigen Glanzleistungen der Vögel.



Werner Kinnebrock
**WAS MACHT DIE ZEIT,
WENN SIE VERGEHT?**
Wie die Wissenschaft die Zeit erklärt

2012, 160 S. mit 4 Abb. u. 2 Tab., kart., Beck

Bestell-Nr. 3531
€ 12,95 (D), € 13,40 (A)

»Was macht die Zeit, wenn sie vergeht?« Diese Frage stellte der Physiker Albert Einstein dem Mathematiker Kurt Gödel. Für Werner Kinnebrock, selbst Mathematiker, war sie der Anlass, ein wunderbar verständliches Buch über dieses faszinierende Phänomen zu schreiben.



Patrick Wyse Jackson
**PALÄONTOLOGIE FÜR
NEUGIERIGE**
Was Sie schon immer über
Fossilien, Erdgeschichte und
Evolution wissen wollten

2012, 100 S. m. 60 Farbb., geb.,
Primus Verlag

Bestell-Nr. 3532 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Eine kompakte Einführung in die Paläontologie!

Patrick Wyse Jackson erklärt anschaulich, wie und warum Fossilien erhalten blieben, wie sie klassifiziert werden und welche Informationen sie über die Geschichte der Erde liefern.

Die großen Fragen behandeln grundlegende Probleme und Konzepte in Wissenschaft und Philosophie. Anspruch der ambitionierten Reihe ist es, die Antworten auf diese Fragen zu präsentieren und damit die wichtigsten Gedanken der Menschheit in einzigartigen Übersichten zu bündeln.

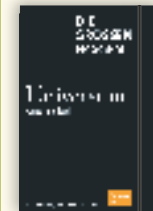


Tony Crilly
**DIE GROSSEN FRAGEN:
MATHEMATIK**

2012, 208 S. m. 70 Abb. u. 14 Tab.,
geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3516
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Mathematik*, der einen Bogen spannt vom Beginn des Zählens und den idealen platonischen Körpern bis zur Chaostheorie und dem fermatschen Theorem, setzt sich Crilly mit den 20 Fragen auseinander, die das Herz der Mathematik und unseres Verständnisses der Welt bilden.



Stuart Clark
**DIE GROSSEN FRAGEN:
UNIVERSUM**

2012, 208 S. m. 15 Abb., geb.,
Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3517
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Universum* geht Clark den 20 entscheidenden Fragen der Astronomie, Kosmologie und letztlich unserer Existenz nach.



Mit Michael Mosley
**UNSER UNIVERSUM –
DIE KOMPLETTE FÜNFTE
STAFFEL, 3 VIDEO-DVDS**

2012, Laufzeit 360 Min., INFO-Programm gem. § 14 JuSchG, Polyband

Bestell-Nr. 3511
€ 34,- (D), € 34,- (A)

Eine faszinierende und bildgewaltige Entdeckungsreise zu den Geheimnissen unseres Universums!

Mit Hilfe aktuellster wissenschaftlicher Erkenntnisse und Computeranimationen der neuesten Generation nähert sich diese packende HISTORY-Dokumentation der fantastischen Welt der kosmischen Rätsel. Denn schließlich liegen in den vielen unbeantworteten Fragen nicht nur Erkenntnisse über den Ursprung der Menschheit, sondern auch der Schlüssel für unsere Zukunft.



Mit Michael Mosley
**DIE GROSSEN FRAGEN DER
WISSENSCHAFT – MACHT,
BEWEISE UND LEIDENSCHAFT, 2 VIDEO-DVDS**

2012, Laufzeit: 360 Min., INFO-Programm gem. § 14 JuSchG, Deutsch/Englisch, Polyband

Bestell-Nr. 3500 € 19,90 (D), € 19,90 (A)

Einige Fragen faszinieren und beschäftigen uns seit Beginn der Menschheit: • Was ist da draußen? • Woraus besteht die Welt? • Wie sind wir hierhergekommen? • Besitzen wir grenzenlose Kraft? • Was ist das Geheimnis des Lebens? • Was macht uns zu Menschen?

Neuheiten
Schnäppchen*
Science & Fun

SCIENCE-SHOP
SPEZIAL 2/2012

* Lieferung, solange Vorrat reicht



Joanne Baker

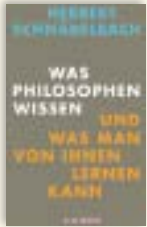
50 SCHLÜSSELIDEEN ASTRONOMIE UND KOSMOLOGIE

2012, 208 S. m. 55 Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3512 € 24,95 (D), € 25,70 (A)

Eine Entdeckungsreise durch unser Universum vom Urknall bis zur Astrobiologie. In 50 Schlüsseldaten Astronomie und Kosmologie erklärt Joanne Baker klar und prägnant die wichtigen Konzepte, großen Entdeckungen und neuesten Theorien der Astronomen und Astrophysiker.

Weitere Bände der Reihe »50 Schlüsseldaten« finden Sie hier:
www.science-shop.de/schluesseleiden



Herbert Schnädelbach

WAS PHILOSOPHEN WISSEN und was man von ihnen lernen kann

2012, 237 S., geb., C.H. Beck

Bestell-Nr. 3523

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Ein brillanter Grundkurs in

Philosophie – für Einsteiger und Fortgeschrittene!

Herbert Schnädelbach demonstriert in 14 Kapiteln exemplarisch, was in der gegenwärtigen Philosophie verbindlich gelehrt und gelernt werden kann. »Philosophisches Wissen« ist kein leeres Wort. Ungeachtet mancher Zweifel wissen Philosophen wirklich etwas; sie verfügen über einen Kernbestand wissenschaftlichen Wissens, der wenig umstritten ist und hinter dessen Einsichten nicht zurückfallen darf, wer heute nach den Regeln des Fachs philosophiert.

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



Brian Greene

DIE VERBORGENE WIRKLICHKEIT Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos

2012, 500 S. m. Abb., geb., Siedler

Bestell-Nr. 3488

€ 24,99 (D), € 25,70 (A)

Der Physiker und Bestsellerautor Brian Greene macht sich auf die Suche nach der »verborgenen Wirklichkeit« im Universum. Er zeigt, warum vieles dafür spricht, dass wir im weiten Kosmos nicht allein sind, und beschreibt, welchen Parallelwelten Astrophysiker auf der Spur sind.



Ingrid Hilgert, Joachim Hilgert

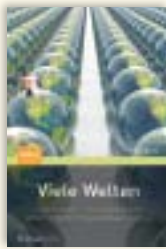
MATHEMATIK – EIN REISEFÜHRER

2012, VII, 273 S. m. Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3524

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch versteht sich als Reiseführer in das Land der Mathematik. Es informiert unter anderem über die Regionen dieses Landes (Algebra, Geometrie, Analysis, Stochastik, ...), über seine Geschichte, bedeutende Krisen und Entwicklungslinien, Beziehung zu benachbarten Gebieten, Kultur und Gepflogenheiten und seine Bewohner, die Mathematiker.



Peter Byrne

VIELE WELTEN

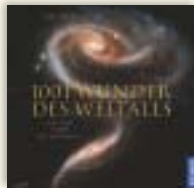
Hugh Everett III – ein Familien-
drama zwischen kaltem Krieg
und Quantenphysik

2012, XII, 356 S. 50 S-W-Abb., geb.,
Spektrum-Springer

Bestell-Nr. 3525

€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Peter Byrne erzählt die Lebensgeschichte von Hugh Everett III (1930–1982), dessen »viele Welten«-Theorie der multiplen Universen die Physik und Philosophie entscheidend beeinflusst hat. Anschaulich entwirft Byrne ein detailliertes Porträt des Genies, das eine Methode erfand, unser komplexes Universum von innen zu beschreiben. Er verwendet bisher unveröffentlichte Schriften von Everett und zahlreiche Interviews.



Piers Bizony

1001 WUNDER DES WELTALLS Eine Reise durch das Universum

2012, 399 S. m. zahlr. Farbbabb.,
geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3498 € 39,99 (D), € 41,20 (A)

Vorbei an Ringplaneten und Eismonden geht es zu den Geburtsstätten der Sterne. Die fantastische Bilderreise zeigt die besten Aufnahmen der kosmischen Objekte und erläutert in kurzen und leicht verständlichen Texten deren Natur.



David Eagleman

INKOGNITO Die geheimen Eigenleben unseres Gehirns

2012, 328 S. m. 20 S-W-Abb., geb., Campus

Bestell-Nr. 3501

€ 24,99 (D), € 25,70 (A)

Wissen Sie, wer die Entscheidungen in Ihrem Leben trifft? Sie oder Ihr Unterbewusstsein? Wer tritt auf die Bremse, noch bevor wir ein Hindernis bewusst wahrgenommen haben? Eagleman führt Sie mit grandioser Leichtigkeit durch die mysteriösen Tiefen Ihres Gehirns und lässt das, was Sie für die Wirklichkeit gehalten haben, in völlig neuem Licht erscheinen.

»Ein kluges und fesselndes Buch – das Workout für Ihr Großhirn.« Nature

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



Klaus Schmeh

NICHT ZU KNACKEN Von ungelösten Enigma-Codes zu den Briefen des Zodiac-Killers

2012, 224 S. m. Abb., geb., Hanser
Wirtschaft Wissen Weltgeschehen

Bestell-Nr. 3519

€ 18,90 (D), € 19,50 (A)

Die meisten Rätsel der Kryptologie sind heute gelöst – jedoch nicht alle. Klaus Schmeh hat die bedeutendsten ungeknackten Codes der Verschlüsselungsgeschichte zusammengetragen. In abenteuerlichen Geschichten schildert er die vergeblichen Bemühungen, die Botschaften zu dechiffrieren.



Brian Clegg

WARUM TEE IM FLUGZEUG NICHT SCHMECKT UND WOLKEN NICHT VOM HIMMEL FALLEN

Eine Flugreise in die Welt des
Wissens

2012, 238 S. m. zahlr. Abb., kart., Hanser

Bestell-Nr. 3518

€ 14,90 (D), € 15,40 (A)

Nirgendwo sonst begeben wir uns so sehr in die Hand der Wissenschaft wie im Flugzeug. Brian Clegg erklärt, wieso wir ohne Relativitätstheorie ins Meer stürzen würden, weshalb Vielfliegen eine Verjüngungskur und eine wohlgeschmeckende Tasse Tee im Flugzeug ein Ding der Unmöglichkeit ist. Und er lehrt uns, wieder über die Welt zu staunen, die wir vom Flugzeugfenster aus wahrnehmen. Die perfekte Urlaubslektüre und der ultimative Flugbegleiter.



Rita Carter

GEHIRN UND GEIST Eine Entdeckungsreise ins Innere unserer Köpfe

2012, VII, 374 S. m. 250 meist farb.
Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3504

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

In diesem Buch zeigt uns die preisgekrönte Journalistin Rita Carter, was uns wissenschaftliche Untersuchungen und moderne Imaging-Techniken über die biologischen Mechanismen hinter unseren Gedanken und Emotionen und über Verhalten und Persönlichkeit verraten. Dieses viel gelobte Buch ist ein breit angelegter, visuell ansprechender Führer durch die Strukturen und Fähigkeiten jener gefalteten grauen Masse, die wir in unseren Köpfen herumtragen.

Bequem
bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



STIRLINGMOTOR MIT TEELICHT-ANTRIEB

Bausatz für Tüftler ab 14 Jahre
Ca. 150 Einzelteile, ausf. Anleitung,
aufgebaut knapp 25 cm hoch, Kraul

Bestell-Nr. 3520

€ 38,- (D), € 38,- (A)

Dieser Stirlingmotor entsteht buchstäblich aus der Dose, in der er verpackt ist. Angetrieben wird er durch die Wärme eines Teelichts und der Luftkühlung. Für den Zusammenbau der ca. 150 Teile brauchen Bastler 2–3 Stunden. Die gründliche Anleitung mit exakten Bildern führt Schritt für Schritt zum fertigen Motor. Zusätzlich benötigt werden nur einfache Werkzeuge und ein Teelicht.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



Ulrich E. Stempel

LERNPAKET EXPERIMENTE MIT ULTRASCHALL

2012, 2 Ultraschallsensoren,
2 Steckboards, Fledermaus-
ohr und viele Bauteile, Ex-
perimentierhandbuch mit
160 S., Franzis

Bestell-Nr. 3533 € 49,95 (D), € 49,95 (A)

Dieses Lernpaket vermittelt die Grundlagen der Ultraschalltechnik und führt Sie mit spannenden Experimenten zu vielen interessanten Einsatzmöglichkeiten. Große Vorbereitungen sind nicht notwendig – Sie können sofort loslegen und forschen. Dabei lernen Sie auch die Hintergründe praktischer Ultraschallanwendungen kennen, die aus unserem modernen Alltag nicht mehr wegzudenken sind – sei es in der Medizin oder im wissenschaftlich-technischen Bereich. Hier werden ständig neue, verblüffende und oft wegweisende Möglichkeiten entwickelt. Lötten nicht erforderlich.



Ulrich E. Stempel

DAS SOLARBLOCK- HAUS – BAUSATZ

145 Teile aus Holz,
Solareinheit mit
Motor, Propeller-Drei-
flügler, Kunststoffschale
zum Gras sähen,

1 Tüte Grassamen, Kokosnuss-Substrat, ab 6 Jahren, InproSolar

Bestell-Nr. 3534 € 68,- (D), € 68,- (A)

Mit diesem Bausatz können Kinder spielerisch die Wind- und Solartechnik kennen lernen, denn am Blockhaus befindet sich ein Windgenerator. Im Vorgarten kann Rasen ausgesät und beim Wachsen beobachtet werden. Wenn man das Haus nicht fest verleimt, kann es immer wieder neu auf- und abgebaut werden. Die 145 Stück Holzbalken und Kleinteile stammen aus dem traditionsreichen französischen Jura. Das Holz wird ausschließlich aus wiederbeforsteten Wäldern geschlagen, langsam getrocknet und umweltfreundlich verarbeitet.



DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm,
Höhe: 73 mm (über Schorn-
stein), Kolbendurchmesser:
7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung:

Schiebersteuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50 (D), € 149,50 (A)

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Dieser Maschinentyp wurde zunächst zum Pumpen von Wasser aus Bergwerken eingesetzt, später auch als Antriebsmaschine in Fabriken. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfkompressor und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50 (D), € 136,50 (A)



Andreas Martius

PAPIERFLIEGER DER EXTRAKLASSE, MIT CD-ROM

2012, 64 S. m. zahlr. farb. Abb.,
Beil.: Vorlagenbogen, geb.,
Christophorus

Bestell-Nr. 3539

€ 12,99 (D), € 13,40 (A)

Immer wieder ist es faszinierend, wie dieses gefaltete Stück Papier die Schwerkraft für eine Weile überwindet und sanft schwebt. Papierflieger sind aber nicht nur etwas zum Träumen, das Falten begeistert außerdem alle Konstrukteure. In dieser »Flugwerft für Profis« werden ganz besondere futuristische Modelle in einer speziellen Faltechnik gebaut, der Verhakung. So sind diese Flieger besonders stabil und flugsicher.



TASCHENPLANETARIUM Der kleine Tierkreis

Mit 24-seitigem Begleitheft,
Durchmesser der Tierkreisscheibe:
15 cm, Ständer aus Holz,
für Kinder ab 12 Jahren, Kraul

Bestell-Nr. 3514

€ 25,90 (D), € 25,90 (A)

Das Taschenplanetarium ist ein astronomisches Hilfsmittel, um den Gang von Sonne, Mond und den Planeten anschaulich zu machen. Mit den verschiedenfarbigen kleinen Magnetscheibchen werden die Wandelsterne im Tierkreis markiert. Die drehbare große Tierkreisscheibe zeigt dann den Auf- und Untergang der Himmelskörper und Tierkreissternbilder. Für den Umgang mit dem Taschenplanetarium sind einige einfache astronomische Kenntnisse notwendig. Diese werden im Anleitungsheft ausführlich erklärt.

Schöne Ostergeschenke



FASTFOOD NaCl – SALZSTREUER AUF RÄDERN

Ei auf Rädern, Salzstreuer, Porzellan / Kunststoff,
mit Rückziehmotor, weiß mit farbigem Aufdruck;

L x B x H: ca. 6 x 5,5 x 6,5 cm, Troika

Bestell-Nr. 3540 € 27,- (D), € 27,- (A)

»Kannst du mal bitte das Salz rüberrollen?« Wenn Sie das am Tisch hören, dann ist Fastfood im Spiel, das rollende Salzstreuer-Ei aus Porzellan. Der unsichtbare Rückziehmotor macht es zum Geschmacksflitzer auf jedem Tisch. Das Salz in der Suppe (oder auf dem Ei) des modernen Lebens. Neues Design: bedruckt mit Rennstreifen und »NaCl« (chem. Formel für Salz).

Ebenfalls lieferbar ohne Aufdruck in weiß:



FASTFOOD – SALZSTREUER AUF RÄDERN

Bestell-Nr. 3317 € 27,- (D), € 27,- (A)



PIEPEI GOLD

Das perfekte Frühstücksei
für jeden Feinschmecker

Mit echtem Gold veredelt, Brainstream

Bestell-Nr. 2700

€ 24,90 (D), € 24,90 (A)

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



CLACK – SCHLAGFERTIGER EIERÖFFNER

Der Eieröffner der anderen Art

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

Bestell-Nr. 2716 € 18,90 (D), € 18,90 (A)

Der ultimative »Eierschalensollbruchstellenverursacher« funktioniert nach folgendem Prinzip: Kappe auf das Ei setzen, Schlagkugel herunterfallen lassen. Clack! So erhält die Schale eine ringförmige Bruchstelle, an der sich der »Eierkopf« fein säuberlich abheben lässt.



PEN ULTIMATE

Bestell-Nr. 1667

€ 13,90 (D), € 13,90 (A)

Der schwebende Pen

Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.

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



Helmut Genaust

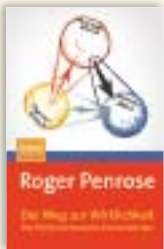
**ETYMOLOGISCHES
WÖRTERBUCH
DER BOTANISCHEN
PFLANZENNAMEN**

2012, 704 S., Lizenz: Birkhäuser, geb., Nikol

**Bestell-Nr. 3541 früher € 148,-,
jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)**

Das Buch vermittelt das Wissen über die Etymologie botanischer Pflanzennamen, also die Aufklärung über die Herkunft und Geschichte der wissenschaftlichen Gattungs- und Artnamen (einschließlich Bakterien, Algen, Pilzen, Moosen und Flechten) und gibt einen faszinierenden Einblick in die Geschichte der mannigfachen Beziehungen zwischen Pflanze und Mensch.

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



Roger Penrose

**DER WEG
ZUR WIRKLICHKEIT
Die Teilübersetzung für
Seiteneinsteiger**

2010, XII, 244 S. m. 50 Abb., geb., Spektrum

**Bestell-Nr. 3021 früher € 24,95,
jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)**

Der Weg zur Wirklichkeit ist eine Kurzübersetzung des Penrose-Klassikers *The Road to Reality*, die aus dem Monumentalwerk für Physik- und Mathematikexperten die allgemeinverständlichen Kapitel für interessierte Laien lesbar macht. Wer ein Faible für die Grundfragen der Wissenschaft, einen Blick für Geometrie, einen Sinn für Zahlen und Neugier für kosmologische Theorien hat, findet in diesem klar und kompetent geschriebenen Buch überraschende und provozierende Ideen.

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



Volker Reinhardt

**ROM
Ein illustrierter Führer
durch die Geschichte**

1999, 287 S. m. 104 meist farb. Abb., 1 zweifarb. Stadtplan, geb., Beck

**Bestell-Nr. 3489 früher € 19,90,
jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)**

Die zweieinhalbtausendjährige Geschichte der Stadt wird hier aus den sichtbaren Zeugnissen ihrer Vergangenheit erzählt und gedeutet. Ein historisches Gesamtbild, ein neuartiger und lebendiger illustrierter Stadt- und Geschichtsführer für alle Romreisenden mit über 120 weit gehend farbigen Abbildungen.



Manfred Spitzer, Norbert Herschkowitz

**WIE ERWACHSENE DENKEN
UND LERNEN, 3 AUDIO-CDs**

2012, Laufzeit: 210 Min., m. Booklet, Galila

**Bestell-Nr. 3502 früher € 44,85,
jetzt nur € 29,90 (D), € 29,90 (A)**

In welchem Alter hört das Gehirn auf zu reifen? Worin zeichnet sich Weisheit bei einem alten Menschen aus? Ist es tatsächlich für einen 40-Jährigen schwieriger, eine Fremdsprache zu lernen, als für einen 20-Jährigen? Diese und viele weitere spannenden Fragen werden von den renommierten Hirnforschern Norbert Herschkowitz und Manfred Spitzer auf den drei CDs in gewohnt unterhaltsamer Weise beantwortet.



Von Peter Schütt, Hans J. Schuck, Bernd Stimm u. a.

**LEXIKON DER BAUM- UND
STRAUCHARTEN**
Das Standardwerk der Forstbotanik
2011, 581 S. m. zahlr. Farb- u. S-W-Abb., kart., Originalverlag: Ecomed, Nikol
**Bestell-Nr. 3481
früher € 101,24, jetzt nur € 9,99 (D), € 10,30 (A)**

Das Lexikon bietet die botanischen Grundlagen und einen umfassenden Einblick in die Biologie der Holzpflanzen und des »Ökosystems Wald«. Mit Angaben zu natürlichen Arealen, Standortansprüchen, Wachstumsleistungen und Art der wirtschaftlichen Nutzung, Gattungen, Familien, Ordnungen, Baumkrankheiten.



Philip G. Zimbardo

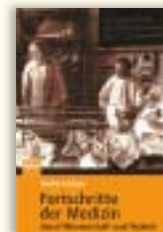
**DER LUZIFER-EFFEKT
Die Macht der Umstände
und die Psychologie des Bösen**

2008, XXIII, 504 S. m. 24 Abb., geb., Spektrum

**Bestell-Nr. 2694 früher € 39,95,
jetzt nur € 16,95 (D), € 17,40 (A)**

Der renommierte Sozialpsychologe Philip Zimbardo erläutert in seinem Buch, wie wir alle für die Verlockungen »der dunklen Seite« anfällig sind und die unzähligen Gründe dafür. Anhand historischer Beispiele sowie seiner eigenen bahnbrechenden Forschungen führt er detailliert aus, wie situative Kräfte und gruppenspezifische Prozesse zusammenwirken können, um aus anständigen Männern und Frauen Ungeheuer werden zu lassen.

**Portofreie Lieferung nach
Deutschland und Österreich**



Andras Gedeon

**FORTSCHRITTE DER
MEDIZIN DURCH
WISSENSCHAFT UND
TECHNIK**
99 wegweisende
Veröffentlichungen aus fünf
Jahrhunderten

2010, XII, 540 S., geb., Spektrum

**Bestell-Nr. 3027 früher € 59,95,
jetzt nur € 19,95 (D), € 20,60 (A)**

Dieser aufwändige Farbbildband ist eine Sammlung von 99 Essays über Meilenstein-Publikationen der letzten 500 Jahre aus dem weiten Feld wissenschaftlicher und technologischer Forschungsdisziplinen, die den Fortschritt der Medizin vorangebracht haben. Jeder Beitrag enthält eine Zusammenfassung der jeweiligen Publikation, eine kurze Biografie des Autors und eine Diskussion über den Einfluss der Entdeckung auf spätere Entwicklungen. Musterseiten aus dem ursprünglichen Artikel und Bilder aus der jeweiligen Zeit runden die Beiträge ab.

BESTELLCOUPON Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname _____
Datum/Unterschrift _____

Straße/Hausnummer _____
E-Mail-Adresse _____

☐ **Zahlung per Bankeinzug**

Geldinstitut/Ort _____
Konto-Nr. _____
BLZ _____
Datum/Unterschrift _____

☐ **Zahlung per Rechnung**

PLZ/Wohnort _____
Kunden-Nr. (falls vorhanden) _____ **NIF12COUP**



Energiespeicher der Zukunft

Wind, Sonnenenergie und Wasserkraft spielen eine immer größere Rolle für die Energieversorgung. Doch ihr Ertrag schwankt erheblich – was die Speichertechnik vor enorme Herausforderungen stellt.

Von Ferdi Schüth

Die Energiewende ist in vollem Gange, zumindest hier zu Lande. Im Jahr 2022 soll das letzte deutsche Kernkraftwerk vom Netz gehen. Ersatz muss her, doch möglichst nicht in Form fossiler Brennstoffe, denn mit zunehmenden Treibhausgasemissionen steigt die Gefahr, dass sich das weltweite Klima unbeherrschbar verändert. Zudem dürften wichtige konventionelle Energieträger, etwa Erdöl, in absehbarer Zeit knapp werden.

Es scheint unumgänglich, dass wir künftig einen großen Teil unserer Energieversorgung aus regenerativen Quellen bestreiten, sowohl aus Wind- und Wasserkraft wie auch aus

der direkten Sonneneinstrahlung. Da deren Ertrag aber je nach Wetterverhältnissen stark schwankt, könnte es sein, dass wir künftig auf hochleistungsfähige Energiespeicher setzen müssen, um das Angebot der Nachfrage anzupassen. Speichertechnologien werden somit Schlüsselemente unserer zukünftigen Energieversorgung sein.

Bislang hat sich das Speicherproblem kaum gestellt, denn Erdöl, Gas und Kohle sind nicht nur effiziente Brennstoffe, sondern zugleich hervorragende chemische Energiereservoir. Der Heizwert von Erdgas etwa beträgt 10 bis 14 Kilowattstunden pro Kilogramm und der von Dieselmotorkraftstoff 12.



Pumpspeicherkraftwerke wie das im thüringischen Goldisthal arbeiten mit hoher Effizienz. Gemessen am landesweiten Energieverbrauch ist ihre Speicherkapazität aber gering.

Eine leistungsfähige Lithiumionenbatterie mit einem Kilogramm Gewicht hingegen kann nur etwa 0,2 Kilowattstunden elektrische Energie aufnehmen. Das stellt deshalb ein Problem dar, weil die meisten regenerativen Energiequellen Elektrizität bereitstellen und nicht etwa eine chemische Verbindung: Windräder und Wasserturbinen treiben Elektrogeneratoren an, bei der Fotovoltaik erzeugt das Sonnenlicht eine Spannungsdifferenz, und auch die Solarthermie liefert – über ein erhitztes Medium, eine Turbine und einen Generator – elektrischen Strom. Da sich Elektrizität nur schwer speichern lässt, bringt es enorme Herausforderungen für die Netzbetreiber mit sich, wenn der Anteil regenerativer Quellen am Energiemix steigt. Schließlich müssen Angebot und Nachfrage von Strom immer sehr gut ausbalanciert sein, um Netzstörungen zu vermeiden.

Als Beispiel lässt sich die Windleistung herausgreifen, die in der Regelzone des Netzbetreibers »50 Hertz« – im Wesentlichen sind das die neuen Bundesländer – im April 2011 ins Netz eingespeist wurde (siehe Abbildung S. 74 unten). Sie schwankte innerhalb weniger Stunden um etwa 8000 Megawatt, was der kollektiven Leistung von sechs großen Kernkraftwerken entspricht! Es ist sogar schon mehrfach vorgekommen, dass ein Überangebot von Windstrom die Preise an der Leipziger Strombörse unter null drückte, weil die anderen Kraftwerke nicht schnell genug heruntergefahren werden konnten, um die Stromspitze zu kompensieren. Leistungsfähige, kostengünstige Energiespeicher könnten helfen, solche Schwankungen abzufangen.

Dabei werden sie für sehr verschiedene Anforderungen benötigt. Kurzzeitige Spitzen im Stromangebot und -verbrauch dauern maximal einige Tage; sie ließen sich mit Speichern abfangen, die einige hundert Millionen Kilowattstunden fassen. In den meisten Weltregionen gibt es darüber hinaus aber auch deutliche Unterschiede im jahreszeitlichen Verbrauch. In Deutschland etwa ist der Gasbedarf im Winter mehr als doppelt so hoch wie im Sommer und der Strombedarf um zehn Prozent höher, da die Bürger ihre Heizungen aufdrehen. In den USA ist es anders herum: Hier liegt der sommerliche Stromverbrauch wegen der vielfach genutzten Klimaanlage um etwa 20 Prozent höher als im Winter. Normalerweise stimmt das Angebot an regenerativ erzeugtem Strom nicht mit dem saisonalen Bedarf überein, so dass die Netzbetreiber für die Zeiten starker Nachfrage entweder zusätzliche Kraftwerke bereithalten oder jahreszeitliche Energiespeicher einsetzen müssten. Diese Reservoirs müssten allerdings enorme Energiemengen vorhalten, in der Größenordnung von einigen hundert Milliarden Kilowattstunden. Hierfür kommen fast nur stoffliche Speicher in Frage, denn Batterien, Druckluft- oder Pumpspeicherkraftwerke besitzen längst nicht genügend Kapazität.

Künftige Elektrofahrzeuge wiederum benötigen kleine, mobile Energiedepots. Diese müssen einige zehn oder hundert Kilowattstunden fassen – millionenfach weniger als Speicher für das Stromnetz, was ganz andere Herausforderungen mit sich bringt.

Das größte Problem dabei: Die hohe Energiedichte, die in den chemischen Bindungen von Benzin oder Dieselkraftstoff steckt, ist mit alternativen Speichertechnologien kaum zu erreichen. Deshalb haben heutige Elektroautos auch eine deutlich geringere Reichweite als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren.

Im Folgenden werden die wichtigsten Speichertechnologien sowie ihre Vor- und Nachteile vorgestellt.

Mechanische Speicherung

Elektrische Energie lässt sich relativ einfach in mechanische Energie und wieder zurück verwandeln. Dieses Prinzip nutzen etwa Pumpspeicherkraftwerke. Steht hier überschüssiger elektrischer Strom zur Verfügung, betreibt man damit Pumpen, um Wasser von einem niedrigen Reservoir in ein höher gelegenes zu pumpen. Später kann man das Wasser durch Turbinen ablassen, um seine potenzielle Energie wieder zurück in elektrische zu verwandeln. Die gespeicherte Energiemenge hängt ab vom Höhenunterschied der beiden Reservoirs und der Masse des hochgepumpten Wassers, gemäß der physikalischen Formel für die potenzielle Energie: $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$, wobei g die Schwerebeschleunigung der Erde ist, die etwa 9,8 Meter pro Quadratsekunde beträgt.

Bei einer Höhendifferenz von 300 Metern, was für Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland typisch ist, speichert ein Kubikmeter Wasser etwa drei Megajoule elektrische Energie, das entspricht 0,8 Kilowattstunden. Alle deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammen haben eine Kapazität von etwa 38 Millionen Kilowattstunden. Dieser Wert lässt sich nicht mehr wesentlich steigern, denn es mangelt an geeigneten Standorten für neue Anlagen und die Genehmigungsverfahren ziehen sich meist lange hin (siehe SdW 2/2012, S. 84).

Die Bundesrepublik Deutschland verbraucht pro Jahr zirka 600 Milliarden Kilowattstunden Strom. Alle deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammen könnten das Land also etwa eine halbe Stunde lang mit Elektrizität versorgen. Mit hin sind sie nicht geeignet, um über mehrere Tage hinweg zwischen Stromverbrauch und -nachfrage auszugleichen. Sie haben jedoch eine hohe Effizienz: Typischerweise gewinnen sie etwa 75 bis 80 Prozent der eingesetzten Energie zurück. Zudem gehören sie zu den Speichertechnologien mit den geringsten Kosten.

SERIE IM ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



Teil 1	Strom aus der Sonne	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher	April 2012
Teil 6	Wasserstofftechnologie	Mai 2012

VORRATSHALTUNG FÜR ENERGIE

1 Eine Energieversorgung, die sich auf erneuerbare Quellen stützt, muss mit starken **Schwankungen im Stromangebot** umgehen. Sie benötigt daher große Energiespeicher, die das Leitungsnetz stabilisieren und eine verlässliche Stromversorgung gewährleisten.

2 Es gibt **verschiedene Speichertechnologien**, von denen manche sich bereits bewähren, während andere erst noch entwickelt werden. Sie untergliedern sich in mechanische, thermische, chemische und elektrochemische Reservoirs.

3 Jede Speichertechnologie hat spezifische Vor- und Nachteile. Deshalb wird die **künftige Energieversorgung** sich wohl auf viele verschiedene stützen – je nachdem, ob es darum geht, Fahrzeuge anzutreiben, kurzfristige Netzschwankungen zu kompensieren oder jahreszeitliche Unterschiede im Energieverbrauch abzudecken.

Energie lässt sich auch in Druckluftspeichern vorhalten. Die Methode beruht darauf, Luft mit Hilfe überschüssigen Stroms in unterirdische, gasdichte Hohlräume zu pressen – bis auf einen Druck von 70 Bar. Zum »Anzapfen« des Speichers leitet man die komprimierte Luft in eine Gasturbine ein, deren Effizienz dadurch zunimmt. Auf diese Weise wird die gespeicherte Energie zurückgewonnen. Weltweit sind zwei solcher Anlagen in Betrieb, eine in Huntorf in Niedersachsen und eine in Alabama in den USA. Die gespeicherte Energiemenge hängt ab von der Größe der unterirdischen Höhlen und dem eingesetzten Luftdruck. Bei typischen Kavernengrößen von mehreren hunderttausend Kubikmetern lassen sich einige Millionen Kilowattstunden speichern.

Allerdings arbeiten Druckluftspeicher nur begrenzt effizient, wenn man die Wärme, die beim Verdichten frei wird, nicht zwischenspeichert – siehe unten – und beim »Wiederausblasen« an die Luft zurückführt (adiabatischer Betrieb). Dies geschieht bei den Anlagen in Huntorf und Alabama nicht, so dass deren Wirkungsgrade mit etwa 40 Prozent beziehungsweise 54 Prozent relativ niedrig liegen. Bei adiabatischem Betrieb gehen Experten von einer maximalen Effi-

zienz von 70 Prozent aus; ob das im praktischen Betrieb erreicht werden kann, ist allerdings fraglich.

Druckluftspeicherkraftwerke haben im Vergleich zu Pumpspeicherkraftwerken einen großen Vorteil: Der Eingriff in die Landschaft hält sich in Grenzen, der größte Teil der Anlage liegt tief unter Tage. Nur das Turbinenhaus und gegebenenfalls der Wärmespeicher befinden sich über der Erdoberfläche. Die Genehmigungsverfahren für solche Anlagen werden also weniger kompliziert verlaufen als die für große Pumpspeicherinstallationen.

Es gibt noch weitere mechanische Speichersysteme, etwa Schwungräder. Diese können aber nur relativ wenig Energie aufnehmen und haben auch recht hohe Reibungsverluste. Daher werden sie lediglich zur Netzstabilisierung eingesetzt.

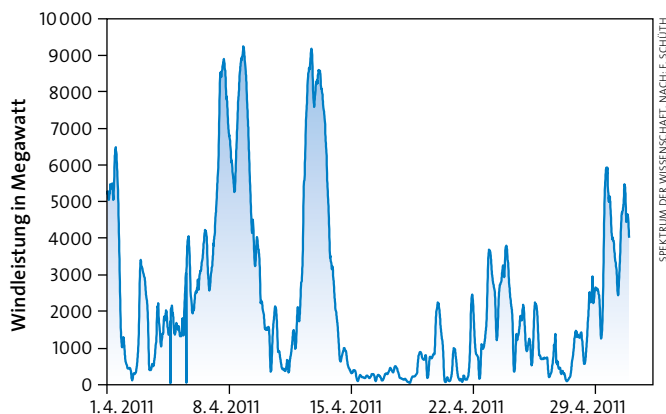
Wärmespeicher

Wärme lässt sich meist nur unter erheblichen Verlusten in andere Energieformen umwandeln. Der Carnotsche Wirkungsgrad η_c beschreibt die Fähigkeit, durch Ausnutzen eines Temperaturgefälles Arbeit zu leisten: $\eta_c = 1 - T_u/T_o$. Hierbei ist T_u die Temperatur des unteren Temperaturniveaus und T_o die des oberen (beide in Kelvin).

Je geringer also das Temperaturgefälle, desto weniger effizient ist es, Wärme in eine andere Energieform umzuwandeln, wobei in der Realität meist noch deutlich niedrigere Wirkungsgrade erreicht werden, als die obige Gleichung angibt. Daraus folgt, dass Wärmeenergie, die später als solche genutzt werden soll, auch in dieser Form gespeichert werden sollte, um Umwandlungsverluste zu vermeiden.

Grundsätzlich können Wärmespeicher sensible oder latente Wärme aufnehmen. Bei der sensiblen Wärmezufuhr erhöht sich die Temperatur des Speichermediums, etwa beim Erhitzen von flüssigem Wasser. Solche Speicher sind im Prinzip sehr einfach aufgebaut, doch sie benötigen eine gute thermische Isolation, um Wärmeverluste zu begrenzen. Anders bei Speichern, die latente Wärme aufnehmen: Bei ihnen bewirkt die Wärmezufuhr einen Phasenübergang oder eine chemische Reaktion, während die Temperatur konstant bleibt. Beispiele sind das Schmelzen von Wassereis oder das Hydrieren von Magnesium. Latentwärmespeicher haben allerdings den Nachteil, dass sie oft komplex aufgebaut und prozesstechnisch schwierig zu beherrschen sind.

Ein gutes Speichermedium für Wärmeenergie ist Wasser. Es hat eine große Wärmekapazität (4,2 Joule pro Kelvin und Gramm, verglichen etwa mit 0,9 bei Beton oder 2,1 bei einem typischen Thermoöl) und kann deshalb schon bei geringen Temperaturänderungen große Wärmemengen speichern. So heizt etwa der Deutsche Bundestag mit der Abwärme eines Motorheizkraftwerks, die in 300 Meter tiefen, Wasser führenden Gesteinsschichten zwischendeponiert wird. Die Siedlung Ackermannbogen in München verfügt über einen Wärmespeicher mit 5700 Kubikmeter Wasser, der etwa 300 Wohnungen mit Wärme versorgt und im Sommer mit 2900 Quadratmeter Kollektorfläche aufgeheizt wird. Selbst bei Einfamilienhäusern ließe sich dieses Prinzip umsetzen: Ein



Leistung der Windkraftanlagen in der Regelzone des Netzbetreibers »50 Hertz«. Sie kann binnen Stunden um 8000 Megawatt schwanken – den Beitrag von sechs Kernkraftwerken.



Natur
Energie
Plus

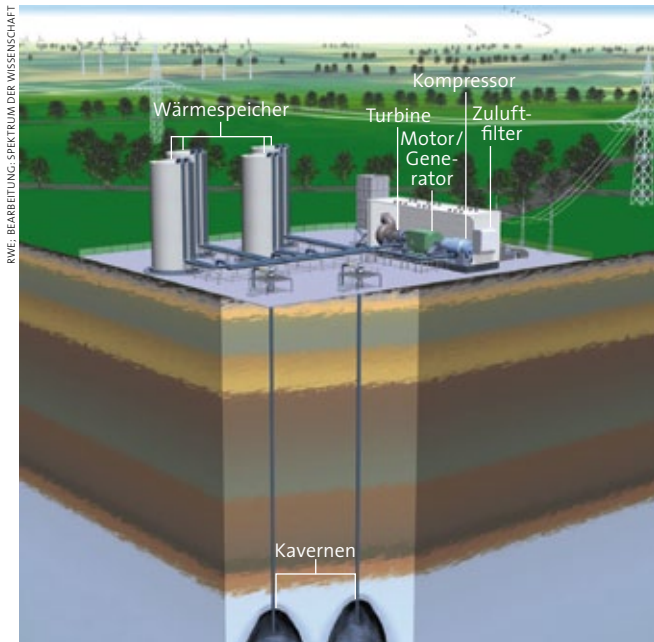
Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 25.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!



www.naturenergieplus.de



Schema eines Druckluftspeicherkraftwerks. Es presst Luft mit Hilfe überschüssigen Stroms in unterirdische Kavernen; bei starker Nachfrage nach Strom lässt es die Luft wieder durch eine Turbine ab und gewinnt so elektrische Energie. Der Wirkungsgrad steigt, wenn man die Wärme, die beim Verdichten frei wird, zwischen speichert und beim Ausblasen an die Luft zurückführt.

gut isolierter Wassertank von etwa 150 Kubikmetern reicht aus, um den Wärmebedarf eines nach modernem Energiestandard gebauten Hauses zu decken.

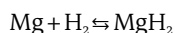
Eine alternative Methode ist die Hydrierung und Dehydrierung von Zeolithen – porösen Silikaten, die unter anderem als Ionenaustauscher, Trockenmittel und Katalysatoren dienen. Sie können bei erhöhten Temperaturen, wie sie mit Solarkollektoren erreicht werden, unter Verbrauch von Wärmeenergie entwässert werden. Bringt man sie später mit feuchter Luft in Kontakt, nehmen sie wieder Wasser auf, wobei Wärme frei wird. Die Speicherkapazität liegt bei 0,3 Kilowattstunden pro Kilogramm, für die Beheizung eines Hauses wären etwa 20 Kubikmeter Zeolith erforderlich. Da es sich hier um einen Latentwärmespeicher handelt, der bei konstanter Temperatur arbeitet, wäre keine aufwändige Isolierung wie bei einem Wassertank erforderlich.

Große Wärmespeicher mit einer Kapazität von Millionen Kilowattstunden machen es bereits möglich, dass auch Solarkraftwerke dazu beitragen können, die Grundlast im Stromnetz abzudecken. In den spanischen Parabolrinnenkraftwerken des Andasol-Komplexes etwa erhitzt ein Teil der eingefangenen Wärme mehr als 28.500 Tonnen Salzschnmelze (ein Gemisch aus Kaliumnitrat und Natriumnitrat) auf knapp 400 Grad Celsius. In der Nacht lässt man das Salz auf knapp 300 Grad Celsius abkühlen und nutzt die frei werdende Wärme zum Verdampfen von Wasser, um damit die Strom erzeugenden Turbinen auch während der Nachtstunden zu betrei-



ben. Die thermische Speicherkapazität der Schmelze beträgt eine Million Kilowattstunden; die gespeicherte Wärme lässt sich zu etwa 37 Prozent in elektrische Energie umwandeln.

Auch in solarthermischen Anlagen könnten Latentwärmespeicher eingesetzt werden. Eine Möglichkeit, die für Temperaturen zwischen 300 und 500 Grad Celsius geeignet ist – also in dem Bereich, in dem Parabolrinnenkraftwerke arbeiten –, stellt die Hydrierung und Dehydrierung von Magnesium dar. Dieses System untersuchen wir seit vielen Jahren am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. Die Reaktion von Magnesium mit Wasserstoff setzt Wärme frei, das dabei entstehende Hydrid zerfällt bei 300 bis 500 Grad Celsius wieder in Magnesium und Wasserstoff, wobei sich die genaue Temperatur nach dem Wasserstoffdruck richtet:



Diese Reaktion speichert 0,9 Kilowattstunden pro Kilogramm Magnesium. Um eine thermische Speicherkapazität wie in den Andasol-Kraftwerken zu erreichen, wären nur etwa 1100 Tonnen Magnesium statt 28500 Tonnen Salzgemisch erforderlich – bei einem Fünftel der Kosten. Allerdings bräuchte man noch zusätzliche Infrastruktur, um den Wasserstoff bereitzustellen. Dies ließe sich aber erreichen, indem man ein solarthermisches Kraftwerk, das elektrische Energie liefert, mit einem Solarkraftwerk kombiniert, das über einen thermochemischen Prozess direkt Wasserstoff erzeugt.

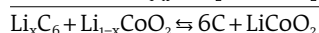
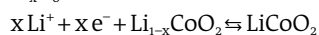
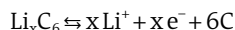
Batterien und Akkus

Elektrochemische Speicher gehören zu den bekanntesten Energiespeichern, denn wir nutzen sie täglich, etwa als Lithiumionenakkus in unseren Mobiltelefonen, Notebooks und vielen anderen technischen Geräten. Auch Elektroautos der

Die solarthermischen Andasol-Kraftwerke in Spanien speichern die tagsüber gewonnene Wärmeenergie in Tanks (braun) mit Salzschnmelze. Nachts gewinnen sie daraus elektrische Energie.

neuesten Generation sind damit ausgestattet, und zumindest für das nächste Jahrzehnt werden solche Batterietypen Stand der Technik bleiben. Ein großer Vorteil von elektrochemischen Speichern ist ihre hohe Effizienz. Abhängig von den Lade- und Entladeströmen – kleine Ströme sind besonders effizient, führen aber zu langen Ladezeiten – lassen sich mehr als 90 Prozent der gespeicherten Energie zurückgewinnen.

Ein gebräuchlicher Lithiumionenakku hat eine Anode aus Graphit, mit eingelagerten Lithiumionen zwischen den Graphitebenen, sowie eine Kathode, die auf Kobaltoxid basiert. Die Reaktionen, die im Akku ablaufen, kann man vereinfacht formulieren als:



(Li = Lithium, C = Kohlenstoff, Co = Kobalt, O = Sauerstoff)

Lithium löst sich hier als positiv geladenes Ion von der Graphitanode und wandert durch die Batterieflüssigkeit hindurch zum Kobaltoxid. Es bleibt ein freies Elektron an der Anode zurück, das durch einen äußeren Stromkreis – den Verbraucher – zur Kobaltoxid-Kathode fließt. Dort nimmt ein vierfach positives Kobaltion das Elektron auf, wobei dreifach positives Kobalt entsteht, das zusammen mit Lithium als Lithiumkobaltoxid (LiCoO_2) gebunden wird. Durch Anle-

gen einer externen Spannung lässt sich dieser Vorgang umkehren, was man nutzt, um den Akku wieder aufzuladen. Bei dem »x« in der Reaktionsgleichung handelt es sich um eine Zahl zwischen 0 und 1, die ausdrückt, dass die Redoxreaktion nicht vollständig abläuft, denn in diesem Fall würde der Akku sehr schnell zerstört. Für x zwischen 0,5 und 1 arbeitet er einigermaßen reversibel. Die Spannung eines solchen Lithiumionenakkus beträgt 3,6 Volt.

Von den wiederaufladbaren Batterien hat der Lithiumionenakku die höchste Speicherdichte mit knapp 0,2 Kilowattstunden pro Kilogramm. Bei zusammengeschalteten Akkuzellen, die zum Antrieb von Elektrofahrzeugen dienen, liegt die Speicherdichte allerdings etwas niedriger. Elektroautos haben einen Energiebedarf von etwa 0,15 Kilowattstunden pro Kilometer Fahrstrecke. Für eine Reichweite von 500 Kilometern, die eher am unteren Rand dessen liegt, was ein Pkw mit Verbrennungsmotor mit einer Tankfüllung erreicht, benötigt man also eine Batterie, die einschließlich der zusätzlich erforderlichen Komponenten mehr als eine halbe Tonne wiegt. Diese Masse lässt sich nicht wesentlich verringern, denn dazu müsste man die Energiedichte der Akkus erhöhen, was derzeit nicht erreichbar scheint. Allein auf die Kathode entfällt fast die Hälfte des Gesamtgewichts, und sie besteht immer aus Übergangsmetalloxiden oder ähnlichen Verbindungen, die nun einmal eine hohe Masse besitzen. Wesentlich leichtere Materialien, die diese Funktion erfüllen könnten, sind nicht in Sicht.

Metall-Luft-Batterien haben deutlich höhere Speicherdichten, allerdings lassen sie sich nicht wieder aufladen. Zwar laufen intensive Forschungen über wiederaufladbare Metall-Luft-Batterien und andere Batterietypen, etwa Lithium-Schwefel-Batterien. Ob solche Systeme allerdings praxistauglich werden, ist fraglich. Falls überhaupt, werden bis dahin noch viele Jahre, vielleicht Jahrzehnte vergehen.

Elektrofahrzeuge haben also ihre technischen Begrenzungen – aber sie eröffnen auch neue Möglichkeiten: Sie können nicht nur Autos mit Verbrennungsmotoren ersetzen, sondern zusätzlich als mobile, dezentrale Speicher im Elektrizitätsnetz dienen. In Deutschland gibt es etwa 42 Millionen Pkws, die die meiste Zeit des Tages nur herumstehen. Wenn jedes Auto eine Elektrobatterie hätte, die 75 Kilowattstunden speichern könnte, entspräche dies insgesamt einer Kapazität von 3,15 Milliarden Kilowattstunden – dem 80-Fachen aller deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammengenommen.

Dieses Fassungsvermögen kann natürlich nicht vollständig zum Speichern von Strom genutzt werden, denn Autos dienen zunächst einmal dem Transport. Da zudem nicht klar ist, ob häufige Lade- und Entladezyklen die Lebensdauer der Batterien verringern, würde man diese vermutlich nur bei starkem Stromüberschuss laden, aber nicht bei Strommangel entladen. Trotzdem könnte eine große Zahl von Batteriefahrzeugen wesentlich dazu beitragen, Spitzen im Stromangebot zu glätten und dadurch das Leitungsnetz zu stabilisieren.

Auch stationäre Großbatterien werden wohl einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilität leisten. Lithiumionenbatterien sind zwar derzeit noch zu teuer hierfür, doch entwickeln Wissenschaftler und Ingenieure zurzeit verschiedene kostengünstigere Technologien, wobei schwer abzuschätzen ist, welche sich durchsetzen wird. Stromspeicher mit einer Kapazität von mehreren hunderttausend Kilowattstunden können Flauten in Windparks oder Schlechtwetterperioden in Fotovoltaikanlagen überbrücken. Hierfür setzen Japaner und Amerikaner bereits heute Natrium-Schwefel- oder Redox-Flow-Batterien ein. Erstere beruhen auf der Reaktion von Natrium und Schwefel zu Natriumsulfid. Da beide Stoffe geschmolzen sein müssen, benötigen die Batterien eine Betriebstemperatur von 300 bis 350 Grad Celsius. Um diese aufrechtzuerhalten, muss man ständig Energie hineinstecken, weshalb Natrium-Schwefel-Batterien für die langfristige Speicherung nicht geeignet sind.

Redox-Flow-Batterien funktionieren über Redoxprozesse in Elektrolytlösungen. Am bekanntesten sind die Zink-Brom- und die Vanadium-Redox-Flow-Batterie, beide kommerziell erhältlich. Letztere zum Beispiel hat zwei Tanks mit Elektrolytlösungen; einer davon enthält zweifach positive Vanadiumionen (V^{2+}), der andere dagegen fünffach positive (V^{5+}). Um elektrische Energie bereitzustellen, wird an einer Elektrode V^{2+} zu V^{3+} oxidiert und an einer anderen V^{5+} zu V^{4+} reduziert. Dies erzeugt eine Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden. Beim Aufladen der Batterie laufen die Reaktionen in umgekehrter Richtung ab. Die Oberfläche der Elektroden bestimmt die Leistung des Speichers, und die Größe der Tanks legt die deponierte Energiemenge fest, so dass sich die benötigten Ausmaße der Batterien sehr einfach bestimmen lassen. Zudem sind sie relativ robust. Allerdings haben sie

Fahrzeuge mit Elektroantrieb, etwa der Opel Ampera, könnten als mobile Speicher im Elektrizitätsnetz dienen und dazu beitragen, Spitzen im Stromangebot zu glätten.



GENERAL MOTORS COMPANY

den Nachteil einer niedrigen Speicherdichte (nur einige zehn Wattstunden pro Kilogramm).

Insgesamt gehören elektrochemische Batterien zu den am breitesten einsetzbaren Speichertechnologien und werden am intensivsten erforscht. Deshalb können wir hier in den kommenden Jahren deutliche Fortschritte erwarten – sowohl bessere Leistungen als auch fallende Kosten.

Von Wasserstoff bis Benzin

Chemische Speicher im engeren Sinn sind Stoffe, bei denen viel Energie in den chemischen Bindungen steckt. Zum Speichern großer Energiemengen über lange Zeiträume hinweg, etwa als jahreszeitliche Depots, kommen solche Stoffe besonders in Frage, da sie sich durch hohe Energiedichte und Lagerstabilität auszeichnen. Diskutiert werden dafür im Wesentlichen fünf Kandidaten, nämlich Wasserstoff, Methan, Methanol, Ethanol und Gemische aus flüssigen Kohlenwasserstoffen, zu denen etwa Benzin und Diesel zählen.

Wasserstoff gilt als besonders viel versprechender Energieträger (siehe Teil 6 der Energieserie in der kommenden SdW-Ausgabe). Seine massenbezogene Energiedichte fällt mit 33,3 Kilowattstunden pro Kilogramm enorm hoch aus, er ist ungiftig und verbrennt zu reinem Wasser. Allerdings hat er auch Nachteile: Da er gasförmig ist, besitzt er selbst bei

hoher Kompression eine nur mäßige volumenbezogene Energiedichte; außerdem muss er selbst zunächst unter Energieeinsatz hergestellt werden. Dies kann mittels Elektrolyse geschehen, also durch Zersetzen von Wasser mit elektrischem Strom. Allerdings funktioniert der Umwandlungszyklus Elektroenergie-Wasserstoff-Elektroenergie derzeit nicht besonders effizient: Mit heutigen Technologien gehen dabei mehr als 70 Prozent der Energie verloren. Außerdem sind Elektrolysesysteme sehr teuer. Die Speicherung von kurzzeitig verfügbarem Überschussstrom durch Wasserelektrolyse wäre also mit hohen Kosten verbunden.

Wasserstoff lässt sich auch mit anderen Verfahren herstellen, diese sind aber weniger ausgereift. Solar-Turmkraftwerke etwa könnten das Sonnenlicht so stark fokussieren, dass Temperaturen entstehen, bei denen sich Zinkoxid in Zink und Sauerstoff zersetzt. Das Zink könnte später mit Wasser zu Zinkoxid und Wasserstoff reagieren, womit ein geschlossener Reaktionskreislauf entstünde. Geforscht wird zudem über Algen, die Wasserstoff als Stoffwechselprodukt erzeugen, doch ob sich das je technisch anwenden lässt, ist ungewiss. Auch die direkte fotokatalytische Spaltung von Wasser befindet sich noch im Stadium der Grundlagenforschung.

Die Lagerung von großen Mengen Wasserstoff ist jedenfalls möglich, etwa in unterirdischen Druckspeichern. Die

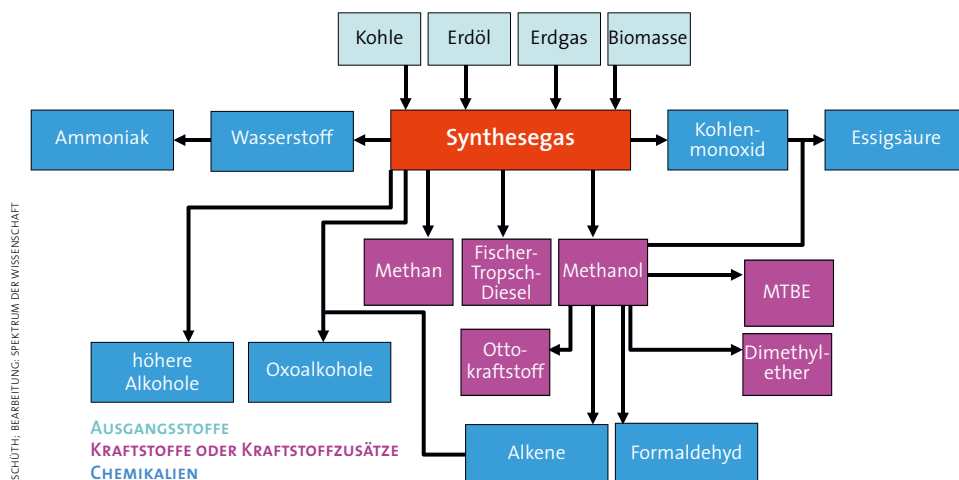
Alleskönner der Kohlenstoffchemie

Synthesegas ist im Wesentlichen ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Es entsteht, wenn Wasserdampf bei hohen Temperaturen mit kohlenstoffhaltigen Verbindungen reagiert, etwa mit Kohle, Erdöl, Erdgas oder Biomasse. Je nachdem, welche Verbindung man hierfür einsetzt, enthält das Synthesegas mehr oder weniger Wasserstoff:

Aus Kohle: $\text{CO}:\text{H}_2 = 1:1$, entsprechend der chemischen Reaktion $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2$

Aus Erdgas: $\text{CO}:\text{H}_2 = 1:3$, entsprechend der chemischen Reaktion $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2$

Mit Synthesegas lassen sich diverse Stoffe erzeugen, etwa Methan (mit Hilfe von Nickelkatalysatoren), Methanol (mit Hilfe von Kupfer-Zinkoxid-Katalysatoren) oder höhere Kohlenwasserstoffe (mit Kobalt- und Eisenkatalysatoren über den Fischer-Tropsch-Prozess). Methanol kann seinerseits zu Alkenen weiterverarbeitet werden, wichtigen Ausgangsmaterialien für Kunststoffe. Somit dient Synthesegas als Startpunkt für zahlreiche Verfahren der Kohlenstoffchemie und erlaubt auch die Herstellung von energiereichen Molekülen, die sich gut als chemische Langzeitspeicher eignen.



Synthesegas lässt sich aus diversen kohlenstoffhaltigen Verbindungen gewinnen und zu zahlreichen Substanzen weiterverarbeiten – etwa zu klimafreundlichen Kraftstoffen.

Kaverne des Clemens Dome in Texas beispielsweise, Teil eines Raffinerieverbunds, fasst 580 000 Kubikmeter und speichert Wasserstoff bei einem Druck bis zu 100 Bar. Angeblich gehen weniger als 0,01 Prozent des Gases pro Jahr durch Lecks verloren. Der Clemens Dome kann also Wasserstoff mit einem Energieinhalt von 170 Millionen Kilowattstunden vorhalten, woraus sich etwa 85 Millionen Kilowattstunden elektrische Energie gewinnen lassen – mehr als das Doppelte dessen, was alle deutschen Pumpspeicherkraftwerke bereitstellen können. Zwar gibt es derzeit weder Gasturbinen für den Betrieb mit reinem Wasserstoff noch Brennstoffzellen für Leistungen in Kraftwerksdimensionen, doch erscheinen solche Systeme grundsätzlich möglich.

Schwieriger umzusetzen sind Wasserstofftanks in Autos, um zusammen mit Brennstoffzellen eine Alternative zum Verbrennungsmotor zu ergeben. Druckspeicher mit 700 Bar weisen derzeit die größte Praxisreife auf, allerdings bei noch unbefriedigenden Speicherdichten.

Methan, der Hauptbestandteil von Erdgas, hat zwar eine niedrigere massenbezogene Speicherdichte als Wasserstoff, aber im gasförmigen Zustand eine etwa dreimal höhere volumenbezogene Dichte. Darüber hinaus gibt es in Deutschland bereits ein flächendeckendes Erdgasnetz mit großen unterirdischen Speichern, dessen Kapazität bei effizienter Verstromung ausreicht, um Deutschland für zwei bis drei Monate mit elektrischer Energie zu versorgen (siehe SdW 1/2012, S. 78). Methan lässt sich aus der Reaktion von Wasserstoff mit Kohlenmonoxid oder -dioxid gewinnen, allerdings ist das weniger effizient, als den Wasserstoff direkt zu nutzen. Viele Fürsprecher argumentieren zwar, das Kohlendioxid in Kraftwerksabgasen ließe sich in einen Wertstoff umwandeln, indem man es abscheidet und mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff zu Methan, Methanol oder flüssigen Kohlenwasserstoffen hydriert. Jedoch hat jeder dieser Prozesse eine negative CO₂-Bilanz, denn den hierfür erforderlichen Wasserstoff könnte man stattdessen in elektrische Energie umwandeln und dafür weniger fossile Brennstoffe verfeuern.

Attraktiver erscheint es, Biomasse in methanhaltiges Biogas umzusetzen. Allerdings muss man dabei sicherstellen, dass kein Methan aus den Biogasanlagen entweicht, da seine Treibhausgaswirkung 25-mal so hoch ist wie die von Kohlendioxid. Mit Gas- und Dampfturbinen lässt sich das Methan mit einem Wirkungsgrad von bis zu etwa 60 Prozent in Strom umwandeln; zusätzlich kann man die Abwärme des Prozesses nutzen. Auch Festkörperelektrolyt-Brennstoffzellen erlauben es, elektrische Energie aus Methan zu gewinnen, allerdings haben sie derzeit einen schlechteren Wirkungsgrad als Turbinen.

Methanol hat ebenfalls viel versprechende Eigenschaften als möglicher Energiespeicher. Es ist eine einfach handhabbare Flüssigkeit und leicht aus Synthesegas (siehe Kasten links) zu erzeugen – und dieses wiederum lässt sich unkompliziert aus fossilen Brennstoffen oder Biomasse gewinnen. Methanol kann Verbrennungsmotoren befeuern oder als Flüssigbrennstoff in Kraftwerken dienen. Insgesamt jedoch



erscheint es anderen stofflichen Energiespeichern unterlegen: Erstens erfordert seine Herstellung immer Wasserstoff, der selbst effizienter als Speichermolekül genutzt werden könnte; zweitens gibt es kaum Infrastruktur für seinen Vertrieb und seine Verwertung; drittens liegt seine Speicherdichte deutlich niedriger als die anderer flüssiger Energieträger, etwa von Kohlenwasserstoffen, die sich ebenfalls aus Synthesegas herstellen lassen; und nicht zuletzt ist es giftig.

Der nächsthöhere homologe Alkohol dient bereits in großem Stil als stofflicher Energiespeicher: Ethanol, hergestellt durch Vergärung von Biomasse. Der wachsende Gebrauch dieses »Biotreibstoffs« konkurriert mittlerweile jedoch ernsthaft mit der Nahrungsmittelproduktion und führt zu handfesten Landnutzungskonflikten (siehe SdW 3/2012, S. 68). Das Gleiche gilt für Biodiesel, der durch Umesterung oder Hydrierung von pflanzlichen Ölen erzeugt wird.

Ethanol weist eine um etwa 30 Prozent höhere Energiedichte auf als Methanol und lässt sich problemlos dem Benzin für Ottomotoren beimischen. Um daraus in existierenden Kraftwerken elektrische Energie zu gewinnen, müsste man diese jedoch umbauen, so dass man hier vermutlich andere Lösungen bevorzugt. Gelänge es jedoch, Bioethanol nachhaltig und klimafreundlich zu produzieren, ohne dabei den Nahrungsmittelanbau zu beeinträchtigen, wäre es sinnvoll, daraus einen Teil der Kraftstoffe für den Verkehrssektor herzustellen.

Schließlich gibt es noch die Option, die derzeitige Infrastruktur für Benzin und Diesel unverändert zu lassen und weiterhin solche Kohlenwasserstoffe zu nutzen – diese aber aus erneuerbaren Quellen zu erzeugen. Der so genannte Fischer-Tropsch-Prozess, vor fast 90 Jahren am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung erfunden, erlaubt die Herstellung hochwertiger Dieselmotorkraftstoffe aus Synthesegas. Zudem gibt es Verfahren, um aus Synthesegas über Methanol und einen anschließenden Methanol-to-Gasoline-Prozess ein Kohlenwasserstoffgemisch zu erzeugen, das dem Benzin ähnelt. Gewinnt man das Synthesegas hierfür aus Biomasse, kann man klimafreundliche Kraftstoffe produzieren, denn der darin enthaltene Kohlenstoff ist mittels Photosynthese vorher aus der Atmosphäre entfernt worden. Außerdem kann das Verfahren holzige Pflanzenteile verwerten und tritt



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unsere Themenseite »Energie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/energie

dadurch nicht in Konkurrenz mit der Nahrungs- und Futtermittelindustrie. Etwa 40 Prozent des Energiegehalts von Biomasse lassen sich über den Umweg des Synthesegases in Kraftstoff umwandeln. Pilotanlagen laufen bereits, etwa am Karlsruher Institut für Technologie oder bei der Firma Choren in Freiberg.

Flüssige Kohlenwasserstoffe werden auf Grund ihrer hohen Energiedichte wohl auch weiterhin unverzichtbar bleiben. Flug- und Schwerlastverkehr etwa sind auf sie angewiesen. Für die nächsten Jahrzehnte stehen noch genügend fossile Rohstoffe zur Verfügung, aber in fernerer Zukunft werden aus Biomasse gewonnene Kohlenwasserstoffe eine zunehmend größere Rolle spielen. Erste Tests mit solchen regenerativ erzeugten Kraftstoffen sind bereits erfolgreich durchgeführt worden, sowohl in der militärischen als auch in der zivilen Luftfahrt.

Für jeden Einsatz die richtige Methode

Unsere künftige Energieversorgung wird sich wohl auf viele verschiedene Kraftwerkstypen stützen, und ähnlich vielfältig werden auch unsere Energiespeicher aussehen. Flüssige Kohlenwasserstoffe und Batterien etwa könnten Pkws betreiben. Ob Brennstoffzellen auf Basis von Wasserstoff sich gegen Batterieantriebe durchsetzen werden, hängt von vielen Faktoren ab – insbesondere davon, wie effizient und kostengünstig der Wasserstoff bereitgestellt werden kann.

Wärmespeicher in Verbindung mit solarthermischen Kraftwerken könnten kurzfristige Schwankungen der Wind- und Sonnenenergie ausgleichen. Auch Pumpspeicherkraftwerke, Druckluftspeicher und stationäre Großbatterien sind hierfür geeignet. Sie halten Energie für einen Zeitraum von mehreren Tagen bis Wochen vor, mit Kapazitäten in der Größenordnung von einigen tausend bis Millionen Kilowattstunden.

Für die Speicherung über Jahreszeiten hinweg kommen – neben sehr großen Stauseen – nur stoffliche Speicher in Frage. Wasserstoff und Methan scheinen die aussichtsreichsten Kandidaten zu sein, wobei sich Methan effizient aus Biomasse erzeugen lässt, soweit diese nicht für die Produktion flüssigen Kraftstoffs benötigt wird. Regional kann auch Ethanol eine wichtige Rolle spielen. Wenn es gelänge, Lignozellulose kostengünstig aufzuschließen und somit auch holzige Pflanzenteile massenhaft zu verwerten, dann ließen sich sowohl Methan als auch Ethanol in noch größeren Mengen aus Biomasse gewinnen (siehe SdW 3/2012, S. 68). Einige Bereiche,

etwa der Luft- und Schwerlastverkehr, werden weiterhin benzin- oder dieselähnliche Kohlenwasserstoffe benötigen. Der Fischer-Tropsch-Prozess erlaubt es, diese vollständig regenerativ aus Biomasse herzustellen.

Der Heizenergiesektor wird sich wohl weitgehend vom Rest der Energieversorgung abkoppeln und zumindest in Neubauten an Bedeutung verlieren, da die immer bessere Gebäudeisolierung das Heizen zunehmend verzichtbar macht. Möglicherweise werden Wärmespeicher, die im Sommer »auftanken«, künftig sehr viel stärker zur Innenraumtemperierung beitragen als bisher. Wärmepumpen oder Drahtheizungen könnten gelegentliche Bedarfsspitzen auffangen.

Grundsätzlich gilt: Eine künftige, stark auf regenerative Quellen gestützte Energieversorgung wird vornehmlich Elektrizität bereitstellen. Da jede Umwandlung mit Energieverlusten behaftet ist, sollte man den elektrischen Strom so weit wie möglich direkt nutzen. Hierfür sind effiziente Leitungsnetze erforderlich, die sich möglichst über ganze Kontinente erstrecken sollten. Je großflächiger der Verbund, desto besser kann er lokale Schwankungen im Energieangebot ausgleichen, ohne auf Depots zurückzugreifen.

Mit gut aufeinander abgestimmten Kraftwerks-, Netz- und Speichertechnologien sollte es gelingen, auch ohne fossile Brennstoffe genügend Energie bereitzustellen. Allerdings wird sie dann vermutlich teurer sein als heute, denn mit Kohle, Öl und Gas nutzen wir zurzeit die Sonnenenergie, die über Jahrmillionen hinweg ohne unser Zutun in Biomasse deponiert wurde. Haben wir dieses Erbe erst einmal aufgezehrt, wird der Aufwand zur Energieversorgung steigen – und damit auch der Preis, den wir dafür zahlen müssen. ~

DER AUTOR



Ferdi Schüth ist Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. Er erforscht katalytische Prozesse, die eine wichtige Rolle für die Energieversorgung spielen, etwa die Aktivierung von Methan, die Umwandlung von Biomasse oder die Speicherung von Wasserstoff.

QUELLEN

Eberle, U. et al.: Chemische und physikalische Lösungen für die Speicherung von Wasserstoff. In: *Angewandte Chemie* 121, S. 6732–6757, 2009

Rinaldi, R., Schüth, F.: Hydrolysis of Cellulose as the Entry Point into Biorefinery Schemes. In: *ChemSusChem* 2, S. 1096–1107, 2009

Schüth, F.: Chemical Compounds for Energy Storage. In: *Chemie Ingenieur Technik* 83, S. 1984–1993, 2011

WEBLINKS

www.bine.info

Breites Informationsangebot und Newsletter über Energiespeicher vom FIZ Karlsruhe, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wird

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142722



Fritz Vahrenholt, Sebastian Lüning

Die kalte Sonne

Warum die Klimakatastrophe nicht stattfindet

Hoffmann und Campe, Hamburg 2012.

448 S., € 24,99

GLOBALE ERWÄRMUNG

Und wieder mal die Sonne

Zwei Autoren haben den katastrophalen Klimawandel abgesagt – und sich prompt wohlbegründeten Widerspruch aus der Fachwelt eingefangen. Die hält die vorgebrachten Thesen für teils falsch, teils äußerst spekulativ.

Kaum erschienen, hat »Die kalte Sonne« Anfang Februar eine gewaltige Aufregung ausgelöst. Fritz Vahrenholt und Sebastian Lüning erwischten einen perfekten Zeitpunkt, denn Europa erstartete gerade in einer Kältewelle. »Bild« gab den Autoren Raum, für ihre Sicht der Dinge zu werben. Andere Medien fielen über das Buch her, als hätte Beelzebub persönlich den Griffel geführt.

Es ist immer ein Ereignis, wenn ein Prominenter die Seiten wechselt. Fritz Vahrenholt machte 1978 Schlagzeilen, als er – gemeinsam mit Egmont R. Koch – in dem Buch »Seveso ist überall« die Risiken der chemischen Industrie anprangerte. Von 1991 bis 1997 war er für die SPD Umweltsenator in Hamburg. Danach wechselte der studierte Chemiker in die Wirtschaft. Seit 1999 lehrt er außerdem als Professor an der Universität Hamburg. Zurzeit ist Vahrenholt Geschäftsführer von RWE Inno-

gy, der Tochter des Energiekonzerns RWE für erneuerbare Energiequellen.

Noch bis vor wenigen Jahren warnte er vor den Gefahren der globalen Erwärmung. Jetzt sagt er, wir könnten uns Zeit lassen mit der Energiewende. Die »kalte Sonne« gönne uns vorerst eine Verschnaufpause.

Vahrenholts Koautor, der Geologe Sebastian Lüning, arbeitet für RWE Dea, ein Explorations- und Förderunternehmen für Erdöl und Erdgas. Vier wissenschaftliche Gastautoren haben einzelne Kapitel geschrieben: Die für ihre Außenseiterthesen bekannten Professoren Nicola Scafetta, Nir Shaviv, Henrik Svensmark und Werner Weber erläutern, wie die Sonne das Klima der Erde beeinflussen könnte.

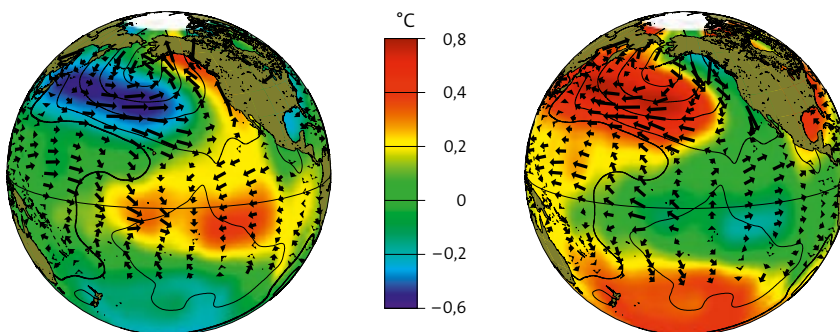
»Mindestens die Hälfte der Erwärmung der letzten 40 Jahre«, schreiben Vahrenholt und Lüning, sei »dem Einfluss der Sonne sowie zyklischen ozea-

nischen Oszillationen« geschuldet. Bis 2040 sei wegen der abnehmenden Aktivität der Sonne und der Meereszyklen mit einer Abkühlung zu rechnen, bis Ende des Jahrhunderts mit einer Erwärmung von einem Grad Celsius. Das Zwei-Grad-Ziel werde also ohnehin eingehalten. Auf einen »hektischen und daher riskanten Umbau der gesamten Industrielandschaft innerhalb von ein bis zwei Jahrzehnten« könne man darum verzichten.

Nicht nur die Energiezufuhr durch die Sonnenstrahlung selbst werde abnehmen; gleichzeitig lasse das Magnetfeld der Sonne nach, das die Erde bis zu einem gewissen Grad vor der kosmischen Strahlung abschirmt. Die energiereichen Partikel aus dem Weltraum würden daher vermehrt in die Atmosphäre eindringen und dort Kondensationskeime für kühlende Wolken bilden. Insgesamt seien die Auswirkungen der Sonnenaktivität auf das Klima viel größer, als es der Uno-Klimarat IPCC darstelle. Das Gremium ignoriere Mechanismen, die den solaren Einfluss verstärken würden.

Die meisten Fachleute, namentlich Reto Knutti, Mojib Latif, Jochem Marotzke und Hans von Storch, betrachten diese Thesen jedoch als bereits widerlegt oder zumindest höchst spekulativ. Zwar haben Schwankungen der Sonnenaktivität das Klima in den vergangenen Jahrhunderten beeinflusst, wie sich an natürlichen Klimaarchiven in Sedimenten und Eisbohrkernen erkennen lässt. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts aber wird die Entwicklung des Klimas nach ihrer Ansicht von der Erwärmung durch den verstärkten Treibhauseffekt dominiert.

Wo die Kondensationskeime für die Wolkenbildung herkommen, ist allerdings noch nicht vollständig geklärt. Von der Erd- oder Meeresoberfläche hochgewirbelte Partikel tragen dazu nur die Hälfte bei. Für den Rest ist ionisierende Strahlung aus dem Weltall in der Tat ein Kandidat. Zurzeit laufen entsprechende Experimente am europäischen Kernforschungszentrum CERN. Es gilt aber als sehr zweifelhaft, ob sich durch die Strahlung Kondensationskei-



Die Pazifische Dekaden-Oszillation (PDO): Im Rhythmus von 20 bis 30 Jahren tauschen Warm- und Kaltwassergebiete im nördlichen Pazifischen Ozean ihre Plätze.

me in ausreichender Größe und Menge bilden würden.

Was die ozeanischen Klimaschwankungen angeht, weisen Vahrenholt und Lüning zu Recht darauf hin, dass die Atlantische Multidekadische Oszillation und die Pazifische Dekaden-Oszillation (Bild S. 81) die globale Mitteltemperatur auf und ab treiben können. Diese werden aber – anders, als die Autoren behaupten – in den IPCC-Berichten keineswegs vernachlässigt. Ozeanische Oszillationen sind in den Computermodellen zur Simulation des Klimas enthalten und gehen, nachdem die Modelle an Beobachtungsdaten geeicht wurden, mit in die Klimaprognosen des IPCC ein. Wohl hegen manche Forscher, etwa Judith Curry vom Georgia Institute of Technology, Zweifel an der Güte der Modelle und des gesamten Verfahrens und halten darum die IPCC-Warnungen für übertrieben. Das haben die Buchautoren aber nicht herausgearbeitet.

Das grundsätzliche Problem des Buchs liegt darin, dass Vahrenholt und Lüning sich nicht gut genug in der Klimaforschung auskennen. Daher stolpert man über viele Ungenauigkeiten, Missverständnisse und Fehler. So behaupten die Autoren auf S. 25, der IPCC habe prognostiziert, dass die Temperaturen pro Jahrzehnt um 0,2 Grad Celsius zunehmen würden, doch in den letzten Jahren sei ja kein Temperaturanstieg mehr zu verzeichnen gewesen. Haben sie den Klimarat bei einer Fehleinschätzung erlappt? Nein – richtig ist, dass der IPCC unter bestimmten plausiblen Annahmen für die kommenden 20 Jahre einen gemittelten Anstieg von 0,2 Grad pro Jahrzehnt vorhergesagt hat. Er kann durchaus von jahrelangen Erwärmungspausen (wie seit 2002) unterbrochen werden.

Nichts spricht dagegen, auf noch offene Fragen in der Klimaforschung hinzuweisen. Es gibt zweifellos auch

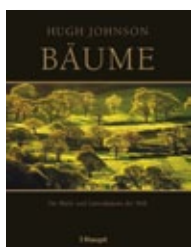
Mängel in der IPCC-Berichterstattung. Fehlerhafte Analysen und verwegene Prognosen helfen aber niemandem weiter. Das Autorenduo hat es damit verpasst, einen aufklärenden Beitrag zur Klimadebatte zu leisten.

Es ist bedauerlich, dass dieses mangelbehaftete Buch so viel Aufmerksamkeit gefunden hat. Die Polarisierung der Debatte über die globale Erwärmung hat dadurch wieder zugenommen.

Man darf gewiss auch über die Effektivität der Maßnahmen streiten, die im Zuge der Energiewende getroffen werden. Vahrenholt und Lüning legen im letzten Kapitel den Finger in diese Wunde. Hätten sie sich doch nur auf das Thema beschränkt! An der Wissenschaft jedoch haben sich die beiden Autoren verhoven.

Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.



Hugh Johnson

Bäume

Die Wald- und Gartenbäume der Welt

Aus dem Englischen von Bettina Borst,
Martina Walter und Frank von Berger.

Haupt, Bern 2011. 400 S., € 59,90

BOTANIK

Blumenesche als Barockmätresse

Der Weinexperte Hugh Johnson hat zu den Bäumen ein sehr individuelles und genießerisches Verhältnis.

Dieses Buch ist nicht neu. Der Brite Hugh Johnson, der im deutschen Sprachraum eigentlich nur als Verfasser eines Standardwerks über Wein bekannt ist, hat das Original »Trees« in der ersten Version bereits 1973 geschrieben. Es ist bei Weitem nicht das erste Buch zum Thema. Anders als der Untertitel behauptet, behandelt es nicht alle Wald- und Gartenbäume der Welt, sondern nur die wichtigsten, mit Schwer-

punkt auf den gärtnerisch interessanten. Es ist – entgegen dem Klappentext – kein Standardwerk für Gärtner, Forstwirte und Landschaftsarchitekten, sondern wendet sich an den interessierten Laien. Und dem ersten Eindruck – groß, schwer und voller opulenter Bilder – zum Trotz ist es kein »Coffee Table Book«, das man bewundernd durchblättert und dann ungelesen beiseitelegt. Gleichwohl ist es ein Prachtwerk,

was auch der britische Historiker und Baumentor Thomas Pakenham im Vorwort bestätigt.

Man kann das Buch beim Blättern, Lesen und Anschauen genießen. Man kann es als Nachschlagewerk benutzen, beispielsweise um den Unterschied zwischen Sequoia und Thuja kennen zu lernen; systematische Vollständigkeit und absolute Korrektheit darf man nicht erwarten. Aber das Wertvollste, was den »Baum-Johnson« vor den meisten Baumbüchern auszeichnet: Er vermittelt nicht nur Wissen, sondern vor allem auch Freude; und er regt zur Pflanzung und Pflege von Bäumen im eigenen Garten an.

Das im ersten, etwa 70-seitigen Teil ausgebreitete Allgemeinwissen geht sehr in die Breite, aber mangels Raum kaum in die Tiefe. Aufbau und Funktion von Stamm, Ast, Blüte und Frucht sind übersichtlich dargestellt. Es folgen kurze Artikel über Wurzel und Boden, Waldbewirtschaftung, den Einfluss des Wetters, die Eiszeiten und – einzigartig – acht Seiten über Persönlichkeiten, Forscher und Sammler, die sich in irgend-

einer Weise um die Sache der Bäume verdient gemacht haben. Eine Johnson-Seite entspricht dabei immerhin zwei Seiten normaler Buchgröße.

Der zweite Teil, etwa 280 Seiten, beschreibt die wichtigsten Baumarten oder Artengruppen und entspricht damit für sich genommen schon einem üblichen Baumbuch. Großformatig werden einzelne Baumarten oder typische Wälder gezeigt, kleinere Bilder verdeutlichen Einzelheiten von Blatt und Frucht, Reihen von Zeichnungen erlauben Vergleiche von Arten oder Formen, Baum-silhouetten illustrieren die Größenverhältnisse und das Wuchsverhalten. Alle Bilder sind farbig und von vorzüglicher Qualität.

Der dritte Teil mit etwa 50 Seiten ist ein Tabellenwerk mit nützlichen Hinweisen zu Baumeigenschaften, Standortansprüchen und Verwendung.

Wer das Buch als Anleitung für die Arbeit im eigenen Garten nutzen möchte, stößt vielleicht beim Blättern auf ein Bild der Blumenesche und liest: »Sie präsentiert im Frühjahr ihre herrlichen cremeweißen Blüten wie die Barockmätresse Nell Gwynn und ihre Zeitgenossen ihre von Samt gerahmten Dekolletés auf den Wänden ehrwürdiger Gemädegalerien. Der eher kleine, reich belaubte Baum ist eine ausgezeichnete Art für den Landschaftsgärtner.« Die sachlichen Einzelheiten wie der lateinische Name (*Fraxinus ornus*), die Wuchshöhe (bis zu 15 Meter, 4,5 Meter nach 20 Jahren), die Standortansprüche (sonnig), die Eigenschaften von Krone, Blättern, Blüten und Früchten sowie Hinweise zur Pflanzung und Pflege finden sich im Tabellenteil, mit dessen Hilfe man sich auch systematisch den zu den eigenen Vorstellungen passenden Baum herausuchen kann.

Das Buch ist ein Schatzkästchen bereichernder Nebenbemerkungen. Die Blüten-Kirsche »ist mehr ein Ereignis als ein Baum und bildet den Höhe-

punkt im Jahreskreis; sie wirkt verführerisch und unschuldig zugleich«. Die Platane »verbindet Eleganz mit Weltgewandtheit«. »Die Kiefern folgen ihrer Evolutionstaktik und beschäftigen so die Botaniker.« »Nach Thukydides sind die Völker des Mittelmeerraums dank dem Wein und der Olive der Barbarei entkommen.« »Die Pappel hieß bei den Römern *populus*, Volk, weil sie nach Horaz zur Beschattung öffentlicher Versammlungsplätze angepflanzt wurde.«

Johnson behandelt seine Bäume gern als Wesen mit einem individuellen Charakter. Da finden sich eigenwillige Attribute wie »Schönheitskönigin«, »wandlungsfähige Exzentriker«, »gigantisches Gemüse«, »mit ehrenwerter Er-

scheinung« oder »mit Schrullen und Marotten«.

Gelegentlich schiebt der Autor kleine, isolierte praktische oder wissenschaftliche Einzelheiten ein. Wie nahe am Stamm soll ein Ast abgeschnitten werden? Die Birnensorte *Conférence* ist noch immer die erfolgreichste im Handel; die Zeit ihres perfekten Reifegrads dauert nur 24 Stunden. Die Schwarze Walnuss (*Juglans nigra*) vergiftet benachbarte Bäume, besonders Obstbäume, durch einen Stoff aus ihren Wurzeln. Die Mehlbeere ist auf Grund moderner DNA-Analysen nicht mehr derselben Gattung *Sorbus* zuzuordnen wie die Vogelbeere, sondern einer neu eingerichteten Gattung namens *Aria*.



Jahrzehntelang wächst sie geradeaus nach oben, dann verliert sie den Haupttrieb und bildet den typischen abgeflachten Wipfel: die Libanon-Zeder.



JOHNSON-BÄUME-HAUPT-VERLAG 2011 / SALING-HALL-PRESS

Die größte und älteste Hängeform der Frühlingskirsche *Prunus pendula* (hier in La Torrechia bei Rom) überspannt mit ihren Zweigen mehr als 25 Meter.

Positiv für praktisch orientierte Benutzer ist das dauernde Eingehen auf die Größe und das Wuchsverhalten der Bäume. Wer bei der Pflanzung schon beachtet, wie groß ein Baum in 10, 20 oder 100 Jahren sein wird, kann viel Schaden

und Ärger vermeiden. Vielen Architekten täte dieses Wissen gut!

Das Buch enthält weder Herkunftangaben für Darstellungen und Tabellen noch ein Literaturverzeichnis. Der Kleindruck von Bildtexten und Tabellen und

der leidige Graudruck machen das Lesen unnötig schwer. Die Übersetzung ist stilicher und scheint fehlerlos zu sein.

Das krasse Gegenstück zum gleichen Thema ist »The Secret Life of Trees« von Colin Tudge (2006). Bei ähnlicher inhaltlicher Breite geht es grundsätzlich, aber in knappstem Stil, in die Tiefe, verzichtet fast völlig auf Illustrationen und ganz auf persönliche und unterhaltende Zusätze. Kompakte 350 Gramm gegenüber ausschweifenden zwei Kilogramm!

Wer mit dem vorliegenden Buch den Geist Johnsons aufnimmt, wird mit der Zeit nicht nur vielseitig, sondern auch wagemutig werden und Freude an Bäumen und der Arbeit mit ihnen gewinnen. »Bäume sind ein wunderbares Gemeingut. Überall kann man sich über sie freuen, ohne einen Cent zu bezahlen.«

Felix Thommen

Der Rezensent hat an der ETH Zürich Forstingenieur studiert, war Leiter eines Kreisforstamts und ist seit 1993 im Ruhestand.



Worldwatch Institute (Hg.) in Zusammenarbeit mit der Heinrich-Böll-Stiftung und Germanwatch

Zur Lage der Welt 2011

Hunger im Überfluss

Neue Strategien gegen

Unterernährung und Armut

Oekom, München 2011. 288 S., € 19,95

WELTERNÄHRUNG

Kleine Schritte gegen den Hunger

Immer mehr Menschen, immer weniger Anbaufläche: Wie können wir zukünftig genügend Nahrungsmittel für alle Menschen bereitstellen? Viele Hilfsprojekte geben Beispiele für konkrete Maßnahmen – doch es bleibt viel zu tun.

Im Jahr 2009 wurden weltweit über 2,5 Milliarden Tonnen Getreide geerntet. Das macht für jeden der sieben Milliarden Erdbewohner ziemlich genau ein Kilogramm pro Tag. An der schieren Menge liegt es also nicht, dass etwa eine Milliarde Menschen Hunger leiden, und das mit steigender Tendenz.

Über die Hälfte aller Nahrungsmittel kommt gar nicht bis zum Endverbraucher. Ein Großteil der Produktion wird als Futtermittel genutzt (35 Prozent weltweit, in Deutschland sogar 62 Prozent). Manches verarbeitet die Industrie, zum Beispiel zu Biokraftstoff. Und vieles landet im Müll statt auf dem Tel-

ler – je nach Art des Lebensmittels bis zu 75 Prozent der gesamten Produktion.

Eine naheliegende Lösung des Hungerproblems sah man lange darin, die Menge der produzierten Nahrungsmittel zu erhöhen. Genau das haben wir in den letzten Jahrzehnten getan, allerdings ohne darauf zu achten, ob der Anbau nachhaltig ist oder unsere Konsumgewohnheiten fair sind. Aber unter den Bedingungen des Klimawandels werden die bisherigen Bemühungen mit dem Wachstum der Weltbevölkerung nicht Schritt halten. Um im Jahr 2050 etwa neun Milliarden Menschen auf der Welt zu ernähren, müssen heute die Weichen gestellt werden, meinen die Herausgeber.

Der Bericht »Zur Lage der Welt«, den die internationale, in Washington ansässige Forschungsorganisation Worldwatch Institute jedes Jahr herausbringt, konzentriert sich 2011 auf Afrika, weil dort einerseits ein großer Teil der Bevölkerung Hunger leidet, andererseits viele Projekte zeigen, wie nachhaltige Entwicklung in der Landwirtschaft aus-

sehen kann. Die deutsche Version, an der das Entwicklungspolitikinstitut Germanwatch und die den Grünen nahestehende Heinrich-Böll-Stiftung beteiligt waren, enthält Ergänzungen und Informationen speziell zu Deutschland und der Europäischen Union.

Über 30 Autoren, allesamt in Hilfsorganisationen oder Stiftungen beschäftigt, liefern eine detaillierte Analyse der Weltagrarpolitik und ihrer Folgen. Gerade das Kapitel von Christine Chemnitz (Heinrich-Böll-Stiftung) und Tobias Reichert (Germanwatch) macht deutlich, wie entscheidend sich die EU-Agrarpolitik auf den internationalen Markt auswirkt: Dadurch, dass die EU ihre teuren Produkte durch Subventionen auf dem Weltmarkt konkurrenzfähig macht, sinken dort die Preise immer weiter. Und ganz abgesehen davon, dass diese Maßnahmen so, wie sie ausgestaltet sind, die großen Betriebe gegenüber den kleinen bevorzugen, treffen sie gerade Afrika besonders hart. Dort nämlich wer-

den landwirtschaftliche Erzeugnisse häufig nicht nur nicht subventioniert, sondern sogar besteuert, mit dem Effekt, dass es billiger ist, Nahrungsmittel zu importieren, als sie im eigenen Land anzubauen. Das wiederum nimmt vor allem der ländlichen Bevölkerung in armen Regionen die Existenzgrundlage.

Schon heute ist der Agrarsektor für knapp 15 Prozent der Treibhausgase verantwortlich. Rechnet man zusätzlich zu den direkten Emissionen die Entwaldung und den Energieverbrauch, der für die Düngemittelherstellung nötig ist, kommt man sogar auf 30 Prozent. Aber gerade die Landwirtschaft leidet unter veränderten klimatischen Bedingungen, die durch Treibhausgase ausgelöst werden. Was also tun?

Hier liefern die Autoren zwar keine neuen Lösungen, doch sie zeigen, wie wir durch viele kleine Schritte die Landwirtschaft weltweit nachhaltig gestalten können. Dazu zählen Fruchtwechsel und biologische Schädlingsbekämpfung

für einen gesunden, nährstoffreichen Boden ebenso wie Bäume und Sträucher am Rand der Nutzflächen, die den natürlichen Nährstoffkreislauf aufrechterhalten und gleichzeitig als Habitat für Tiere dienen. Nachdem Bauern in Malawi um ihre Felder herum Stickstoff speichernde Bäume anpflanzten, die den Boden auf natürliche Weise mit Nährstoffen anreicherten, konnten sie ohne Zusatz von anderen Düngemitteln die vierfache Maisernte einfahren.

Besonders wichtig ist es, traditionelle Anbau- und Konservierungsmethoden wiederzubeleben. Noch immer gehen in armen Ländern 25 bis 50 Prozent der Ernte allein durch schlechte Lagerung und Schädlinge verloren. Mit Hilfe neuartiger Lagersysteme konnte man in Westafrika die Kuhbohne, eine der wichtigsten regionalen Nutzpflanzen, besser vor Fäulnis schützen.

In Afrika liegt die effektive Niederschlagsmenge um 50 Prozent unter dem globalen Mittelwert. Und nur 20

Praktisches aus dem Lesershop



Sammelkassette

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



Jahrgangs-CD-ROM SdW 2011

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **Spektrum.de**-Archiv mit zirka 11 000 Artikeln. **Spektrum.de** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); erhältlich ab Ende Februar 2012. ISBN 978-3-941205-92-5



Christian Hesse

Achtung Denkfalle. Die erstaunlichsten Alltagsirrtümer und wie man sie durchschaut

C.H.Beck, München 2011. 224 S., € 18,-

Christian Hesse hält es nicht in den Grenzen seiner Wissenschaft, der Stochastik. Immer wieder schreibt der Mathematiker von der Universität Stuttgart vergnügliche Bücher, das neueste über unsere geläufigsten Selbsttäuschungen, die »Alltagsirrtümer«. Das bekannteste Beispiel, das immer wieder mal die Öffentlichkeit beschäftigt, ist das »Ziegenproblem«: Hinter welcher von drei Türen steckt die Ziege, und wie hat man die Wahrscheinlichkeiten dafür einzuschätzen? Anderen Fehlschlüssen unterliegen wir bei Fragen von Leben und Tod (»Wenn du denkst, der Rückgang der Störche hat die Geburtenrate verringert«, »Warum man wahrscheinlich doch keinen Krebs hat, selbst wenn der Krebstest gerade positiv ausfiel«). Nicht alle Fälle sind neu, aber Hesses Aufklärungen sind immer witzig und originell – beste Unterhaltungsmathematik.

REINHARD BREUER



Felice C. Frankel, George M. Whitesides

Der Nanokosmos. Die wunderbare Welt der kleinsten Dinge

Aus dem Englischen von Michael Haupt. Primus, Darmstadt 2011. 176 S., € 29,90

George M. Whitesides ist einer der führenden Nanotechnologie-Experten, Felice C. Frankel eine renommierte Wissenschaftsfotografin. Die Bilder sind zum Teil fantastisch: Winzige Polymerfinger unter dem Elektronenmikroskop scheinen nach kleinen Kunststoffkugeln zu greifen; zwei Wasserstrahlen prallen zusammen und bilden blattartige Fließstrukturen. Doch das sind die Sahnehäubchen: Oft gelingt es nicht, den Inhalt des Texts im Bild aufzufangen. Die Fotografie eines gläsernen Apfels, dem durch Nachbearbeitung ein würfelförmiger Schatten verpasst wurde, kann die Paradoxien der Quantenmechanik nicht wirklich veranschaulichen. In der deutschen Übersetzung finden sich ungewöhnliche Begriffe wie »Selbstassemblierung«; und ausgerechnet auf dem Buchtitel ist im Namen des Autors ein Schreibfehler. Ein nettes Buch – mit kleinen Schönheitsfehlern.

JANINA FISCHER



Richard David Precht

Warum gibt es alles und nicht nichts? Ein Ausflug in die Philosophie

Goldmann, München 2011. 208 S., € 16,99

Dieses Buch ist so etwas wie eine Kinder Ausgabe von »Wer bin ich, und wenn ja, wie viele?« (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 100). Der Philosoph und – inzwischen – Bestsellerautor Richard David Precht wandert mit seinem Sohn Oskar durch Berlin und findet an vielen Stellen Anlässe zum Philosophieren. Bei den Flughunden im Tierpark Friedrichsfelde liegt die berühmte Frage von Thomas Nagel nahe, »wie es ist, eine Fledermaus zu sein«. Dagegen wirkt das viel zitierte moralische Dilemma »Soll man die Weiche stellen, damit der außer Kontrolle geratene Güterzug nur einen an Stelle von fünf Menschen umbringt?« ausgerechnet im neuen Berliner Hauptbahnhof, wo es gar keine Rangiergleise gibt, etwas an den Haaren herbeigezogen. Einerlei: Precht liefert eine Blütenlese der heutigen Philosophie, endlich mal ohne Platon, dafür mit langen Exkursen in die Verhaltensforschung, in kindgerechter, gleichwohl auch für Erwachsene durchaus eingängiger Sprache.

CHRISTOPH PÖPPE



David Eagleman

Inkognito. Die geheimen Eigenleben unseres Gehirns

Aus dem Englischen von Jürgen Neubauer. Campus, Frankfurt am Main 2012. 328 S., € 24,99

Unter den vielen populärwissenschaftliche Büchern, die Laien eine Einführung in die moderne Hirnforschung vermitteln möchten, ist dieses eins der besseren. David Eagleman, Neurowissenschaftler aus Houston, erläutert die bekannten Sachverhalte anschaulich und unterhaltsam, oft an Alltagsphänomenen: die große Bedeutung des Unterbewussten, faszinierende Sinnestäuschungen, Kuriositäten aus der Neurologie à la Oliver Sacks. Letztere leiten nahtlos über zu den brisanten Fragen nach freiem Willen und strafrechtlicher Schuld, wie sie seit einigen Jahren im Licht der Hirnforschung diskutiert werden. Eagleman argumentiert gegen das konventionelle Schuldverständnis und schlägt ein »präfrontales Training« als biologische Rehabilitationsmaßnahme für Straftäter vor. Die recht tief greifende Erörterung solcher juristischer Folgen neurowissenschaftlicher Erkenntnisse hebt das Buch denn auch von den vielen anderen seiner Art ab.

HARTWIG HANSER

Prozent davon werden zu »blauem Wasser«, das als Fluss-, See- oder Grundwasser der Landwirtschaft zur Verfügung steht. Dazu kommt ungefähr einmal pro Jahrzehnt eine extreme Dürre, die gerade in ertragsschwachen Gebieten zu vollständigen Ernteaussfällen führt. Auch ohne Dürre ist die Wasserbeschaffung für die Menschen in trockenen Regionen sehr belastend, vor allem für Frauen und Mädchen, die täglich mehrere Stunden damit verbringen, Wasser aus weit entfernten Gebieten zu holen.

Hier versprechen aktuelle Projekte zur besseren Versorgung und effizienteren Nutzung Abhilfe. Je nach Region bietet es sich beispielsweise an, Nebelwasser mit Netzen zu gewinnen oder Grundwasser hochzupumpen.

Einfache Mittel wie Sickerschächte, Dämme oder Regenrinnen können gerade in ertragsschwachen Regionen große Fortschritte erzielen. Immerhin steigt der Ertrag einer Nutzpflanze proportional zur verfügbaren Menge an Wasser, solange dies die einzige knappe Ressource ist. Und zum besseren Timing der Bewässerung kann man den Bauern über Internet oder Telefon die aktuellen, aus Satellitenaufnahmen bestimmten Bodenfeuchtigkeitswerte mitteilen.

Es gibt viele gute Ideen für eine ertragreiche und nachhaltige Landwirtschaft der Zukunft. Das klingt schon fast nach einem Happy End; aber noch ist viel zu tun, bis die guten Ideen bei den Bauern ankommen und für sie realisierbar werden.

Indem die Autoren die Fakten in Geschichten aus dem Alltag der Betroffenen einbetten, lassen sie den Leser begreifen, wo die Probleme liegen, anstatt nur abstrakte Thesen aufzulisten. Das etwas ungute Gefühl, das sich beim Lesen bisweilen einstellt, ist sicher gewollt. Gleichzeitig zeigen die Autoren aber auch in jedem Kapitel Auswege, in der Hoffnung, dass die Industrieländer, die ja die Hauptverantwortung für den Klimawandel tragen, ihre moralische Verpflichtung den ärmeren Ländern gegenüber einlösen, da diese am meisten unter den Folgen der klimatischen Veränderungen leiden.

Janina Fischer

Die Rezensentin ist promovierte Chemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.



Siegfried Bär

Der Untergang des Hauses Rascher

Ein Dokumentarroman

Selbstverlag, Freiburg 2011, zu beziehen über
amazon.de oder laborjournal.de. 529 S., € 15,-

ZEITGESCHICHTE

Der Massenmörder und der Kartoffelbrei

Eine Biografie über einen der grausamsten NS-Verbrecher scheitert an dem Versuch, komisch zu sein.

Genau genommen ist der Mediziner Sigmund Rascher (1909–1945) ein Opfer des NS-Regimes. Kurz vor Kriegsende wurde er im Konzentrationslager Dachau erschossen, allem Anschein nach auf telefonischen Befehl aus München. Warum und auf wessen Betreiben, ist nicht überliefert.

Wie er in die Fänge der SS geriet, ist allerdings bekannt – und eine überaus bizarre Geschichte. Seine Frau Caroline (»Nini«) hat die vier Knaben, die sie als ihre Söhne aufzog, nicht geboren, sondern ihren leiblichen Müttern abge-

kauft oder mit List und Tücke weggenommen. Zweimal hat sie sogar, als ihr wegen dieser Taten Ungemach drohte, ein Baby zurückgegeben und sich ein anderes als Ersatz beschafft. Den ermittelnden Kriminalpolizisten erschien die Vorstellung, dass Nini ihrem eigenen Ehemann vier Schwangerschaften erfolgreich vortäuschen konnte, so abwegig, dass sie ihn für einen Mittäter hielten und in Haft nahmen.

Für ein Strafverfahren reichten die Beweise nicht aus. Aber anscheinend diente sich Rascher Anfang 1945 wäh-

rend seiner Odyssee durch verschiedene Gefangenenlager einem britischen Mitgefangenen für die Zeit nach dem Krieg als wissenschaftlicher Mitarbeiter an. Das kam vermutlich durch eine Spionin höheren Stellen zu Ohren, die es als Hochverrat interpretierten.

Derselbe Mann, der sich von seiner Frau zum Trottel machen ließ, dem nach allen Quellen »Gutmütigkeit und eine überdurchschnittliche Hilfsbereitschaft« zu bescheinigen ist und der heute »ein beliebter Arzt der alternativen Szene geworden« wäre, war einer der schlimmsten Massenmörder der Nazizeit. Ausgerechnet in Dachau, wo er später selbst umgebracht wurde, unternahm er an Häftlingen wissenschaftliche Versuche zu den Wirkungen von Unterdruck in (simulierten) großen Flughöhen. Dabei brachte er seine Versuchspersonen qualvoll zu Tode und sezierte sie eine halbe Stunde später, um die tödlichen Luftembolien zu dokumentieren. Andere setzte er der Kälte aus, bis ihre Arme und Beine stocksteif gefroren waren, und erprobte verschiedene Methoden der Wiedererwärmung; auch von diesen Versuchen endeten viele tödlich. Die geforderte Geheimhaltung der Experimente erwies sich als schwierig, weil die Unterkühlten vor



Sigmund Rascher mit dem untergeschoenen Sohn Peter (Porträt von Rebecca Tehrani nach einer Fotografie)

Schmerzen so laut brüllten, dass es durch das ganze Lager schallte.

Die schiere Anzahl der Opfer Raschers, schätzungsweise 200, verblasst gegenüber den Todesraten von Auschwitz, wo täglich 20-mal so viele Menschen vergast wurden. Dennoch neigt man dazu, dem Arzt, der seine Opfer mit hohem persönlichem Einsatz und mit großer Grausamkeit im Namen der Wissenschaft zu Tode brachte, einen viel übleren Charakter zuzuschreiben als den Beteiligten der Mordmaschine in den Vernichtungslagern.

Es gibt also genug Anlass, das Leben Sigmund Raschers genau unter die Lupe zu nehmen – und reichlich Material dafür: Seine mörderischen Menschenversuche sind nach dem Krieg im »Ärzteprozess«, einem der Nürnberger Prozesse, ausführlich zur Sprache gekommen; seine Korrespondenz mit seinem Förderer Heinrich Himmler, dem »Reichsführer SS«, ist ebenso erhalten geblieben wie sein privater Briefwechsel, die Akten des Strafverfahrens wegen des Kinderraubs sowie die Äußerungen etlicher Zeitzeugen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Der Biochemiker und Herausgeber des »Laborjournals« Siegfried Bär, bürgerlich Hubert Rehm, hat diesen Berg an Dokumenten überaus gründlich durchgearbeitet, weitere umfangreiche Recherchen unternommen und das Ergebnis im vorliegenden Werk zusammengefasst. Gegenüber der ersten Version von 2006 hat es seinen Umfang reichlich verdoppelt. Mit vielen, teilweise sehr langen Zitaten gelingt es ihm, das Leben Sigmund Raschers in großer Detailtreue nachzuzeichnen.

Wie erklärt es sich, dass dieser nette, kleine Mediziner zum Massenmörder wurde? Nach reichlich 500 Seiten ist das ernüchternde Ergebnis: gar nicht. Herkunft aus dem deutschen Bildungsbürgertum; Scheidung der Eltern mit anschließendem, relativ mildem Familienzwist? Viel zu gewöhnlich, um für diese außerordentliche Verbrecherkarriere als Erklärung herzuhalten. Der Einfluss der Ehefrau mit ihrer besonderen Beziehung zu Himmler? In Bärs Darstellung erscheint sie raffgierig, intrigant und verlogen. Aber ausgerechnet den mehrfachen Kinderraub beging sie, um ihren geliebten Sigmund an sich zu binden, und mit dessen mörderischer Berufstätigkeit hatte sie offensichtlich nichts zu tun. Anthroposophische Neigungen in der Familie? Bär nutzt diese Tatsache, um die Anthroposophie mit Hohn und Spott zu übergießen; aber sie hat mit der Nazi-Ideologie nicht mehr gemein als das deutsche Bildungsbürgertum insgesamt.

Rascher ging allerdings bei dem Anthroposophen Ehrenfried Pfeiffer (1899–1961) in die Lehre und praktizierte dessen Verfahren der Kupferchloridkristallisation – mit Erfolg, wie Pfeiffer selbst ihm bescheinigte. Nun kann man nach allgemeiner Überzeugung aus der Gestalt der Kristalle nichts von den »Lebenskräften« herauslesen, die in den der Kupferchloridlösung beige-fügten Substanzen stecken sollten. Mit gutem Grund vermutet Bär daher, diese Beschäftigung habe Raschers wissenschaftliche Maßstäbe für sein Leben verdorben.

In der Tat war Rascher ein schlechter Wissenschaftler. Es fehlte ihm an eigen-

nen Ideen; statt sich auf ein Projekt zu konzentrieren, verzettelte er sich in Geschäftigkeit. Seine Fachkollegen hielten nicht viel von seiner Arbeit – aber nicht etwa, weil er dabei massenhaft Menschen umbrachte, sondern weil er seine Morde nicht wissenschaftlich korrekt dokumentierte und auswertete. Am Ende entzogen sie ihm die Ressourcen für seine Experimente. Darauf suchte Rascher fieberhaft neue Betätigungsfelder – und nahm, was er kriegen konnte, unter anderem die Idee eines Dachauer Häftlings für einen Kartoffelbrei, der wegen besonderer Nährhaftigkeit, Haltbarkeit oder aus welchen Gründen auch immer den Endsieg befördern sollte.

Warum also quälte Sigmund Rascher im Namen der Wissenschaft mehrere hundert Menschen zu Tode? Weil er dazu Gelegenheit hatte und ihm nichts Besseres einfel. Damit ist seine Geschichte ein weiterer Fall der »Banalität des Bösen«, die Hannah Arendt am Beispiel Adolf Eichmanns, des bürokratischen Planers der Judenvernichtung, so wirkungsvoll in Worte gefasst hat.

Siegfried Bär hat mit seiner Materialsammlung ein höchst verdienstvolles Werk getan – und es durch seine Darstellung verdorben. Zum einen nahm er allzu viel Belangloses mit ins Buch auf; zum anderen versucht er, die Geschichte durch einen ironisch-besserwisserischen Stil, fiktive Zitate auf Schwäbisch (Sigmund Rascher) beziehungsweise Bayrisch (Nini) und einige – angeblich sehr wenige – hinzugefügte Details wenigstens ein bisschen lustig zu machen. Das misslingt. Da hilft auch nicht, dass er sich dem Anspruch, der an eine Biografie zu stellen ist, listig mit dem Untertitel »Dokumentarroman« entzieht.

Ja, es ist zweifellos schwer, angesichts der grausigen Fakten das Gleichgewicht zwischen Einfühlen in die Hauptperson und kritischer Distanz zu wahren. Aber Siegfried Bär hätte es wenigstens versuchen sollen.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Andrew Stanton (Regie)

John Carter

Zwischen den Welten

Nach dem Roman »A Princess of Mars« von Edgar Rice Burroughs

Mit Taylor Kitsch und Lynn Collins

Walt Disney Studios Motion Pictures Germany, München.

Kinostart: März 2012. Freigegeben ab zwölf Jahren.

3-D, 130 Minuten

FANTASYFILM

Trubel auf dem Mars

Die Disney-Studios haben eine 3-D-Weltraumoper im Retrolook produziert.

Angelsächsische Schauspielernamen können in fremden Ohren komisch klingen. Johnny Depp zum Beispiel – aber der spielt so gut, dass niemand an einen Deppen denkt. Der Heldendarsteller des neuen Fantasyfilms aus dem Hause Disney läuft da größere Gefahr. Er heißt Taylor Kitsch.

Der langhaarige, topfit trainierte Muskelmann mimt John Carter, einen Soldaten der Konföderierten im Amerikanischen Bürgerkrieg, der nach der Niederlage der Südstaaten genug vom Militär hat. Auf der Suche nach Gold gerät der Abenteurer an ein Medaillon der Marsmenschen, das ihn auf deren Hei-

matplaneten teleportiert. Dort kommt ihm die geringere Schwerkraft zugute: Er kann ungemein große Sprünge machen und besiegt mit seinem durch Erdschwere gestärkten Körperbau ohne Weiteres vierarmige Marsmenschen. Unterwegs verliebt er sich in eine attraktive Marsprinzessin, greift erneut zu den Waffen und sorgt für den Sieg der guten Marsianer über die bösen.

Die Geschichte stammt vom Amerikaner Edgar Rice Burroughs (1875–1950), hier zu Lande vor allem als Erfinder des adeligen Dschungelmenschen Tarzan bekannt. Noch vor den Tarzanromanen veröffentlichte er 1917 »A Princess of Mars«, hatte damit Erfolg und schrieb zehn Fortsetzungen. Burroughs' Marsromane haben Sciencefiction-Autoren wie Robert A. Heinlein, Arthur C. Clarke und Ray Bradbury inspiriert; James Cameron erzählt in seinem 3-D-Film »Avatar« im Wesentlichen dieselbe Geschichte in modernisiertem Sciencefiction-Gewand. Im

ANZEIGE

chrismon plus

Das evangelische Magazin

**Zum Nachdenken,
Weiterdenken und Miteinanderreden.**

Jeden Monat Geschichten über Menschen in außergewöhnlichen Situationen, hintergründige Reportagen und fundierte Kommentare.

3 Hefte lesen Sie kostenlos.

Unser Dankeschön für Sie, wenn Sie nach dem Test chrismon plus weiterlesen: ein Jahreslos der Aktion-Mensch-Lotterie.

❖ **Bestellen Sie jetzt:**

Telefon **0800 / 7587537**, E-Mail leserservice@chrismon.de, oder im Internet unter www.chrismon.de/testen



Gleich sagt er was

Früher hätte Frank Büttner höchstens gestottert. Heute glänzt er auf der Bühne
Seite 14–18





Auf dem Mars bewegt man sich mit Luftschiffen fort (oben). Der Kampf des Helden gegen eine Kreuzung aus Affen und Eisbären (links) erinnert stark an den Film »Gladiator«.

deutschen Sprachraum erinnert der Plot unweigerlich an Karl May: Ein Bleichgesicht stolpert in eine fremde Kultur, verschafft sich durch Kampfstärke – als »Old Shatterhand« hier, als Weitspringer da – bei den Einheimischen Respekt, steigt zum Anführer auf und bewährt sich als Retter in der Not.

Wie »Avatar« ist »John Carter« ein tricktechnisch aufwändiger 3-D-Film. Was ist diesmal anders? Den Unterschied macht erstens die Vorlage, zweitens Disney.

Burroughs' Roman ist keine Science-fiction, sondern pure Fantasy. An der Frage, wie man zum Mars gelangt und ob es sich dort überhaupt leben lässt, hatte der Autor kein Interesse. Er suchte Spielraum für ein Abenteuer mit fantastischen Lebewesen in exotischer Szenerie. Darin sind ihm die Disney-Stu-

dios offenbar gern gefolgt. Regisseur Andrew Stanton hat zuvor Oscars für die optisch eindrucksvollen Trickfilme »WALL-E« und »Findet Nemo« erhalten, und visuelle Fantasie ist auch die Stärke von »John Carter«.

Der utopische Mars ähnelt auffallend den Nationalparks im US-Bundesstaat Utah, wo die Außenaufnahmen gedreht wurden: nackte Steinwüsten, weite Horizonte, atemberaubende Felsnadeln und tief eingegrabene Canyons. Darin tummeln sich per Computertrick vielerlei Fabelwesen, die sich vor allem durch die große Anzahl ihrer Gliedmaßen auszeichnen. Ein typischer Disney-Einfall ist ein vielbeiniges, hundeähnliches Tier, ein rasend schnell dahinkeuchendes Gemisch aus Mops und Kröte, das zwischendurch für Heiterkeit sorgt.

Schön ausgedacht sind die Flugmaschinen der Marsianer, die mit Sonnenenergie angetrieben werden und riesige Vogelflügel schwingen (Bild oben). Auch die unterschiedlichen Architekturen der Marsbewohner machen sich gut in den weiträumigen Landschaftsprospekten. Und das Brautkostüm der Marsprinzessin ist so raffiniert geschneidert, dass es für eine kirchliche Hochzeit auf der Erde nicht in Frage käme.

Mit solchen optischen Vorzügen kann »John Carter« durchaus punkten. In den besten Momenten ähnelt der Film einem verrückt querfeldein pressenden Roadmovie ohne Straße und Fahrzeug – nichts als pure Bewegung durch Traumgefilde. Leider stören immer wieder saudumme Dialogzeilen aus der untersten Klischeeschublade. Auch ödet der unweigerlich mit dem Niedermetzeln der Bösen endende Showdown arg an. Dass das Abschlachten von Außerirdischen einer Freigabe ab zwölf Jahren nicht entgegensteht, erscheint besonders fragwürdig.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

Damit aus Neugier Wissen wird.

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt **Spektrum neo**.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

 facebook

Bestellen Sie schon jetzt:

www.spektrum-neo.de



Interplanetarische Mikroorganismen

»Die Wirkung des Ultrahochvakuums (unter 10^{-7} Torr) auf Mikroorganismen ist von praktischem Interesse in Verbindung mit Fragen der Raumfahrt. D.M. Portner und Mitarbeiter berichten über ihre Versuche, die sie mit Sporen von *Bacillus subtilis* und *Aspergillus fumigatus* sowie mit Zellen von *Mycobacterium smegmatis* durchführten. Die Sporen- bzw. Zellsuspensionen wurden einem Vakuum von ca. 4×10^{-10} Torr bei 23–24° ausgesetzt. Nach 5 Tagen zeigte sich gegenüber Kontrollorganismen kein Abfall der Lebensfähigkeit. Aus diesen Untersuchungen kann geschlossen werden, daß Mikroorganismen auf nicht sterilisierten Raumschiffen den Transport durch den interplanetarischen Raum überstehen können.« *Naturwissenschaftliche Rundschau* 4, April 1962, S. 156

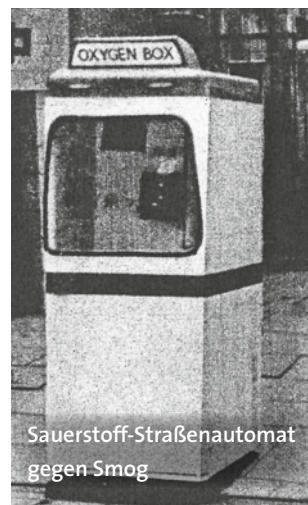
Magnetischer Lawinenhund

»Die Hochalpine Forschungsstation Jungfrauoch hat erstmals ein magnetisches Suchverfahren für Verschüttete demonstriert. Die neue Methode besteht darin, dass der Skifahrer und lawinenbedrohte Bergbewohner einen kleinen Magneten auf sich tragen. Dieser ist so bemessen, dass er mit dem neuen Suchgerät auf grössere Entfernung, unabhängig

von Temperatur, Luftdruck, Wind- und Schneeverhältnissen, nachgewiesen werden kann. Das Suchgerät bewährte sich ausgezeichnet. In ca. 15 Minuten wurden zwei in zwei bis drei Metern Tiefe vergrabene Männer an die Oberfläche gebracht.« *Neuheiten und Erfindungen* 318, April 1962, S. 52

Eine Tüte Luft

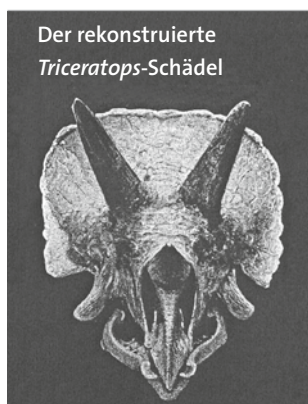
»In den Strassen der japanischen Stadt Osaka stehen Automaten, die nach Einwurf einer 10-Yen-Münze zwanzig Sekunden lang Sauerstoff verströmen. Wer Luftmangel verspürt, tritt an einen der Papiertrichter und atmet die frische Luft tief ein.« (Smogbedingt starben 1962 in Osaka vermutlich 30 Personen. *Die Red.*) *Populäre Mechanik* 79, April 1962, S. 36



Urige Dickschädel

»Triceratops ist in einem wunderbaren Exemplare in der großen Halle des Senckenbergischen Museums zu Frankfurt aufgestellt worden.

Die Ausmeiselung des Schädels ist eine Glanzleistung des Präparators, der in halbjähriger Arbeit den teilweise sehr zerbrochenen Schädel aus dem Gestein herauspräparierte und das fehlende Vorderteil ergänzte. Er arbeitete nach einem anderen Originalschädel, der, ebenfalls Eigentum des Museums, später aufgestellt werden wird. Beide Schädel wurden im Staate Montana, im Westen von Nordamerika, aufgefunden.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik* 16, April 1912, S. 334



Waschmaschine für die Straßen

»In einigen Städten Deutschlands werden seit einigen Jahren zur Reinigung der mit Asphalt gepflasterten Fahrdämme elektrisch betriebene Straßenwaschmaschinen benutzt. Für

den elektrischen Antrieb hat man sich nach eingehenden Versuchen entschieden, zunächst, weil dieser geruchlos und nahezu geräuschlos arbeitet, sowie, weil der Betrieb eines elektrischen Fahrzeugs wesentlich einfacher ist, wie derjenige eines Benzinfahrzeugs. Ganz besonders ausschlaggebend für den elektrischen Betrieb war es aber, daß er die Möglichkeit bot, die kurze gedrungene Form der Straßenwaschmaschine für Pferdebetrieb beizubehalten und sie auf dem denkbar kleinsten Raum wendbar zu machen.«

Elektrotechnische Zeitschrift 17, April 1912, S. 434

Strom gegen Rheuma

»Wärmewirkungen sind schon für Heilzwecke ausgenutzt worden. Bisher blieb jedoch die zugeführte Wärme in ihrer Wirkung nur auf die Haut und die direkt darunter befindlichen Schichten beschränkt. Jetzt hat man in den neuerdings in der drahtlosen Telegraphie benutzen sog. ungedämpften elektrischen Schwingungen Wechselströme zur Verfügung, die beim Einschalten bis in beliebige Tiefen sehr energische Wärmewirkungen hervorrufen, ohne daß irgendwelche Störungen im Organismus auftreten. Das Verfahren hat besonders in der Behandlung rheumatischer Leiden gute Erfolge gezeigt.« *Technische Monatshefte* 4, April 1912, S. 124

Wie Gerissenes wieder hinreißend wird



LINKS: DEUTSCHES MUSEUM, RECHTS: SUSEMIHL GMBH, FRANKFURT

Als Nylonstrümpfe noch teuer waren, reparierte die SUMA 55 Laufmaschen (rechts: Auszug aus der Bedienungsanleitung).



Die SUMA 55 besteht aus:

1. Maschine
2. Schuko-Stecker mit Zuleitung. (Verwenden Sie bitte eine Schuko-Steckdose, denn Sie vermeiden damit Rundfunkstörungen. Selbstverständlich ist die SUMA ohnehin ordnungsgemäß entstört.)
3. Spiralhalter für 2 Nadeln oder Nadel und Ziehfadengerät. Bei der letzten Serie befinden sich bereits zwei Nadelhalter vorne an der Maschine, so daß bei dieser Ausführung kein besonderer Nadelständer mitgeliefert wird.
4. Repassiernadel mit Verbindungsschlauch.
5. Ziehfadengerät mit Verbindungsschlauch.
6. Fußanlasser mit Kohle-Feinstregulierung.
7. Repassierbecher.
8. SUMA-Koffer (bei Kauf im Preis einbegriffen, bei Miete gegen Berechnung).
9. Diverse Ersatzteile: 2 Motorkohlen, 1 SUMA-Membrane, Verbindungsschlauch.

Welche Frau kennt das nicht? Da zieht man zu hastig die Feinstrumpfhose an oder streift zu nah an einer Kante entlang und hat schon eine Laufmasche. Genauer gesagt: Einer der Fäden wurde durchtrennt, aus denen das Kleidungsstück gestrickt ist; dieser Schaden pflanzt sich dann in einer Kettenreaktion fort. Heutzutage landen die unansehnlich gewordenen Objekte im Müll, noch vor wenigen Jahrzehnten aber war ein Paar Nylonstrümpfe ein Luxusgut. Anfang der 1950er Jahre kosteten sie durchschnittlich sechs Deutsche Mark – dafür musste ein Handwerker damals gut vier Stunden arbeiten. Sie wegwerfen kam also nicht in Frage. Der Schaden wurde stattdessen mit einer Laufmaschen-Hebe-maschine behoben, auch Repassiermaschine genannt (abgeleitet vom französischen »repasser« bedeutet repassieren so viel wie »Laufmaschen aufnehmen«). Die Reparatur erledigten Nähstuben und spezialisierte Werkstätten für wenige Pfennige.

Eine solche Maschine machte sich die Schlaufeneigenschaften der Wirkware zu Nutze, denn jede Masche ist in die jeweils vorherige eingehängt. Wenn eine davon reißt, verliert zwar die darunterliegende Masche den Zusammenhalt und das Unglück nimmt seinen Lauf, es lassen sich aber auch neue Maschen in die noch bestehenden Querräden einhängen. Dazu stülpte eine Repassiererin den Strumpf zunächst über ein becherförmiges Metallstück. Dann setzte sie eine spezielle Nadel an einer noch intakten Masche entlang der

aufgetrennten Spur an. Es handelte sich dabei um eine Zungennadel, wie sie in Strickmaschinen zur Fadenführung eingesetzt wird. Über einen kleinen, dünnen Schlauch wurde sie angeblasen und damit in Bewegung gesetzt. Wie eine Häkelnadel ließ sich auf diese Weise ein Faden durch die Masche führen und auf der anderen Seite wieder aufnehmen.

10 bis 15 Minuten benötigte eine erfahrene Repassiererin pro Strumpf, sofern nicht bereits zu viele Maschen gezogen waren. Anschließend vernähte sie das Ende der Laufmasche per Hand, was je nach Größe der Laufmasche und Material des Strumpfs durchaus sichtbar blieb. Die hier abgebildete Strumpf-Reparatur-Maschine SUMA 55 der Firma Susemihl von 1958 wurde mit einem Fußpedal bedient. Zusammen mit Zubehör wie Strumpfgarn und Nadeln fand sie in einem Köfferchen Platz. Die so ausgerüstete Repassiererin war daher mobil und konnte ihre Dienste vielerorts anbieten.

In der DDR war die Reparatur von Nylonstrümpfen und Strumpfhosen bis zur Wende gang und gäbe. Aber auch heute noch bieten Fachbetriebe in Deutschland und Österreich diesen Service an, um besonders hochwertige Kleidungsstücke zu retten.

Die promovierte Biologin **Margherita Lasi** absolvierte ein zweijähriges Volontariat am Deutschen Museum. Seit 2011 ist sie Kuratorin für Life Sciences.

Die Grenzen der Intelligenz

Kann sich das menschliche Gehirn zu einer immer leistungsfähigeren Denkmachine weiterentwickeln? Wahrscheinlich nicht – denn auf Grund physikalischer Gesetze dürften sich unsere kognitiven Fähigkeiten bereits nahe am evolutionär möglichen Limit bewegen



ADAM VOORHES



KEVIN BROWN, MONDRIJN THE STUDIOS

Die dunkle Seite der Milchstraße

Auf der Suche nach der Dunklen Materie stießen Astronomen auf eine merkwürdige Eigenschaft der Galaxis: ihren verbeulten Rand. Diese bisher unerklärte Deformation könnte zur Klärung eines der großen Rätsel der Kosmologie beitragen



DOMINIK BONATZ

Megalithen im Regenwald

Lange galten die riesigen Steine im Hochland von Sumatra als Zeugnisse einer prähistorischen Kultur, die offenbar nichts mit den Tempeln und Palästen des Tieflands gemein hatte. Nun haben Archäologen entdeckt: Beide Kulturen bedingten einander!

Wasserstoff als Energiespeicher

Aus Wasser oder Gas hergestellt, gespeichert, transportiert und schließlich in Brennstoffzellen zur Stromgewinnung verbrannt – Wasserstoff birgt das Potenzial, drängende Probleme der Energieversorgung zu lösen. Wenn es denn gelingt, bei all diesen Schritten die Kosten zu senken

HIV mit Gentechnik besiegen

Einige Menschen sind gegen HIV-Infektionen gefeit, weil sie ein Rezeptormolekül nicht ausbilden, mit dessen Hilfe das Virus Zellen befällt. Nun erproben Forscher, das betreffende Gen zu zerstören. Die ersten klinischen Studien scheinen Erfolg zu versprechen

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

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!



- 1** 12 Ausgaben zum Preis von nur € 84,- inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90
- 2** **2 in 1:** Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!
- 3** Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln
- 4** Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet
- 5** Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats

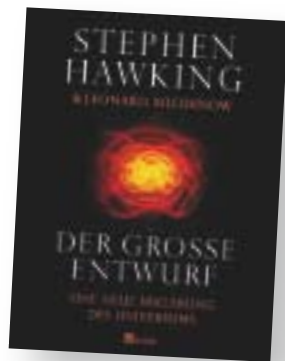
Produkt im April

Lampe:
»JellyFish«



- 6** Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Um das Universum auf fundamentalster Ebene zu verstehen, müssen wir nicht nur wissen, wie sich das Universum verhält, sondern auch: Warum gibt es etwas und nicht einfach nichts? Warum existieren wir? Das Buch »Der große Entwurf« versucht die Antworten zu geben.



Diese schön gestaltete Tasse erfüllt beim Kaffee- oder Teegenuss einen doppelten Zweck: Sie genießen Ihr Lieblingsgetränk und erlernen gleichzeitig durch das Design der Tasse das Periodensystem der Elemente. Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml



Der Tintenroller »Rollerball« aus der CERRUTI-Manufaktur verbindet höchste Verarbeitungspräzision und einzigartigen Schreibkomfort mit einem edlen Design. Mit auswechselbarer, schwarzer Mine.

Diese und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/abo
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751
mit der Bestellkarte anbei

Thema Nanotechnologie bei

Spektrum
DER WISSENSCHAFT



Als PDF direkt in Ihr Postfach

Lassen Sie sich schnell und kompakt über die wichtigsten Erkenntnisse im Bereich Nanotechnologie informieren! »Briefings Nanotechnology« erscheint monatlich digital und in englischer Sprache.

spektrum.com/briefings



SPEKTRUM-SPEZIAL – PHYSIK • MATHEMATIK • TECHNIK 1/2012

»Einblicke in die Nanowelt«

Die Nanotechnologie ist unaufhaltsam auf dem Vormarsch und wird das 21. Jahrhundert prägen. Schon heute hat sie Eingang in unseren Alltag gefunden. Dieses Spektrum-Spezial bietet eine Sammlung wichtiger Artikel zum Thema Nanotechnologie aus »Spektrum der Wissenschaft«, die schlaglichtartig den aktuellen Stand und die Zukunft dieses Gebiets beleuchten – und wie es unser aller Leben beeinflussen wird.

spektrum.de/spezialabo



Themenseite »Nanotechnologie«

Hier finden Sie eine Zusammenstellung der wichtigsten Beiträge aus den Magazinen und Onlineberichten des Verlags rund um das Thema Nanotechnologie.

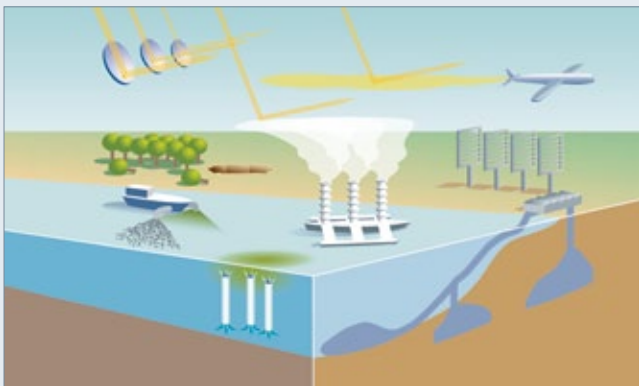
www.spektrum.de/nano

Klimawandel

Die Herausforderung
des 21. Jahrhunderts



- Deutschland im Treibhaus
- Climate Engineering als letzte Rettung?
- Schutz vor steigenden Fluten



4 Lässt sich die Erde künstlich kühlen?

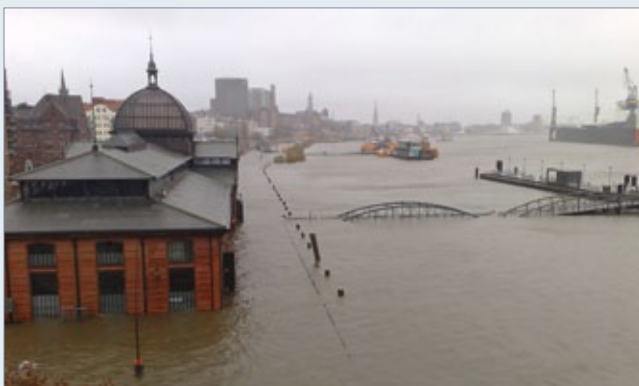
Thomas Leisner, Andreas Oschlies und Wilfried Rickels

Angeichts steigender CO₂-Emissionen gewinnen Vorschläge an Bedeutung, der Erderwärmung durch gezielte Eingriffe in das Klimasystem entgegenzuwirken. Wie realistisch sind sie, und welche Probleme werfen sie auf?

INTERVIEW

12 »Der Himmel wäre nie mehr blau«

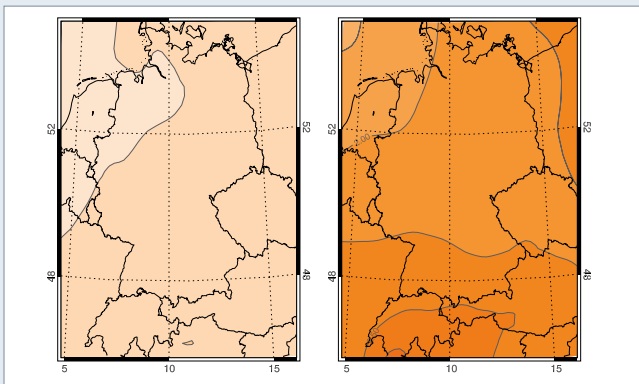
Konrad Ott von der Universität Greifswald erörtert die ethischen Aspekte des Climate Engineering



14 Klimawandel und Küstenschutz

Horst Sterr

Im Zuge der Erderwärmung steigt der Meeresspiegel. Besonders bedrohlich ist das für tief liegende Deltaregionen wie in Bangladesch und Vietnam sowie für Inselstaaten. Aber auch auf Deutschland kommen beträchtliche Herausforderungen zu



19 Wie hart trifft es Deutschland?

Paul Becker, Thomas Deutschländer und Florian Imbery

Wie hart wird der Klimawandel die Bundesrepublik treffen? Regionale Klimamodelle geben darüber inzwischen recht detailliert Auskunft. Demnach werden die Sommer heißer und die Winter feuchter – und die Gefahr extremer Niederschläge nimmt zu



24 Wärmeinseln im Treibhaus

K. Heinke Schlünzen

Städte haben ihr eigenes Klima. Deshalb ist wichtig zu wissen, wie sich die globale Erwärmung hier speziell auswirken wird – auch im Hinblick darauf, wie Städteplaner sich schon heute darauf vorbereiten sollten



Gerhard Trageser
Redaktionsleiter

Gegensteuern, anpassen oder herumdoktern?

Solange es nicht gelingt, den Ausstoß von Kohlendioxid weltweit zu senken, schwebt über der Erde das Damoklesschwert eines verhängnisvollen Klimawandels. Doch alle Anstrengungen, zu einer bindenden internationalen Vereinbarung zu kommen, waren bisher vergeblich. Das ist umso fataler, als das Klimasystem erst mit einer Verzögerung von Jahrzehnten auf veränderte Randbedingungen reagiert. So könnte es geschehen, dass der Menschheit demnächst keine Wahl bleibt, als sich drastisch veränderten Klimabedingungen, anzupassen – so gut es eben geht.

Wir Deutsche sind in der vergleichsweise komfortablen Lage, dass der Klimawandel bei uns keine wirklich verheerenden Auswirkungen haben wird (S. 19). Unsere Sommer dürften heißer und trockener, die Winter milder und feuchter werden. Misslicher ist die mutmaßliche Zunahme von Extremereignissen wie Starkregenfällen und schweren Stürmen. Auch könnte sich die Zahl der Tage, an denen das Quecksilber die 30-Grad-Marke überspringt, bis Ende des Jahrhunderts verdreifachen. Darunter werden vor allem Städte zu leiden haben, die auch bisher schon Wärmeinseln sind (S. 24).

Eine der größten Bedrohungen durch die Erderwärmung ist der Anstieg des Meeresspiegels (S. 14). Er gefährdet einige Länder in ihrer schieren Existenz. Aber auch in Deutschland nimmt die Wahrscheinlichkeit schwerer Sturmfluten zu, wogegen nur höhere Deiche helfen. Doch retten sie das Wattenmeer nicht, und der zu erwartende Verlust von Stränden wird auch den Küstentourismus hart treffen.

In dem Maß, wie die Weltgemeinschaft bei der Klimaretterung versagt, reifen Blütenträume einer künstlichen Kühlung der Erde (S. 4). Die Vorschläge sind teils abenteuerlich – wie die Installation riesiger Sonnenschirme im All. Die meisten wären wohl kostspieliger als eine Senkung der Kohlendioxidemissionen. Vor allem aber treiben sie den Teufel mit Beelzebub aus. So brächte der Eintrag von Sulfataerosolen in die Stratosphäre den sauren Regen zurück, und ein blauer Himmel würde für immer der Vergangenheit angehören (S. 12). Durch die großflächige Düngung von Ozeanen mit Eisen, um über künstliche Algenblüten der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen, könnte das gesamte marine Ökosystem aus dem Gleichgewicht geraten.

In diesem SPEKTRUM EXTRA, das in enger Kooperation mit der VolkswagenStiftung entstanden ist, befassen sich ausgewiesene Fachleute mit den Folgen des Klimawandels speziell für Deutschland und mit den Möglichkeiten, sie zu bewältigen oder abzumildern. Die meisten Autoren wirken auch an dem diesjährigen Forum »Mensch Natur Technik« (siehe Kasten) in Hannover mit. Das detaillierte Programm der drei Abende finden Sie unter www.spektrum.de/mnt.

Herzlich Ihr

Gerhard Trageser

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Forum MENSCH NATUR TECHNIK 2012



Klimamodelle – Wie berechenbar ist die Zukunft?

11.4.2012, 19.00 Uhr, Landesfunkhaus Niedersachsen, kleiner Sendesaal, Hannover

Mit Prof. Dr. Mojib Latif, Dr. Gabriele Gramelsberger, Dr. Paul Becker und Dr. Thorsten Mauritsen

Moderation: Dr. Reinhard Breuer

Geo-Engineering – Wem gehört das Wetter?

11.10.2012, 19.00 Uhr, Landesfunkhaus Niedersachsen, kleiner Sendesaal, Hannover

Mit Prof. Dr. Werner Aeschbach-Hertig, Prof. Dr. Konrad Ott, Prof. Dr. Ulrich Bathmann, Dr. Franz May und Prof. Dr. Sabine Schlacke

Moderation: Dr. Daniel Lingenhöhl

Anpassung unter Unsicherheit – Sind wir auf den Klimawandel vorbereitet?

11.12.2012, 19.00 Uhr, Landesfunkhaus Niedersachsen, kleiner Sendesaal, Hannover

Mit Prof. Dr. Heinke Schlünzen, Prof. Dr. Beate Ratter, Prof. Dr. Richard Pott, Prof. Dr. Horst Sterr

Moderation: Dr. Carsten Könneker

Lässt sich die Erde künstlich kühlen?

Eigentlich ist die Mission klar: Wir müssen den weltweiten Kohlendioxid-ausstoß begrenzen. Doch politisch lässt sich das Ziel womöglich nicht realisieren. Könnten wir der Erderwärmung stattdessen durch gezielte Eingriffe in das Klimasystem entgegenwirken?

Von Thomas Leisner, Andreas Oschlies und Wilfried Rickels

Dass der Mensch den Strahlungshaushalt der Erde beeinflusst, ist nichts Neues. Bis vor zwei Jahrhunderten geschah das aber praktisch nur durch Veränderung der Landoberflächen, und die Auswirkungen waren so gering, dass sie sich kaum von natürlichen Klimaschwankungen abhoben. Das änderte sich jedoch mit der industriellen Revolution. Von nun an gelangte durch

die zunehmende Nutzung fossiler Brennstoffe, die zur Energiegewinnung verfeuert wurden, rasch immer mehr Kohlendioxid (CO_2) in die Atmosphäre. Parallel dazu kam es zu einem rapiden Bevölkerungswachstum, das mit einer Intensivierung der Landwirtschaft einherging. Durch die vermehrte Nutztierhaltung und die künstliche Düngung stiegen vor allem die Emissionen von Methan (CH_4), aber auch die von Lachgas (N_2O) an.

Diese Entwicklung setzt sich bis heute fort, und es gibt kaum Anzeichen für eine Trendwende. Als Folge nehmen die Konzentrationen der drei Gase in der Atmosphäre weiter zu, wo sie die Wärmestrahlung in den unteren Luftschichten zurückhalten. Dadurch heizen sie die Erde allmählich auf. Der resultierende Klimawandel ist durch Messungen der globalen Luft- und Ozeantemperatur, der Schnee- und Eisbedeckung sowie des Meeresspiegels inzwischen klar belegt.

Da Kohlendioxid ein sehr stabiles Molekül ist, beträgt seine mittlere Verweilzeit in der Atmosphäre mehrere Jahrhunderte bis Jahrtausende. Es wird nur sehr langsam über den Gasaustausch mit dem Ozean, durch photosynthetische Umwandlung in Biomasse und beim Verwittern von Gestein wieder aus der Luft entfernt. Deshalb lässt sich ein von CO_2 verursachter Klimawandel nicht einfach durch eine Senkung der Kohlendioxidemissionen rückgängig machen. Methan ist dagegen chemisch sehr viel instabiler und wandelt sich in der Atmosphäre innerhalb von etwa einem Jahrzehnt in Kohlendioxid und Wasser um. Lachgas bleibt zwar etwa zehnmal so lange in der Lufthülle, liegt aber in deutlich geringeren Konzentrationen vor. Aus diesem Grund fokussiert sich die langfristige Klimapolitik vor allem auf das CO_2 .

Ab wann der Temperaturanstieg gefährliche Ausmaße annimmt, lässt sich wissenschaftlich nicht eindeutig festlegen. Auf politischer Ebene gibt es Bestrebungen, die Erderwärmung auf zwei Grad Celsius zu begrenzen. Dazu müsste es al-

AUF EINEN BLICK

RISKANTES DREHEN AN DER KLIMASCHRAUBE

1 Prinzipiell lässt sich das **Erdklima** mit einer Reihe von Methoden gezielt beeinflussen, die entweder das einfallende Sonnenlicht abschwächen oder der Atmosphäre Kohlendioxid (CO_2) entziehen.

2 Technisch am leichtesten realisierbar wäre die Injektion von **Sulfataerosolen** in die **Stratosphäre**, die einen Teil der Sonnenstrahlung ins All zurückstreuen. Eine andere Möglichkeit bestünde darin, Ausmaß und Art der **Bewölkung** zu manipulieren. Auch die **Albedo (Reflexivität)** der Erdoberfläche ließe sich erhöhen – etwa durch Erzeugen winziger Luftbläschen an der Meeresoberfläche.

3 All diese Maßnahmen müssten jedoch über Jahrhunderte fortgeführt werden und hätten teils **unkalkulierbare Nebenwirkungen**. So würden Aerosole in der Stratosphäre den Himmel dauerhaft eintrüben und ebenso wie die Manipulation der Bewölkung die regionalen **Niederschlagsmuster** beeinflussen.

4 Die Senkung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration scheint am ehesten durch **Eisendüngung der Ozeane** möglich. Sie würde das **Algenwachstum** anregen und so die Aufnahme von Kohlendioxid durch das Meer beschleunigen. Ihre **ökologischen Auswirkungen** lassen sich derzeit aber nicht abschätzen.

5 Denkbar, wenngleich technisch aufwändig, wäre auch, die natürliche **Verwitterung** unter Verbrauch von CO_2 anzukurbeln oder das **Treibhausgas** chemisch aus der Luft zu filtern. Beide Maßnahmen bieten jedoch keinen Kostenvorteil gegenüber einer Verringerung des Kohlendioxidausstoßes.

lerdings gelingen, die globalen CO₂-Emissionen in den nächsten zwei bis vier Jahrzehnten zu halbieren. Von diesem Ziel sind wir trotz internationaler Anstrengungen noch immer weit entfernt. Angesichts dessen gewinnen Vorschläge an Bedeutung, das Klima mit technischen Maßnahmen gezielt zu beeinflussen, um so der Erwärmung entgegenzuwirken.

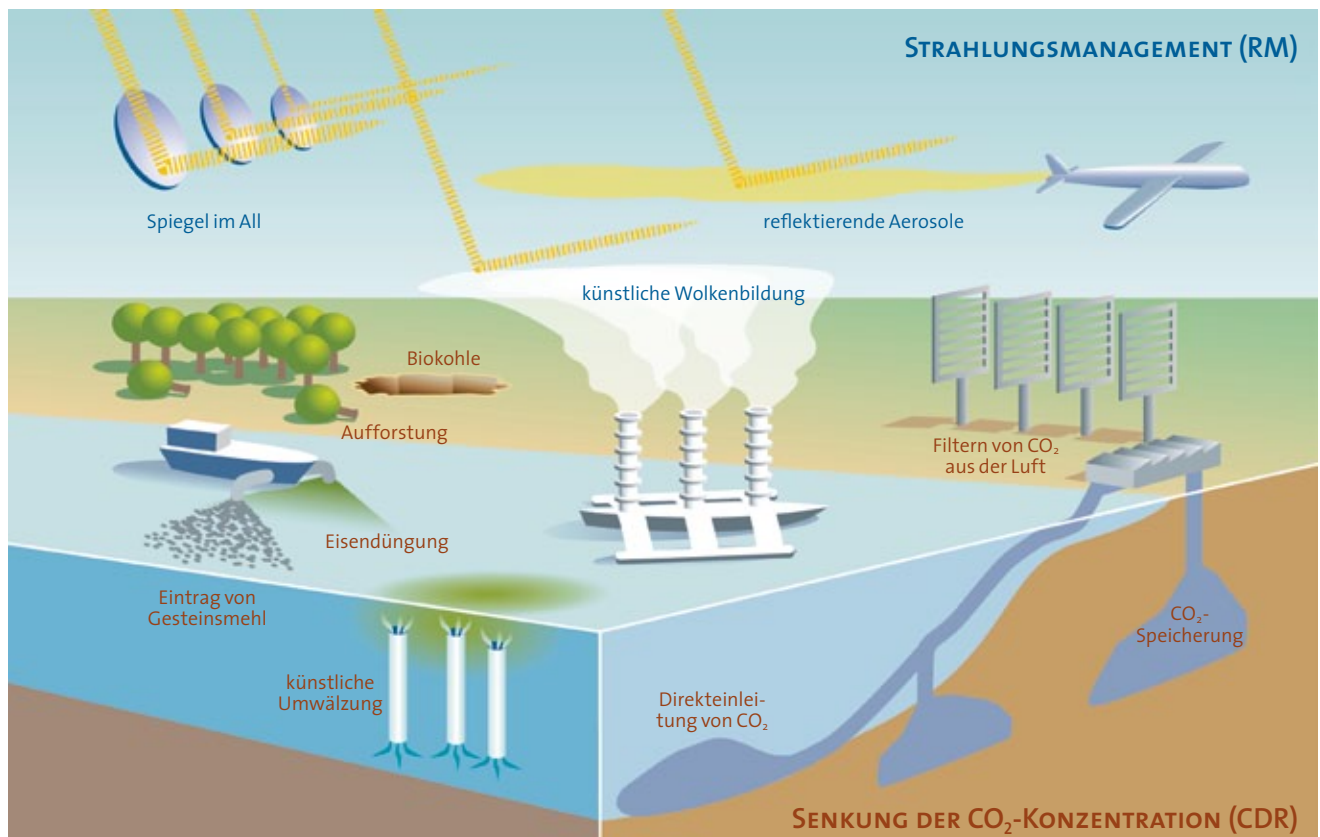
Ein solches »Climate Engineering« erscheint auf den ersten Blick als viel sprechender Ausweg. Im Gegensatz zur Emissionskontrolle wäre kein weltweiter Konsens erforderlich: Einzelne oder einige wenige Staaten könnten den Klimawandel vielmehr im Alleingang eindämmen. Der US-Ökonom und Wirtschaftsnobelpreisträger Thomas C. Schelling sah im Climate Engineering deshalb 1996 geradezu eine Verheißung. Mittlerweile haben sich die ersten Einschätzungen jedoch als allzu optimistisch herausgestellt, weil sie zahlreiche gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Aspekte nicht hinreichend berücksichtigten. Wie man heute weiß, gibt es keine einfache und kostengünstige technische Lösung für das Problem des Klimawandels. Dennoch könnten einige Verfahren des Climate Engineering durchaus einen Beitrag zum globalen Klimaschutz leisten. Allerdings greifen die verschiedenen Technologien auf sehr unterschiedliche

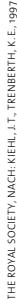
Weise in das Klimasystem ein und haben damit auch unterschiedliche Risiken und Nebenwirkungen.

Vereinfacht gesagt, sind drei Größen für die Erdtemperatur maßgeblich: die einfallende Sonnenstrahlung (Solarkonstante), deren Reflexion (Albedo) und die Absorption der langwelligen Wärmestrahlung von der Erdoberfläche (Treibhauseffekt). Die Solarkonstante beträgt ziemlich genau 1368 Watt pro Quadratmeter. Das ist der Strahlungsfluss, der auf der Mitte der sonnenzugewandten Seite des Globus senkrecht auf den Außenrand der Atmosphäre trifft. Für die gesamte Erdkugel, die ja immer zur Hälfte im Schatten liegt, stehen im Durchschnitt nur 25 Prozent dieses Werts zur Verfügung, also rund 342 Watt pro Quadratmeter.

Außerdem werfen Wolken und die Erdoberfläche die Sonnenstrahlung teilweise zurück. Dadurch verbleibt letztlich nur eine Nettoenergiezufuhr von etwa 240 Watt pro Quadratmeter. Im thermischen Gleichgewicht gibt die Erde denselben Energiebetrag in Form von Wärmestrahlung wieder ab. Während die irdische Lufthülle das einfallende kurzwellige Sonnenlicht weit gehend durchlässt, absorbieren atmosphärische Spurengase einen Teil dieser Wärmeabstrahlung und emittieren ihn wieder in alle Richtungen. Durch die nach un-

Die vorgeschlagenen Maßnahmen zum künstlichen Abkühlen der Erde – Climate Engineering – lassen sich grob in zwei Gruppen unterteilen. Die einen beeinflussen den Strahlungshaushalt der Erde: Strahlungsmanagement (Radiation Management – RM). Die anderen entziehen der Atmosphäre das Treibhausgas Kohlendioxid: Senkung der CO₂-Konzentration (Carbon Dioxide Removal – CDR). Die Grafik gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren, die zur Debatte stehen.





Mit Hilfe dieser drei Größen lässt sich in einem einfachen Zweischichtenmodell die mittlere Bodentemperatur der Erde von 15 Grad Celsius relativ gut reproduzieren. Ohne Absorption der langwelligen Wärmeabstrahlung durch atmosphärische Spurengase wie Kohlendioxid, Methan oder Lachgas läge der Wert nur bei etwa -18 Grad.

Seit Beginn der industriellen Revolution greift der Mensch massiv in diesen Strahlungshaushalt ein. Durch den Ausstoß von Treibhausgasen verringert sich die langwellige Wärmeabstrahlung. Dadurch verbleibt überschüssige Sonnenenergie an der Erdoberfläche und erwärmt sie. Die Differenz zwischen Ein- und Abstrahlung am oberen Atmosphärenrand, gemessen in Watt pro Quadratmeter, bezeichnen Klimaforscher als Strahlungsantrieb. Ist er positiv, erwärmt sich die Erde so lange, bis ein neues thermisches Gleichgewicht erreicht ist. Durch den Ausstoß von Treibhausgasen erhöht der Mensch den Strahlungsantrieb. Mit anderen Aktivitäten senkt er ihn allerdings auch. Beispiele sind die Umwandlung großer Waldgebiete in hellere Grün- oder Brachflächen und die Emission von Schwefeldioxid. Beides führt zu einer höheren Albedo und damit zu einer geringeren Zufuhr von Sonnenenergie.

te der Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) in seinem vierten Sachstandsbericht von 2007 auf 1,6 Watt pro Quadratmeter. Wie stark sich dadurch die Erde erwärmt, steht damit allerdings nicht genau fest. Das hängt nämlich auch von zahlreichen Rückkopplungen innerhalb des Klimasystems ab, die sich nicht exakt quantifizieren lassen. Deshalb bewegen sich die Schätzungen, wie stark bei einem Strahlungsantrieb von einem Watt pro Quadratmeter die globale Durchschnittstemperatur steigt – die so genannte Klimasensitivität –, zwischen 0,4 und 1,1 Grad Celsius.

Wegen solcher Unsicherheiten lässt sich nur schwer abschätzen, wann der Klimawandel gefährliche Ausmaße erreicht. Weil der CO₂-induzierte Strahlungsantrieb sehr lange bestehen bleibt und das Klimasystem nur träge reagiert – mit einer Verzögerung von mehreren Jahrzehnten –, ist nicht auszuschließen, dass schon durch die bisherigen Kohlendi-

oxidemissionen für große Teile der Weltbevölkerung eine verhängnisvolle Entwicklung in Gang gesetzt worden ist.

Unter anderem aus diesem Grund denken besorgte Forscher und Politiker über Notfallmaßnahmen nach, die einen katastrophalen Klimawandel schnell mildern oder eindämmen könnten. Das bisher nur als theoretisches Konzept existierende Climate Engineering bietet sich möglicherweise dafür an. Ähnlich wie in der Medizin lässt sich dabei zwischen Maßnahmen unterscheiden, die wirklich die Ursachen oder nur die Symptome bekämpfen. Letztere zielen darauf ab, dem positiven Strahlungsantrieb durch Treibhausgase einen negativen entgegenzusetzen, um ihn so möglichst auszugleichen. Der Fachausdruck dafür ist Radiation Management (RM). Je nachdem ob die kurzwellige oder langwellige Strahlung beeinflusst wird, spricht man von Solar Radiation Management (SRM) oder Thermal Radiation Management (TRM). Im Gegensatz dazu laufen die ursächlich wirkenden Eingriffe darauf hinaus, Treibhausgase aus der Atmosphäre zu entfernen. Ganz überwiegend geht es dabei um Kohlendioxid, weshalb von Carbon Dioxide Removal (CDR) die Rede ist.

Die Sonneneinstrahlung lässt sich verringern

Es gibt bereits eine Vielzahl von Vorschlägen zur Klimabeeinflussung, und immer wieder kommen neue hinzu. Für kein Verfahren wurde aber die technische Machbarkeit, Effektivität oder Kontrollierbarkeit im Detail gezeigt. Deshalb ist die Diskussion darum, ob Climate Engineering überhaupt realistisch,

nützlich und steuerbar sein kann, noch in vollem Gang. Dabei spielen auch politische und ethische Aspekte eine wichtige Rolle. Hier wollen wir uns jedoch nur mit der naturwissenschaftlichen Basis einiger viel diskutierter Methoden befassen.

Ein früher Vorschlag lautete, eine Art Sonnenschirm im All zu installieren, um so die Solarkonstante zu verringern. Die Frage der praktischen Umsetzbarkeit und der Kosten ist jedoch weit gehend unbeantwortet. Der Aufwand wäre jedenfalls sehr hoch: Nach jetzigem Stand der Technik müssten Raketen, deren Startmasse zwei bis drei Größenordnungen über ihrer Nutzlast liegt, große Mengen an Material in den Weltraum befördern.

Aussichtsreicher erscheinen da schon Vorschläge, die Reflexion innerhalb der Erdatmosphäre zu erhöhen – beispielsweise durch Einbringen von Aerosolen. Dabei ließe sich mit relativ geringem Materialeinsatz die Sonneneinstrahlung deutlich drosseln. Da aus der Stratosphäre kein Niederschlag fällt, haben Aerosole dort eine relativ lange Verweildauer von ein bis zwei Jahren, während sie aus der Troposphäre in nur einer Woche ausgewaschen werden. Große Vulkanausbrüche haben den grundsätzlichen Wirkungsmechanismus bestätigt. Dabei gelangten teils erhebliche Mengen an Schwefeldioxid in die Stratosphäre und bildeten dort Sulfataerosole, die zu einer globalen Abkühlung um mehrere zehntel Grad in den folgenden Jahren führten.

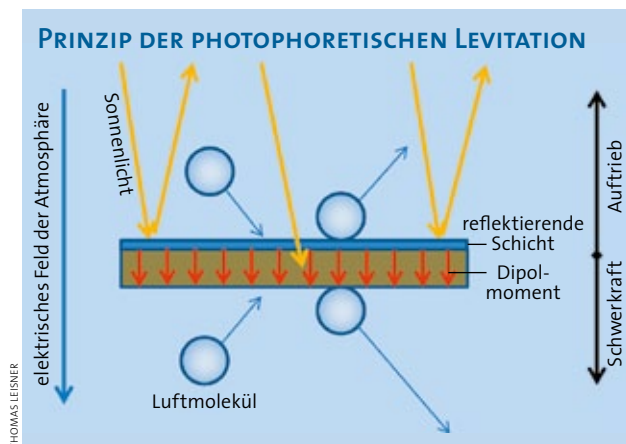
Die Idee, den Klimawandel durch Schwefelinjektionen in die Stratosphäre zu begrenzen, hatte der russische Klimato-

Ein weltumspannender Sonnenschirm aus Nanopartikeln

Geeignet aufgebaute winzige Teilchen könnten von sich aus in die hohe Atmosphäre aufsteigen und dort Sonnenlicht reflektieren. Grundlage dafür ist die so genannte Photophorese, bei der Licht Kräfte auf Partikel ausübt, die von einem Gas umgeben sind. Wenn die Teilchen das Licht auf einer Seite stärker absorbieren als auf der anderen, erwärmen sie sich asymmetrisch. An der heißeren Seite werden dann aufprallende Gasmoleküle, weil sie mehr Wärmeenergie aufnehmen, heftiger zurückge-

schleudert als an der kalten (Pfeile). Daraus resultiert eine Nettokraft in Richtung der kalten Seite. Dasselbe passiert auch, wenn die Teilchen auf einer Seite die Wärme effizienter an die Luft abgeben als auf der anderen. Bei Nanopartikeln kommt nur dieser Mechanismus in Betracht, weil sie zu klein sind, um einen Temperaturunterschied aufzubauen.

Um mit Hilfe photophoretischer Kräfte einen Auftrieb zu erzeugen, müssen die reflektierenden Teilchen alle die gleiche Orientierung zum Sonnenlicht haben. Dies lässt sich mit Elektretmaterialien erreichen, die ein elektrisches Dipolmoment aufweisen und sich deshalb im elektrischen Feld der Atmosphäre ausrichten. Ein solches Nanoteilchen bestünde also auf der einen Seite aus einer Schicht mit schlechtem Wärmeübergang zur Umgebung, die zugleich das Sonnenlicht reflektiert (beispielsweise Aluminium). Auf der anderen Seite enthielte es ein Material mit elektrischem Dipolmoment (etwa Bariumtitanat) und guter Wärmeabgabe. Dieses müsste von der reflektierenden Schicht weg zeigen. Indem es sich parallel zum elektrischen Feld der Erde orientiert, das zum Erdboden hinweist, würde es das Teilchen mit der reflektierenden Seite zur Sonne hin ausrichten. Da die Elektretschicht Wärme besser abgibt, würde das Partikel gleichzeitig zur Sonne hin beschleunigt.

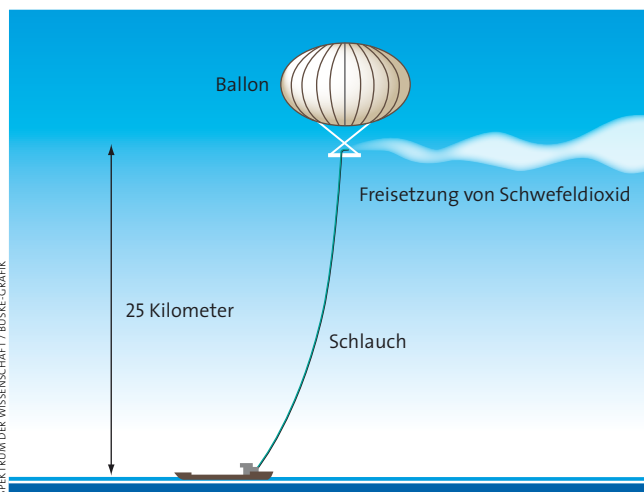


loge Michail Budyko schon in den 1970er Jahren. Bekanntheit erlangte sie aber vor allem durch den niederländischen Meteorologen und Chemie-Nobelpreisträger Paul Crutzen. Dieser griff den Vorschlag in einem Artikel aus dem Jahr 2006 auf, stellte Berechnungen dazu an und ergänzte sie durch Beobachtungen bei der Eruption des Vulkans Pinatubo im Jahr 1991 sowie durch eine Analyse der industriellen Schwefel-emissionen. Indem diese nach Umwandlung in Aerosolpartikel in der niedrigeren Troposphäre Sonneneinstrahlung reflektieren, so die Feststellung Crutzens, kompensieren sie schon heute einen Teil des anthropogenen Treibhauseffekts. Würde nur ein kleiner Teil davon in die höher liegende Stratosphäre verbracht, hätte dies einen noch stärkeren Kühleffekt. Zugleich gäbe es weniger unliebsame Nebenwirkungen wie sauren Regen oder Beeinträchtigungen der Gesundheit.

Nach heutigem Kenntnisstand ließe sich auf diese Weise in der Tat eine Verdopplung der vorindustriellen CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre ausgleichen. Doch der Aufwand wäre enorm – gälte es doch, einige Millionen Tonnen Schwefel pro Jahr in 15 bis 25 Kilometer Höhe zu verfrachten. An Ideen, wie das geschehen könnte, mangelt es nicht. Zur Debatte stehen unter anderem Luftschiffe, Raketen, Kanonen und lange, von Ballons getragene Schläuche. Am günstigsten wären aber wohl Flugzeuge, da bereits Typen existieren, die hoch genug fliegen können. Weil der Abkühlungseffekt nicht linear mit der Schwefelmenge steigt, müsste für eine stärkere Erniedrigung der Temperatur überproportional immer mehr Schwefel in die Stratosphäre gebracht werden.

Armada von Nanopartikeln in der Stratosphäre

Als Alternative hat der US-Physiker David Keith kürzlich maßgeschneiderte Nanopartikel ins Spiel gebracht. Diese wären so aufgebaut, dass sie bei Sonneneinstrahlung einen Auftrieb erfahren und dadurch selbstständig bis in die obere Stratosphäre oder gar in die Mesopause (in 80 Kilometer Höhe) aufsteigen (siehe Kasten auf S. 7). Dort würden sie sich als Miniaturspiegel im elektrischen Feld der Erde ausrichten. Ihre Verweildauer wäre nur durch den (foto)chemischen Abbau begrenzt und damit potenziell sehr hoch.



Das Konzept scheint gleich mehrere Vorteile zu vereinen. Außer dass der Aufwand für die Beförderung in hohe Luftschichten entfällt, wäre dank der langen Verweilzeit und optimierbarer optischer Eigenschaften der Materialeinsatz viel geringer. Auch würde die Ozonschicht wohl weniger beeinträchtigt, und es käme nicht im selben Maß zu einer diffusen Lichtstreuung, die den Himmel milchig trüb erscheinen ließe, wie beim Einsatz von Sulfataerosolen.

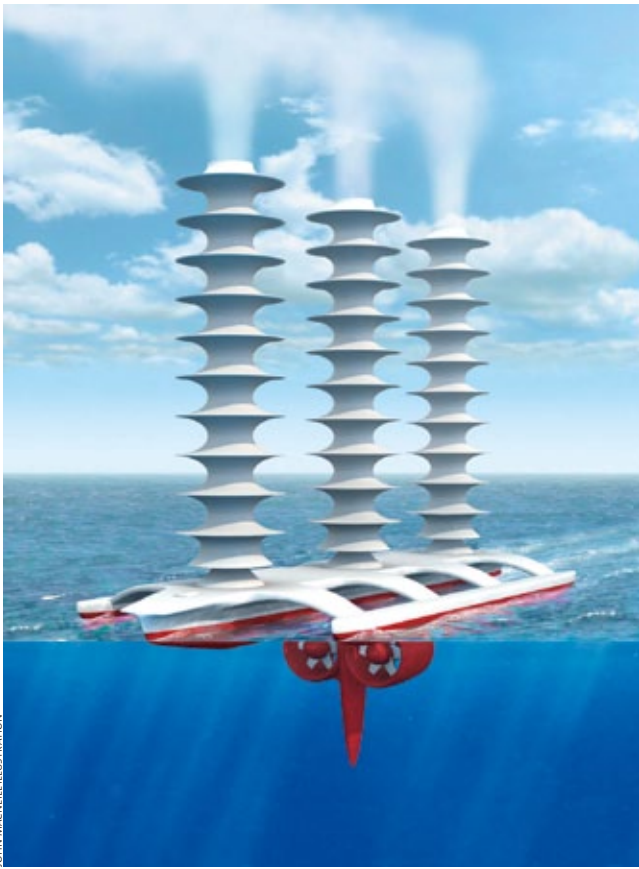
Noch handelt es sich allerdings um reine Gedankenspiele, da Partikel mit den benötigten Eigenschaften bisher nicht existieren und beim gegenwärtigen Stand der Technik wohl auch nicht in den erforderlichen Mengen herstellbar wären. Außerdem ist unklar, wie sich erreichen ließe, dass sie den extremen Bedingungen in der oberen Atmosphäre lange genug standhalten. Zugleich erhebt sich die Frage nach der Umweltverträglichkeit der für den Aufstieg benötigten speziellen Materialien.

Es gibt auch eine Möglichkeit, die Strahlungsbilanz der Erde in tieferen Schichten der Atmosphäre zu beeinflussen: durch Manipulation der Bewölkung. Hohe, helle Zirruswolken, die aus Eiskristallen bestehen, reflektieren sowohl kurzwelliges Sonnenlicht als auch langwellige Wärmestrahlung. Da der letztgenannte Effekt jedoch in der Regel überwiegt, erhöhen sie insgesamt die Temperatur. Gelänge es also, sie künstlich aufzulösen, könnte die langwellige Wärmestrahlung vom Erdboden besser ins All entweichen – mit kühlender Wirkung. Tief hängende, aus Wassertröpfchen aufgebaute Stratokumuluswolken streuen dagegen vor allem kurzwelliges Sonnenlicht in den Weltraum zurück. Ihre Bildung zu fördern oder dafür zu sorgen, dass sie länger bestehen bleiben oder heller sind, brächte deshalb gleichfalls eine gewisse Abkühlung.

Das Ausmaß der Kühlwirkung ist bei der Manipulation von Wolken allerdings deutlich unsicherer als beim Verfrachten von Aerosolen in die Stratosphäre. Denn in diesem Fall verändern die eingebrachten Materialien den Strahlungsfluss nicht direkt, sondern nur auf dem Umweg über die Wolken. Deren grundsätzliches Verständnis lässt aber noch einiges zu wünschen übrig (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2011, S. 80).

Bei den hohen Zirren wäre denkbar, sie mit Kristallisationskeimen für die Eisbildung zu versetzen. Dadurch entstünden weniger, dafür aber größere Eispartikel, die schneller herabfallen. So würden sich die Wolken schneller auflösen und einen geringeren Teil des Himmels bedecken. David L. Mitchell und William Finnegan vom Desert Research Institute in Reno (Nevada) schlagen Wismutjodid als Keime vor. Man könnte es dem Treibstoff von Linienflugzeugen beimi-

Mit Schwefeldioxid in der Stratosphäre ließe sich die auf die Erde treffende Sonnenenergie reduzieren. Das Gas könnte durch Schläuche in große Höhen geleitet werden, wo es mit Wasserdampf und Sauerstoff Sulfataerosole bildet. Diese reflektieren das Sonnenlicht und kühlen so die Erde.



JOHN MACNEILL ILLUSTRATION

Auch durch Versprühen von Meerwasser ließe sich die Erde abkühlen. Auf diese Weise würde die Bildung tiefer, heller Wolken angeregt, die Sonnenlicht reflektieren.

Albedo erhöhen ließe. Nur das Bepflastern von Wüsten mit stark reflektierendem Material könnte den irdischen Strahlungshaushalt merklich beeinflussen, wäre aber viel teurer als die Reduktion der Kohlendioxidemissionen.

Aussichtsreicher erscheint es da, die Albedo der Ozeane zu verändern. Interessanterweise war das der erste dokumentierte Vorschlag zur Beeinflussung des Klimas: Wissenschaftliche Berater von US-Präsident Lyndon B. Johnson machten ihn schon 1965. Wegen der technischen Schwierigkeiten und der zu erwartenden negativen Auswirkungen auf die Umwelt wurde die Idee aber kaum weiterverfolgt. Erst kürzlich brachte sie Russell Seitz von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) wieder ins Gespräch. Seine Lösung: mikroskopische Luftblasen im Meerwasser. Sie ließen sich relativ leicht von Schiffen aus erzeugen und hätten eine Lebensdauer von Monaten bis Jahren. Brechende Wellen produzieren solche Mikrobblaschen auf natürliche Weise, allerdings nur in verschwindender Konzentration. Wegen der riesigen Fläche der Ozeane könnte diese Maßnahme für einen starken negativen Strahlungsantrieb sorgen. Die Idee ist sehr spekulativ, zeigt aber, dass immer wieder neue Vorschläge auftauchen.

Befürworter des Climate Engineering preisen solche Radiation-Management-Maßnahmen geradezu als Wunderwaffen. Einige könnten den Planeten schon innerhalb weniger Monate deutlich abkühlen – und das angeblich bei moderaten Kosten, die für einzelne Staaten oder sogar für privat finanzierte Konsortien erschwinglich wären. Doch enthalten solche Rechnungen nur das, was für die Einrichtung und den Betrieb aufzuwenden wäre. Tatsächlich verursachen RM-Eingriffe jedoch langfristige gesamtwirtschaftliche Folgekosten auf Grund von Nebenwirkungen und der Notwendigkeit, sie sehr lange aufrechtzuerhalten (siehe das Interview auf S. 12).

Auch würde nicht etwa das frühere Klima wiederhergestellt, sondern ein neues, künstliches Klima geschaffen. Während nämlich die gestiegene Treibhausgaskonzentration den Wasserkreislauf im Wesentlichen über die Troposphäre beeinflusst, verändert ihn das Radiation Management primär über das Strahlungsbudget an der Erdoberfläche. Dadurch ergäbe sich eine neue Niederschlagsverteilung, die nicht unbedingt mit der vorindustriellen übereinstimmen würde. Ähnliches gilt für die Eisbedeckung. Soll sie auf der Nordhalbkugel wieder das einstige Niveau erreichen, würden wahrscheinlich auch auf der Südhalbkugel bislang gletscherfreie Regionen vereisen. Die Vor- und Nachteile des Radiation Management verteilen sich also ungleichmäßig auf die verschiedenen Regionen, was zu erheblichen politischen Spannungen und finanziellen Kompensationsforderungen führen kann. Außerdem helfen solche Maßnahmen nur gegen den Temperaturanstieg, nicht aber gegen die anderen Auswirkungen einer erhöhten CO_2 -Konzentration wie die Versauerung der Meere.

schen oder in ihre Abgase einspritzen. Da die Substanz die Eisbildung nur bei Temperaturen unter -20 Grad Celsius stark fördert, hätte sie kaum Auswirkungen auf niedrigere Wolken. Experimentell ist die Methode noch nicht erprobt.

Tief liegende Stratokumuluswolken lassen sich durch Aerosole beeinflussen, da diese als Kondensationskeime wirken. Steigt ihre Konzentration, bilden sich mehr, aber kleinere Wassertröpfchen. So entstehen ausgedehnte, helle Wolken. Der Effekt wäre dort besonders stark, wo die Luft – wie über einigen Meeresgebieten – normalerweise nur wenig Aerosole enthält. Das belegen Satellitenbilder, auf denen von Rauchpartikeln erzeugte Wolken die Routen von Schiffen markieren. Nach einem Vorschlag des Physikers John Latham von der University of Manchester (Großbritannien) ließe sich durch Versprühen feiner Meerwassertröpfchen dieser Effekt gezielt verstärken. Allerdings ist noch ziemlich unklar, wie das in der Praxis geschehen könnte und ob es überhaupt technisch machbar wäre.

Schließlich besteht auch die Möglichkeit, die Rückstrahlung direkt an der Erdoberfläche zu erhöhen. Durch die angesprochenen Landnutzungsänderungen ist das bereits unabsichtlich geschehen. Als gezielte Maßnahme wäre eine Erhöhung der Albedo von Städten, Grünflächen oder Wüsten denkbar. Das »Weißeln« von Hausdächern oder Straßen bringt wegen der geringen Flächen global aber nur wenig, sondern kann lediglich das lokale Klima beeinflussen und Energiekosten sparen. Auch gibt es nicht genug Grün- oder Waldflächen, als dass sich durch ihre »Aufhellung« die globale

Eine Möglichkeit, der Atmosphäre Kohlendioxid zu entziehen, wäre die Düngung von Meeresregionen mit Eisen. Der Pflanzennährstoff würde das Wachstum von Algen fördern, die ihrerseits CO_2 aus der Luft aufnehmen und es, wenn sie nach dem Absterben absinken, langfristig in Meeressedimenten binden.

CDR-Maßnahmen, die beim Kohlendioxid selbst ansetzen, sind mit keinen solchen Risiken und Nebenwirkungen verbunden. Außerdem beeinflussen sie den Strahlungshaushalt nachhaltig und müssen nicht wie das Radiation Management so lange durchgeführt werden, bis sich die Treibhausgaskonzentration auf natürlichem Weg reduziert hat. Dafür wirken sie langsamer und erscheinen zunächst kostspieliger. Trotzdem können sie bei einer langfristigen, dynamischen Betrachtung durchaus besser abschneiden als RM-Verfahren.

Für CDR-Eingriffe bieten sich physikalische, chemische und biologische Prozesse an. Als physikalische Methode wurde vorgeschlagen, die Ventilation der Ozeane zu beschleunigen, so dass diese in kürzerer Zeit mehr CO_2 aufnehmen. Allerdings scheint das energetisch wenig sinnvoll und würde die Wärmekapazität der Weltmeere nachhaltig stören.

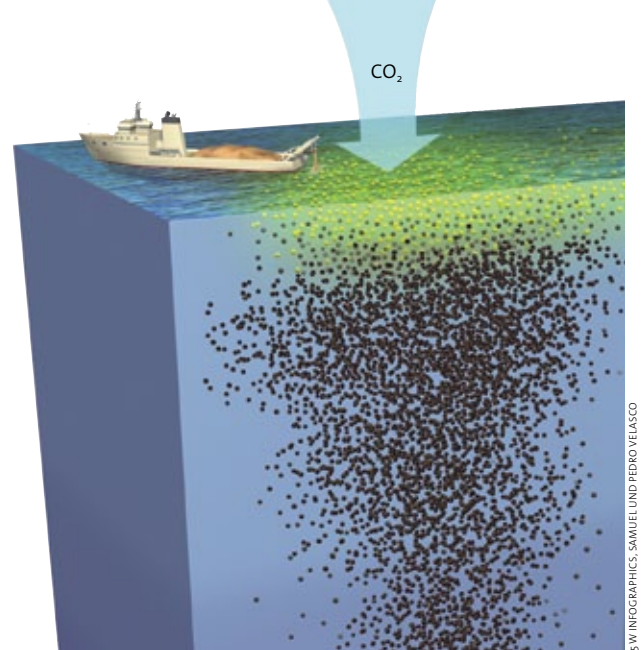
Der Luft CO_2 entziehen

Die biologischen Methoden basieren auf der Photosynthese, mit deren Hilfe Pflanzen Kohlendioxid aus der Luft aufnehmen und daraus organische Verbindungen herstellen. Dazu zählen Aufforstung und Landnutzungsänderungen, die in begrenztem Umfang schon Teil des Kioto-Protokolls sind. Der gebundene Kohlenstoff kann aber auch in so genannte Biokohle umgewandelt und in Böden eingebracht werden. Dort bliebe er für Jahrtausende konserviert und würde womöglich sogar die Bodenqualität verbessern.

Prinzipiell sind biologische CDR-Methoden an Land aber durch die Flächenkonkurrenz mit der Nahrungsmittelproduktion begrenzt, und eine Ausweitung auf andere Areale wäre mit enormen Kosten verbunden. So käme bei einer künstlichen Bepflanzung von Sahararegionen allein die Bewässerung teurer als konventionelle Maßnahmen zur Verringerung der CO_2 -Emissionen.

Denkbar wäre auch, die ozeanische CO_2 -Aufnahme durch Anregung des Algenwachstums zu erhöhen. Zwar enthalten die Meere nur einen kleinen Teil der Biomasse unseres Planeten, aber das marine Phytoplankton kommt für etwa die Hälfte der globalen Photosynthese auf. Die Verteilung der dazu nötigen Nähr- und Spurenstoffe im Oberflächenwasser hängt von verschiedenen Faktoren ab und ist deshalb sehr ungleichmäßig. Infolgedessen gibt es große Meeresregionen, in denen der Mangel eines oder mehrerer Nähr- oder Spurenstoffe wie Nitrat oder Eisen das Algenwachstum begrenzt. Hier setzen biologische Verfahren zur Kohlenstoffeinlagerung in den Ozean an: Durch Düngung soll das Algenwachstum angeregt werden, so dass die Meere mehr CO_2 aufnehmen.

In großen Teilen des Nord- und äquatorialen Pazifiks sowie des Südlichen Ozeans herrscht Eisenmangel, während



andere Nährstoffe wie Nitrat und Phosphat ausreichend vorhanden sind. Deshalb formulierte der Ozeanograf John Martin (1935–1993) schon vor mehr als 20 Jahren provokant: »Gebt mir einen halben Tanker Eisen, und ich gebe euch die nächste Eiszeit.« Freilandexperimente bestätigten zwar den grundsätzlichen Wirkungsmechanismus, aber nicht das von Martin behauptete Potenzial.

Im Südlichen Ozean gibt es in der Nähe von Inseln auch natürliche Eisendüngung durch eisenhaltiges Gestein. Tatsächlich wird dort mehr Kohlenstoff durch Algen gebunden und in die Tiefe befördert als im nicht gedüngten Umgebungswasser. Extrapoliert man diese Ergebnisse in Modellen auf den gesamten Südlichen Ozean, könnte dieser jährlich maximal fünf Gigatonnen Kohlendioxid zusätzlich aufnehmen, was etwa 15 Prozent der momentanen anthropogenen CO_2 -Emissionen entspräche. Da sich die Düngung auf das gesamte marine Ökosystem auswirken dürfte, ist allerdings noch unsicher, wie sie die Nahrungskette des Meeres und seine Produktivität beeinflusst. Außerdem entsteht bei der mikrobiellen Zersetzung des zusätzlich organisch gebundenen Kohlendioxids als Nebenprodukt Lachgas, das etwa zehn Prozent des Düngungseffekts wieder aufhebt.

Grundsätzlich birgt die künstliche Verstärkung der Photosynthese ein relativ hohes Risiko unerwünschter Nebeneffekte, weil biologische Kreisläufe in aller Regel ziemlich empfindlich auf Eingriffe reagieren und besonders in ökologischer Hinsicht oft erst ansatzweise verstanden sind. Chemische CDR-Methoden sind in dieser Hinsicht leichter überschaubar. Sie zielen darauf ab, die natürliche Verwitterung zu beschleunigen, bei der Gesteine mit Kohlendioxid aus der Luft reagieren. Im einfachsten Fall kann man Kalk- oder Silikatgestein zermahlen und den Staub an Land – vorzugsweise in feuchtwarmen tropischen Gebieten – oder über dem Meer ausstreuen. Theoretisch haben solche Maßnahmen ein recht hohes Potenzial, und die zu Grunde liegenden chemischen Reaktionen sind gut bekannt. Außerdem würde der Ozeanversauerung entgegengewirkt. Die praktische Hürde liegt bei den logistischen Anforderungen und den Kosten. Für einen nennenswerten Effekt wäre sehr viel Gestein abzubauen und

zu zerkleinern. Der Lufthülle ähnlich große Mengen an CO₂ zu entziehen wie bei der Eisendüngung, würde bergbautechnische Aktivitäten in einem Umfang wie bei der Gewinnung fossiler Brennstoffe erfordern.

Ein weiterer Vorschlag ist das maschinelle Filtern von CO₂ aus der Atmosphäre. Dazu leitet man Luft über einen Stoff, der selektiv Kohlendioxid adsorbiert. Bei seiner anschließenden Regeneration wird reines CO₂ frei, das sich etwa an Gewächshäuser oder die Industrie verkaufen ließe. Diese Anlagen funktionieren für das Sorptionsmittel als geschlossene Kreislaufsysteme, benötigen zum Substanztransport und zur Regeneration aber Energie. Wird dieser Energiebedarf aus fossilen Brennstoffen gedeckt, könnte das Verfahren sogar mehr Kohlendioxid produzieren, als es der Atmosphäre entzieht. Sinnvoll erscheint sein Einsatz daher nur bei Verwendung CO₂-neutraler Energiequellen, die sonst nicht nutzbar wären. Generell ist das Abtrennen von Kohlendioxid aus der Luft derzeit noch keine kostengünstige Alternative zur herkömmlichen Emissionskontrolle.

Lösung für das »grüne Paradoxon«

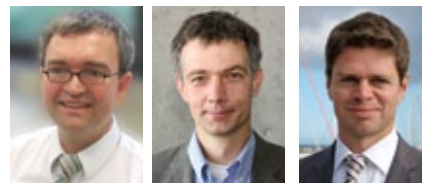
Bis zu einem gewissen Grad gilt das für alle diskutierten CDR-Maßnahmen: Sie bieten, was ihr Potenzial und ihre Kosten angeht, meist kaum Vorteile gegenüber Bemühungen, den Ausstoß von CO₂ zu verringern. Allerdings vermeiden sie bei einseitiger Emissionskontrolle durch nur wenige Länder einen negativen Effekt, den der deutsche Ökonom Hans-Werner Sinn als das »grüne Paradoxon« bezeichnet hat. Wenn nämlich einzelne Staaten auf eigene Faust ihren Verbrauch an fossilen Brennstoffen drosseln, lässt die dadurch verringerte Nachfrage deren Weltmarktpreis sinken. Dadurch können andere Länder, die sich nicht an der Emissionskontrolle beteiligen, ihren Verbrauch ausweiten, so dass die CO₂-Emissionen insgesamt gleich bleiben. Bei CDR-Maßnahmen tritt dieser Effekt nicht auf, weil sie keinen Einfluss auf die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen haben.

Wie diese Überlegungen zeigen, eröffnet das Climate Engineering zwar neue Möglichkeiten für die Klimapolitik, könnte aber die Anstrengungen für eine weltweite Emissionskontrolle torpedieren. Bei CDR-Maßnahmen ist diese Gefahr geringer. Selbst wenn sie die Bemühungen um eine Verringerung des CO₂-Ausstoßes beeinträchtigen, reduzieren sie dennoch im Endeffekt die Menge des Treibhausgases in der Atmosphäre. Anders verhält es sich bei RM-Eingriffen. Sie machen einen weiteren Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration und damit eine Verschärfung der ursächlichen Problematik wahrscheinlich. Eigentlich sollten sie einen Ausweg aus den bisher wenig erfolgreichen Bemühungen um eine international verbindliche Vereinbarung zur wirksamen Emissionskontrolle bieten. Stattdessen ergibt sich aus ihnen ein neues Dilemma für den Klimaschutz. Drohen irgendwann Kipppunkte im Klimasystem überschritten zu werden, gibt es für eine schnelle Abkühlung praktisch keine Alternative zu RM-Eingriffen in die Strahlungsbilanz. Sind aber funktionierende RM-Technologien für die Zukunft zu

erwarten, weil wir sie heute erforschen, sinkt der Anreiz, durch entschiedene Emissionskontrolle dafür zu sorgen, dass wir sie nicht nutzen müssen.

Dieses Dilemma zeigt, wie schwierig es ist, die Erforschung des Climate Engineering in den Maßnahmenkatalog zum Klimaschutz aufzunehmen. Die Berücksichtigung von RM-Technologien bringt uns womöglich auf einen ganz anderen Emissionspfad – mit gravierenden, unkalkulierbaren Folgen. Auf der anderen Seite sind die Unsicherheiten über den Klimawandel immer noch so groß, dass es genauso riskant wäre, diese Technologien nicht zu erforschen. Spinnt man derartige Überlegungen weiter und bezieht auch die soziale, politische, rechtliche und ethische Dimension mit ein, wird schnell deutlich, dass sich die Bewertung des Climate Engineering nicht auf die naturwissenschaftliche Machbarkeit beschränken darf, sondern eine umfassende Betrachtung der Auswirkungen auf unsere Gesellschaft erfordert. Es geht nicht allein darum, was wir tun können, sondern auch, was wir tun wollen. Fest steht nur, dass wir nicht nichts tun können. ∞

DIE AUTOREN



Thomas Leisner (links) ist Direktor am Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher

Instituts für Technologie sowie Professor für Atmosphärenphysik an der Universität Heidelberg. Seine Forschungsschwerpunkte sind atmosphärische Aerosole, Wolken und Niederschlag. **Andreas Oschlies** (Mitte) ist Professor für Biogeochemische Modellierung an der Universität Kiel und am Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel (GEOMAR). Er beschäftigt sich hauptsächlich mit den physikalischen, biogeochemischen und ökologischen Grenzen der ozeanischen CO₂-Aufnahme, mit der Klimasensitivität physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse im Meer sowie mit deren Abbildung in biogeochemischen Modellen. **Wilfried Rickels** ist Postdoc am Institut für Weltwirtschaft in Kiel im Forschungsbereich »Umwelt und natürliche Ressourcen« und befasst sich vor allem mit den Möglichkeiten und Grenzen der ozeanischen CO₂-Aufnahme in dynamischen Optimierungsmodellen.

QUELLEN

- Feichter, J., Leisner, T.:** Climate Engineering: A Critical Review of Approaches to Modify the Global Energy Balance. In: The European Physical Journal Special Topics 176, S. 81–92, 2009
- Keith, D.W.:** Photophoretic Levitation of Engineered Aerosols for Geoengineering. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 107, S. 16 428–16 431, 2010
- Lackner, K.S.:** Große Wäsche für das Klima. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 70–75, 2010
- Rickels, W. et al.:** Gezielte Eingriffe in das Klima? Eine Bestandsaufnahme der Debatte zu Climate Engineering. Sondierungsstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142732

»Der Himmel wäre nie mehr blau«

Im Gespräch mit »Spektrum der Wissenschaft« bewertet der Umweltethiker **Konrad Ott** die Maßnahmen des Climate Engineering aus moralphilosophischer Sicht.



Spektrum der Wissenschaft: Warum ist Climate Engineering für einen Philosophen und Ethiker ein Thema?

KONRAD OTT: Schon allein deshalb, weil es zum Problem des Klimawandels gehört. Und der steckt voller ethischer Fragestellungen. Man könnte sogar sagen, dass er im Kern ein umweltethisches Problem ist und kein rein wissenschaftliches oder technisches. Bei seiner Lösung aber bewegt man sich in dem Spannungsfeld zwischen Reduktion von Treibhausgasen, Anpassungsmaßnahmen und den verschiedenen Möglichkeiten des Climate Engineering.

Was sind die ethischen Probleme speziell bei Letzteren?

OTT: Betrachten wir einmal den Vorschlag, mehrere Millionen Tonnen Sulfataerosole in die Stratosphäre einzubringen, um so die Sonneneinstrahlung zu verringern. Laut den Befürwortern einer solchen Maßnahme handelt es sich um einen vorübergehenden kurzfristigen Eingriff. Aber wenn er in Erwägung gezogen wird, sagen viele Verantwortliche in Wirtschaft und Politik vermutlich: »Warum noch Emissionen reduzieren, es gibt ja jetzt eine technische Lösung.« Und dann müsste die Menschheit vielleicht sehr lange mit dieser Art Schutzschild in der Stratosphäre leben, um den fortgesetzten Ausstoß von Kohlendioxid auszugleichen.

Sie meinen also, die Sulfatoption könnte die Bemühungen um eine Verringerung der Emissionen untergraben.

OTT: Diese Einschätzung beruht zwar auf einer Reihe von Voraussetzungen. Aber vieles spricht dafür.

Angenommen, Sie haben Recht, und die Menschheit setzt weiter massenhaft CO₂ frei. Wenn der Sulfatschutzschild funktioniert, wäre daran doch nichts auszusetzen.

OTT: Bei Eingriffen dieser Größenordnung sollte man immer auch den schlimmsten Fall bedenken. So könnte es sein, dass plötzlich schwer wiegende Nebenwirkungen auftreten, also etwa der saure Regen wiederkehrt, die Meere versauern oder die Niederschläge zurückgehen. Dann müssten wir unter Umständen zwischen zwei Übeln wählen: die Injektionen trotzdem fortzusetzen oder damit aufzuhören und einen drastischen Klimawandel innerhalb weniger Jahrzehnte in Kauf zu nehmen; denn der CO₂-Gehalt der Atmosphäre wäre inzwischen ja erheblich angestiegen, was ohne Gegen-

maßnahmen eine starke Erwärmung zur Folge hätte. Solange wir noch andere Handlungsoptionen haben, sollten wir auf jeden Fall einen Weg vermeiden, der zukünftige Generationen in eine derart fatale Situation bringen könnte.

Sehen Sie noch andere ethische Probleme mit der Sulfatinjektion in die Stratosphäre?

OTT: Die gibt es ohne Zweifel. Wenn man das tatsächlich macht, wird sich zum Beispiel die Farbe des Himmels verändern. Er wird nie mehr blau sein, sondern milchig oder gräulich, ähnlich wie Hochnebel. Und wir werden auch die Sterne in der Nacht nie mehr sehen können.

Ist das nicht eher ein ästhetisches Problem?

OTT: Finden Sie? Dieses Argument ist deshalb so interessant, weil man sich hier wirklich fragen muss, was uns das Himmelsblau eigentlich bedeutet. Ist das nur Ästhetik, oder reicht das in die Lebenswelt des Menschen hinein?

Die Lebenswelt verändert sich nun einmal – das war immer so. Denken Sie nicht, wir werden uns daran gewöhnen?

OTT: Die Frage ist: Sollen wir uns daran gewöhnen wollen? Sollten wir nur, weil wir nicht bereit sind, einen bestimmten, energieintensiven Lebensstil aufzugeben, dafür den blauen Himmel und den Blick auf die Sterne opfern? Ich würde es da mit Albert Schweitzer halten, dem zufolge Ethik auch etwas damit zu tun hat, nicht abzustumpfen. Statt zu sagen: »Irgendwie kommen wir schon über die Runden, das Leben geht weiter«, sollten wir das, was momentan mit dem Climate Engineering auf dem Spiel steht, in seiner moralischen Brisanz und Tragweite voll erfassen.

Und wenn alle Völker in einem globalen Konsens die Sulfatinjektion gutheißen würden?

OTT: Gerade die entschiedensten Befürworter dieser Option sagen ja, ein Konsens sei nicht unbedingt erforderlich. Rein technisch könnte die Sulfatoption von einigen wenigen Staaten, von einer Art Koalition der Willigen, durchgeführt werden. Anderen Risiken aufzubürden, ist für mich als Diskursethiker aber nur statthaft, wenn die Betroffenen die Gelegenheit zu informierter Zustimmung haben. Diese Konsensidee ist eine entscheidende Legitimationsbedingung, die mir freilich nur schwer erfüllbar scheint.

ZUR PERSON

Konrad Ott ist Professor für Umweltethik an der Universität Greifswald. Er hat in Frankfurt am Main Philosophie studiert und bei Jürgen Habermas promoviert. Von 2000 bis 2008 gehörte er dem Sachverständigenrat für Umweltfragen der deutschen Bundesregierung an. Als Diskursethiker geht er davon aus, dass sich die Richtigkeit von Handlungsanweisungen durch rationale Argumentation ermitteln lässt, wobei deren Regeln durch die Teilnahme am Diskurs anerkannt werden.

Wie könnte solch ein informierter Konsens aussehen, und wer könnte darüber befinden?

OTT: Letztlich nur die Völkergemeinschaft selbst. Wenn sich die Vereinten Nationen nach einem langen Diskussionsprozess damit einverstanden erklären würden, müsste ich als Ethiker anerkennen, dass zumindest diese Legitimitätsbedingung erfüllt ist. Moralische Bedenken wie die oben genannten blieben davon jedoch unberührt.

Sind andere Methoden des Climate Engineering vielleicht weniger problematisch?

OTT: Beim Climate Engineering unterscheidet man grob zwischen zwei Ansätzen: der Manipulation der Sonneneinstrahlung – darunter fällt die besprochene Sulfatoption – und der Kohlenstoffsequestrierung, also dem Anlegen von CO₂-Senken. Das kann etwa durch Aufforsten oder durch Vernässen von Mooren geschehen. Wenn die Sequestrierung mit einer Verringerung der Emissionen kombiniert würde, kämen wir beim Klimawandel vielleicht mit einem blauen Auge davon.

Würde die Sequestrierung die Reduktionsbemühungen nicht genauso unterminieren wie der Aerosolansatz?

OTT: Nein, weil sie einen anderen Pfad ergibt. Wenn wir die Emissionen stark verringern, uns klug anpassen und darüber hinaus temporäre CO₂-Senken anlegen, dann ist das ein ganz bestimmter Pfad, der den Klimawandel in einem tolerierbaren Bereich halten könnte. Zudem bestehen bei CO₂-Senken kaum Risiken. Da kann man im Grunde nur sehr wenig falsch machen, und die Maßnahmen sind reversibel.

Es gibt dazu aber auch ganz andere Meinungen. Was, wenn die CO₂-Lager den Boden zerstören oder undicht werden?

OTT: Ich habe nicht von Lagern gesprochen, also nicht von CCS, dem Verpressen von CO₂ tief im Erdboden. Vielmehr meine ich natürliche Kohlenstoffsinken. CCS wäre noch einmal gesondert sehr gründlich zu bewerten. Darauf möchte ich hier aber nicht näher eingehen.

Warum nicht?

OTT: Weil man beim Abwägen der verschiedenen Climate-Engineering-Optionen am Ende immer bei der Aerosolinjektion landet; denn sie wirkt relativ schnell und verursacht vergleichsweise wenig direkte Kosten. Außerdem

kann sie von einem oder einigen wenigen Staaten im Alleingang durchgeführt werden. Deswegen beschäftige ich mich vor allem damit, ob diese Option ethisch legitim sein kann.

Was ist mit der Idee, die Sonneneinstrahlung im Weltall mit Schutzschirmen abzufangen – wäre das nicht die perfekte großtechnische Lösung, ohne Nebenwirkungen?

OTT: Ich finde es einigermaßen kurios, wenn gerade von den Kreisen, die uns immer vorrechnen, wie teuer die Verringerung der Emissionen ist, plötzlich Vorschläge kommen, deren Kosten im Bereich von Billionen US-Dollar liegen. Schon grobe Überschlagsrechnungen zeigen, dass die Vermeidung von Emissionen sehr viel preiswerter ist.

Ist das Argument nicht eher ökonomisch als ethisch?

OTT: Ökonomische Entscheidungen sind ethisch nie neutral. Ob ich mein Geld für Solaranlagen ausbebe oder für Sonnenschirme im All, hängt nicht nur von wirtschaftlichen Überlegungen ab, sondern ist auch eine Sache meiner persönlichen Wertvorstellungen. Investitionsentscheidungen verändern die Zukunft und die Welt, die andere vorfinden.

Und wenn ein paar superreiche Wohltäter der Menschheit diese Schirme im All spendieren?

OTT: Anders formuliert, fragen Sie: Wenn es die perfekte technische Lösung ohne Nebenwirkungen gäbe, sollte man sie dann realisieren? Aber das ist eben Sciencefiction, diese Patentlösung existiert nicht. So ein Gedankenexperiment bringt uns auch ethisch nicht weiter. Die Suche nach der technischen Patentlösung ist nur dazu geeignet, uns den Blick zu verengen und zu verstellen.

Dann kommen wir zurück zur Realität. Ist es für Ihre ethische Einschätzung auch von Belang, wer die großtechnischen Climate-Engineering-Maßnahmen propagiert?

OTT: Es fällt ja auf, dass genau die Nationen, die in der Vergangenheit Klimaverhandlungen sabotiert haben, diese Optionen jetzt in die Diskussion bringen. Ich überlege tatsächlich, ob es ein Argument dafür geben kann, solchen Ländern die moralische Berechtigung abzusprechen, derartige Vorschläge zu machen.

Was ist das Ergebnis Ihrer Überlegungen?

OTT: Der Gedanke, dass jemand durch sein Verhalten in der Vergangenheit das Recht verwirkt hat, ein bestimmtes Argument vorzubringen, ist für mich als Diskursethiker sehr ungewöhnlich. Man könnte vielleicht Begriffe wie Glaubwürdigkeit oder Aufrichtigkeit heranziehen, um zu begründen, warum jemand die moralische Legitimation verliert, eine Option zu vertreten, wenn er zuvor alle anderen Lösungswege blockiert hat. Aber das ist ein sehr harter Vorwurf, da muss man sich seiner Gründe sehr sicher sein. Ich hege noch Bedenken, ob ein solches Vorgehen zulässig ist. Prinzipiell aber halte ich es durchaus für vorstellbar, so zu argumentieren. ~

Die Fragen stellte **Miriam Ruhenstroth**, freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Klimawandel und Küstenschutz

Eine der größten Bedrohungen durch die Erderwärmung stellt der Anstieg des Meeresspiegels dar. Besonders gefährlich ist er für tief gelegene Flussdeltaregionen wie in Bangladesch und Vietnam sowie für Inselstaaten in der Südsee und der Karibik. Auch auf Deutschland kommen beträchtliche Herausforderungen zu.

Von Horst Sterr

Seit Beginn der Industrialisierung übt der Mensch einen stetig wachsenden Einfluss auf das irdische Klimasystem aus, indem er Gase freisetzt, welche die Rückstrahlung der Wärme vom Erdboden in den Weltraum verhindern. Diese Treibhausgase, namentlich Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Stickoxide und Ozon, kommen zwar schon immer in gewissen Mengen in der Erdatmosphäre vor. Durch die vom Menschen betriebene Land- und Energienutzung nimmt ihre Konzentration jedoch beständig zu. Dadurch ist die globale Durchschnittstemperatur seit 1900 schon um knapp ein Grad Celsius angestiegen. Da eine Beschränkung oder gar Reduktion des Ausstoßes an Treibhaus-

gasen leider nicht in Sicht ist, wie jüngst die Klimakonferenz in Durban zeigte, wird sich die Erde weiter erwärmen – um schätzungsweise zwei bis fünf Grad Celsius bis zum Jahr 2100.

Wie ein Blick zurück in die Erdgeschichte lehrt, wirkt sich das auch auf den Meeresspiegel aus. So schwankte dieser in den letzten zwei bis drei Millionen Jahren als Folge des mehrfachen Wechsels zwischen Kalt- und Warmzeiten um bis zu 130 Meter. Noch vor 20 000 Jahren lag fast das gesamte Nordseebecken trocken. Mit dem Ende der letzten Eiszeit vor 12 000 bis 6000 Jahren stieg der Spiegel der Weltmeere um rund 120 Meter an. Danach blieb er weit gehend stabil; durch die heutige Erderwärmung droht er sich jedoch weiter zu erhöhen. Im 20. Jahrhundert betrug der Anstieg – nach einem langsamen Beginn und einer deutlichen Beschleunigung zum Ende hin – im globalen Durchschnitt bereits 17 Zentimeter. Hochpräzise Messungen per Satellit ergaben inzwischen, dass er sich seit 1990 etwa verdoppelt hat und jetzt 3,3 Zentimeter im Jahrzehnt ausmacht. Angesichts der zu erwartenden weiteren Erwärmung rechnen einige Wissenschaftler mit einer Erhöhung des Meeresspiegels um bis zu zwei Meter bis zum Jahr 2100 (Grafik auf S. 16).

Das liegt unter anderem an der Ausdehnung des Meerwassers, das sich bis in rund 500 Meter Tiefe erwärmt. Dieser Effekt war für etwas mehr als die Hälfte des Meeresspiegelanstiegs im 20. Jahrhundert verantwortlich. Weitere 30 bis 35 Prozent resultierten aus dem Abschmelzen von Gebirgsgletschern, der Rest entfiel auf Verluste bei den großen Inlandeis Massen der Polarregionen.

Nach jüngsten Beobachtungen schmilzt das Inlandeis Grönlands, das relativ weit südwärts in den immer wärmer werdenden Nordatlantik hineinreicht, inzwischen aber viel rascher ab als vermutet. Darauf ließen sich zwischen 2003 und 2008 bereits 40 Prozent des damaligen Meeresspiegelanstiegs um 2,5 Millimeter pro Jahr zurückführen – mit zunehmender Tendenz. Deshalb rechnen Klima- und Eisfor-

AUF EINEN BLICK

LAND UNTER?

1 Weil bei steigenden globalen Temperaturen das **Festland** eis abschmilzt und sich das Meerwasser ausdehnt, erhöht sich durch den Klimawandel der **Meeresspiegel** – um möglicherweise zwei Meter bis zum Ende des Jahrhunderts.

2 Ungeschützte tief gelegene **Küstenregionen** – insbesondere **Deltagebiete** in Südostasien – und flache Inseln werden dadurch überflutet. In eingedeichten und etwas höher gelegenen Bereichen drohen **häufigere schwere Überschwemmungen** durch das **vermehrte Auftreten starker Stürme**.

3 In Europa und speziell Deutschland lässt sich ein Landverlust vermutlich vermeiden, allerdings nur mit hohem finanziellem und technischem Aufwand für die **Erhöhung der Deiche** und die **Installation von Pumpwerken**.

4 Allerdings droht die **Zerstörung wertvoller Naturräume** wie des Wattenmeers. Damit verschwindet zugleich ein natürlicher Puffer gegen Sturmfluten.

5 Am stärksten gefährdet sind wirtschaftlich schwache **Schwellen- und Entwicklungsländer**, bei denen ein wirksamer Küstenschutz aus finanziellen oder technischen Gründen meist nicht möglich ist.

scher mit einer Erhöhung des Meeresspiegels um 80 bis 150 Zentimeter bis zum Ende des Jahrhunderts – deutlich mehr als die 20 bis 60 Zentimeter, die der UN-Klimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) noch in seinem vierten Sachstandsbericht aus dem Jahr 2007 angibt. Sollte das gesamte Eis Grönlands abschmelzen, was bei anhaltend starkem Erwärmungstrend in 300 Jahren möglich scheint, betrüge der Anstieg sogar bis zu sieben Meter.

Allerdings gibt es deutliche lokale Abweichungen vom globalen Mittelwert. So heben sich manche Gebiete in den hohen Breiten, die während der Kaltzeit kilometerdicke Eisdecken trugen, wegen der Druckentlastung seit deren Abschmelzen immer noch und müssen daher keinen Meeresspiegelanstieg befürchten. Das gilt etwa für das nördliche Skandinavien. Dagegen senkt sich andernorts das Land – insbesondere in großen, dicht besiedelten Deltagebieten, wo die Entnahme von Grundwasser zur Verdichtung von Sedimenten führt. Da-

durch kann sich hier der Meeresspiegel um bis zu mehrere Zentimeter pro Jahr erhöhen. So sieht beispielsweise das Chao-Phraya-Delta mit der 13-Millionen-Stadt Bangkok einer sehr ungewissen Zukunft entgegen – sogar an eine Verlegung der thailändischen Kapitale wird inzwischen gedacht.

Generell sind Küstenräume als Zentren von Fischerei, Handel und Seeverkehr besonders dicht besiedelt. Hier reicht deshalb vielfach schon ein Anstieg des Meeresspiegels um einen halben bis einen Meter, um Großstädte und Ballungsgebiete in Bedrängnis zu bringen, zumal mit dem Klimawandel auch Stürme und Niederschläge zunehmen dürften. Bedroht sind zudem viele wertvolle oder einzigartige Küsten-

Schon heute steht der Hamburger Fischmarkt bei Sturmflut regelmäßig unter Wasser. Bei steigendem Meeresspiegel infolge der Erderwärmung wird die Überflutungsgefahr weltweit zunehmen.

MIT FRDL. GEN. VON CHRISTIAN MEYER, HAMBURG

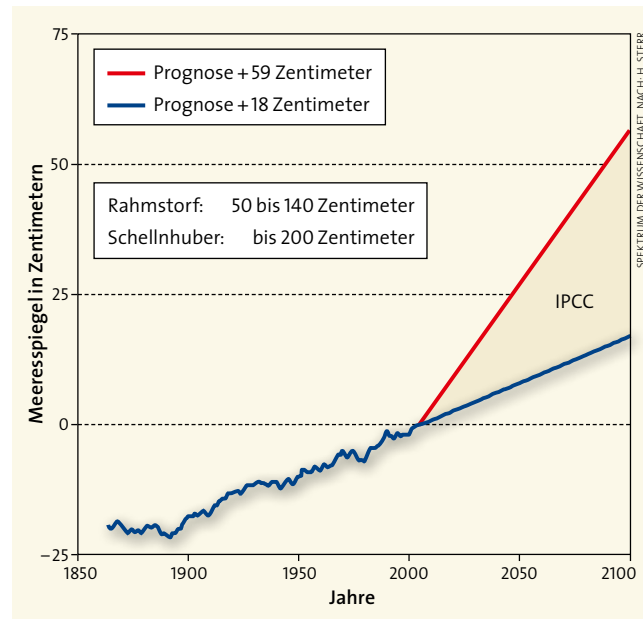


Von 1870 bis 2005 ist der Meeresspiegel im weltweiten Durchschnitt um etwas mehr als 20 Zentimeter gestiegen. Durch die zunehmende Erderwärmung dürfte er sich laut dem vierten Sachstandsbericht des UN-Klimarats IPCC von 2007 bis Ende des Jahrhunderts um weitere 18 bis 59 Zentimeter erhöhen. Einige Klimaforscher wie Stefan Rahmstorf und Hans-Joachim Schellnhuber vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung erwarten sogar ein rascheres und stärkeres Abschmelzen des Grönlandeises, so dass der Anstieg des Meeresspiegels bis zu zwei Meter betragen könnte.

Ökosysteme wie das Wattenmeer, tropische Korallenriffe und Mangrovenwälder, die sich in der Regel noch schwerer schützen lassen als Siedlungen und Häfen. Außer den Deltas gehören kleine, flache Inselarchipele wie die Malediven und zahlreiche Inseln in der Südsee und der Karibik zu den Hochrisikogebieten. Sie bieten weder Rückzugsräume für die Bevölkerung noch Baumaterial für Küstenschutzanlagen. Viele von ihnen dürften deshalb auf längere Sicht unbewohnbar werden oder ganz versinken.

Wie eine Betrachtung der Küstennationen mit der höchsten Bevölkerungsdichte in überflutungsgefährdeten Regionen zeigt, gehören Bangladesch und Vietnam, die beide in Südostasien liegen und große Deltagebiete haben, zu den besonders bedrohten Ländern. In den subtropischen Zonen verschlimmern regelmäßig auftretende schwere tropische Wirbelstürme die Lage zusätzlich, weil sie das Meerwasser großflächig mehrere Meter hoch auftürmen, während an Land sintflutartige Regenfälle niedergehen. So wurden im August 2005 beim Durchzug des Hurrikans Katrina das Mississippidelta und die Stadt New Orleans überflutet. Über 2000 Menschen starben bei dieser größten Naturkatastrophe in der jüngeren Geschichte der USA.

In Europa ist außer dem Podelta und der Lagune von Venedig die Nordseeküste von der Rheinmündung bis zur jüt-



ländischen Halbinsel am stärksten gefährdet. Dieser Küstenstreifen ist extrem flach, was der Name Niederlande bereits zum Ausdruck bringt. Zudem besteht er aus weichen Meeresedimenten, die mit zunehmendem Alter zusammensacken. Zugleich senkt sich hier als Gegenbewegung zu den sich hebenden Landmassen Skandinaviens der Boden leicht ab. Deshalb ist der Meeresspiegel an der deutschen Nordseeküste im 20. Jahrhundert mit 25 Zentimetern deutlich stärker gestiegen als im globalen Mittel. Hinzu kommt, dass dieser Küstenabschnitt nach Norden bis Nordwesten exponiert ist. Aus dieser Richtung entwickeln sich meist die winterlichen Sturmfluten, die den Wasserstand an der Küste um mehrere Meter ansteigen lassen.

Deshalb wurde hier schon vor fast 1000 Jahren mit dem Bau von Schutzanlagen begonnen: zuerst Warften (künstliche Hügel), später Deichen. Trotz mittelalterlicher Sturmflut-

Spektrum der Wissenschaft Extra »Mensch, Natur, Technik« ist eine regelmäßige Sonderpublikation in Kooperation mit der VolkswagenStiftung

www.spektrum.de/mnt

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte, Redakteur dieser Sonderpublikation)
Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 4/2012

VolkswagenStiftung

Leitung Kommunikation: Jens Rehländer
Projektmanagement Veranstaltungen: Anna Böhning

www.volkswagenstiftung.de

Spektrum CUSTOM
DER WISSENSCHAFT PUBLISHING

Leitung: Dr. Joachim Schüring
Anschrift: Spektrum der Wissenschaft – Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,
Tel. 06221 9126-612, Fax 06221 9126-5612;

www.spektrum.com/cp

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: © 2012 (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.

katastrophen war diese Küstenverteidigung bislang erfolgreich. Der Klimawandel bringt nun aber neue Herausforderungen mit sich.

Dies gilt in abgeschwächter Form auch für die Küstengebiete der südlichen Ostsee. Zwar sind sie von den Gletschern der letzten Eiszeit geprägt und damit hügeliger. Zudem fehlt das Gezeitenregime der Nordsee. Dennoch kommt es auch hier zu Überflutungen, wenn bei bestimmten Windverhältnissen das Ostseewasser wie in einer Badewanne hin- und hergeschaukelt wird. Dabei sind es vor allem die heute relativ seltenen Winde aus nordöstlicher Richtung, die Sturmfluten entstehen lassen. Sollten sich also durch den Klimawandel die Windfelder in unseren Breiten ändern, wären die Nord- und Ostseeküste unterschiedlich betroffen. Bisherigen Klimasimulationen zufolge sollten sich eher die Westwinde verstärken.

Häufigere Sturmfluten

Als wichtigste Effekte des Klimawandels, die viele tief liegende Küstenräume weltweit betreffen werden, gelten:

1. häufigere Extrempegelstände durch Anhebung des Ausgangsniveaus bei steigendem Meeresspiegel – ein Sturmflutwasserstand, der bislang statistisch nur alle 100 Jahre vorkam, wird künftig alle zehn Jahre oder noch öfter auftreten;
2. Rückstau des Oberwassers in Flussmündungen sowie Grundwasseranhebung mit Bodenvernässung in ufernahen Zonen;
3. dauerhafte großflächige Landverluste in Marschgebieten und Deltas durch Ertränken;
4. Vordringen von Meerwasser landeinwärts mit Versalzung von Böden und Grundwasser als Folge;
5. zunehmende Erosion von Stränden, Dünen und Kliffs an Lockergesteinsküsten;
6. möglicher Verlust von seeseitigen Ökosystemen wie Watten, Seegras- und Salzwiesen oder Mangrovenwäldern;
7. zunehmender Stress für Korallenriffe durch hohe Wassertemperaturen (Korallenbleiche) und beschleunigten Anstieg des Meeresspiegels.

Die beiden letztgenannten Effekte beeinträchtigen die Produktions- und Regulationsfunktionen von Küstenökosystemen, was leider oft ignoriert oder unterschätzt wird. Das Küstenmeer stellt für die Anwohner Rohstoffe, Nahrung, Lebens- und Erholungsraum oder Lagerstätten für Abfälle zur Verfügung. Außerdem spielen die von selbst ablaufenden Prozesse der Bioregulation im aquatischen Milieu eine wichtige Rolle. So gelänge es ohne die natürliche Filter- und Pufferwirkung von Feuchtgebieten oder Dünen nur mit sehr hohen Kosten und aufwändigen Technologien, Nähr- und Schadstoffe ähnlich wirksam zurückzuhalten. Der Klimawandel zieht zahlreiche Einschränkungen dieser Ökosystemdienstleistungen nach sich, was bei der Klimafolgenabschätzung bislang zu wenig beachtet wurde.

Die unter 1. bis 5. genannten Effekte bedrohen oder beeinträchtigen direkt das menschliche Leben und Wirtschaften

in der Küstenzone. Kurzfristig nimmt die Überflutungsgefahr zu, und die Küstenerosion beschleunigt sich. Längerfristig werden bei weiter steigendem Meeresspiegel Vernässung und Versalzung des Bodens an Bedeutung gewinnen.

Ob und wie gut sich diese Bedrohungen beherrschen lassen, hängt vom Typ der Küstenlandschaft ab – sowie davon, was die betroffenen Regionen an materiellen Ressourcen aufbieten können. Generell gibt es zwei Möglichkeiten: Anpassung oder Verteidigung. Im ersten Fall versucht man, der Gefahr auszuweichen – sei es durch Rückzug aus überflutungsgefährdeten Gebieten oder durch den Bau von Häusern auf Warften oder Pfählen. Das praktiziert die Bevölkerung in vielen Entwicklungsländern außerhalb von Großstädten bis heute. Sie kann so flexibel auf eine Zuspitzung der Situation reagieren. Bei wachsenden Städten in exponierten Lagen ist ein solches Ausweichen aber kaum möglich.

Auf die Verteidigungsstrategie setzen dagegen Gebiete mit einer langen Küstenschutzhistorie, wie sie besonders in Europa zu finden sind. Vom Rhein-Maas-Mündungsgebiet bis zum nördlichen Ende des Wattenmeers bei Esbjerg in Dänemark ist die Festlandküste durchgehend eingedeicht; Ähnliches gilt für Marschenküsten im südlichen England sowie in Frankreich, Italien und Spanien. Trotz wiederholter Sturm-

Norddeutschland und der Klimawandel im Überblick

- Deutschland hat insgesamt 3700 Kilometer Küste.
- Davon entfallen auf die Nordsee 1580 und auf die Ostsee 2120 Kilometer (inklusive Boddengewässer und Inseln).
- Überflutungsgefährdet sind die Landflächen niedriger als fünf Meter über Normalnull an der Nordsee- und drei Meter über Normalnull an der Ostseeküste.
- Dies entspricht einer Gesamtfläche von 13 900 Quadratkilometern; ein Großteil davon ist derzeit durch Deiche geschützt.
- Im Überflutungsgebiet leben 3,2 Millionen Menschen.
- Die volkswirtschaftlichen Werte im Überflutungsgebiet belaufen sich auf mehr als 500 Milliarden Euro.
- Im Überflutungsgebiet sind mehr als eine Million Arbeitsplätze angesiedelt.
- Gefahren drohen Großstädten an der Nordsee (Hamburg, Bremen) durch Sturmfluten.
- Auch Ostseestädte wie Kiel, Lübeck, Rostock und Greifswald sind – mangels Deichschutz – teilweise überflutungsgefährdet.
- Den Tourismuszentren an Nord- und Ostsee droht der Verlust ihrer Strände.
- Die Kosten für Küstenschutzmaßnahmen wie Deichbau und Sandvorspülungen werden stark steigen.
- Langfristig können große Teile der ökologisch wertvollen Salzwiesen und Wattflächen verloren gehen.

flutkatastrophen konnte hier bislang eine starre Verteidigungslinie gehalten werden. Das Beispiel der Niederlande, wo große Flächen schon länger unterhalb des Meeresspiegels liegen, zeigt aber auch, welch immenser technischer und finanzieller Aufwand damit verbunden ist – vor allem für die Drainage der Polder mittels Pumpwerken.

Bedrohung für Wattenmeer und Küstentourismus

An der deutschen Nordseeküste liegen die eingedeichten Marschflächen bisher größtenteils noch so hoch, dass das aus dem Hinterland kommende Wasser bei Ebbe mit Gefälle in die Nordsee fließt. Wenn der Meeresspiegel um einen halben bis einen Meter ansteigt, müssen sie aber auch hier zu Lande mit hohem Energie- und Kostenaufwand künstlich entwässert werden. Zugleich sind die vorhandenen Deiche so zu verstärken und zu erhöhen, dass sie immer noch ausreichende Sicherheit bieten.

Die Küstenschutzbehörden der norddeutschen Länder halten das immerhin für möglich. Trotzdem wird auch über Vorgehensweisen nachgedacht, die der natürlichen Küstenentwicklung außerhalb der Siedlungen mehr Raum geben. Anderenfalls könnte nämlich das Wattenmeer früher oder später ganz verschwinden, eingeklemmt zwischen der rasch ansteigenden Nordsee auf der einen und den massiven Deichbauten auf der anderen Seite. Damit würde nicht nur ein Weltnaturerbe verloren gehen, sondern auch ein natürlicher Puffer, der die Deiche, das Festland und die küstennahen Siedlungen bislang vor noch größeren Sturmflutschäden bewahrt hat. Die Deichsicherheit geriete dadurch also weiter in Gefahr. Abgesehen davon ist das Watt als einzigartiger Naturraum auch für den Küstentourismus von herausragender Bedeutung.

Ähnlich gravierend und schwierig zu meistern ist das zweite Problem: die bei steigendem Meeresspiegel immer rascher fortschreitende Küstenerosion. Sie betrifft vor allem die sandigen Brandungsküsten, deren Strände das wichtigste Kapital für den wirtschaftlich sehr bedeutsamen Küstentourismus sind – nicht nur an der Nord- und Ostsee, sondern an vielen Orten weltweit.

Auf Sylt werden schon seit den 1990er Jahren jährlich rund zehn Millionen Euro dafür aufgewendet, mit Sandaufspülungen die ständigen Sandverluste an der Westseite zu bekämpfen. Dabei ist diese Insel noch in der glücklichen Lage, dass es vor ihrer Küste ausreichend Sand auf dem Boden der Nordsee gibt, den Schiffe direkt über Rohrleitungen auf den Strand pumpen können. An der Ostsee geht das nicht so einfach. Hier müsste der Sand an vielen Stellen per Schiff oder Lastkraftwagen herantransportiert werden, was jedoch die finanziellen Möglichkeiten der kleineren Küstengemeinden übersteigen würde. Für den Küstentourismus in Deutschland zeichnen sich mittel- bis langfristig also massive Probleme ab.

Weltweit nimmt der Aufwand für Schutzmaßnahmen gegen den ansteigenden Meeresspiegel und die häufiger auf-

tretenden Sturmfluten schon jetzt dramatisch zu. Wohlhabendere Nationen wie die Niederlande und Deutschland verfügen wohl noch auf absehbare Zeit über die finanziellen und technischen Mittel, die Überflutungsrisiken und Landverluste einzudämmen. Aber selbst hier zeigen sich bereits ernst zu nehmende Defizite, beispielsweise bei der Hochwassersicherung in Küstenstädten wie Hamburg, Kiel oder Lübeck. Langfristig müssen wohl Kosten-Nutzen-Überlegungen angestellt werden, wie sich die begrenzten Mittel am effektivsten einsetzen lassen und wo höhere Risiken in Kauf zu nehmen sind.

Ärmere Länder in der Dritten Welt trifft der Anstieg des Meeresspiegels wesentlich stärker. So gibt es in den dicht besiedelten Flussdeltas von Vietnam, Bangladesch oder Ägypten kaum adäquate Deiche und Schutzanlagen. Auf Grund der natürlichen Gegebenheiten wäre hier die Errichtung solcher Bauwerke selbst mit internationaler Finanzhilfe ohnehin sehr schwierig. Auf Inselarchipelen wie den Malediven oder den Bahamas dürfte ein angemessener Hochwasser- und Erosionsschutz mangels Platz und Baumaterial sogar prinzipiell unmöglich sein. Wie so oft leiden also ausgerechnet die wirtschaftlich schwachen Schwellen- und Entwicklungsländer am stärksten unter der fortschreitenden globalen Erwärmung. ~

DER AUTOR



Horst Sterr ist Professor für Physische Geografie und Küstengeografie an der Universität Kiel. Er hat Geografie und Geologie studiert – zunächst an der Universität Regensburg und später an der University of Colorado in Boulder, wo er 1980 auch promovierte. Von 1992 bis 1997 war er wissenschaftlicher Leiter des Verbundvorhabens »Klimaänderungen & Küste« an der Universität Oldenburg. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Klima- und Küstengeografie.

QUELLEN

- Brückner, H. et al.:** Trifft es nur die Armen? Der Meeresspiegelanstieg und seine Folgen für die Küstentiefländer der Erde. In: Ehlers, E., Leser, H. (Hg.): Geographie heute für die Welt von morgen. Klett-Perthes, Gotha 2002, S. 90–98
- Schirmer, M. et al.:** Meeresspiegelanstieg und hydrologische Probleme der Küstenzone. In: Lozán, J.L. et al. (Hg.): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? 3. Auflage 2011
- Sterr, H. et al.:** Risikomanagement im Küstenschutz in Norddeutschland. In: Felgentreff, C., Glade, T. (Hg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2007, S. 337–352
- Sterr, H.:** Assessment of Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise for the Coastal Zone of Germany. In: Nicholls, R. (Hg.): Global Overview of Coastal Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise. In: Journal of Coastal Research Special Issue 24, S. 380–393, 2008
- Sterr, H. et al.:** Die ungewisse Zukunft der Küsten. In: Maribus (Hg.): World Ocean Review. Mare, Hamburg 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142730

Wie hart trifft es Deutschland?

Den Ergebnissen regionaler Klimamodelle zufolge werden unsere Sommer heißer und die Winter feuchter – und die Gefahr extremer Niederschläge nimmt zu.

Von Paul Becker, Thomas Deutschländer und Florian Imbery

Laut UNO-Klimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) bestehen kaum noch Zweifel: Menschliches Handeln beeinflusst unser Klima nachhaltig. Die untere Erdatmosphäre hat sich zwischen 1906 und 2005 global um 0,74 Grad Celsius erwärmt – mit deutlich steigender Tendenz seit den 1980er Jahren. Wenn sich die Aufheizung in den kommenden Dekaden weiter beschleunigt, wird das unser aller Leben maßgeblich beeinflussen. Was uns erwartet, können Wissenschaftler mit Computersimulationen abschätzen, die möglichst viele

Komponenten des irdischen Klimasystems nachbilden. Zunächst wurden hierfür ausschließlich globale Modelle verwendet, welche die durchschnittliche Erwärmung der Erde insgesamt erfassten. Für spezielle Aussagen zur Klimaentwicklung in eng begrenzten Gebieten haben sie in aller Regel jedoch nicht die nötige räumliche Auflösung. Um auch solche detaillierteren Informationen zu erhalten, arbeiten Klimaforscher seit rund 20 Jahren an der Entwicklung regionaler Modelle.

Doch auch sie geben meist noch keinen Aufschluss darüber, wie sich die Klimaänderung auf die verschiedenen Lebensbereiche auswirken wird. Dafür bedarf es zusätzlich so genannter Wirkmodelle, die beispielsweise den Einfluss auf die Land- und Forstwirtschaft oder auf den Wasserhaushalt erfassen. Erst sie erlauben es, die Folgen des Klimawandels auf den verschiedensten Gebieten zu simulieren, so dass sich optimale Anpassungsstrategien entwerfen lassen.

AUF EINEN BLICK

HEISSE SOMMER, NASSE WINTER

1 Globale Klimamodelle haben räumliche Auflösungen von 200 bis 500 Kilometern und erlauben deshalb keine Aussagen für einzelne Regionen. Das leisten **regionale Modelle**, die auf der Grundlage der globalen Daten und unter Berücksichtigung **topografischer Besonderheiten** Trends für kleinere Gebiete errechnen.

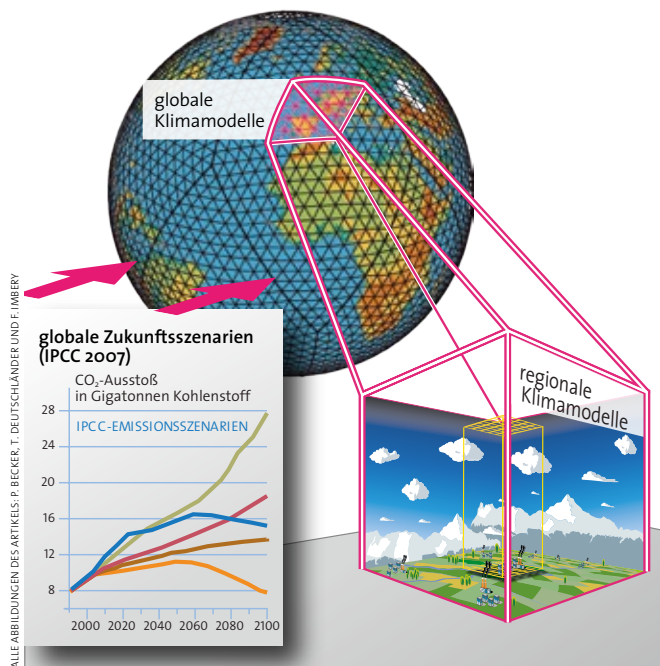
2 Um **zuverlässige Aussagen** zu erhalten, bündeln Klimaforscher die Ergebnisse möglichst vieler Klimamodelle und werten sie kollektiv aus – eine Vorgehensweise, die als **Ensembleansatz** bezeichnet wird.

3 Auf der Basis von 19 regionalen Klimaprojektionen präsentiert der **Deutsche Klimaatlas** wahrscheinliche **Szenarien** für das zukünftige Klima in Deutschland im Vergleich zu den heutigen Verhältnissen.

4 Demnach steigt bis Ende dieses Jahrhunderts die Durchschnittstemperatur in der Bundesrepublik um bis zu vier Grad Celsius. Die Sommer werden trockener und die Winter feuchter. Die Zahl der **heißen Tage** mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius verdreifacht sich. Vor allem im Winter nehmen **Starkniederschläge** zu – und damit die **Überschwemmungsgefahren**.

Szenarien für die Wirtschaftsentwicklung

Was die Klimamodelle liefern, sind nach offiziellem Sprachgebrauch keine Vorhersagen, sondern Projektionen. Die Wortwahl bringt die vielen Unwägbarkeiten zum Ausdruck, die in die Berechnungen eingehen. Dazu zählen insbesondere die zukünftigen gesellschaftlichen, ökonomischen und technologischen Entwicklungen. Diese entscheiden über den weltweiten Ausstoß an Treibhausgasen wie Kohlendioxid, die für die momentane Erderwärmung wesentlich mitverantwortlich sind. Im letzten IPCC-Bericht waren es vier Familien aus so genannten SRES-Szenarien (Special Report on Emission Scenarios), welche die möglichen Emissionen solcher Gase bis Ende dieses Jahrhundert erfassten. Sie trugen die Bezeichnungen A1, A2, B1 und B2 und unterschieden sich im Wesentlichen in der angenommenen wirtschaftlichen



Regionale Klimamodelle basieren zwar auf globalen Emissions-szenarien des IPCC, können aber kleinräumige geografische Gegebenheiten berücksichtigen und Entwicklungen in einzelnen Regionen simulieren.

und demografischen Entwicklung sowie im Grad der Globalisierung.

So geht A1 von einem sehr schnellen Wirtschaftswachstum und der raschen Einführung neuer, effizienterer Technologien aus, wobei die Weltbevölkerung noch bis Mitte des 21. Jahrhunderts zu- und danach abnehmen soll. Zu dieser Familie gehört insbesondere das als moderat angesehene und am häufigsten verwendete A1B-Szenario, das sich durch eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen auszeichnet.

Die SRES-Szenarien sind durch die Konzentration an Kohlendioxidäquivalenten in parts per million (ppm, millionstel Anteile) im Simulationszeitraum charakterisiert. Im fünften IPCC-Sachstandsbericht, dessen Publikation 2014 geplant ist, stehen sie jedoch nicht mehr im Vordergrund. An ihre Stelle treten Representative Concentration Pathways (RCP, repräsentative Konzentrationsverläufe). Sie geben die Änderung des so genannten Strahlungsantriebs in Watt pro Quadratmeter wieder und beinhalten folglich nicht nur die Treibhausgasemissionen, sondern – neben den natürlichen Einflüssen – alle sozioökonomischen Faktoren, welche den Strahlungshaushalt der Erde beeinflussen. Rückkopplungen zwischen Prozessen, die in den Modellen der einzelnen Forschungsdisziplinen gesondert betrachtet werden, lassen sich dadurch besser erfassen. Rechnungen mit RCP-Szenarien sind auch insofern flexibler, als sie beispielsweise mögliche Anpassungsstrategien bereits berücksichtigen können. Erste Klimaprojektionen auf ihrer Basis werden noch im Lauf dieses Jahres veröffentlicht.

Globale Klimamodelle simulieren die wesentlichen physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre, in den Ozeanen und auf der Erdoberfläche sowie die komplexen Wechselwirkungen zwischen diesen Teilsystemen auf Rechengittern mit einer Auflösung von bislang etwa 200 bis 500 Kilometern. Dabei berechnen sie die Reaktion des Klimasystems auf Veränderungen externer Randbedingungen wie der Strahlungsintensität der Sonne und der erwarteten Emission klimarelevanter Treibhausgase. Trotz zahlreicher Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen sind ihre wesentlichen Aussagen vergleichbar. Alle Simulationen, die im IPCC-Bericht von 2007 diskutiert werden, ergeben auf Basis der SRES-Szenarien beispielsweise einen mittleren globalen Temperaturanstieg von zwei bis vier Grad Celsius zum Ende des 21. Jahrhunderts sowie die Ausbreitung von Wüsten und eine Umverteilung des Niederschlags.

Globale Klimamodelle sind so aufwändig, dass sie trotz der enormen heute verfügbaren Rechenleistung kaum kleinräumige Veränderungen mit hoher zeitlicher Auflösung simulieren können. Um Aussagen darüber zu erhalten, muss man ihre Ergebnisse auf die regionale Ebene »herunterrechnen«. Das leisten regionale Klimamodelle, die nur einen Ausschnitt der Erdoberfläche betrachten, dafür aber detaillierter sind. Ihre Auflösung liegt derzeit in der Regel im Bereich zwischen 10 und 50 Kilometern. Sie berücksichtigen unter anderem Faktoren wie den Einfluss von Gebirgen oder Feinheiten der Landnutzung. Dadurch zeichnen sie ein differenzierteres Bild und liefern beispielsweise auch genauere Angaben über die räumliche Verteilung und zeitliche Variabilität des Niederschlags.

Wo liegen die Unsicherheiten?

Für alle globalen wie regionalen Klimamodelle gilt, dass sich nicht sagen lässt, welches davon das beste ist. Jedes hat seine besonderen Stärken und Schwächen und liefert unter den jeweiligen Anfangs- und Randbedingungen leicht unterschiedliche Klimatrends. Die daraus resultierende Bandbreite an Ergebnissen spiegelt ein gewisses Maß an Unsicherheit wider, die es bei der Interpretation von Klimaprojektionen zu beachten gilt.

Die Ungewissheit speist sich aus drei grundsätzlichen Quellen:

- der hypothetischen Natur der zu Grunde liegenden Emissionsszenarien, weil sich die sozioökonomische Entwicklung der Welt nur schwer abschätzen lässt;
- den Vereinfachungen in den Modellen selbst, die unmöglich alle relevanten physikalischen Prozesse in der Natur erfassen können;
- und den natürlichen Klimaschwankungen auf Grund der chaotischen Dynamik des Klimas.

Zudem sind bestimmte Abläufe und Kopplungen im Klimasystem bis heute nicht vollständig verstanden oder können nicht in den Modellen abgebildet werden. Die extrem komplexen physikalischen Prozesse in der Atmosphäre und ihre gegenseitigen Kopplungen immer genauer wiederzugeben,

ist daher eine stetige Herausforderung für die Klimamodellierer.

Auf Grund der geschilderten Unsicherheiten bieten einzelne Modellläufe keine ausreichende Basis für die Interpretation und Anwendung der Ergebnisse oder für die Planung von Anpassungsmaßnahmen. Um ein besser abgesichertes Fundament zu schaffen, betrachten Klimaforscher deshalb möglichst viele Projektionen und werten sie kollektiv aus – eine Vorgehensweise, die als Ensembleansatz bezeichnet wird.

Das 2004 ins Leben gerufene EU-Projekt ENSEMBLES bezweckte, die Voraussetzungen für die Anwendung dieser Methode in Europa zu verbessern. Dazu wurden die globalen und regionalen Klimamodelle mehrerer Forschungseinrichtungen miteinander kombiniert, um ein möglichst verlässliches Resultat zu gewährleisten.

Für Deutschland stehen aktuell mehr als 50 Ergebnisse regionaler Klimasimulationen zur Verfügung. Das im Folgenden vorgestellte Ensemble umfasst 19 regionale Klimaprojektionen, die auf dem schon erwähnten SRES-Szenario A1B beruhen und bis zum Ende des 21. Jahrhunderts reichen.

Die Trends bei Temperatur und Niederschlag

Zur Darstellung der Ergebnisse dienen so genannte Perzentile. Hierbei handelt es sich um Schwellenwerte, die nur von einer bestimmten Anzahl aller ausgewerteten Simulationen überschritten werden. Gewöhnlich betrachten Klimatologen eine konservative untere Grenze, die so gut wie sicher überschritten wird, und eine obere Schranke für unwahrscheinlich drastische Änderungen. Die tatsächliche Klimaänderung sollte innerhalb dieser Spanne liegen.

Das 15. Perzentil als untere Schwelle beschreibt Effekte, welche nicht größer als diejenigen sind, die sich aus mindestens 15 Prozent der Projektionen ergeben. Bei 85 Prozent der Simulationen fallen die Änderungen dagegen stärker aus.

An der oberen Grenze, dem 85. Perzentil, verhält es sich genau umgekehrt: Es umfasst alle Änderungen, die höchstens gleich dem sind, was 85 Prozent der Projektionen vorhersagen; nur 15 Prozent der Modelle ergeben noch stärkere Effekte. Der Bereich zwischen den beiden Schwellenwerten deckt somit 70 Prozent der Ergebnisse des betrachteten Ensembles ab.

Für die Endpunkte dieser Spanne stellt der Deutsche Klimaatlas (www.dwd.de/klimaatlas) auf der Basis des erwähnten Ensembles von 19 regionalen Klimaprojektionen dar, wie sich das Klima in der Bundesrepublik gegenüber dem Zeitraum zwischen 1961 und 1990 voraussichtlich ändern

wird. Demnach wird die Lufttemperatur im Jahresmittel bis 2050 gemäß dem 15. Perzentil um mindestens ein halbes Grad steigen (Bild unten). Laut 85. Perzentil beträgt die Zunahme dagegen zwei Grad – in Süddeutsch-

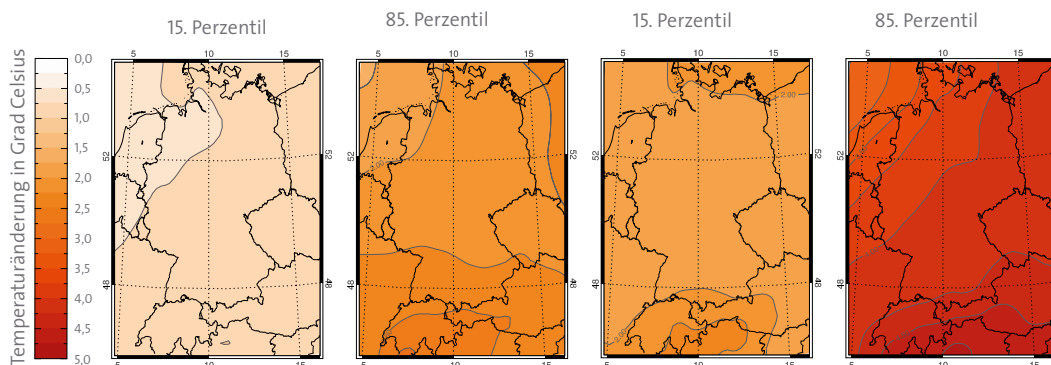
land etwas mehr und in Norddeutschland etwas weniger. Für den Zeitraum zwischen 2071 und 2100 ist für die gesamte Bundesrepublik mindestens eine Erhöhung um 1,5 Grad zu erwarten (15. Perzentil). Der Anstieg kann aber sogar 3,5 Grad in Norddeutschland und 4 in Süddeutschland betragen (85. Perzentil). Hier zu Lande wird es also erheblich wärmer.

Beim Niederschlag ist zwischen den Jahreszeiten zu differenzieren. Die Winter dürften bis zum Ende des Jahrhunderts in ganz Deutschland im Mittel feuchter, die Sommer dagegen trockener ausfallen. Gemäß den ausgewerteten Klimaprojektionen werden die mittleren Regenfälle in der heißen Jahreszeit bis 2050 erst einmal noch relativ wenig, im letzten Quartal dann aber leicht bis mäßig zurückgehen – um bis zu 20 Prozent (Bild rechts oben). In der ersten Jahrhunderthälfte könnten die Niederschlagsmengen während der Monate Juni, Juli und August in einigen Regionen auch fast unverändert bleiben. Im Winter ist dagegen mit einer Zunahme um bis zu 10 Prozent in naher und bis zu 15 Prozent in ferner Zukunft zu rechnen.

Bis Ende des Jahrhunderts werden die Obstbäume 15 Tage früher blühen! Damit vergrößert sich die Gefahr durch Spätfröste

2021 – 2050

2071 – 2100



Regionale Klimamodelle sagen für Deutschland einen Anstieg der Lufttemperatur im Jahresmittel voraus. Das 15. Perzentil und das 85. Perzentil grenzen den Bereich der wahrscheinlichsten Werte ein.

Eine besonders wichtige Frage lautet, ob durch den Klimawandel ungewöhnliche Witterungsbedingungen zunehmen. Viele Bereiche unserer Gesellschaft sind ausgesprochen anfällig gegenüber Wetterextremen und ihren unmittelbaren Folgen. Das gilt etwa für den Bevölkerungsschutz oder die Versicherungswirtschaft. Deshalb ist es von großer Bedeutung, möglichst frühzeitig zu erfahren, ob es durch den globalen Temperaturanstieg öfter zu Hitzewellen, Starkniederschlägen und schweren Stürmen kommt.

Erste Auswertungen eines Teilensembles der insgesamt zur Verfügung stehenden regionalen Klimaprojektionen für Deutschland bestätigen das. Ziemlich eindeutig ist das Bild bei der Temperatur. Hitzephasen dürften sehr viel öfter auftreten und länger andauern. Den vorliegenden Simulationen zufolge wird die jährliche Anzahl der Tage mit einer Höchsttemperatur von mindestens 30 Grad Celsius in den kommenden vier Jahrzehnten in Norddeutschland um bis zu 10 und in Süddeutschland um bis zu 15 steigen. Das entspricht annähernd einer Verdopplung gegenüber der aktuell gültigen Klimanormalperiode von 1961–1990. Bis zum Ende des Jahrhunderts könnte sich die Zahl der heißen Tage in Norddeutschland sogar um bis zu 15 und in Süddeutschland um bis zu 35 Tage erhöhen – mehr als eine Verdreifachung des bisherigen Wertes.

Auch Starkniederschläge – hier definiert als Niederschlagsereignisse oberhalb eines vorab festgelegten, jedoch regional unterschiedlichen Schwellenwertes – werden voraussichtlich öfter auftreten. Das gilt vor allem für die kalte

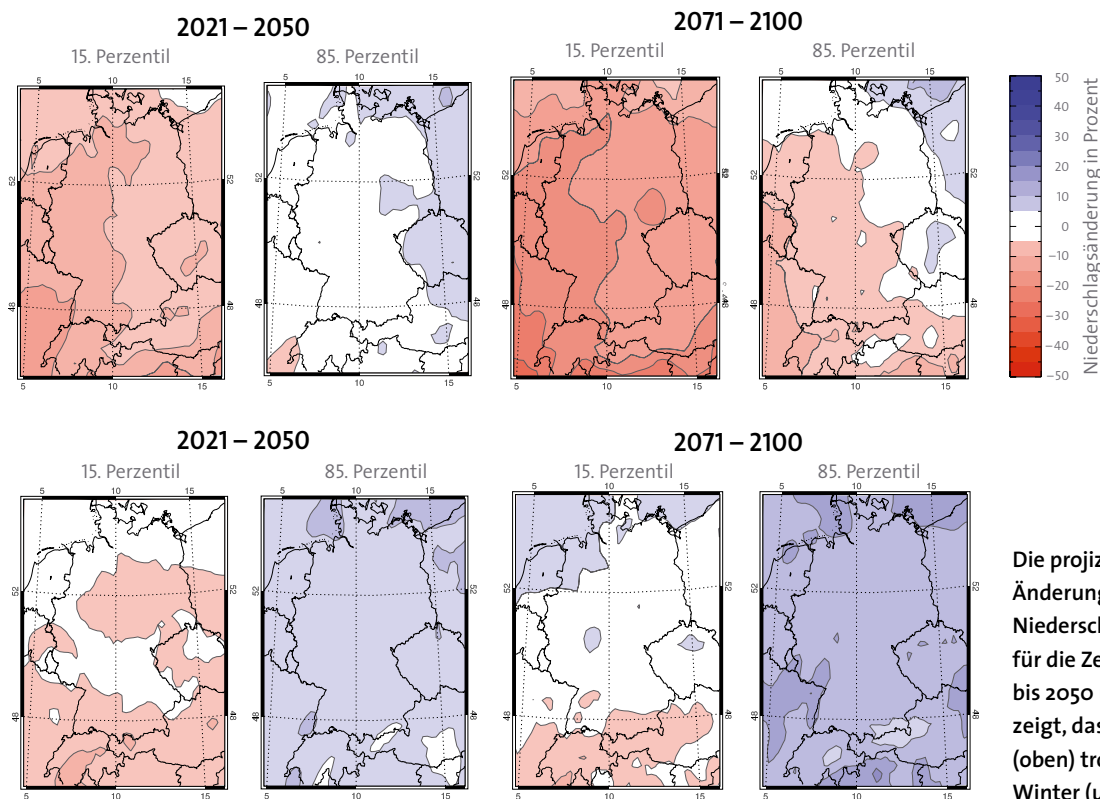
Jahreszeit, wo sich ihre Zahl in den küstennahen Regionen bis 2100 gegenüber dem Zeitraum von 1961 bis 1990 annähernd verdoppeln dürfte. In den übrigen Regionen bleibt es vermutlich bei einem moderaten Anstieg um bis zu 50 Prozent. Nur im Alpenbereich scheint sich an der Häufigkeit der Starkniederschläge wenig zu ändern.

Unliebsame Folgen für die Landwirtschaft

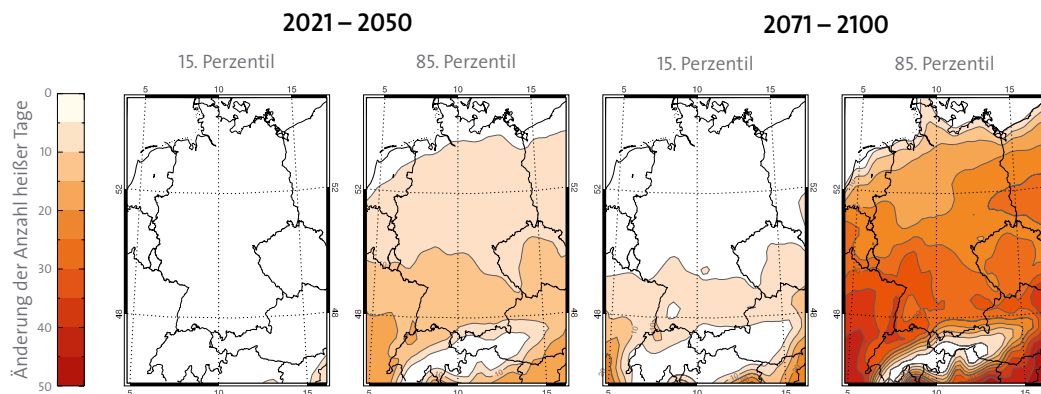
Für die Sommermonate sagt die Mehrzahl der ausgewerteten Klimaprojektionen entgegen dem allgemeinen Trend zu größerer Trockenheit ebenfalls mehr heftige Regenfälle voraus. Das würde zum Beispiel die Landwirtschaft treffen. Schließlich gehört sie zu den am stärksten vom Wetter abhängigen Wirtschaftszweigen: Knapp 80 Prozent der Schwankungen bei den Ernteerträgen in Deutschland lassen sich auf den Witterungsverlauf zurückführen.

Durch die höhere Lufttemperatur wird sich auch der Vegetationsbeginn verschieben. Auswertungen von 21 regionalen Klimaprojektionen lassen erwarten, dass er bis zum Ende des Jahrhunderts im Mittel etwa 15 Tage früher stattfindet. Damit vergrößert sich die von Spätfrösten ausgehende Gefahr zum Beispiel für die Obstblüte.

Der Klimawandel betrifft nicht nur die Landwirtschaft. Er wird sich auch auf viele andere Bereiche auswirken, namentlich das Bauwesen. Dabei geht es vor allem um die Witterungsbeanspruchung von Gebäuden. Da diese meist über viele Jahrzehnte Bestand haben, ist bei ihrer Konzeption und



Die projizierte prozentuale Änderung der mittleren Niederschläge in Deutschland für die Zeiträume von 2021 bis 2050 und von 2071 bis 2100 zeigt, dass es im Sommer (oben) trockener und im Winter (unten) feuchter wird.



Den Projektionen regionaler Klimamodelle zufolge wird sich in Deutschland die Anzahl heißer Tage, an denen die Temperatur mindestens 30 Grad erreicht, bis zur Mitte des Jahrhunderts verdoppeln und bis 2100 sogar verdreifachen.

Ausführung die zukünftige Entwicklung des Klimas zu berücksichtigen. Beispielsweise erfordern steigende Lufttemperaturen eine bessere Isolierung bei Dächern, Wänden und Fenstern sowie effizientere Methoden zur Klimatisierung des Gebäudeinneren.

Beeinflusst wird auch die Möglichkeit des Bauens selbst – hier allerdings zum Positiven. So dürfte sich die Zahl der Tage mit »erschwerter Bautätigkeit« wegen schlechter Witterung verringern – einer Auswertung der Klimaprojektionen zufolge bis Ende des Jahrhunderts um bis zu zehn Tage pro Jahr. Am stärksten profitieren werden wohl der Osten und Süden Deutschlands.

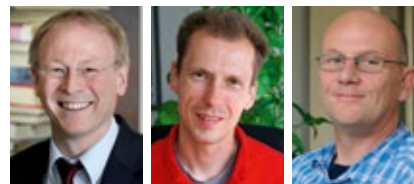
Langfristige Vorhersagen der Witterung

Neben den langfristigen Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert gewinnen kurzfristigere Prognosen für die Politik- und Wirtschaftsplanung immer größere Bedeutung. Jenseits der Wettervorhersage für die nächsten Tage klafft bisher im Zeitbereich zwischen etwa zehn Tagen und wenigen Jahrzehnten eine große Lücke. Sie zu schließen ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt der Meteorologen. Zwar gelingt es nicht, für diesen Vorhersagehorizont das genaue Wetter im Einzelnen zu berechnen. Immerhin aber sind Aussagen zur Häufigkeit verschiedener Wetterlagen möglich. Daraus lässt sich wiederum der grundsätzliche Witterungscharakter für eine bestimmte Region ableiten. Solche Abschätzungen sind sehr wichtig für Anpassungsstrategien, Risikomanagement und die Planung von Infrastrukturmaßnahmen.

Die erreichbare Genauigkeit nimmt natürlich ab, je weiter man in die Zukunft blickt. Bei der Monats- und Jahreszeitevorhersage gelingt es noch bis zu einem gewissen Grad, den tatsächlichen Witterungsverlauf zu erfassen. So lassen sich für einige meteorologische Messgrößen wie die Temperatur oder den Niederschlag die mutmaßlichen Abweichungen von den normalen Werten für eine Jahreszeit inzwischen im Voraus bestimmen. Bei der Monatsvorhersage geschieht das typischerweise für einzelne Kalenderwochen, im Falle saisonaler Prognosen zumeist auf Basis von Kalendermonaten.

Klimasimulationen erlauben dagegen nur, die über längere Zeiträume hinweg vorherrschenden großräumigen atmosphärischen Strömungsverhältnisse zu berechnen. Doch auch daraus lassen sich zumindest qualitative Aussagen über die Witterungsverhältnisse für Regionen unterhalb der Größenordnung ganzer Kontinente ableiten. Es ist also prinzipiell möglich vorherzusagen, ob etwa in Deutschland in einzelnen Jahren besonders kalte Winter oder besonders heiße Sommer auftreten. Ebenso besteht die Hoffnung, Dürreperioden oder großräumige Flutereignisse frühzeitig zu erkennen. Doch gleichgültig, ob die Vorhersage das nächste Vierteljahr oder Jahrzehnt betrifft – immer handelt es sich um eine reine Wahrscheinlichkeitsaussage. ~

DIE AUTOREN



Paul Becker (links) ist Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Offenbach und leitet dort

den Geschäftsbereich Klima und Umwelt. **Thomas Deutschländer** (Mitte) und **Florian Imbery** sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung Klima- und Umweltberatung des DWD und Experten für statistische beziehungsweise hydrologische Fragestellungen.

QUELLEN

Mitchell, J.F.B., van der Linden, P. (Hg.): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project. Met Office Hadley Centre, Exeter 2009
Moss, R.H. et al.: The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. In: Nature 463, S. 747–756, 2010
Nakicenovic, N., Swart, R. (Hg.): Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2000

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142726

Wärmeinseln im Treibhaus

Städte haben ihr eigenes Klima. So liegen die Temperaturen dort meist höher als im Umland. Deshalb lohnt es sich, die Auswirkungen der globalen Erwärmung auf unsere Metropolen gesondert zu betrachten – auch im Hinblick darauf, wie Städteplaner sich schon heute darauf vorbereiten sollten.

Von K. Heinke Schlünzen

Weltweit lebt inzwischen jeder zweite Mensch in einer Stadt; in Deutschland gilt das sogar für drei von vier Einwohnern (Zahlen der Vereinten Nationen für alle Länder unter <http://esa.un.org/unup>). Bis zur Mitte des Jahrhunderts wird die Verstädterung weiter zunehmen, vor allem in den Staaten, in denen heute noch vergleichsweise viele Menschen auf dem Land leben. Um 2050 dürften zwei von drei Erdbewohnern Städter sein.

Das ist gleich in mehrfacher Hinsicht von Bedeutung, wenn es um Fragen des Klimawandels geht. So tragen Städte stärker zur globalen Erwärmung bei als ländliche Regionen; denn sie benötigen wegen der hohen Bevölkerungs- und Verkehrsdichte weitaus mehr Energie und Rohstoffe pro Hektar. Deren Gewinnung, Bereitstellung und Verbrauch bringt beträchtliche Emissionen an Treibhausgasen und Schadstoffen mit sich. Diese fallen zwar nicht immer in den Städten selbst an. Dennoch ist die Luftbelastung dort höher als auf dem Land.

Städte tragen aber nicht nur überproportional zum Klimawandel bei, sondern erzeugen durch ihre von Menschen-

hand überformten Oberflächenstrukturen – Gebäude unterschiedlichster Höhe und Dichte, Industrieanlagen, Straßen, Parks, Wiesen, künstliche Gewässer – auch ein eigenes, lokales Klima, das so genannte Stadtklima. So liegen die Temperaturen abends und nachts über denen im Umland. Zwar ist es zwischen den Häuserzeilen weniger windig, doch treten dafür stärkere Böen auf, und die Schadstoffbelastung der Luft ist höher. Auch die Strahlungs- und Beleuchtungsverhältnisse unterscheiden sich von denen auf dem Land – ebenso die Niederschlagsmuster. Deshalb untersuchen Klimaforscher, wie sich die für die nächsten Jahrzehnte erwartete Erderwärmung speziell auf Städte auswirken wird. Immerhin lebt dort, wie eingangs erwähnt, schon heute die Mehrheit der Bevölkerung – mit steigender Tendenz – auf engstem Raum beieinander und ist damit direkt betroffen.

Unter Klima verstehen Meteorologen das typische Wetter. Damit sind nicht nur die Mittelwerte von Messgrößen wie Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeiten gemeint, sondern auch die Abweichungen davon, also die gesamte statistische Verteilung einzelner meteorologischer Parameter. Der Beobachtungszeitraum beträgt mindestens 30 Jahre; denn er muss groß genug sein, dass kurzzeitige zufällige Schwankungen die Verteilungsfunktionen nicht mehr wesentlich verändern. Länger andauernde Abweichungen vom typischen Wetter deuten dann auf eine Klimaänderung hin.

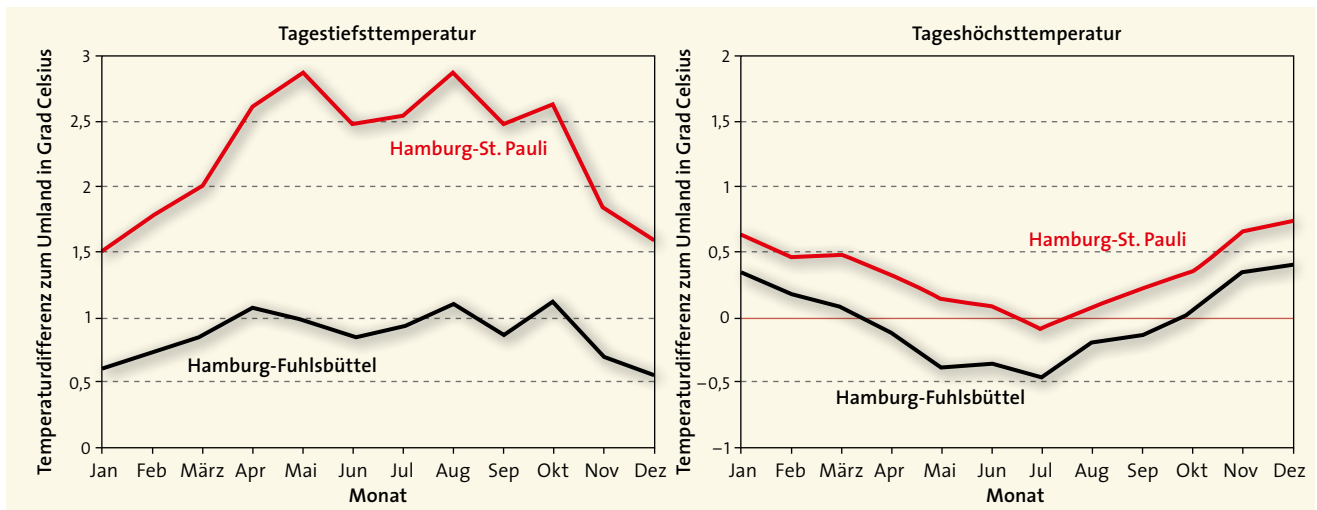
Aus meteorologischer Sicht sind vor allem direkt am Boden gemessene Daten wie Windgeschwindigkeit und -richtung, Temperatur, Niederschlagsmenge und Luftfeuchte von Interesse. Aber auch abgeleitete Größen wie die Dauer von Trockenperioden oder Kältewellen spielen eine Rolle. Bei allen Betrachtungen stehen die statistische Verteilung der Klimaparameter und deren Änderung im Vordergrund.

Wenn von der Erderwärmung die Rede ist, geht es meist um die globale Mitteltemperatur. Was die einzelnen Menschen unmittelbar betrifft, sind aber die regionalen Klimaänderungen. Diese können ganz anders – und deutlich extremer – ausfallen (siehe den Beitrag »Wie hart trifft es Deutschland?«, S. 19). Das regionale Klima für eine Stadt hängt von ihrer geografischen Lage ab und wird durch die topogra-

AUF EINEN BLICK

STADTENTWICKLUNG IN ZEITEN DES KLIMAWANDELS

- 1 Durch ihre **Oberflächenstrukturen** tragen Städte mehr zur **Erderwärmung** bei als ländliche Regionen. Hier werden auch mehr Menschen davon betroffen sein.
- 2 Schon heute sind Städte **Wärmeinseln**, deren Temperatur teils deutlich über denen des Umlands liegt. Wegen der hohen Emissionen und weil die dichte Bebauung die Durchmischung der Luftmassen erschwert, ist auch die **Schadstoffbelastung** höher.
- 3 Erste Untersuchungen und Simulationen zeigen, dass der **allgemeine Temperaturanstieg** auch die Städte voll erfassen dürfte, so dass es dort noch erheblich wärmer sein wird.
- 4 Da Gebäude im Durchschnitt erst nach etwa 50 Jahren grundlegend saniert oder abgerissen werden, sollten Städteplaner schon jetzt die künftigen Klimabedingungen berücksichtigen – etwa durch bessere **Wärmedämmung**, **Begrünung von Dächern** und das Zurückhalten von Regenwasser auf **Sickerflächen**.



K.H. SCHLÜNZEN, P. HOFFMANN, G. ROSENHAGEN UND W. RIECKE

In unseren Breiten wirken Städte als Wärmeinseln. Die Tagestieftemperaturen (links) liegen dort ganzjährig über denen im Umland. Bei den Höchsttemperaturen (rechts) gilt das zumindest für den Winter. Je dichter die Bebauung, desto größer ist der Temperaturunterschied zum grünen Umland. Das zeigt der Vergleich zwischen den Hamburger Stadtteilen St. Pauli und Fuhlsbüttel.

fischen Verhältnisse oder auch durch Wasserflächen beeinflusst. So strömt bei bestimmten Wetterlagen kühle Luft vom Schwarzwald durch das Höllental nach Freiburg. Ein anderes Beispiel ist der Föhn in München, ausgelöst durch Fallwinde am Nordrand der Alpen. Küstenstädte wiederum profitieren im Sommer von kalter Seeluft, die der nachmittäglichen Hitze entgegenwirkt.

Unterschiede zum Umland

Städte schaffen sich ihr Klima aber auch bis zu einem gewissen Grad selbst: Temperatur, Druck, Luftfeuchte und Windverhältnisse unterscheiden sich in ihrem Wert und ihrer Heterogenität vom Umland. All das sind nicht nur kurzzeitige Abweichungen, sondern langfristige lokale Besonderheiten, welche die Witterungsverhältnisse über weit mehr als 30 Jahre prägen. So wird im einfachsten Fall die Nordseite eines Gebäudes in unseren Breiten fast nie direkt von der Sonne beschienen, was sich etwa auf die Temperatur und Bodenfeuchtigkeit im Gebäudeschatten auswirkt.

Der Begriff Stadtklima bezieht sich in erster Linie auf Parameter, die für den Menschen von unmittelbarer Bedeutung sind. Das gilt zunächst einmal für klassische meteorologische Messgrößen. So beeinflusst die Temperatur unser Wärmeempfinden. Die Luftfeuchte bestimmt über Schwüle oder Trockenheit. Starke böige Winde können unser Wohlbefinden empfindlich stören. Und ob es regnet, bedeckt ist oder die Sonne scheint, wirkt sich merklich auf unsere Stimmung aus. Der Begriff Stadtklima umfasst aber auch weitere Parameter, welche die Gesundheit beeinträchtigen können – beispielsweise die Konzentrationen von Schadstoffen wie Stickoxiden, Ozon oder Feinstaub.

Wie Meteorologen schon seit Langem wissen, sind Städte in unseren Breiten nächtliche Wärmeinseln, deren Durch-

schnittstemperatur die im Umland übersteigt. Das liegt vor allem an ihrer künstlichen Oberflächenstruktur aus dichten Ansammlungen von Gebäuden mit geteerten Straßen dazwischen. Generell nimmt der Erdboden tagsüber, wenn die Lufttemperatur hoch ist und die Sonne ihn eventuell zusätzlich aufheizt, Wärme auf und gibt sie nachts wieder ab. Das dämpft den Tagesgang der Temperatur. In der Stadt verstärken die versiegelten und mit Beton, Stein oder anderen dichten Materialien bedeckten Oberflächen diesen Effekt; denn sie absorbieren an heißen Sommertagen viel mehr Wärme und speichern sie wirksamer als naturbelassene Böden. Dadurch wirken sie am frühen Abend und in der ersten Nachthälfte wie riesige Heizöfen, welche die Abkühlung verlangsamen.

Hinzu kommt, dass in bebauten Bereichen auch die Luftzirkulation und die langwellige Ausstrahlung behindert ist. Dadurch dauert die Überwärmung unter Umständen bis in die späten Nachtstunden an. Die Minimaltemperaturen liegen deshalb erheblich über denen im Umland (Grafik oben). Die Maximaltemperaturen können wegen der Wärmeaufnahme durch die dichte Bebauung dagegen etwas geringer sein als in der ländlichen Umgebung. Obwohl viele Städte im Hochsommer deswegen tagsüber schwache Kälteinseln sind, übertrifft ihre über 24 Stunden gemessene Durchschnittstemperatur die auf dem Land.

Im Winter, wenn die Sonne wenig Wärme spendet, sorgt ein weiterer Eingriff des Menschen in die Energiebilanz der Oberflächen dafür, dass es in der Stadt nicht nur nachts, sondern auch tagsüber wärmer ist als außerhalb: Die Energieverluste von Gebäuden, Industrieanlagen und Verkehr heizen die umgebende Luft auf. Diese Wärmeabgabe liegt nachts bei etwa 5 bis 10 Watt pro Quadratmeter und kann tagsüber 100 Watt pro Quadratmeter erreichen. Im Einzelfall sind noch weitaus höhere Werte möglich. So haben Wissenschaftler um

Toshiaki Ichinose vom japanischen Nationalinstitut für Umweltstudien in Tsukuba für die Innenstadt von Tokio Ende der 1990er Jahre eine Wärmeabgabe von 1590 Watt pro Quadratmeter ermittelt – mehr als das, was an Sonnenenergie von außen auf die Atmosphäre trifft.

Je dichter die Bebauung, desto ausgeprägter ist der Wärmeinseleffekt. Beispiel Hamburg: Hier registrieren die Messstationen in St. Pauli im Sommer sehr viel höhere Werte als im üppig begrünten Umland; im weniger dicht bebauten Stadtteil Fuhlsbüttel ist der Unterschied dagegen deutlich geringer.

Wie stark eine Stadt als Wärmeinsel wirkt, hängt annähernd logarithmisch von der Zahl der Einwohner ab (Bild unten). Allerdings spielen auch regionalklimatische Faktoren eine Rolle. Unter anderem fällt die Überwärmung umso geringer aus, je höher die Windgeschwindigkeit, der Bedeckungsgrad des Himmels und die Luftfeuchte sind. Würden sich durch den Klimawandel diese Faktoren ändern, könnte sich also selbst bei gleicher Energienutzung und Stadtstruktur der Wärmeinseleffekt verstärken oder abschwächen. Für das meistverwendete A1B-Szenario des UN-Klimarats (siehe den Beitrag auf S. 19) haben Peter Hoffmann, Oliver Krüger und ich mit einem statistischen Modell allerdings gezeigt, dass sich die Überwärmung in Städten im Mittel kaum ändern dürfte. Zu einem ähnlichen Resultat gelangten Barbara Früh, Meinolf Koßmann und Marita Roos vom Deutschen Wetterdienst für Frankfurt (Main).

Das bedeutet aber auch, dass die auf uns zukommende Erwärmung voll auf die städtischen Wärmeinseln durchschlagen wird. Gemäß dem A1B-Szenario steigt die mittlere Lufttemperatur in Deutschland bis Ende des Jahrhunderts im Winter um etwa 2,5 bis 4 und im Sommer um 2 bis 3 Grad Celsius. Das gilt für ländliche wie städtische Gebiete gleichermaßen: Überall wird es mehr Sommertage und heiße Tage (mit einer Höchsttemperatur von mindestens 25 beziehungsweise 30 Grad Celsius) sowie mehr Tropennächte geben (in denen die Temperatur über 20 Grad bleibt). Ihre Zahl erhöht sich – wie bisher schon – in den Städten durch den Wärmeinseleffekt entsprechend, etwa in Frankfurt um zehn Sommertage.

Dem lässt sich nur durch Umbaumaßnahmen begegnen. Eine solche Anpassung erscheint umso sinnvoller und dringender, als Gebäude typischerweise ein halbes Jahrhundert

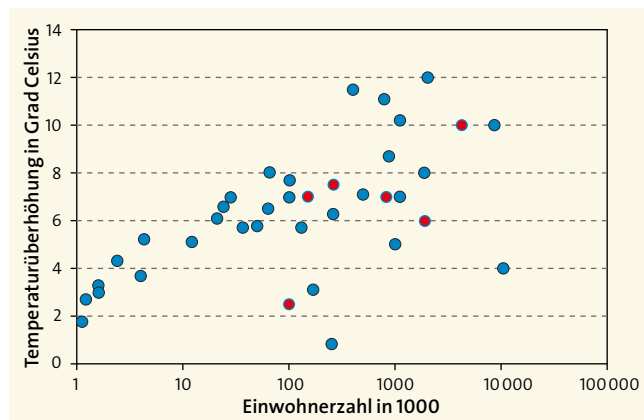
bis zur nächsten grundlegenden Sanierung oder ihrem Abriss bestehen bleiben. Alle heutigen Maßnahmen haben mithin sehr langfristige Auswirkungen. Eine bessere Wärmedämmung spart also nicht nur Energie, sondern zahlt sich auch als vorbeugende Maßnahme für das zukünftige Stadtklima aus.

Für vorausschauende Anpassungsmaßnahmen beim Städtebau lassen sich einige einfache Grundregeln formulieren. Generell empfiehlt es sich, die natürlichen Bodeneigenschaften weitestgehend zu bewahren – das heißt möglichst wenig Fläche zu versiegeln, ein Maximum an Regenwasser in der Stadt zurückzuhalten und das Grün gleichmäßig zu verteilen. Wie sich diese allgemeinen Ratschläge am besten umsetzen lassen, ist weniger klar. So gibt es noch keine gesicherten Erkenntnisse darüber, wie hoch Gebäude maximal sein und welchen Abstand sie voneinander haben sollten. Einiges ist immerhin bekannt. Untersuchungen haben übereinstimmend ergeben, dass der Einfluss einer Grünfläche allenfalls wenige 100 Meter weit reicht. Deshalb sollte eine Stadt nicht nur einzelne isolierte Parks enthalten, sondern durchweg begrünt sein. Bäume am Straßenrand sind ein Anfang. Allerdings dürfen sie nicht die Durchlüftung behindern, wodurch sich Schadstoffe anreichern würden. Ein anderes Mittel, um die Stadt nachts zu kühlen, ist die Begrünung von Dächern. In diesem Fall muss jedoch für ausreichende Bewässerung gesorgt sein, damit die Pflanzen keinen Trockenstress erleiden, der die positiven Effekte zunichtemachen würde.

Wohin mit dem Regenwasser?

Die meisten Menschen mögen keinen Regen, aber Stadtbewohner hegen meist eine besonders große Abneigung dagegen. Ein Grund dafür sind die böigen Winde in den Straßenschluchten, die den Umgang mit Regenschirmen zum Abenteuer machen können. Hinzu kommt die Gefahr der Überflutung von Gehwegen, Straßen und Kellern, vor allem als Folge von Extremniederschlägen. Um das zu verhindern, versuchen die Städte Regenwasser möglichst umgehend in Siele zu leiten. Dadurch geht aber potenzielles Grundwasser verloren, das der städtischen Vegetation fehlen wird, wenn im Zuge des Klimawandels im Sommer vermehrt Hitze- und Trockenperioden auftreten, wie regionale Klimamodelle vermuten lassen. Inzwischen sind viele Städte deshalb dazu übergegangen, Niederschlagswasser zumindest teilweise zurückzuhalten, zum Beispiel über eine Dachbegrünung oder Parkplätze mit Rasengittersteinen (Bild rechts oben). Eine gesteigerte Verdunstung durch die Vegetation sollte kühlend wirken, so dass sich der Wärmeinseleffekt abschwächt.

Von regionalen Änderungen des Niederschlags als Folge der Erderwärmung sind Stadt und Land gleichermaßen be-





Parkplätze mit Rasengittersteinen können Niederschläge aufnehmen. Weil durch die Vegetation mehr Wasser verdunstet, schwächen sie zudem den Wärmeinseleffekt von Städten ab.

troffen. Heutige Starkniederschlagsmengen werden nach dem A1B-Szenario in Deutschland bis Ende des Jahrhunderts vermutlich um etwa zehn Prozent häufiger auftreten. Das sollte bei der Planung von Sielen und Sickerflächen bedacht werden. Zu berücksichtigen ist auch, dass Städte die Niederschlagsverteilung beeinflussen. Auf der windzugewandten Seite zwingen sie nämlich die Luft zum Aufsteigen. Das verstärkt die Wolkenbildung und erhöht die Niederschlagsneigung auf der windabgewandten Seite.

Diesen Effekt haben Forscher schon bei verschiedenen Städten nachgewiesen. Ob der Niederschlag im Stadtinneren bereits zunimmt oder erst außerhalb, hängt von den lokalen topografischen Gegebenheiten und der aktuellen meteorologischen Situation ab. Aber auch die Stadtgröße spielt eine Rolle. Je ausgedehnter eine Stadt ist, desto mehr von dem leeseitig erhöhten Niederschlag fällt in ihr selbst. Das hat mein Mitarbeiter Peter Hoffmann 2009 in einer idealisierten Studie gezeigt. In Hamburg tritt nach Untersuchungen meiner Gruppe bei fast allen Windrichtungen verstärkter Lee-Niederschlag auf. Eine Ausnahme bilden nur Nordostwinde – vermutlich wegen topografischer Effekte.

Auf Grund ihrer Schadstoffemissionen können Städte aber auch für weniger Niederschläge sorgen. Insbesondere Schwefel- und Stickoxide sowie Ammoniak bilden in der Luft Aerosole. Diese Schwebeteilchen wirken als Kondensationskeime für Wassertröpfchen. Da ihre Konzentration über dem Stadtgebiet hoch ist, entstehen viele solche Tröpfchen, die um den vorhandenen Wasserdampf konkurrieren. Deshalb bleiben sie klein und zu leicht, um zu Boden zu fallen. Durch die Aerosole intensiviert sich also zwar die Wolkenbildung, aber es regnet in den leeseitigen Bereichen einer Stadt weniger.

Wir haben es folglich mit zwei gegensätzlichen Effekten zu tun. Während eine Stadt durch ihre Topografie die Niederschläge in leeseitigen Gebieten verstärkt, schwächt sie sie we-

gen ihrer Emissionen zugleich ab. Welcher Vorgang überwiegt, muss in jedem Fall einzeln untersucht werden. Für die Zukunft ist damit zu rechnen, dass der vom Menschen verursachte Schadstoffausstoß weiter zurückgeht. Damit verringert sich der Abschwächungseffekt, und die leeseitigen Niederschläge sollten zunehmen. Durch die globale Erwärmung ändern sich allerdings möglicherweise auch die Windstärken und -richtungen – und damit die Stadtteile, die im Windschatten liegen. Auskunft darüber können Simulationen mit regionalen Klimamodellen geben.

Obwohl schon seit Langem bekannt ist, dass Städte ein eigenes Klima aufweisen, bleibt noch viel zu erforschen. Dabei gilt es, die eher qualitativen Aussagen mit konkreten Zahlen zu unterfüttern, die Beobachtungen zu quantifizieren und die Schlussfolgerungen statistisch abzusichern. Städte sind von Menschen gemacht, und die Art ihrer Bebauung und Strukturierung ist es, die das Regionalklima derart modifiziert, dass es zum kleinräumigen heterogenen Stadtklima wird. Deshalb besteht grundsätzlich die Möglichkeit zum Eingreifen und zur Verbesserung der gegenwärtigen Situation. Gebäude werden regelmäßig saniert oder sogar ersetzt. Die Umstrukturierung von Städten mit dem Ziel, das lokale Klima angenehmer zu gestalten, ist daher nicht zwangsläufig mit hohen Kosten verbunden. Zugleich kann sie negativen Auswirkungen der Erderwärmung beizeiten vorbeugen. ~

DIE AUTORIN



K. Heinke Schlünzen ist Professorin für Meteorologie an der Universität Hamburg. Als Leiterin der Arbeitsgruppe »Meso- und mikroskalige Vorgänge und Phänomene« forscht sie über kleinräumige Vorgänge in der Atmosphäre.

QUELLEN

- Allen, L. et al.:** Global to City Scale Urban Anthropogenic Heat Flux: Model and Variability. In: International Journal of Climatology 31, S. 1990–2005, 15.11. 2011
- Früh, B. et al.:** Frankfurt am Main im Klimawandel – Eine Untersuchung zur städtischen Wärmebelastung. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 237, Offenbach 2011
- Hoffmann, P.:** Modifikation von Starkniederschlägen durch urbane Gebiete. Diplomarbeit Meteorologie, Universität Hamburg 2009
- Hoffmann, P. et al.:** A Statistical Model for the Urban Heat Island and its Application to a Climate Change Scenario. In: International Journal of Climatology, in Druck. doi: 10.1002/joc.2348
- Rudolf, E.:** Untersuchung von Starkniederschlägen der ENSEMBLES Regionalmodelle in der Metropolregion Hamburg. Bachelorarbeit Meteorologie, Universität Hamburg 2011
- Schlünzen, K. H. et al.:** Long-Term Changes and Regional Differences in Temperature and Precipitation in the Metropolitan Area of Hamburg. In: International Journal of Climatology 30, S. 1121–1136, 30. 6. 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1142728

So haben Sie Wissenschaft noch nie gesehen ...



Superschnell dank Haifischhaut?

Ingenieur Björn Feldhaus will Flugzeuge Treibstoff sparend bauen – indem er die Struktur von Haifischhaut auf Triebwerkschaufeln nachbildet.

www.sciencemovies.de

science
movies
.....

Acht spannende Forschungsprojekte
der VolkswagenStiftung als Videoblog