

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SERIE DARWIN
(TEIL IV)

EVOLUTION
UND RELIGION

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC
AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

04/09

APRIL 2009

PHYSIK

Wie entsteht
aus Chaos Ordnung?

MEDIZIN

Oxytozin – das Hormon
Ihres Vertrauens

EPIDEMIEN

Kampf gegen
Killerwürmer

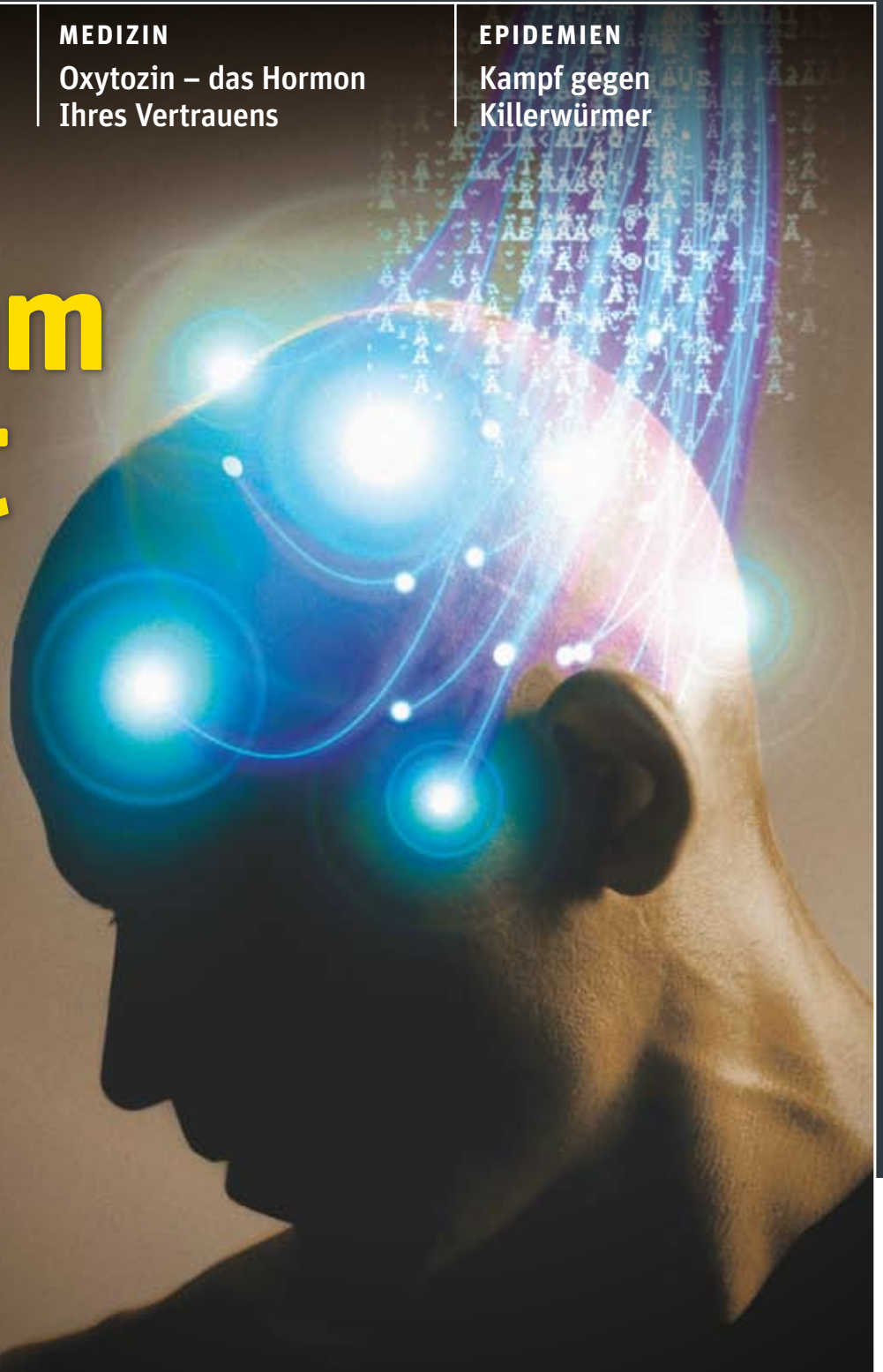
Hirn am Draht

▶ Kann man
mit Gedanken
Maschinen
steuern?

▶ Lässt sich
das Gedächtnis
downloaden?

SERIE AUTO (TEIL III)

**ELEKTROAUTOS –
DIE ROLLENDEN
STROMSPEICHER**



7,40 € (D/A) · 8,- € (L) · 14,- sFr.

D6179E



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur



Religion im Licht der Evolution

Bei meinen Vorträgen über Wissenschaftsjournalismus berichte ich gerne auch über die Vorlieben unserer Leser – also von Ihnen. »Es sind die Grenzen«, sage ich dann. Ob Kosmologie, Quantenphysik oder Hirnforschung – wo die Forschung weit draußen oder tief drinnen ins Unbekannte und Geheimnisvolle vorstößt, dort wächst offenbar auch die Faszination für »Spektrum«-Leser. Und wie viele Briefe an die Redaktion belegen, tritt noch ein Grenzgebiet hinzu: das zwischen Wissenschaft und Religion.

Im Darwin-Jahr bietet sich erneut die Gelegenheit, fernab von jedem Kreationismus die kulturelle Reibungsfläche zwischen Religion und Evolution zu erkunden. Wir tun das mit zwei Beiträgen. Zum einen berichtet der Theologe Wolfgang Achtnr über eine originelle Figur des 19. Jahrhunderts, Gustav Jaeger. Der Zoologe und Mediziner reagierte auf das Erscheinen von Darwins »Entstehung der Arten« mit Ideen, die ihn heute als Vordenker der Soziobiologie ausweisen (S. 68).

Zum anderen hat es sich der amerikanische Kognitionspsychologe Pascal Boyer zur Aufgabe gemacht, Religion »aus evolutionärer und kognitiver Sicht« zu erkunden (S. 74). Das finde ich wirklich spannend, verlangt doch das Phänomen Religion ebenfalls nach einer naturwissenschaftlichen Erklärung. Aber ist Religion nicht ein reines Kulturphänomen, wie etwa Musik, Kunst und Politik? Oder steckt mehr dahinter? Darum geht der Streit.

Der Populationsgenetiker Theodosius Dobzhansky befand einmal: »Nichts in der

Biologie ergibt Sinn, außer im Licht der Evolution.« Wäre demnach sogar Religion zuerst einmal biologisch zu betrachten? Natürlich, denn alles, was in der Welt ist, bietet uns auch eine naturwissenschaftliche Seite. Dabei geht es nicht etwa darum, »Gene für religiöses Empfinden dingfest zu machen«, wie Boyer meint. Vielmehr befasst sich der Forscher schlicht mit der Frage, »was an der Natur des Menschen Religion möglich und erfolgreich macht«. Keiner wird behaupten, damit sei das Thema bereits erschöpfend behandelt, doch kann dies die biologische und kognitive Basis klären, auf der Geist und Glaube gedeihen.

Die Resultate dieser noch relativ jungen Forschungsrichtung haben mich überrascht. Offenbar tragen wir eine besondere Prädisposition zu glauben in uns. Kein Wunder also, dass der Atheismus einen schwierigen Stand hat. Obwohl manche ja meinen, dass auch er nur eine Art von Glauben darstellt.

Für die 11. Wunschartikel-Runde stehen diesmal unter anderem Beiträge über die Neurobiologie des Tanzes, selbstreinigende Oberflächen und den Zigarettenkonsum bei Kindern zur Wahl – stimmen Sie ab unter www.spektrum.de/artikel/983339! Der Gewinner der 10. Runde ist ermittelt: der Neurochirurg Dr. Theodor Schwenk aus Bayreuth. Den Sieger-Artikel finden Sie in diesem Heft: »Wie entsteht Ordnung aus Chaos?« (S. 30).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

INHALT



ASTRONOMIE & PHYSIK
Wie entsteht Ordnung
aus Chaos?



MEDIZIN & BIOLOGIE
Mehr Vertrauen dank Chemie?



MEDIZIN & BIOLOGIE
Killerwürmer: Bessere Aussichten auf einen Impfstoff

AKTUELL

10 Spektrogramm

Kleinster Exoplanet · Vormensch mit Nussknackergebiss · Farben des Denkens · Uralte Monsterschlange · Feldknoten als Teilchen u. a.

13 Bild des Monats

Fußabdruck eines Frühmenschen

14 Draculas Stammbaum

Mutationen im Blutgerinnungshemmer bestimmten die Evolution der Vampire

16 E.colizenz zum Töten

Krebsbekämpfung mit künstlichem Räuber-Beute-System aus Bakterien

20 Mit Salz aus Holz Zucker gewinnen

Eleganter Weg zur Produktion von Biokraftstoffen aus Pflanzenrückständen

23 Einsiedler im Erdinneren

3000 Meter unter der Erde lebt ein Bakterium von radioaktiver Strahlung

24 Springers Einwüfe

Ist Ekel angeboren oder adressiert?

ASTRONOMIE & PHYSIK

SCHLICHTING!

29 'ne Perl in jeder Primel Ohr

Warum sich Tau zu Tropfen formt

30 ► Ordnung aus Chaos

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kann in unserer Welt die Unordnung nur wachsen. Woher stammt dann die Ordnung, die wir überall beobachten?

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

36 Die unentschlossene Sonne auf Merkur

Sie geht auf, gleich wieder unter und noch einmal auf, weil Merkur so langsam rotiert und so schnell und ungleichmäßig um die Sonne läuft

MEDIZIN & BIOLOGIE

40 ► Die Neurobiologie des Vertrauens

Bestimmte Moleküle, die ansonsten Geburtswehen auslösen, beeinflussen unser Verhalten Fremden gegenüber

48 ► Kampf den Killerwürmern

Schistosomen, eine Gattung der Saugwürmer, töten jährlich 200 000 Menschen. Genetische Werkzeuge verbessern jetzt die Chancen auf einen wirksamen Impfstoff

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial: Religion im Licht der Evolution
8 Leserbrief
8 Impressum
77 Im Rückblick
110 Vorschau

104 Rezensionen:

Peter J. Bentley *Das Buch der Zahlen*

Xuewu Gu, Maximilian Meyer
Chinas Energiehunger: Mythos oder Realität?

J. H. Reichhoff *Warum die Menschen sesshaft wurden*

Marlene Zuk *Was wäre das Leben ohne Parasiten?*

Rüdiger Vaas, M. Blume *Gott, Gene und Gehirn*



TITEL

Gehirn am Draht

88

ERDE & UMWELT

ERDE 3.0

- 56 **Die Ethik des Klimawandels**
Auf wie viel Wohlstand sollten wir verzichten, um künftigen Generationen, die vermutlich reicher sind als wir, Kosten durch die Erderwärmung zu ersparen?
- 64 **Kurzberichte**
Bodenentgiftung mit Pflanzen · Bio boomt trotz Krise · Umweltfreundliche Fabriken
- WISSENSCHAFT & KARRIERE
- 66 **»Carpe Diem«**
Wer heute den Schritt in den Markt wagt, hat kleinere Hürden zu überwinden, jedoch mehr Konkurrenz, meint der Physiker und SAP-Mitgründer Klaus Tschira

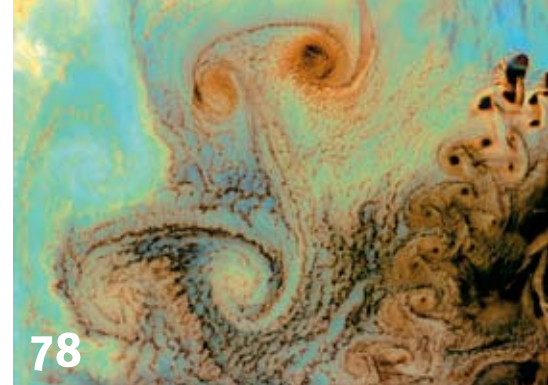
MENSCH & GEIST

SERIE (TEIL IV) EVOLUTION

- 68 ▶ **Religion als Evolutionsvorteil**
Anders als Charles Darwin betrachtete sein Zeitgenosse Gustav Jaeger Glauben und Evolution nicht als unversöhnlichen Gegensatz
- ESSAY
- 74 **Müssen wir glauben?** 
Offenbar ist der Mensch kognitiv prädisponiert, an etwas zu glauben

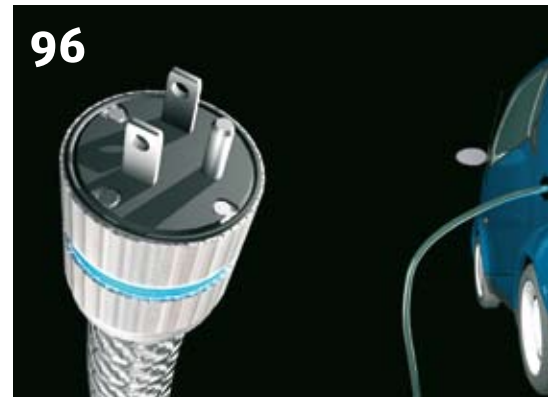
SERIE (TEIL VII)
DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

- 78 **Die Navier-Stokes-Gleichungen**
Sie beschreiben Allerweltsphänomene – Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen; dennoch ist bis heute unklar, unter welchen Voraussetzungen sie lösbar sind



78

MENSCH & GEIST Die Mathematik der Strömung




96

TECHNIK & COMPUTER E-Autos: Energiepuffer für Stromnetze?

TECHNIK & COMPUTER

TITEL

- 88 **Log-in ins Gehirn** 
Wie weit ist die Entwicklung einer Gehirn-Computer-Schnittstelle gediehen, von der Futurologen und Sciencefiction-Autoren seit Langem träumen?

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

- 94 **Drehen und Wippen**
Mikromotoren bringen Festplatten auf Touren
- SERIE (TEIL III) AUTOS DER ZUKUNFT
- 96 ▶ **Elektroautos – die rollenden Stromspeicher** 
Auch Stromversorger unterstützen den Trend zur Elektromobilität. Millionen von E-Fahrzeugen könnten ihnen nämlich eines Tages helfen, ihre Netze effizienter zu betreiben

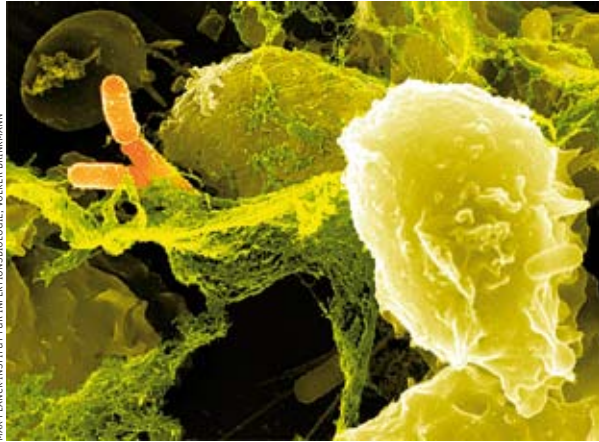
Titelmotiv: Kenn Brown, Mondolithic Studios

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit  markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: www.spektrum.de/audio

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf www.spektrum.de.

Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

<http://www.spektrum.de/>



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR INFektionsBIOLOGIE, VOLKER BRINKMANN



MATT COLLINS

SPEKTRUMDIREKT Alles auf Abwehr

www.spektrumdirekt.de/immunsystem

INTERAKTIV Mathematische Gruppen und mehr

www.spektrum.de/artikel/983339

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Alles auf Abwehr

Gegen Viren, Bakterien oder Parasiten setzt der Körper komplexe Abwehrketten in Gang. Doch mitunter versagt unser Immunsystem, und manchmal – bei Autoimmunkrankheiten – tut es zu viel des Guten

www.spektrumdirekt.de/immunsystem

»Lücken« im ewigen Eis

Das Polarjahr 2007/2008 ist vorbei, aber Arktis und Antarktis machen weiterhin Schlagzeilen. Vor allem dann, wenn Forscher immer mehr Lücken in unserem Verständnis der Vorgänge rund um die Pole schließen können

www.spektrumdirekt.de/polarforschung

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Surfen durch das Jahr der Astronomie

»Sterne und Weltraum« berichtet online über ausgewählte Ereignisse im Internationalen Jahr der Astronomie, etwa das weltweite Beobachtungsprojekt »Globe at Night«, den Kometen Lulin oder die »Wiederkehr« des Mars

www.astronomie-heute.de

Welt aus Quarks

Allen, die im Teilchenzoo gelegentlich den Überblick verlieren, bieten wir online eine bebilderte kurze Einführung in die Welt der Elementarteilchen. Tatsächlich sind es nicht mehr als 18 verschiedene Bausteine, aus denen sich die beobachtbare Welt zusammensetzt: sechs Quarks, sechs Leptonen und sechs Kraftteilchen

www.spektrum.de/artikel/980303

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Mathematische Gruppen, Nikotin oder die Neurobiologie des Tanzes?

In unserer 11. Wunschartikelrunde stehen wieder fünf Themen zur Wahl. Stimmen Sie mit ab! Den von Leserinnen und Lesern gewählten Wunschartikel werden wir in der Printausgabe veröffentlichen. Dem Gewinner winkt eine Reise nach Heidelberg und ein Besuch in der »Spektrum«-Redaktion

www.spektrum.de/artikel/983339

Der Stand der Welterkenntnis

Es ist der größte, aber auch der wohl am schwersten umzusetzende Traum der modernen Physik: die Welt mit all ihren Vielfältigkeiten aus einer einzigen Theorie heraus zu beschreiben. »Der Quantenkosmos« von Claus Kiefer fasst den Stand der Dinge zusammen. Lesen Sie unsere Rezension oder stellen Sie selbst ein Buch vor

www.spektrumdirekt.de/artikel/982849



ANS-BERLIN (ALEXANDER FREIHERR VON HUMBOLDT); GEMÄLDE VON GEORG FRIEDRICH WEITSCH, 1806; ALTE NATIONALGALERIE (BERLIN)

FÜR ABONNENTEN »Das ewige Treiben in mir«

www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Das ewige Treiben in mir«

»Das Zusammen- und Ineinanderweben aller Naturkräfte zu untersuchen«, so lautete das Vorhaben, das Alexander von Humboldt geradezu versessen zu seinem Lebensinhalt machte. Damit setzte sich der vielleicht letzte Universalgelehrte zwar nicht das eine große Denkmal, wie dies etwa Charles Darwin mit seiner Evolutionstheorie tat. Doch Humboldts multidisziplinärer Ansatz ist heute wieder hochmodern

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **epoc** und
Gehirn&Geist kostenlos online lesen

»Felsenstadt Petra – Zentrum des nabatäischen Reiches«

Nabatäer, Römer, Byzantiner und Muslime hinterließen ihre Spuren in dieser archäologischen Stätte im Süden Jordaniens, die im Mittelpunkt eines neuen Bildbands steht. Ein exklusiver Vorabdruck

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE
LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

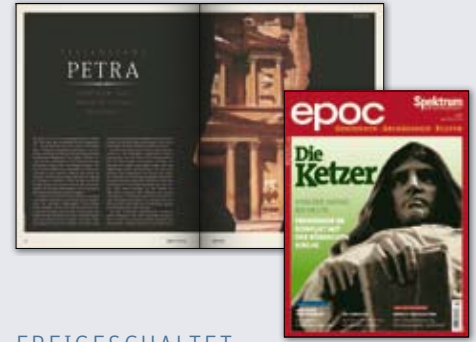
www.epoc.de/artikel/983437

»Homo religiosus«

Die Debatte über Wissenschaft und Religion nimmt eine Wende: Forscher suchen nach den biologischen Wurzeln des Glaubens. Für den Religionswissenschaftler Michael Blume gibt es viele Argumente, Spiritualität und Frömmigkeit als »segensreiche« Produkte der Evolution zu begreifen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE
LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/982255



FREIGESCHALTET

»Felsenstadt Petra«

www.epoc.de/artikel/983437

Alle Publikationen unseres
Verlags sind im Handel,
im Internet oder direkt über
den Verlag erhältlich

www.spektrum.com
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Auserlesen

Für die »Auslese 2008« unter den letztjährigen Posts in deutschen Wissenschaftsblogs tat sich kürzlich eine fünfköpfige Jury von Journalisten und Wissenschaftlern zusammen. Heraus kam eine Auswahl der 15 besten Texte (www.wissenschafts-cafe.net/2009/02/auslese-2008-die-besten-wissenschaftlichen-blogartikel-des-jahres/). Ihre Themen reichen von Anatomie und Gezeiten über Weihnachten im Islam und die »Klimawette« bis hin zum Zusammenhang zwischen Neuromarketing und mentalem Kapitalismus. Allein vier davon finden Sie in den Blogs des Spektrum-Verlags. Schauen Sie rein!

www.wissenslogs.de
www.scilog.de

Erfinder der Wärmepumpe

Von null auf sechzig
Wissenschaft im Alltag, Februar 2009

Der Erste, der das Prinzip nicht nur zum Heizen oder Kühlen, sondern für beides gleichzeitig angewendet hat, war Peter Ritter von Rittinger, der 1855 in der Saline Bad Ischl/Österreich den Energieverbrauch der Salzerzeugung aus Sole vermindern wollte. Im praktischen Einsatz ist er allerdings gescheitert, da damals das Problem der Kesselsteinbildung an den Wärmetauschern noch nicht gelöst war.

Bei der Salzerzeugung ist der hocheffiziente Einsatz der Wärmepumpe heute Standard, wobei des besseren Wirkungsgrads wegen die Sole unter Vakuum verdampft wird, wodurch Prozesstemperaturen unter 50 °C erreicht werden.

Gegenüber der alten Sudpfannentechnik ergibt sich dadurch eine Effizienzsteigerung von mehr als Faktor 20.

Dipl.-Ing. Hermann Pichler, Salzburg

Raimarus Ursus – in Vergessenheit geratener Kollege von Tycho Brahe

Worum dreht es sich eigentlich? Physikalische Unterhaltungen, Februar 2009

Zu dem Artikel von Norbert Treitz ist eine Ergänzung angebracht, um einem weniger prominenten Zeitgenossen von

Tycho Brahe Gerechtigkeit zuteilwerden zu lassen. Gleichzeitig mit Tycho Brahe hat nämlich Nicolaus Reimers, genannt Raimarus Ursus (1551–1600), ein sehr ähnliches Weltsystem veröffentlicht, das insofern moderner war als das von Tycho, der die rotierende Fixsternsphäre beibehielt, als Ursus die tägliche Drehung des Fixsternhimmels auf eine Rotation der Erde zurückführte und die unterschiedliche Helligkeit der Sterne auf unterschiedliche Entfernungen. Ursus war Dithmarscher, aus einfachsten Verhältnissen und Autodidakt. Er brachte es aber bis zum »kaiserlichen Mathematiker« in Prag als unmittelbarer Amtsvorgänger von Tycho. Als Bediensteter eines dänischen Edelmanns war er 1583 auf der Insel Ven gewesen, wo der von ihm bewunderte, aber adelsstolze Tycho ihn jedoch nicht zur Kenntnis nahm. Als Ursus später sein Weltsystem veröffentlichte, raste Tycho vor Zorn und behauptete, Ursus habe es ihm auf Ven gestohlen. Sogar der von Tycho abhängige Kepler, der »Kopernikaner« war und an keines der beiden Systeme glaubte, musste in dem äußerst heftigen Plagiatsstreit gegen Ursus Stellung nehmen. Das Problem löste sich dadurch, dass Ursus 1600 und Tycho 1601 starben. Das tychonische Weltsystem, das die Erde stillstehen ließ, wurde im 17. Jahrhundert, als Galilei bei der Kirche in Ungnade war, von den hervorragenden jesuitischen Astronomen bis auf die Zeit von Newton benutzt. Ursus geriet weit gehend in Vergessenheit.

Prof. Arnold Oberschelp, Heikendorf

Genzentrierter Selektionsansatz

Evolution – Gruppe oder Individuum?
Januar 2009

Die Befunde, auf die sich der Bericht stützt, sind mit dem genzentrierten Selektionsansatz ebenso gut und konzeptionell sauberer zu erklären.

Beispiel Staatsqualle: Jede der Einheiten des Verbunds leistet einen Beitrag zum Überleben des Ganzen, und zwar durch die erfolgte Arbeitsteilung effizienter, als dies bei viel kleineren Einzelorganismen möglich wäre. Dabei reproduzieren auf Grund der hohen genetischen Übereinstimmung im Verband alle ihre eigenen Gene, ob sie nun selbst an der Fortpflanzung beteiligt sind oder nicht. Das hat mit »Gruppenselektion« wenig zu tun.

Beim Menschen gibt es neben der genetischen Evolution eben noch die kulturelle. Selektiert werden hier kulturelle Eigenschaften (Dawkins' »Meme«, wenn man so will), und deren »Organismus« ist nun mal eher die Gemeinschaft und weniger das Individuum.

Die Wilsons gehen der eigentlichen Frage aus dem Weg: Wenn es tatsächlich eine Gruppenselektion *sensu stricto* gibt, auf welche Weise würde sie sich auf den Genpool auswirken? Nach welchen Gesetzmäßigkeiten würden sich die Frequenzen welcher Allele ändern? Solange hier keine wirklich belastbaren, mathematischen Modelle vorliegen, die

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

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

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/Sfr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Goethestraße 85, 10623 Berlin, Tel. 030 526821-841, Fax 030 7526821-828; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werstraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 30 vom 01.01.2009.
Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

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: © 2009 (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

415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairperson: Annette Thomas, President: Steven Yee, Vice President: Frances Newburg, International Managing Director: Kevin Hause, Vice President, Finance and General Manager: 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.





CASEY DUNN, BROWN UNIVERSITY

Bei den Staatsqualen leistet jede Einheit des Verbunds einen Beitrag zum Überleben des Ganzen.

erklärungs-mächtiger sind als die bisherigen und gut bestätigten, sind Gruppen-selektionsmodelle nicht gerade über-zeugend.

Der von den Wilsons vorgetragene Ansatz ist wertvoll, die aufgeworfenen Fragen sind interessant, die Kritik be-fruchtet den Diskurs. Nicht mehr, aber auch nicht weniger.

Prof. Dr. Andreas Beyer, Gelsenkirchen

Negative Rückkopplung fehlt

Dämpfung aus Regelkreis eliminiert, Leserbrief, März 2009

Dr. Grob sieht die Märkte als kybernetisches Netzwerk aus rückgekoppelten Regelkreisen und führt die Schwingungen auf ungenügende Dämpfung zurück. Rückkopplung allein macht allerdings noch keinen Regelkreis aus. Voraussetzung dafür ist nämlich zusätzlich, dass die Rückkopplung negativ ist. Das ist aber in der Wirtschaft nicht generell der Fall.

Es handelt sich wegen des Fehlens eines negativen Stellglieds also nicht um einen Regelkreis. Auf Grund dieses Sachverhalts wachsen Guthaben und Schulden exponentiell an. Diese Tatsache ist

empirisch belegt. Ein positiv rückgekoppeltes System ist jedoch von vornherein auf seine eigene Zerstörung programmiert, wie zum Beispiel eine Atombombe, bei der jede Kernspaltung mindestens mehr als eine weitere auslöst. Unter diesem Gesichtspunkt ist unser Geldsystem und damit auch unser Wirtschaftssystem a priori instabil, so dass der Kollaps nach 60 bis 80 Jahren unausweichlich ist.

Dr. Horst Käsmacher, Aachen

Unterscheiden zwischen Wissenschaftsmethodologie und Heuristik

Manche Schwäne sind grau
Essay, März 2009

Mir scheint, dass Matthews versäumt hat, zwischen Wissenschaftsmethodologie und Heuristik zu unterscheiden. Die Frage, wie jemand zu seinen wissenschaftlichen Ideen kommt (Heuristik), ist zu unterscheiden von der Frage, wie die Gültigkeit einer Theorie zu beurteilen ist. Obwohl beides ineinandergreift, handelt es sich doch um Verschiedenes. Es gibt keine Heuristik, die mit Sicherheit zu wahren Theorien führt. Einzelne Forscher oder die Gruppe sind wohl dann im Vorteil, wenn sie über Fantasie, Intelligenz, logische Konsequenz und Selbstkritik verfügen. Wissenschaftliche Skepsis schützt effektiver vor Irrwegen als selbstsichere Überzeugung, in welcher manchmal logische Konsequenz und Selbstkritik ausgeblendet sind.

Der vorletzte Satz »Ab einem gewissen Punkt kann man auf die Idee der Falsifikation nicht verzichten« steht im Widerspruch zum ganzen Essay, der ja davon ausgeht, dass Falsifizieren nicht funktioniert. Setzen wir getrost den »gewissen Punkt« ganz an den Anfang.

Dr. Wolfram Gorisch, München

Anmerkung der Redaktion: Sie können den vollständigen Leserbrief online unter <http://www.spektrum.de/artikel/983347> lesen.

Korrigenda

Elliptische Kurven und eine kühne Vermutung, Januar 2009

Wendet man die Formel auf S. 66, rechte Spalte oben, auf (3, 5) an, so ergibt

sich im ersten Schritt (129/100, 383/1000). Das im Text abgedruckte Minuszeichen vor der zweiten Komponente ergibt sich erst aus der weiter unten eingeführten Definition der Addition auf elliptischen Kurven.

Bei dem Wert im zweiten Schritt muss in der zweiten Komponente der Zähler auf 279 statt auf 292 enden.

Wolfgang Heine aus Urfeld hat uns darauf aufmerksam gemacht.

Die ABC-Vermutung, Februar 2009

Der kappa-Wert des Zahlentripels (A, B, C) = (13365, 614797312, 614810677) beträgt »nur« 0,864135... Den irrtümlichen Wert 1,142153... im Artikel erhält man, wenn man im Nenner der Formel für kappa das C im Radikal rad(ABC) vergisst. Im Kontext des Artikels ist somit das vorliegende Zahlentripel keines mit hohem kappa > 1, aber trotzdem noch groß im Vergleich zu zufälliger Wahl. Martin Schmidt aus Augsburg hat darauf hingewiesen.

In der ersten Spalte auf S. 73 unten lautet der richtige kappa-Wert 1,06843... statt 1,14..., und in der zweiten Spalte muss in dem Tripel (22 · 3², 51³, 5 · 49³) die Reihenfolge der Komponenten umgedreht werden.

Das Saitenblasinstrument
Februar 2009

Der Vokaltrakt bringt nicht jeden Oberton hervor, sondern nur die ganzzahligen Vielfachen der jeweiligen Grundfrequenz, nicht, wie auf S. 59 angegeben, die geraden Vielfachen. Der Hinweis stammt von Helmut Vetter aus Schorndorf.

Briefe an die Redaktion ...

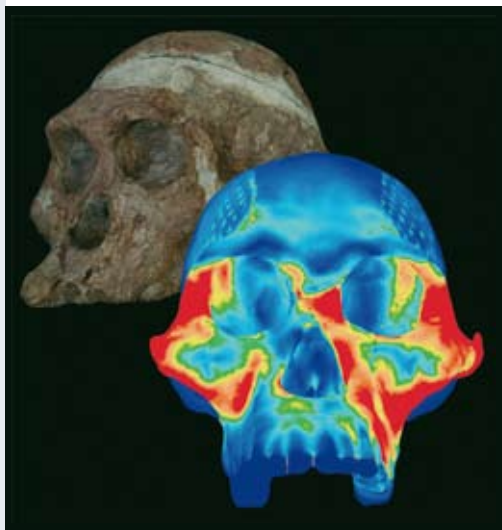
... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

PALÄANTHROPOLOGIE

Vormensch mit Nussknackergebiss



GERHARD W. WEBER, EVAN UNIVERSITÄT WIEN

Schädel fossil eines *Australopithecus africanus* und Ergebnisse von Spannungsrechnungen an einem Modell. Je wärmer die Farbe, desto höheren Druck musste die Schädelregion beim Kauen aushalten.

■ Im Verlauf der Evolution spielte die Ernährungsweise eine große Rolle bei den Formveränderungen des menschlichen Schädels. Besonders markant ist die Knochen- und Gesichtsstruktur des Vormenschlichen *Australopithecus africanus*. Er lebte vor etwa dreieinhalb bis zwei Millionen Jahren im südlichen Afrika und stand ent-

wicklungsgeschichtlich zwischen der berühmten »Lucy« und den ersten Vertretern der Gattung *Homo*. Neben ausgeprägten Wangenknochen hatte er sehr große Backenzähne, die mit einer dicken Schicht Zahnschmelz überzogen waren.

Diese Morphologie gilt traditionell als Anpassung an den Verzehr kleiner, harter, energiereicher Nahrungsstücke oder großer Mengen relativ gehaltloser Kost. Um zwischen diesen Möglichkeiten zu entscheiden, bedienten sich Forscher um David Strait von der University at Albany im US-Bundesstaat New York der Finite-Elemente-Methode. Mit diesem mathematischen Hilfsmittel aus den Ingenieurwissenschaften lässt sich untersuchen, wie komplexe Konstruktionen auf äußere Belastung reagieren. Straits Gruppe nutzte das Verfahren, um die Beanspruchung der verschiedenen Knochenteile zu simulieren.

Die Untersuchungen ergaben, dass sich vor allem mit den ausgeprägten vorderen Backenzähnen perfekt Nüsse knacken und Samen aufbrechen ließen. Die Knochenstruktur war wie geschaffen, die dazu nötige Kraft aufzubringen. Die Anthropologen glauben, dass der Rückgriff auf solch energiereiche Nahrungsmittel für *A. africanus* überlebensnotwendig war, da er in einer kühlen und trockenen, wenig fruchtbaren Klimaperiode Südafrikas lebte.

PNAS, Bd. 106, S. 2124

PSYCHOLOGIE

Die Farben des Denkens

■ Farben beeinflussen nicht nur unsere Gefühlslage, sondern auch unser Denkvermögen. Das ergaben jetzt Untersuchungen von Ravi Mehta und Rui Zhu an der University of British Columbia im kanadischen Vancouver. Dabei führten 69 Probanden Assoziationsaufgaben, Gedächtnistests oder Textkorrekturen an einem Computerbildschirm mit rotem oder blauem Hintergrund aus. Wie sich zeigte, hing ihre Leistung deutlich von der Farbe ab. So fanden Versuchsteilnehmer, bei denen ein Reizwort auf blauem Grund erschien, mehr und treffendere Assoziationen als die Mitglieder der Vergleichsgruppe. Ein roter Hintergrund hingegen bewirkte, dass sich die Probanden besser an Wörter aus einer zuvor angezeigten Liste erinnerten. Auch entdeckten sie mehr Unterschiede zwischen fast identischen Texten als Teilnehmer mit blauem Desktop.

Nach Ansicht der Forscher schärft das in westlichen Kulturen oft mit Gefahr assoziierte Rot unsere Sinne und steigert die Aufmerksamkeit – eine ideale Bedingung dafür, sich auf eine begrenzte Aufgabe, die hohe Genauigkeit verlangt, zu konzentrieren. Ein mit Ruhe verbundenes Blau hingegen aktiviere die Bereitschaft, sich auf Neues einzulassen und somit assoziativer und schöpferischer zu denken.

Science, Bd. 323, S. 1226

ASTRONOMIE

Bislang kleinster Exoplanet entdeckt

■ Rund 400 Lichtjahre von der Erde entfernt kreist ein besonders kleiner Planet um einen sonnenähnlichen Stern. Das gaben Astronomen kürzlich auf einer Konferenz in Paris bekannt. Die französischen Forscher stützen sich auf Daten ihres CoRoT-Satelliten (*Convection, Rotation and Planetary Transits*). Dieser hilft seit Dezember 2006 bei der Suche nach Exoplaneten. Dabei benutzt er die Transit-Methode: Sein Bordteleskop späht nach den winzigen

Abdunklungen, die umlaufende Trabanten erzeugen, wenn sie aus der Perspektive des Satelliten vor ihren Zentralstern treten.

Der Neuzugang trägt den Namen CoRoT-Exo-7b, besteht aus Gestein und ist höchstens doppelt so groß wie die Erde. Damit



CLAUDIA EINHORN, DLR

Diese maßstabsgetreue Zeichnung zeigt, wie der neu entdeckte Exoplanet (schwarzer Punkt unten) vor seinem Zentralstern vorbeizieht.

handelt es sich um den kleinsten extrasolaren Planeten unter allen 337 Exemplaren, die bislang katalogisiert wurden. Die meisten sind heiße Gasriesen auf engen Umlaufbahnen, so genannte »hot Jupiters«.

Für einen kompletten Umlauf benötigt CoRoT-Exo-7b nur 20 Stunden. Wegen der Nähe zu seinem Heimatstern dürfte die Oberflächentemperatur mindestens 1000 Grad Celsius betragen. Leben ist dort also sicher nicht möglich. Bislang wurden nur wenige derart kleine Planeten oder »Super-Erden« außerhalb des Sonnensystems gefunden.

Weitere Messungen, die auch die genaue Masse des neu entdeckten Planeten klären sollen, werden derzeit ausgewertet. Von ihnen erwarten sich die Forscher zugleich erste Auskunft über die chemische Zusammensetzung von CoRoT-Exo-7b.

Pressemitteilung der DLR

Uralte Monsterschlange



JASON BOUROQUE, UNIVERSITY OF FLORIDA

■ Was sich vor 56 bis 60 Millionen Jahren durch die Regenwälder Südamerikas wand, würde heute wohl kein Regisseur auf die Leinwand bringen. Eine 13 Meter lange und über eine Tonne schwere Schlange wäre einfach zu unglaublich. *Titanoboa cerrejonensis* taufte Jason Head und Kollegen das Tier, dessen fossile Überreste sie in der Steinkohlemine El Cerrejón im Nordosten Kolumbiens entdeckten. Die Skelettfragmente der acht geborgenen Individuen konnten die Forscher den Boas aus der Familie der Riesenschlangen zuordnen. Diese Familie hält auch unter den heutigen Kriechtieren die Rekorde in Länge und Gewicht. Mit zehn Metern (Netpython) und 230 Kilogramm (Anaconda) können ihre lebenden Vertreter aber nicht annähernd mit den Verwandten aus dem Paläozän mithalten.

Der Fund erlaubt auch Rückschlüsse auf das einstige Klima in den Tropen. Schlangen sind wechselwarme Tiere, die ihre Körpertemperatur nicht konstant halten, sondern der Außentemperatur

Die Riesenschlange *Titanoboa cerrejonensis* bewohnte wie die heutigen Anacondas tropische Feuchtgebiete. So könnte sie in ihrem Lebensraum ausgesehen haben.

anpassen. Je größer ein wechselwarmes Tier ist, umso heißer muss die Umgebung sein, um den Metabolismus in Gang zu halten. Die größten heutigen Schlangen leben daher in den Tropen, wo konstant hohe Temperaturen herrschen. Aus diesem Zusammenhang berechneten die Forscher, dass *Titanoboa* eine mittlere Jahrestemperatur von 30 bis 34 Grad Celsius zum Überleben benötigte. Das ist erheblich mehr als die 27 Grad, die heute zum Beispiel im Amazonasbecken herrschen. Ursache der Hitze war vermutlich ein extrem hoher Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre von rund 2000 millionstel Volumenanteilen (parts per million, kurz: ppm). Zum Vergleich: 2008 wurden 385 ppm gemessen.

Nature, Bd. 457, S. 71

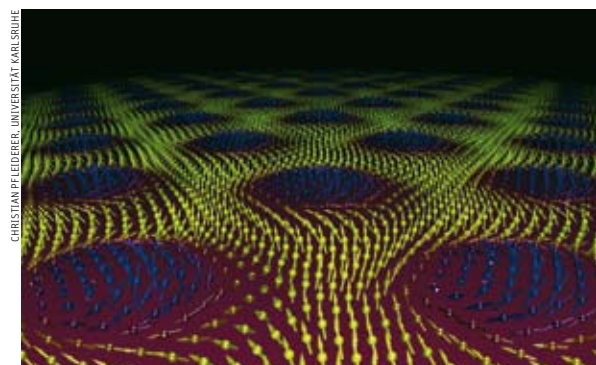
QUANTENPHYSIK

Feldknoten als Teilchen

■ In den 1950er Jahren schlug Werner Heisenberg, einer der Väter der Quantenmechanik, zur Überwindung des Welle-Teilchen-Dualismus vor, die Vorstellung von punktförmigen Teilchen durch Wirbel in Feldverteilungen zu ersetzen. Wenig später griff Tony Skyrme die Idee im Rahmen der mathematischen Topologie auf und zeigte, dass sich in Feldern stabile Wellenpakete mit endlicher Masse konstruieren lassen. Solche »Skyrmionen« werden seit Jahren im Zusammenhang mit dem Quanten-Hall-Effekt in zweidimensionalen Elektronengasen diskutiert. Jetzt haben Sebastian Mühlbauer von der Technischen Universität München und Kollegen sie erstmals tatsächlich beobachtet: als Skyrmionengitter in einer magnetischen Substanz.

Als die Forscher die intermetallische Verbindung Mangansilizium bei -245 Grad Celsius einem schwachen Magnetfeld von 0,2 Tesla aussetzten und mit Neutronen beschossen, zeigte das Streubild der sonst aus parallelen Helizes bestehenden magnetischen Struktur eine Überlagerung sehr vieler solcher Helizes, an deren Kreuzungspunkten Wirbel auftraten. Diese Knoten, in denen hunderte Spins parallel ausgerichtet waren, bildeten eine regelmäßige Anordnung, die sich als identisch mit dem mathematisch vorhergesagten Skyrmionengitter erwies.

Die Physiker vermuten, dass solche Gitter auch in anderen Materialien entstehen und möglicherweise zu anomalem metallischem Verhalten führen. Sie sind aber auch für technische Anwendungen von Be-



In Mangansilizium entstehen bei tiefen Temperaturen in einem Magnetfeld regelmäßig angeordnete Wirbel (hier blau), in denen die Spins der Atome parallel ausgerichtet sind.

deutung: So könnten sie sich zur Herstellung stabiler Speichermedien mit sehr viel höheren Packungsdichten eignen.

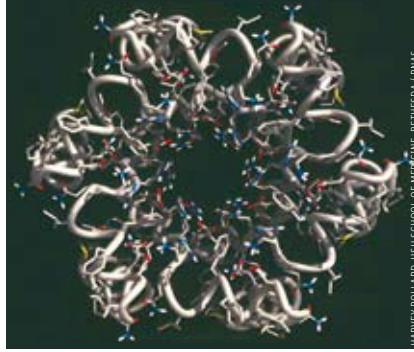
Science, Bd. 323, S. 5916

MEDIZIN

Alzheimererkrankung stoppen?

■ Mehr als eine Million Menschen leiden in Deutschland derzeit unter einer Demenz, und bei zwei Dritteln davon lautet die Diagnose: Alzheimer. Schon Jahre bevor sich die Denkleistung merkbar verschlechtert, bilden sich Ablagerungen in den Hirnzellen der Betroffenen, die aus fehlerhaft gefalteten Beta-Amyloid-Peptiden und Bündeln von Neurofibrillen bestehen. Sie sorgen dafür, dass die Nervenzellen absterben und die Hirnmasse nach und nach abnimmt.

Was allerdings genau den Tod der Neurone auslöst, ist nicht vollständig geklärt. Einer Theorie zufolge werden zu einem Ring verknüpfte Beta-Amyloid-Peptide in die Zellmembranen eingebaut und schaffen dort Öffnungen, durch die Kalziumionen einströmen können. Überreizung durch diesen Signalstoff treibt das Neuron letztendlich in den Tod. Tatsächlich ließ sich zeigen, dass Stoffe, die den Kanal blockieren, das Absterben der Zelle verhindern können. Die dabei benutzten »Pfp-



HARVEY POLLARD, USU SCHOOL OF MEDICINE, BETHESDA / PNAS

Dieses molekulare Modell des transmembranen Beta-Amyloid-Hexamers zeigt den offenen Ionenkanal.

fen« waren jedoch zu unspezifisch und deshalb nicht in der Praxis einsetzbar.

Forscher um Harvey Pollard von der Uniformed Services University School of Medicine in Bethesda (Maryland) suchten deshalb nach kleinen Molekülen, die selektiv die Beta-Amyloid-Kanäle verschließen. Als passende Exemplare erwiesen sich zwei Pyridiniumsalze, die Spiegelbilder voneinander sind. Das eine lässt sich leicht wieder aus der Pore entfernen. Das andere bleibt dagegen dauerhaft darin haften, was die Neurotoxizität der Beta-Amyloid-Peptide aufhebt. Dabei werden zwar nicht die Ablagerungen, aber ihre verheerenden Auswirkungen verhindert.

PNAS, Bd. 106, S. 3348

BIOLOGIE

Hoher Preis des Überlebens

■ Fast jeder Vierbeiner hat einen Schwanz. Oft aber ist nicht ersichtlich, wozu der eigentlich dient. Eine rein dekorative Funktion sollte nicht genügen, sonst wäre das Utensil im Lauf der Evolution wohl verschwunden. Doch ist der Schwanz auch nicht lebensnotwendig. So werfen ihn viele Eidechsen ab, wenn ein Räuber sie daran packt. Innerhalb von drei bis sechs Monaten wächst das gute Stück dann nach.

Aber ist der Verlust für die Echsen wirklich kein großer Schaden? Gary Gillis

und Lauren Bonvini vom Mount Holyoke College in South Hadley (Massachusetts) wollten das genau wissen. Deshalb bauten sie für mehrere Rotkehlantil (Anolis carolinensis) einen Parcours und animierten die Tiere zu 15 bis 30 Zentimeter weiten Sprüngen, die sie mit einer Hochgeschwindigkeitskamera filmten. Anschließend brachten sie die Echsen dazu, ihren Körper anhang abzuwerfen, und ließen sie dieselben Sprünge wiederholen.

Dabei offenbarte sich ein erhebliches Handikap: Ohne Schwanz taumelten die Echsen in der Luft, vollführten Drehungen um mehr als 30 Grad nach hinten und landeten teilweise sogar auf dem Rücken. Der Schwanz stabilisiert demnach die Flugphase. Ohne ihn sind die normalerweise baumbewohnenden Tiere bei der Flucht vor einem Jäger deutlich behindert. Dennoch habe, wie Gillis anmerkt, in manchen Echsenpopulationen die Hälfte aller Tiere ihren Schwanz geopfert – ein hoher Preis des Überlebens.

Journal of Experimental Biology, Bd. 212, S. 604

SCHÄDLINGSBEKÄMPFUNG

Schwärmen dank Glückshormon

■ Die Wüstenheuschrecken (*Schistocerca gregaria*) leben normalerweise als unscheinbare, ortsgebundene Einzelgänger. Bei besonders üppigem Nahrungsangebot explodiert allerdings die Population, wobei sich die Tiere morphologisch und charakterlich verändern: Sie werden dunkler und größer und bekommen längere Flügel. Zudem neigen sie nun zur Geselligkeit und verlassen schließlich in riesigen Schwärmen ihre Rückzugsgebiete (gregäre Phase).

Bisher herrschte die Ansicht, dass Pheromone, die infolge vermehrter Berührungsreize von Artgenossen an den Hinterfüßen ausgeschüttet werden, den Übergang vom Einzel- zum Schwarmtier bewirken. Wie nun Forscher um Stephen Rogers von den Universitäten Oxford und Cambridge entdeckt haben, löst in Wahrheit jedoch das auch als Glückshormon bekannte



TOM FAYE, CAMBRIDGE UNIVERSITY

Heuschrecken können vom Einzelgänger (rechts) zum Schwarmtier (links) mutieren.

Serotonin die Veränderung aus. Seine Konzentration ist Messungen zufolge in den Tieren der gregären Phase dreifach erhöht.

Zunächst untersuchten die Forscher, wie es natürlicherweise zur vermehrten Serotoninausschüttung kommt. Dabei zeigte sich, dass Berührungsreize an den Hinterbeinen zwar dazu beitragen, das Sehen und Riechen von Artgenossen aber allein auch schon ausreicht. Indem die Forscher den Heuschrecken gezielt Serotonin injizierten, konnten sie das Schwarmverhalten künstlich einleiten. Auch die Gegenprobe gelang: Serotoninhemmer verhinderten den Übergang zur gregären Phase – vielleicht eine Möglichkeit, Heuschreckenplagen vorzubeugen, ohne durch Pestizide die Umwelt zu belasten.

Science, Bd. 323, S. 627

Mitarbeit: S. Czaja, V. Spiller und M. Ruhlenstroth

Wenn der in Laubbäumen beheimatete Rotkehlantil seinen Schwanz einbüßt, um einem Jäger zu entkommen, verliert er deutlich an Sprungsicherheit.



MOUNT HOLYOKE COLLEGE



Fußabdruck eines Frühmenschen

Unser Vorfahr *Homo erectus* lief offenbar schon genauso wie wir. Das zeigen 1,5 Millionen Jahre alte Fußspuren dieses Frühmenschen, welche Forscher um John W. Harris von der Rutgers University in New Brunswick (New Jersey) nun in Kenia entdeckt haben. Abgebildet ist hier der sehr detailreiche Abdruck eines Ballens mit Zehen.

Die Analyse der neuen Spuren ergab zahlreiche Übereinstimmungen mit dem Fuß des heutigen *Homo sapiens*. So ist der große Zeh parallel zu den anderen angeordnet und ein

ausgeprägtes Gewölbe erkennbar. Beim Gehen wurde der Fuß wie beim modernen Menschen von der Ferse über den Ballen zu den relativ kurzen Zehen abgerollt. Bei den Menschenaffen ist dagegen der große Zeh abgespreizt und kein Gewölbe vorhanden; beim Gehen werden die Füße flach aufgesetzt. Diese affenartigen Merkmale zeigen sich auch noch bei den berühmten, 3,5 Millionen Jahre alten Fußspuren des Vormenschen *Australopithecus afarensis*, die Mary Leakey 1978 im tansanischen Laetoli entdeckt hatte.



BEIDE FOTOS: ARDEA / ADRIAN WARREN

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

Draculas Stammbaum

US-Forscher konnten nun zeigen, wie sich die Vorliebe von Vampirfledermäusen für verschiedene Wirtstiere entwickelt hat. Entscheidend waren demnach Mutationen im Gen eines Blutgerinnungshemmers.

Von Sebastian Alers

Es ist Nacht auf einer der zahllosen argentinischen Rinderfarmen. Vorsichtig kriecht eine Vampirfledermaus auf dem Boden zu einer Kuh hin. Sie nimmt sich viel Zeit. Zunächst leckt sie in aller Ruhe die Bissstelle am Fuß des Opfers ab und macht sie mit dem Betäubungsmittel in ihrem Speichel schmerzunempfindlich. Dann schneidet sie mit ihren scharfen Eckzähnen ein kleines Stückchen Haut heraus. Die Kuh bemerkt nichts und schläft seelenruhig weiter. Eifrig leckt der Vampir das ausströmende Blut auf. Nach einer halben Stunde, in der sich sein Körpergewicht fast verdoppelt hat, kehrt er an seinen Schlafplatz zurück, um die Mahlzeit in Ruhe zu verdauen.

Szenen wie diese spielen sich allnächtlich in ganz Lateinamerika ab. Zwar hält sich der Blutverlust in engen Grenzen; doch sterben jährlich tausende Haus- und Nutztiere an den Folgen von Infektionskrankheiten, die durch den Biss des Gemeinen Vampirs (*Desmodus rotundus*) übertragen werden.

Das Blut, das durch die Adern von Rindern und auch uns Menschen fließt, besteht etwa zur Hälfte aus Plasma. Zu den Proteinen in dieser klaren Flüssig-

keit gehört ein hoch spezialisiertes System von Gerinnungsfaktoren, die in Aktion treten, sobald ein Blutgefäß verletzt wird. Zunächst heften sich Blutplättchen an die entstandene Wunde und dichten sie provisorisch ab. Dann bildet sich ein Pfropfen aus dem Eiweißstoff Fibrin als fester, dauerhafter Verschluss.

Dieser muss nach der Wundheilung aber wieder abgebaut werden. Das erledigt das Enzym Plasmin, indem es die Fibrinfäden in kleinere, lösliche Stücke spaltet. Es liegt allerdings nicht frei vor, sondern muss erst aus einer inaktiven Vorstufe, dem Plasminogen, gebildet werden. Diesen Aktivierungsschritt übernimmt der so genannte Plasminogenaktivator (PA), der seinerseits durch einen Inhibitor (PAI) in Schach gehalten wird.

Geheimwaffe Desmotepase

Dieses auf den ersten Blick unübersichtliche und komplizierte System aus Aktivierung und Hemmung soll sicherstellen, dass Blutgerinnung nur dort stattfindet, wo sie benötigt wird. Schließlich könnten unkontrolliert gebildete Fibrin Klumpen die Gefäße verstopfen.

Der Vampirfledermaus ist das Blutgerinnungssystem ihres Opfers natürlich ein Dorn im Auge – würde es doch in-

nerhalb von Minuten den Blutstrom zum Versiegen bringen. Der Gemeine Vampir hat allerdings eine Geheimwaffe in der Hinterhand beziehungsweise im Speichel: seinen eigenen Plasminogenaktivator DSPA (*Desmodus rotundus Salivary Plasminogen Activator*), auch Desmotepase genannt. Er bringt das Plasmin des Opfers dazu, entstehende Fibrin Klumpen sofort wieder aufzulösen. So kann das Blut nach einem Biss bis zu acht Stunden lang ungehindert aus der Wunde fließen.

Über 1000 Fledermausarten sind bekannt. Fast alle fressen Insekten oder

Die drei Vampirfledermäuse unterscheiden sich im Gen für den Plasminogenaktivator (PA). Bei der auf Vögel spezialisierten *Diphylla* stimmt es noch mit dem von Fledermäusen, die Insekten oder Früchte fressen, wie *Carollia* überein. Bei *Diaemus*, die auch Säugerblut nicht verschmäht, sorgt eine Deletion dafür, dass im zugehörigen Protein die Andockstelle für das Inhibitorprotein PAI fehlt. Die gleiche Deletion findet sich auch bei den vier PA-Genen von *Desmodus*, der ausschließlich von Säugerblut lebt. Hier steigert eine zusätzliche Mutation außerdem die Enzymaktivität. Hinzu kommen teils weitere Deletionen noch unbekannter Funktion.

Während ein Kammzahnvampir (*Diphylla ecaudata*) hier bei einem Huhn Blut saugt, tut sich ein auf Säugetiere spezialisierter Gemeiner Vampir (*Desmodus rotundus*) an einem Esel göttlich.

Früchte. Die Vampirfledermäuse bilden die große Ausnahme. Als einzige Säugetiere überhaupt ernähren sie sich ausschließlich von Blut. Insgesamt kommen sie in nur drei Arten vor, von denen *D. rotundus* mit Abstand die häufigste ist. Alle drei Spezies sind auf dem amerikanischen Kontinent zwischen Mexiko und Südamerika beheimatet, bevorzugen aber unterschiedliche Beutetiere. So sucht sich der Kammzahnvampir (*Diphylla ecaudata*) ausschließlich größere Vögel wie Hühner oder Truthähne als Opfer. *Desmodus* dagegen ist ganz auf Säugetierblut spezialisiert. Der Weißflügelvampir (*Diaemus youngi*) schließlich hat einen weniger ausgeprägten Geschmack: Trotz einer Vorliebe für Vögel lässt er sich notfalls auch Säugerblut munden.

Forscher um David A. Liberles von der University of Wyoming in Laramie sind nun der molekularen Ursache dieser divergierenden Nahrungspräferenzen auf die Spur gekommen (*Die Naturwissenschaften*, Bd. 96, S. 39). Beim Vergleich

des Erbguts der drei Vampirfledermausarten fanden sie erhebliche Unterschiede im Gen für den Plasminogenaktivator. Früchte und Insekten fressende Arten wie *Carollia perspicillata* sowie der auf Vögel spezialisierte Vampir *Diphylla* besitzen jeweils nur eine Version davon; und die stimmt weitgehend mit derjenigen anderer Säugetiere überein. Bei *Diaemus*, die auch Säugerblut nicht verachtet, fehlt dagegen ein Abschnitt im PA-Gen, auf dem die Bauanleitung für die Bindungsstelle des Inhibitorproteins PAI steht. Der Plasminogenaktivator des Weißflügelvampirs kann von diesem also nicht mehr gehemmt werden – ein großer Vorteil, wenn man Rindern und Pferden Blut abzupfen will.

In *Desmodus* schließlich, die sich strikt nur an Vieh hält, liegt das PA-Gen gleich mehrfach vor. Ursache sind Genverdopplungen, wie sie durch einen Fehler bei der Reifeteilung in den Keimzellen auftreten können. Solche Ereignisse bieten eine große Chance für die Evolution. Die zweite Version des verdoppelten Gens ist nämlich im Grunde überflüssig und damit frei von jedem Selektionsdruck. Sie kann fast beliebig mutieren, ohne dass sich das negativ auf den Organismus auswirkt, und so unter Umständen eine völlig andere Funktion übernehmen.

Aus einem Gen mach vier!

Erstaunlicherweise hat sich eine solche Verdopplung beim Gemeinen Vampir gleich dreimal ereignet. Deshalb verfügt er über vier verschiedene Plasminogenaktivator-Gene ($\alpha 1$, $\alpha 2$, β und γ). Sie alle beruhen auf der verstümmelten Version von *Diaemus*, enthalten aber eine zusätzliche Mutation, durch die das En-

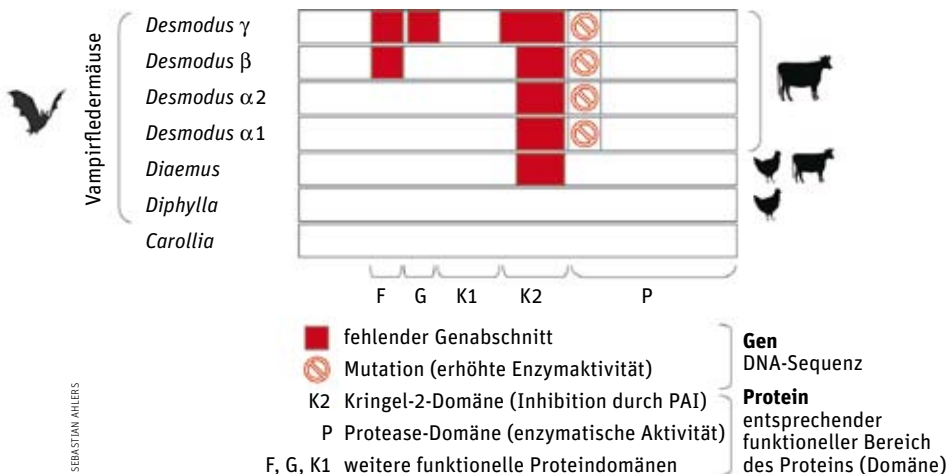
zym Blutgerinnsel 150-mal so gut auflösen kann wie die Plasminogenaktivatoren anderer Säugetiere. Außerdem sind weitere Abschnitte verloren gegangen. Inwieweit sich das auf die Funktion auswirkt, ist bisher allerdings nicht bekannt.

Charles Darwin, der vor genau 200 Jahren geboren wurde, hat als Erster die immense Artenvielfalt unseres Planeten nicht, wie bis dahin üblich, nur akribisch katalogisiert und als gottgegeben hingenommen, sondern die verborgenen Mechanismen dahinter aufgedeckt. Statt Dutzender verschiedener Finkenarten mit seltsam geformten Schnäbeln sah er sehr nah verwandte Spezies, die jeweils perfekt an eine bestimmte ökologische Nische angepasst waren und sich so eine eigene Nahrungsquelle erschlossen hatten.

Heute, im Zeitalter der Molekularbiologie, wird nach und nach klar, auf welche Weise Phänotyp und Genotyp – das ins Auge springende Merkmal und die zugehörige Erbinformation – eines Individuums zusammenhängen. Funktionelle Analysen ermöglichen zugleich genaue Aufschlüsse darüber, wie sich ein bestimmter Genotyp auf zellulärer Ebene auswirkt. Wir sind also dabei, die Brücke von den verborgenen Mechanismen der Evolution zur funktionellen Maschinerie der Zelle zu schlagen.

Die Evolution der Vampirfledermaus ist ein gutes Beispiel dafür. Wie Liberles und seine Kollegen nun herausgefunden haben, besitzt *Diphylla* nur ein einziges, säugertypisches PA-Gen. Diese entwicklungsgeschichtlich älteste Vampirfledermausart trinkt deshalb noch ausschließlich Vogelblut, das keinen Hemmstoff für den Plasminogenaktivator enthält. Der Verlust eines bestimmten Genabschnitts erschloss für *Diaemus* dann auch Säugerblut als Nahrungsquelle, da dadurch die Andockstelle für das dort vorhandene PAI wegfiel. In der Linie, die zu *Desmodus* führte, traten schließlich drei Genduplikationen auf – verbunden mit zusätzlichen Mutationen und dem Verlust weiterer Abschnitte –, die eine noch bessere Anpassung an Säugerblut ermöglichten. Durch die zunehmende Verbreitung domestizierter Rinder in Lateinamerika war dies ein klarer Selektionsvorteil und dürfte dem Gemeinen Vampir damit zu seiner weiten Verbreitung und Dominanz verholfen haben.

Sebastian Alers ist Biochemiker und Doktorand an der Universität Tübingen.



SYNTHETISCHE BIOLOGIE

E.colizenz zum Töten

Im Rahmen eines internationalen Wettbewerbs entwarfen Heidelberger Studenten und Forscher ein künstliches Räuber-Beute-System mit Bakterien, das sich auch zur Krebsbekämpfung eignen sollte.

Von Anna Stöckl, Dominik Niopek und Roland Eils

Krebs, 16 Studenten und eine Kiste voller Genbausteine – diese Dinge scheinen auf den ersten Blick wenig gemeinsam zu haben. Aber im vergangenen Jahr fanden sie sich für drei Monate unter dem Dach des Zentrums für quantitative Biologie in Heidelberg zusammen. Studenten der dortigen Universität konstruierten, angeleitet von einem von uns (Eils) und 13 weiteren Betreuern, aus Genbausteinen eine biologische Maschine, die fähig ist, Krebszellen spezifisch zu erkennen und zu töten.

Anlass dieser ungewöhnlichen Aktion bildete eine Veranstaltung namens iGEM (*international Genetically Engineered Machines competition*). Dieser in-



ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE: iGEM-TEAM HEIDELBERG 2008

ternationale Wettbewerb auf dem Gebiet der synthetischen Biologie – einer der größten seiner Art – wird seit 2005 alljährlich vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston ausgerichtet. Dafür arbeiteten vergangenes Jahr in den Ferien nach dem Sommersemester 84 studentische Teams von Universitäten aus aller Welt an verschiedensten Projekten ihrer Wahl. Anfang November präsentierten sie die Ergebnisse dann bei der Preisverleihung in Boston.

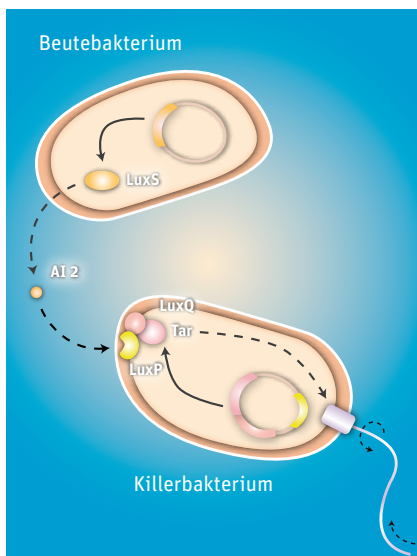
Hinter dem Wettbewerb steht die Grundfrage der synthetischen Biologie, die der Hauptinitiator Randy Rettberg so formuliert: »Können einfache biologische Systeme aus standardisierten, austauschbaren Teilen aufgebaut und in lebenden Zellen verwirklicht werden?« Der Ant-

Ein Heidelberger Team aus Studenten und Forschern gewann 2008 beim iGEM-Wettbewerb (*international Genetically Engineered Machines competition*) in Boston eine Goldmedaille und drei Spezialpreise. Hier präsentiert die Gruppe stolz ihre Trophäen.

wort wollten die Teilnehmer der Veranstaltung auch 2008 näher kommen.

Wichtige Arbeitsfelder der synthetischen Biologie sind die Entwicklung regenerativer Energiequellen und die medizinische Forschung. Im Unterschied zur klassischen Gentechnologie kommt dabei ein ingenieurwissenschaftlicher Ansatz zum Tragen. Ähnlich wie bei der Konstruktion eines Flugzeugs aus verschiedenen kombinierbaren Bauteilen verwendet die synthetische Biologie einfache Genbausteine, BioBricks genannt. Diese werden gezielt zu neuen Systemen mit bestimmten Funktionen zusammengesetzt. Damit das möglich ist, müssen sie eine standardisierte Form haben – wie Legosteine, die sich trotz unterschiedlicher Größe, Gestalt und Farbe alle über ihr Stecksystem miteinander verbinden lassen.

Bei BioBricks besteht dieses Stecksystem aus einer Reihe festgelegter DNA-Sequenzen. Sie rahmen die Genbausteine ein und machen sie so leicht untereinander kombinierbar. Die schon erstellten BioBricks stehen in einer Datenbank, der Registratur. Deren Repertoire ist inzwischen auf mehr als 1000 Bausteine angewachsen. Jedes Wettbewerbsteam kann im Verlauf der Projektarbeit alle in der



Das Heidelberger iGEM-Team manipulierte Darmbakterien der Art *Escherichia coli* so, dass sie ein Räuber-Beute-System bildeten. Als zentralen Bestandteil enthielt dieses System ein Erkennungsmodul. Dazu wurden die Beutebakterien mit dem Gen für das Enzym LuxS ausgestattet, das den Signalstoff Autoinducer II produziert. Sie schütten diesen Stoff daraufhin aus. Die Killerbakterien erhielten das Gen für einen eigens konstruierten chimären Rezeptor in ihrer Zellmembran, der mit seinem extrazellulären Teil Autoinducer II erkennt und bindet. Dies löst eine intrazelluläre Signalkette aus, die den Bewegungsapparat aktiviert, so dass das Killerbakterium auf die Beute zuschwimmt.

Registrierung enthaltenen BioBricks verwenden und neu kombinieren, aber auch weitere Exemplare konstruieren und zur Datenbank hinzufügen.

Wir im Heidelberger Team nutzen die Bausteine für die Entwicklung eines innovativen Ansatzes zur Krebstherapie. Ein grundlegendes Problem bei der Bekämpfung von Tumoren ist die geringe Spezifität der Behandlungsmethoden. Klassische Verfahren wie die Chemotherapie schädigen außer den Krebszellen auch gesundes Gewebe und haben deshalb oft erhebliche Nebenwirkungen. Auf der Suche nach einer Behandlung mit höherer Spezifität arbeiteten wir und die übrigen Heidelberger Teammitglieder an der Entwicklung eines Bakteriums, das Tumorzellen oder auch andere Krankheitserreger zielgerichtet attackiert.

Dabei machten wir uns die Eigenschaft von Zellen zu Nutze, stetig einen Cocktail aus verschiedensten Molekülen in die Umgebung auszuschütten. Dieser ist in gesundem und Tumorgewebe verschieden, so dass sich Krebszellen anhand ihres molekularen Sekretionsmusters identifizieren lassen. Hunde können diese Muster erkennen und daher Melanome, also Hauttumoren, erschnüffeln oder Lungenkrebs in der Atemluft eines Patienten wahrnehmen. Unsere Idee war, die entsprechende Fähigkeit auf Bakterien zu übertragen und mit einer Tötungsfunktion zu kombinieren.

Konstruktion eines Erkennungs- und Tötungsmoduls

Dazu entwickelten wir ein künstliches Testsystem aus zwei Stämmen des Darmbakteriums *Escherichia coli*. Der eine repräsentiert die Tumorzellen, die es zu vernichten galt, und der andere die »Killer«, die sie jagten. Ein Erkennungsmodul sollte dafür sorgen, dass die Jäger ihre Beute aufspüren konnten. Mit einem Tötungsmodul wollten wir sie zugleich befähigen, die »Tumorzellen« auszuschalten.

Für die Entwicklung dieses Testsystems versahen wir zunächst das Beutebakterium mit einem definierten molekularen Sekretionsmuster. Dazu schleusten wir zwei Gene ein, die für die Produktion der Signalmoleküle Autoinducer I und II verantwortlich sind. Sie entstammen dem natürlichen Kommunikationssystem des marinen Bakteriums *Vibrio harveyi*.

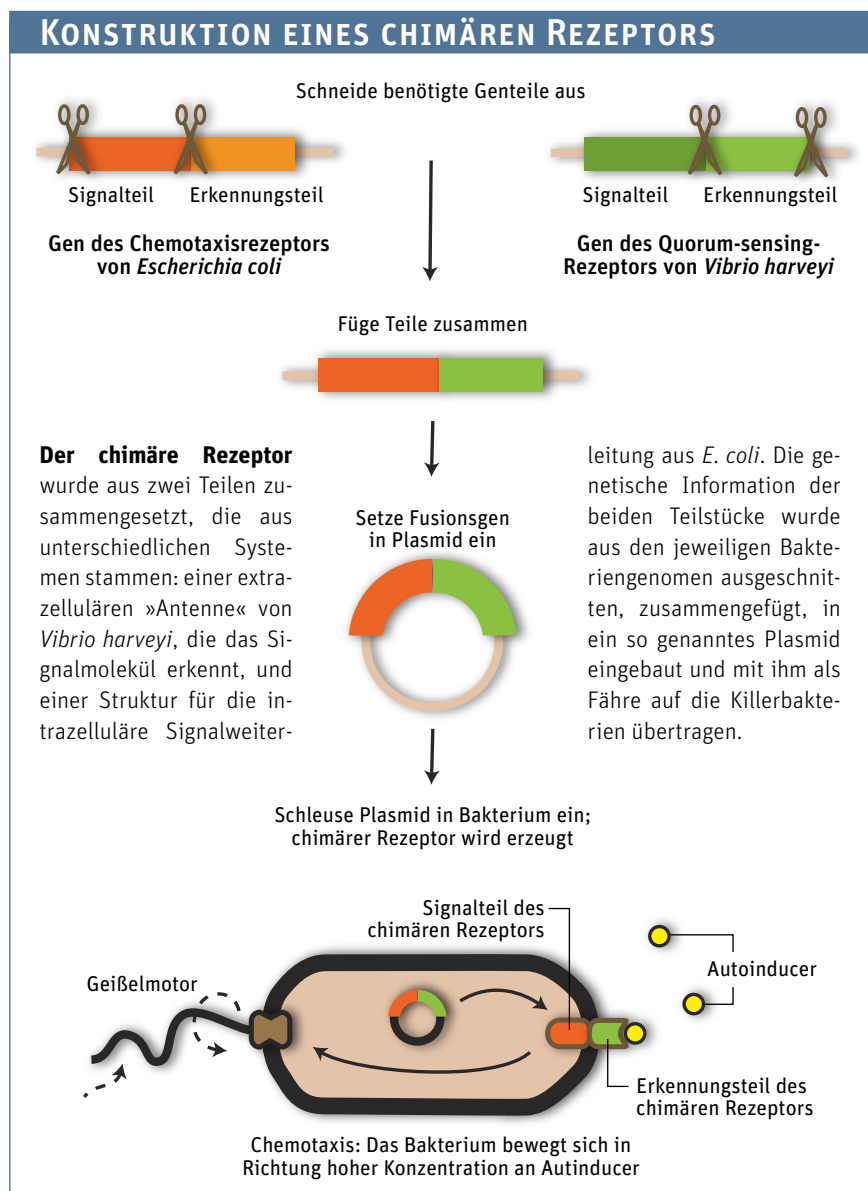
Parallel dazu sensibilisierten wir den Killerstamm für diese Signalmoleküle

und versetzten ihn in die Lage, zu den Beutezellen hinzuschwimmen. Dabei nutzen wir das natürliche Wahrnehmungs- und Bewegungssystem, mit dem *E. coli* in der Natur zum Beispiel Nährstoffe aufspürt. Als Sensor dient ihm dabei ein spezieller Chemotaxisrezeptor. Dieses Protein sitzt in der Zellmembran. Mit dem nach außen überstehenden Ende kann es Nährstoffmoleküle binden. Wenn das geschieht, ändert sich seine Struktur, wodurch sein anderes Ende, das ins Zellinnere ragt, ein Signal auslöst, welches den Bewegungsapparat steuert.

Wir wandelten den natürlichen Chemotaxisrezeptor Tar von *E. coli* so ab, dass er Autoinducer-II-Moleküle an Stelle von Nährstoffen erkannte und band. Dafür kombinierten wir seinen inneren Teil

mit der äußeren Hälfte des LuxQ-Rezeptors, der ebenfalls von *Vibrio harveyi* stammt und dort den Autoinducer II anlagert (Kasten unten). Das Gen für dieses künstliche Konstrukt führten wir in die Killerbakterien ein. Dadurch erzeugten diese einen chimären Chemotaxisrezeptor, der bewirkt, dass sich das Bakterium in Richtung zunehmender Konzentration von Autoinducer II bewegt.

Derzeit testen und optimieren wir zusammen mit einigen weiteren Mitgliedern des iGEM Teams 2008 diesen Rezeptor im Labor. Im Prinzip lässt sich dieses Erkennungsmodul an fast jeden Tumor oder Krankheitserreger anpassen, falls dieser ein ausreichend spezifisches Sortiment an Stoffen ausscheidet. Dazu muss man nur das äußere Ende des Chemotaxisrezeptors austauschen.



WÄHLEN SIE AUS UNSEREN VORTEILSABOS:

JAHRESABO:

- 12 Ausgaben zum Preis von nur € 6,60 (statt € 7,40) pro Ausgabe; Schüler, Studenten und Azubis zahlen sogar nur € 5,55.
- 1 Begrüßungspräsent zur Wahl



Der Regenschirm »Sonnenfraktale« begleitet Sie durch trübe Regentage und bietet unter seinem großen Dach auch zwei Personen Schutz (ø 1,30 m).

Mehr Auswahl auf
spektrum.de/abo



Vorsehen mit zahlreichen Kartenabbildungen zeigt »Der mittelalterliche Kosmos«, welchen Einfluss die Antike auf das Weltbild von Abendland und islamischem Orient hatte und wie beide Kulturkreise es weiterentwickelten.



EIN ABO – VIELE VORTEILE

- 1 Nutzen Sie Ihren Sparvorteil gegenüber dem Einzelkauf.
- 2 Sie verpassen keine Ausgabe und bekommen das Heft sicher verpackt und pünktlich nach Hause geschickt.
- 3 Profitieren Sie vom kostenlosen Onlinezugang auf alle Spektrum-Ausgaben seit 1993.
- 4 Jeden Monat finden Sie im Internet einen nicht im Heft publizierten Zusatzartikel.
- 5 Sie können ausgewählte Sonderhefte gratis downloaden.
- 6 Mit Ihrem persönlichen Mitgliedsausweis (zum Download) kommen Sie in den Genuss zahlreicher Vergünstigungen.
- 7 Als Abonnent können Sie unser Produkt des Monats günstiger bestellen.

Ihr Zugang zu den Onlinevorteilen:

www.spektrum-plus.de

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

MINIABO:

- 3 aktuelle Ausgaben mit 35 % Preisvorteil:
Sie zahlen pro Heft nur € 4,83.
- 1 Präsent zur Wahl

35%
PREIS
VORTEIL

Mit diesem USB-Stick können Sie 2-GB-Dateien in Sekundenschnelle speichern.



Damit Ihr Tag gut anfängt! Die beiden Frühstücksbrettchen mit farnefrohen Fraktalmotiven sind hitzebeständig und spülmaschinenfest.

SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751



E-MAIL: service@spektrum.com

www.spektrum.de/abo

SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR
LESEVERGNÜGEN

Das erste Heft des Abonnements verschicken wir – zu dem von Ihnen gewünschten Termin – zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen an den Beschenkten. Das Präsent schicken wir an Ihre Adresse.

www.spektrum.de/abo

LESER WERBEN LESER

SIE MÖCHTEN UNS EINEN
NEUEN ABONNENTEN VER-
MITTELN?

Dann haben Sie sich eine
Dankesprämie verdient und
können zwischen mehreren
Präsenten wählen:

www.spektrum.de/abo

PRODUKT DES MONATS

STIRLING-ENGINE-BAUSATZ

Freuen Sie sich nach 3 bis 4
Stunden Aufbauzeit über die
ersten Kolbenbewegungen und
eine 3 bis 4 Minuten lange
Fahrt (Antrieb mit Feuer). Preis
für Abonnenten: € 109,- inkl.
Versand Inland (statt € 29,95).

www.spektrum.de/abo

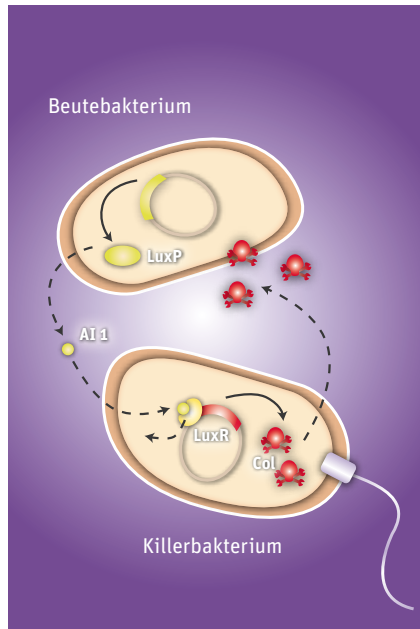


Die Killerbakterien wurden mit dem Gen für das Molekül Colicin E1 (Col) ausgestattet, das die Zellmembran ihrer Beute durchlöchert. Zur Aktivierung dieses Gens erhielten sie zudem den genetischen Schalter LuxR, der auf das Signalmolekül Autoinducer I reagiert. Die Beutebakterien wiederum waren so konstruiert, dass sie mittels des Enzyms LuxI diesen Signalstoff produzierten. Nur in ihrer Nähe setzten die Killer daher Colicin frei.

Für die Killerbakterien genügt es allerdings nicht, die Beute aufzuspüren – sie müssen sie auch töten können. Das von uns entworfene Tötungsmodul arbeitet mit bakteriellen Toxinen, die als Colicine bezeichnet werden, weil sie von bestimmten *E.-coli*-Stämmen produziert werden. Diese gehen mit den Giftstoffen gegen ihre bakteriellen Konkurrenten vor.

Es gibt eine Reihe verschiedener Colicine mit unterschiedlichen Wirkungsweisen. In unserem Projekt verwendeten wir das Colicin E1, das die äußere Membran anderer Bakterien durchlöchert, so dass sie auslaufen. Für seine Herstellung muss die Mikrobe gezielt mehrere Proteine erzeugen, deren Gene gemeinsam in einer so genannten Genkassette untergebracht sind. Diese Genkassette schleusten wir in die Killerbakterien ein und wiesen nach, dass sie wunschgemäß funktioniert.

Allerdings sollten die Jäger nicht unkontrolliert Colicine freisetzen, bevor sie die Zielzellen erreicht haben. Deshalb



stellten wir das Tötungsmodul wiederum unter die Kontrolle eines Signalmoleküls. Dafür verwendeten wir Autoinducer I, den die Beutebakterien ja ebenfalls ausschütten. In ihrer Nähe ist dessen Konzentration folglich hoch. Dort nehmen die Killerbakterien das Signalmolekül daher vermehrt auf, wodurch ihr Tötungsmodul aktiviert wird. Für diese Aktivierung benutzten wir den in der synthetischen Biologie gebräuchlichen molekularen Schalter LuxR.

Colicine haben eine Besonderheit, die unser Tötungsmodul für die Krebstherapie sehr interessant macht: Sie können auch die Zellmembran von Tumorzellen

perforieren und diese so abtöten. Wir haben das Modul deshalb zusätzlich im Labor an Brustkrebszellen getestet. Bereits zwei Stunden nach Verabreichung der Killerbakterien stieg deren Todesrate signifikant an.

So haben also 16 Studenten mit einem Kasten voller Genbausteine nicht nur Pionierarbeit für die synthetische Biologie geleistet, sondern zugleich einen viel versprechenden neuen Ansatz in der Krebstherapie entwickelt. Auch die Juroren bei der iGEM waren beeindruckt. Das Heidelberger Team heimste neben einer Goldmedaille drei Spezialpreise ein und konnte damit von allen beteiligten 84 Gruppen die meisten Ehrungen mit nach Hause nehmen. Auch das andere deutsche Team, das aus Freiburg kam, schnitt sehr gut ab: Es gewann den zweiten Hauptpreis und eine Goldmedaille.

Wie beim Fußball ist nach dem Spiel jedoch vor dem Spiel. Auch in diesem Jahr verfolgt ein neu aufgestelltes iGEM-Team aus Heidelberg ehrgeizige Ziele. Bis zum nächsten Wettbewerb im Herbst in Boston will es mit der bakteriellen Killermaschine dem Krebs noch massiver zu Leibe rücken.

Anna Stöckl und **Dominik Niopek** studieren an der Universität Heidelberg Biologie beziehungsweise molekulare Biotechnologie. Sie waren Mitglieder des iGEM-Teams 2008, das **Roland Eils** geleitet hat. Er ist Professor für Bioinformatik an der Universität Heidelberg und Abteilungsleiter am Deutschen Krebsforschungszentrum.

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

Mit Salz aus Holz Zucker gewinnen

Kraftstoffe wie Bioethanol aus Nahrungsmitteln zu erzeugen ist ethisch bedenklich. Besser wäre es, Pflanzenrückstände zu verwerten. Doch die lassen sich chemisch nur schwer verarbeiten. Eine elegante Möglichkeit eröffnen nun so genannte ionische Flüssigkeiten.

Von Roberto Rinaldi und Ferdi Schüth

Fast die gesamte irdische Biomasse entsteht durch Fotosynthese. Dabei erzeugen Pflanzen, Algen und einige Bakterien mit Hilfe von Sonnenlicht aus Kohlendioxid und Wasser Traubenzucker (Glukose). Zwar beträgt die Effizienz dieses Prozesses nur rund ein Prozent; dennoch schätzt man, dass die weltweit in Biomasse umgewandelte

Sonnenenergie etwa dem Zehnfachen des derzeitigen Energieverbrauchs der Menschheit entspricht.

Allerdings wird der primär entstehende Traubenzucker nicht in dieser Form in Pflanzen gespeichert. Glukose kann in Wasser zwei Strukturen annehmen, die als α - und β -Form bezeichnet werden (Bild rechts). Aus ihnen stellt die Natur durch lineare Verkettung Stärke beziehungsweise Zellulose her. Stärke, ein spi-

ralförmiges Polymer der α -Glukose, fungiert als Hauptenergiespeicher der Pflanzen. Sie kommt in allen Grundnahrungsmitteln wie Kartoffeln, Mais, Getreide und Reis vor. Menschen und Tiere nutzen sie als wesentliche Energiequelle, indem ihr Verdauungsapparat die Polymerkette wieder in die enthaltenen Glukosemoleküle spaltet.

Technisch kann man aus Stärke über Zucker durch Vergärung den Kraftstoff

Bioethanol oder andere Basischemikalien herstellen. Da dabei Lebensmittel wie Mais oder Weizen als Ausgangsprodukt dienen, ergibt sich allerdings ein moralisches Dilemma. Angesichts von Armut und Hunger in vielen Teilen der Welt erscheint es problematisch, wenn die Kraftstoffherzeugung in Wettbewerb mit der Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln tritt.

Pflanzen nutzen Glukose aber nicht nur als Energiespeicher, sondern in noch viel größeren Mengen auch als Strukturmaterial in Form von Zellulose oder Lignozellulose. Zellulose, ein lineares Polymer der β -Glukose, kommt als Hauptbestandteil pflanzlicher Zellwände in großen Mengen in Pflanzenabfällen, Stroh und Holz vor. Schon heute findet sie in Form von Papier und Baumwolle breite Verwendung. Da sie erneuerbar und fast unbegrenzt verfügbar ist, zählt sie zu den aussichtsreichsten Rohstoffen des 21. Jahrhunderts. Pro Jahr produzieren Pflanzen etwa eine Billion Tonnen Zellulose.

Derzeit bilden fossile Kohlenwasserstoffe das Rückgrat unseres Energiesystems. Da ihre Vorräte jedoch zur Neige gehen und bei ihrer Verbrennung das klimaschädliche Treibhausgas Kohlendioxid frei wird, bietet es sich an, verstärkt Biomasse zur Gewinnung von Energie, Treibstoffen und Chemikalien zu nutzen. Um eine Konkurrenz zu Nahrungs- und Futtermitteln zu vermeiden, sollte dabei vorrangig Zellulose und Lignozellulose zum Einsatz kommen.

Dies stellt uns aber vor neue technologische Herausforderungen. In der Evolution wurde Holz so optimiert, dass es weitgehend unempfindlich gegen Witterungseinflüsse und Mikroorganismen ist. Daher kann es trotz seines Aufbaus aus Zuckermolekülen nicht direkt zur Herstellung von Ethanol oder anderen flüssigen Kraftstoffen dienen. Als hinderlich erweist sich auch, dass Holz ein Gemisch aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin ist. Davon bestehen lediglich die ersten beiden aus Zucker und können – zumindest im Prinzip – zu Ethanol oder anderen Chemikalien umgesetzt werden. Lignin hat eine äußerst komplizierte Struktur, die praktisch nur eine Verwertung als Brennstoff erlaubt. In begrenztem Umfang taugt es allenfalls zur Synthese von Vanillin oder Harzen.

Ein Lösungsmittel für Zellulose

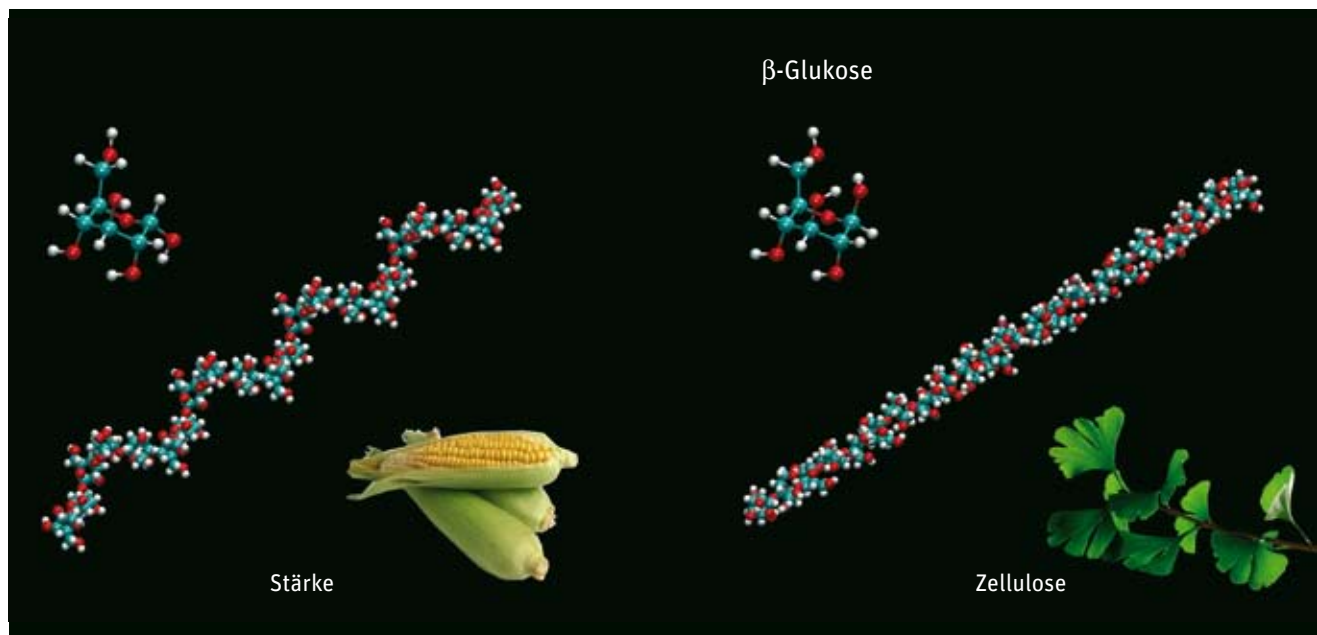
Die Stabilität von Holz gegenüber Wasser, Chemikalien und Mikroorganismen beruht auf der Anwesenheit von Lignin sowie auf der Struktur der Zellulose. Deren Zuckerketten sind durch Wasserstoffbrücken sehr eng miteinander verbunden (Bild auf S. 22). Deshalb sind die meisten möglichen Angriffspunkte für Reaktionen gut abgeschirmt. Auch Wasser, welches das Polymer an den Nahtstellen zwischen den Zuckermolekülen – den so genannten Glykosidbindungen – spalten könnte, kommt nicht zum Zuge. Das wissen wir im Alltag zu schätzen, würde sich doch sonst aus Zellulose bestehende Baum-

wollkleidung im Regen oder beim Waschen auflösen. Auch viele archaische Zeugnisse aus Papier oder Holz wie die Schriftrollen von Qumran haben nur dank der besonderen Stabilität der Zellulose, deren Halbwertszeit bei 25 Grad Celsius auf 5 bis 8 Millionen Jahre geschätzt wird, die Jahrhunderte überdauert.

Der Schutz der Glykosidbindungen wird jedoch weitgehend aufgehoben, wenn man durch Kappen der Wasserstoffbrücken die Zuckerketten voneinander trennt – zum Beispiel durch Auflösen der Zellulose in einer Flüssigkeit. Leider gibt es aber nur ganz wenige geeignete Lösungsmittel, und die sind, wie etwa Schwefelkohlenstoff, sehr umweltschädlich. Deshalb war es ein echter Durchbruch, als Robin Rogers 2002 entdeckte, dass Zellulose in so genannten ionischen Flüssigkeiten löslich ist.

Verbindungen, die aus Ionen aufgebaut sind, bezeichnet man als Salze. Deren Schmelzpunkt liegt gewöhnlich bei mehreren hundert Grad Celsius. In jüngster Zeit haben Chemiker allerdings Salze hergestellt, deren Ionen so sperrig

Glukose kann in Wasser zwei Strukturen annehmen, die als α - und β -Form bezeichnet werden. Stärke besteht aus spiralförmigen Ketten von α -Glukose und kommt in vielen Nahrungsmitteln wie etwa Mais vor. In der Zellulose ist β -Glukose zu linearen Strängen verknüpft. Sie bildet den Hauptbestandteil der Zellwände von Pflanzen.





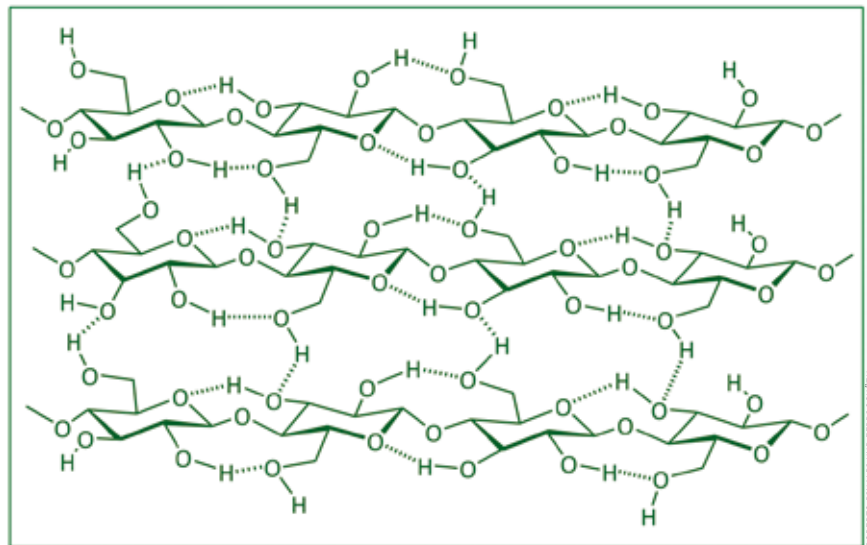
BWVVI

EXISTenziell für einen erfolgreichen Start

Damit aus guten Ideen Realität wird, braucht es Zeit und vor allem Geld. Unser Förderprogramm EXIST schafft optimale Startbedingungen für angehende Existenzgründer und Existenzgründerinnen sowie Forscherteams aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen.

EXIST-Gründerstipendium unterstützt neue Unternehmensideen von der Frühphase bis zur Gründung. Wir fördern technologieorientierte Vorhaben und innovative Dienstleistungen – bis zu einem Jahr lang. Voraussetzung ist, dass sie auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen und den Markt überzeugen können. Nutzen Sie Ihr Potenzial. Wir bringen Sie weiter.

Alle Informationen, alle Details
unter: www.exist.de



ROBERTO RINALDI UND FERDI SCHÜTH

sind, dass sie sich nur schlecht in einem regelmäßigen Kristallgitter anordnen können. Darum schmelzen sie schon bei tiefen Temperaturen. Liegt ihr Schmelzpunkt unter 100 Grad Celsius, bezeichnet man sie als ionische Flüssigkeiten. Solche Flüssigsalze haben nicht nur ein großes Lösungsvermögen für polare Verbindungen, sondern auch einen unmessbar kleinen Dampfdruck. Das macht sie sehr umweltfreundlich, weil keine Emission in die Atmosphäre möglich ist.

Da in ionischen Flüssigkeiten gelöste Zellulose nicht mehr in gleicher Weise geschützt ist wie im natürlichen Zustand, kann sie durch chemische Reaktionen in ihre Bestandteile zerlegt werden. Der Angriff auf die Glykosidbindung erfordert allerdings einen Katalysator. So kann das Enzym Cellulase Zellulose sehr langsam zersetzen. In ionischen Flüssigkeiten versagt es jedoch. Deshalb müssen Chemiker selbst einen geeigneten Katalysator entwickeln.

Säuren können, wie man weiß, die Glykosidbindung knacken. Gibt man sie zu einer ionischen Flüssigkeit, lassen sich ihre Anionen jedoch nur schwierig wieder daraus entfernen. Das aber ist dringend erforderlich, damit sich das teure Lösungsmittel wiederverwenden lässt. Wir haben nun entdeckt, dass die Spaltung auch mit Feststoffen als Katalysatoren gelingt – etwa sauren Ionenaustauscherharzen. Sie lassen sich nach der Reaktion einfach abfiltrieren.

Aber wie kann man die Abbauprodukte aus der ionischen Flüssigkeit isolieren? Ein gängiges Verfahren wie das Abdestillieren des Lösungsmittels scheidet in diesem Fall ja aus. Ein Ausweg besteht darin, die Reaktion nicht komplett bis zu den kleinsten Bausteinen, den Zuckern, ablaufen zu lassen. Wenn man den Abbau bei kurzen Zuckerketten stoppt, fal-

Die linearen Zuckerketten der Zellulose sind durch Wasserstoffbrücken fest miteinander verbunden.

len diese bei Zusatz von Wasser einfach aus. In wässriger Suspension lassen sich die kurzen Polymere dann enzymatisch weiter zu Glukose zerkleinern.

Bis zur technischen Umsetzung des Verfahrens sind allerdings noch einige praktische Probleme zu überwinden. Vor allem kommt es darauf an, die ionische Flüssigkeit möglichst vollständig zurückzugewinnen, da davon die Wirtschaftlichkeit abhängt. Außerdem besteht sicher noch viel Potenzial für Optimierungen sowohl beim Katalysator als auch beim Lösungsmittel. Immerhin ist der Weg vorgezeichnet, und an seinem Ende winkt die Realisierung des alten Traums, aus Holz Zucker herzustellen.

Chemiker verfolgen diese Idee schon seit über 100 Jahren und haben auch bereits mehrere Verfahren zur Holzverzuckerung entwickelt. Gegenüber dem Rohstoff Erdöl sind sie jedoch allesamt nicht konkurrenzfähig. Bei der bekanntesten Methode werden Holzsplitter bei 200 Grad Celsius mit verdünnter Schwefelsäure gekocht. Der Einsatz von ionischen Flüssigkeiten ist im Vergleich dazu viel eleganter, schonender und umweltfreundlicher. Anders als heiße Schwefelsäure sind Feststoffkatalysatoren nicht korrodierend und wirken schon bei viel niedrigeren Temperaturen. Außerdem besteht keine Gefahr, dass suspendierte Teilchen die Rohrleitungen verstopfen.

Roberto Rinaldi befasst sich am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim mit der Spaltung von Zellulose. **Ferdi Schüth** ist Direktor dieses Instituts und Vizepräsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

MIKROBIOLOGIE

Einsiedler im Erdinneren

Knapp drei Kilometer unter der Erde haben Forscher in Südafrika nun ein Bakterium entdeckt, das fernab von Licht und Nahrung mutterseelenallein in höllischer Hitze haust. Die radioaktive Strahlung von Uran liefert energiereiche Verbindungen für seinen Stoffwechsel.

Von Christian Tack

Kilometertief unter dem Boden haben Wissenschaftler jetzt einen einzigartigen Überlebenskünstler aufgespürt. Im unwirtlichen Gestein der Erdkruste gedeiht dort eine Bakterienart, die sich ihren Lebensraum mit keiner anderen Spezies teilt. Zudem ist die Mikrobe absolut autark: Sie braucht weder Licht noch Nahrung und gewinnt ihre Energie allein aus anorganischen Stoffen in ihrer Umgebung. Damit ist *Desulforudis audaxviator*, wie der Vorschlag für den offiziellen Namen des Bakteriums lautet, das erste bekannte Lebewesen, das ganz auf sich allein gestellt sein Dasein fristet.

Als Arbeiter der Goldmine von Mponeng ein frisches Bohrloch in den Basalt des Witwatersrand Basin in Südafrika getrieben hatten, sprudelte Grundwasser aus knapp drei Kilometer Tiefe ans Tageslicht. Tullis C. Onstott von der Princeton University (New Jersey) und Kollegen schöpften die enthaltenen Mikroorganismen mit einem Filter ab und entzifferten pauschal alles genetische Material in der Probe. Mit dieser Vorgehensweise, die als Metagenomik bezeichnet wird, konnten schon viele Bakterien und Archaea (urtümliche Mikroben) aufgespürt werden, die tief im Gestein der Kontinente leben. Allein in Südafrika gelang so der Nachweis von 320 extremophilen Arten, die getreu ihrem Namen Extrembedingungen lieben und sich deshalb nicht auf herkömmliche Art im Labor züchten und charakterisieren lassen.

Wie alle anderen Lebewesen bilden auch die Mikroorganismen normalerweise artenreiche Ökosysteme und stehen in vielfältigen Beziehungen zueinander. Die Genomsequenzierung aus der Probe der Mponeng-Mine widersprach diesem Erfahrungsgrundsatz jedoch. Wie die Wissenschaftler die Daten auch drehten und wendeten, ergab die Rekonstruktion aus den entzifferten DNA-Bruchstücken nur

ein einziges bakterielles Chromosom mit 2,35 Millionen Basenpaaren, also »Buchstaben« im genetischen Text, der die Bauanleitung für ein Lebewesen enthält.

Sollte das Ökosystem tief in der Erdkruste tatsächlich nur aus einer Art bestehen? Einen weiteren Beleg dafür lieferte das Gen für die kleine ribosomale RNA (16S-rRNA). Dieses Molekül ist ein charakteristischer Baustein der bakteriellen Eiweißfabriken. Seine Basensequenz unterscheidet sich von Art zu Art. Hier gab es jedoch nur eine einzige Version, die 99,9 Prozent ausmachte. Die restlichen 0,1 Prozent erwiesen sich als Verunreinigungen aus dem Labor und der Mine.

Ein genügsamer Alleskönner

Das Gen der 16S rRNA eignet sich dank seiner Variabilität auch hervorragend zur Klärung der evolutionären Verwandtschaftsverhältnisse. So konnte *D. audaxviator* in die Familie der Peptococaceae eingeordnet werden, die zu den Clostridiales gehört. Dabei stellte sich heraus, dass die spezielle Variante des Gens für die 16S-rRNA auch früher schon oft in Wasserproben aus Südafrika aufgetaucht war, dort allerdings im Gemisch mit anderen. Damals konnten die gefundenen Genschnipsel den verschiedenen Mikroben nicht zweifelsfrei zugeordnet werden.

Da das Bakterium in der neuen Probe jedoch allein vorkam, musste alles DNA-Material von ihm stammen, so dass eine eindeutige Charakterisierung möglich war. Dazu warfen die Wissenschaftler einen genauen Blick auf die ermittelten Basenfolgen; denn darin sollte sich das Wesen des Organismus offenbaren. Stück

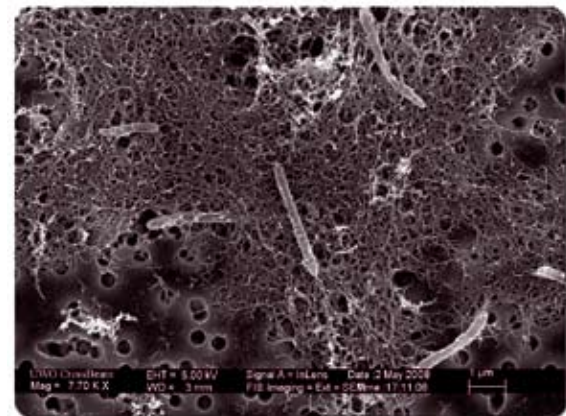
Auf dieser rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme einer Probe aus der Mponeng-Mine in Südafrika sind Exemplare des stäbchenförmigen *Desulforudis audaxviator* zu erkennen.

für Stück wurden einzelne Gene auf dem Chromosom identifiziert. Zum Schluss waren 2157 Exemplare mit ihrem jeweiligen Proteinprodukt bekannt, so dass sich ein umfangreiches Bild über den Stoffwechsel herauskristallisierte.

Demnach besitzt *D. audaxviator* alle nötigen Gene, um seine Zellbestandteile allein aus anorganischen Verbindungen herzustellen. Durch diese chemolithotrophe Lebensweise ist das Bakterium unabhängig von organischen Nährstoffen und damit von anderen Primärproduzenten. Seine chemische Energie gewinnt es, indem es Elektronen von elementarem Wasserstoff auf Sulfat überträgt. Dabei wird ein Protonengradient über die Zellmembran aufgebaut, den das Bakterium für die Synthese von Adenosintriphosphat (ATP) nutzt. Diese energiereiche Verbindung ist die Grundlage für den zellulären Stoffwechsel aller bekannten Lebewesen.

D. audaxviator verwendet das ATP auch, um anorganischen Kohlenstoff, den es aufnimmt, in Biomasse zu überführen. Das Bakterium verfügt sogar über Enzyme zum Binden und Verwerten von elementarem Stickstoff. So kann es aus anorganischen Verbindungen alles synthetisieren, was es zum Leben benötigt: Aminosäuren, Zucker, Lipide, Nucleotide und so weiter.

Allerdings besitzt *D. audaxviator* auch etliche Gene, die über die minimale Ausstattung eines Spezialisten hinausgehen. Demnach scheint es an unterschiedlichsten Bedingungen angepasst zu sein. Trifft es unerwartet doch einmal auf organisches Material – etwa Reste eines toten Organismus –, kann es die betreffenden Verbindungen über eine Reihe von Membranproteinen in die Zelle aufnehmen, wo sie direkt in den Stoffwechsel integriert werden. Eine



GREG WANGER, J. CRAIG VENTER INSTITUTE, UND GORDON SOUTHAM, UNIVERSITY OF WESTERN ONTARIO

Springers Einwürfe

Geschmacksfragen

Ist Ekel angeboren oder adressiert?

Bin ich froh, dass Speicheldrüsen meine Mundhöhle ausgiebig befeuchten! Sonst hätte ich beim Reden einen Frosch im Hals und müsste beim Essen zu jedem Bissen ein halbes Glas trinken. Nur wenn ich unter meinem Zahnarzt liege, wird mir das körpereigene Nass zu viel. Ich schlucke krampfhaft mit weit offenem Mund und schäme mich vor der hübschen Assistentin für das jämmerliche Würgegeräusch.

Ansonsten schlucke ich körpereigenen Speichel bereitwillig hinunter – aber vor fremder Spucke graust mir. Offenbar ist das eine ganz nützliche Reaktion, die mich vor möglicher Ansteckung mit Krankheitskeimen schützt. Die Abwehr ist so stark, dass sie sich sogar gegen den eigenen Speichel richtet, sobald er den Mund verlassen hat. Darum finde ich allein schon den Gedanken, ein Glas privater Spucke auszu trinken, äußerst widerlich.

Zu unserem Ekel vor Körperausscheidungen, aber auch vor Schmutz und Ungeziefer gehört, dass wir dabei ein charakteristisches Gesicht schneiden: gerümpfte Nase und durch Heben der Oberlippe gebleckte Zähne. Ein Team um die Psychologin Hannah A. Chapman von der University of Toronto (Kanada) hat diese »Lippenhebereaktion« genau erforscht und gefunden, dass sie reflexhaft durch einen unangenehmen Geschmack im Mund, aber auch durch den Anblick von Kakerlaken und durch unfaire Behandlung in einem Spiel um Geld ausgelöst wird (*Science*, Bd. 323, S. 222).

Laut Chapman ist es demnach mehr als nur eine Metapher, wenn wir unfaires Verhalten abstoßend, abscheulich, kurz »ekelhaft« finden. Beim angewiderten Zähneblecken handelt es sich um eine angeborene Reaktion, deren Ähnlichkeit bei Affe und Mensch schon Charles Darwin aufgefallen ist. Bei unserer Spezies, meint Chapman, habe sich diese abwehrende Pfui-Teufel-Grimasse nun durch »Exaptation« – evolutionäres Umfunktionieren einer anderweitigen Anpassung – auf soziale und moralische Belange übertragen.

An dieser Hypothese melden drei US-Psychologen im selben »Science«-Heft – wie ich finde, berechnete – Zweifel an (S. 117). Das unwillkürliche Grimassenschneiden angesichts unfairen Verhaltens sei noch kein Beweis für einen angeborenen sozialen Ekelreflex. Es könne sich auch um eine kulturelle Übertragung handeln, eben doch eine Metapher. Als wollte mein verzerrtes Gesicht ausdrücken: Was du da tust, schmeckt mir nicht.

Überhaupt bezweifle ich, dass der Ekel vor Fäkalien, Insekten und Schmutz eine von tierischen Vorfahren ererbte Schutzreaktion sein soll. Wer die so genannte Sauberkeitserziehung seines Kindes mitgemacht hat, der weiß, wie unterschiedslos es mit unbändiger Neugier auf alles losgeht, was da herumliegt, kriecht und fleucht. Keine Spur von Ekel vor eigener oder hündischer Ausscheidung, vor eigener oder fremder Spucke, vor Käfern oder Spinnen. Unentwegt erschallen die Entsetzensschreie besorgter Eltern, denen ihr Kind stolz eine aus dem Spielplatzsand gegrabene Fundsache präsentiert: Pfui, tu das weg! Das ist ekelhaft!

Verblüfft beobachtet das Kind die Panik der Erwachsenen, neugierig studiert es den elterlichen Lippenhebereflex. So lernt es mit der Zeit, selbst Ekel zu empfinden – als Resultat eines ausgiebigen, mühsamen, konfliktträchtigen Trainings. Und wenn es erwachsen ist, erfährt es im Museum, dass die Kunst, vor allem die moderne, gern mit unseren Ekelschranken spielt. Angesichts mancher Ausstellungsobjekte hebt sich dann unwillkürlich die Oberlippe des Betrachters, als wollte sie sagen: Ekelhaft! Aber zugleich bedeuten die hochgezogenen Brauen: Interessant!



Michael Springer

Geißel verleiht der Mikrobe auch eine gewisse Mobilität, die ihr erlaubt, mittels Chemotaxis die Orte mit der besten Nährstoffversorgung aufzusuchen.

Das Leben im Gestein in drei Kilometer Tiefe ist zweifellos hart. Dort unten herrscht eine Temperatur von etwa 60 Grad Celsius. Freien Sauerstoff gibt es gar nicht, weshalb *D. audaxviator* auch keine Schutzmechanismen gegen das aggressive Gas entwickelt hat.

Radioaktivität als Lebensgrundlage

Die einzige Energiequelle ist radioaktive Strahlung von Uran, die diverse geochemische Prozesse antreibt. Insbesondere spaltet sie Wassermoleküle. Dabei entsteht einerseits der molekulare Wasserstoff für die Sulfatreduktion, andererseits Wasserstoffperoxid, das Sulfide aus dem Gestein in Sulfat verwandelt.

Indem das Bakterium bei seinem Energiestoffwechsel seine Umgebung ansäuert, zersetzt es Kalk. Das dabei gebildete Kohlendioxid nutzt es – über den umgekehrten Zitrat- und nicht den bei Pflanzen üblichen Calvin-Zyklus – zur Synthese organischer Verbindungen.

Über eine exakte Wasseranalyse konnten die Wissenschaftler nachweisen, dass dem Bakterium alle wichtigen Substanzen für seinen Stoffwechsel zur Verfügung stehen. Der läuft allerdings extrem langsam ab; denn die Energiedichte in diesen Tiefen ist weit geringer als an der Erdoberfläche. Berechnungen zufolge müssen mehrere hundert oder sogar 1000 Jahre vergehen, ehe sich eine Zelle teilen kann. Ein derart gemächliches Wachstum ist nur möglich, weil der Lebensraum des Organismus über lange geologische Zeiträume hinweg praktisch konstante Bedingungen bietet.

Wo der Mensch nach Gold als Luxusgut schürft, findet der »kühne Wanderer« – so die Übersetzung des lateinischen Namens – also gerade nur das Notwendigste für ein genügsames Dasein. Radioaktivität, Wasser, ein paar gelöste chemische Verbindungen und 2157 Gene reichen ihm aus, um fernab der Erdoberfläche als Einsiedler zu hausen. Nicht nur auf diesem Planeten vielleicht, denn dunkle, heiße Orte ohne Sauerstoff soll es ja noch anderswo geben.

Christian Tack ist Diplombiologie und freier Wissenschaftsjournalist in Frankfurt.

*Die Neigung der Menschen,
kleine Dinge für wichtig zu halten,
hat sehr viel Großes hervorgebracht.*

Georg Christoph Lichtenberg
(1742–1799)



BEIDE FOTOS: H. J. SCHLICHTING

'ne Perl in jeder Primel Ohr

Die leuchtenden Wassertropfen, die früh am Morgen auf Gras, Blättern und auch Schafwollfäden zu finden sind, verdanken sich der Physik der kleinen Dinge.

»Nun such ich Tropfen Taus hervor / Und häng 'ne Perl in jeder Primel Ohr«, sagt die Elfe in William Shakespeares »Sommernachtstraum«. Ein Hauch dieser zauberhaften Nacht mag auch uns berühren, wenn wir früh am Morgen bei niedrig stehender Sonne leuchtende Perlenketten von winzigen Tropfen erblicken. Ist die Elfe an einem Stacheldraht hängen geblieben und hat einen Teil der Perlen zurücklassen müssen?

Der angehende Tag lässt uns die Sache etwas nüchterner betrachten. Keine Elfe, sondern ein Schaf verlor hier einige Wollfäden (großes Bild oben), die nun den »Schweiß der Luft« (Friedrich Hebbel) in Form winziger Tröpfchen aufgefangen haben. Die Schönheit dieses Anblicks verdankt sich indessen in mehrfacher Hinsicht der Kleinheit der daran beteiligten Objekte – und scheint einmal mehr die obige Einsicht Lichtenbergs zu bestätigen.

Nachts kühlen die Luft und beliebige Gegenstände ab, weil sie mehr Wärme in den kalten Weltraum abstrahlen, als sie von dort aufnehmen. Es sinkt also die in ihnen gespeicherte (innere) Energie, und zwar besonders stark in den kleineren Dingen. Denn in der Formel für das Volumen steckt der »Radius hoch drei« (r^3), in jener für die Oberfläche jedoch nur der »Radius hoch zwei« (r^2). Das heißt nichts anderes, als dass kleine Objekte eine im Vergleich zum Volumen große Oberfläche besitzen. Weil der abgestrahlte Energiestrom proportional zu Letzterer ist, kühlen sie folglich besonders schnell ab. Daher wird der Taupunkt an kleinen Gegenständen wie Gras, Blättern oder Schafwollfäden schneller unterschritten. Überschüssiger Wasserdampf in der Luft kondensiert also hier zuerst.

Doch warum entsteht an der Oberfläche der Wollfäden kein gleichmäßiger Flüssigkeitsfilm? Wird Dampf zu Wasser, so bilden sich Grenzflächen zwischen den Oberflächen von Wollfäden, Luft und Wasser aus. Hierzu ist Grenzflächenenergie nötig. Da jeder natürliche Prozess mit der Entwertung von Energie einhergeht – es wird Entropie produziert –, wird sich eine Konstellation einstellen, in der unter den gegebenen Umständen die Grenzflächenenergie insgesamt minimal wird.

Weil die spezifische Grenzflächenenergie zwischen Faden und Wasser kleiner ist als die zwischen Wasser und Luft, haftet das aus Wasserdampf entstehende Wasser zunächst am Faden. In dem Maß, in dem seine Menge zunimmt, wächst aber auch die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft. So wird dem Wasser eine bestimmte Form aufgezwungen: ein Kompromiss zwischen der Tendenz, die Grenzfläche zwischen Faden und Wasser zum Zweck der Energieminimierung groß und die zwischen Luft und Wasser klein zu halten. Ohne den Einfluss der Adhäsion am Faden und der Gewichtskraft würde der Tropfen die kleinstmögliche Oberfläche, also Kugelform anstreben.

Wächst ein Tropfen auf Grund zunehmender Anlagerung von Wassermolekülen, nimmt sein Volumen und proportional dazu die Gewichtskraft zu, beide gemäß r^3 . Die Grenzfläche zwischen Faden und Wasser und die durch sie bestimmte Adhäsionskraft wächst jedoch nur mit r^2 . Infolgedessen gewinnt die Gewichtskraft an »Gewicht«, was nicht nur zur Abweichung von der Kugelform führt, sondern auch dazu, dass sie schließlich die Adhäsionskraft übersteigt – und der Tropfen vom Faden fällt. Oder anders gesagt: Die Elfe hängt keiner Primel je eine zu große Perle ins Ohr. <



Tau formt sich häufig zu Tropfen an Stelle eines Flüssigkeitsfilms. Doch warum erscheinen die »Perlen« oft so hell? Wie kleine Kugellinsen bilden sie die Umwelt kopfstehend ab. Dabei kann der helle Himmel den dunklen Hintergrund der Landschaft dominieren.



H. Joachim Schlichting ist Professor und Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster.

Wie aus CHAOS ORDNUNG entsteht

Obwohl der zweite Hauptsatz der Thermodynamik einen Trend zu wachsender Unordnung vorschreibt, vermag die Natur aus chaotischen Zuständen geordnete Strukturen hervorzubringen. Ein neuer Theorieansatz erklärt das scheinbare Paradox.

Von J. Miguel Rubí

Lebende Organismen sind offene Systeme fern vom Gleichgewicht. Solche Gebilde sind nicht zu raschem Zerfall verurteilt, sondern können spontan neue Ordnungsstrukturen bilden.

Die Naturwissenschaft hat der Menschheit schon manche Enttäuschung bereitet. Sie setzt unserer Technik Grenzen, unter anderem mit der Lichtgeschwindigkeit als prinzipiell unüberbietbarem Tempo für Reisen und Signale; sie vermag unsere Anfälligkeit für Krebs und andere Leiden nicht zu überwinden; und sie konfrontiert uns mit unbequemen Wahrheiten wie dem globalen Klimawandel. Doch die wohl härteste Negativaussage enthält der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Er besagt: Wir leben in

einem Universum, das zwangsläufig immer unordentlicher wird. Jede Lebensregung trägt unweigerlich zum Niedergang der Welt bei. Selbst wenn wir unsere Maschinen noch so weit entwickeln – niemals werden sie ganz ohne Energieverlust und Verschleiß funktionieren. Der zweite Hauptsatz zerstört nicht nur den Traum vom Perpetuum mobile, sondern scheint auch zu besagen, dass der Kosmos letzten Endes alle brauchbare Energie erschöpfen und in ewigen Stillstand verfallen wird, den so genannten Wärmetod des Weltalls.

Dabei entstand die Thermodynamik eigentlich in einer Ära der Technikeuphorie. Mitte des 19. Jahrhunderts trieben Dampf-



maschinen die industrielle Revolution voran, und Physiker wie Rudolf Clausius, Nicolas Sadi Carnot, James Joule und Lord Kelvin schufen die Wärmelehre. Damit konnten sie verstehen, wie solche Maschinen funktionieren und was ihren Wirkungsgrad einschränkt. Aus diesen praktischen Anfängen entwickelte sich die Thermodynamik zu einem der wichtigsten Zweige der Physik. Sie ist eine allgemeine Theorie der kollektiven Eigenschaften komplexer Systeme, die längst nicht mehr nur Dampfmaschinen umfasst, sondern auch Bakterienkolonien, Computerspeicher und sogar Schwarze Löcher in den Tiefen des Alls. In gewisser Weise verhalten sich all diese Systeme gleich. Alle nutzen sich ab, wie es der zweite Hauptsatz vorschreibt.

Doch trotz seines empirischen Erfolgs mutet der zweite Hauptsatz oft paradox an. Die Aussage, Systeme müssten unweigerlich allmählich zu Grunde gehen, scheint den vielen Beispielen aus der Natur zu widersprechen, die nicht Desorganisation und Verfall vorführen, sondern Selbstorganisation und Wachstum. Außerdem weist die ursprüngliche Herleitung des zweiten Hauptsatzes ernste theoretische Mängel auf. Eigentlich dürfte das Gesetz gar nicht so allgemein gelten.

Viele Begründer der Thermodynamik waren sich dieser Schwächen bewusst und suchten eine vollständigere Theorie aufzustellen; im 20. Jahrhundert setzten Lars Onsager, Ilya Prigogine, Sybren de Groot, Peter Mazur und andere diese Bemühungen fort. Doch auch

ihr verfeinerter Ansatz ließ sich nur begrenzt anwenden. Erst kürzlich ist es meinen Kollegen und mir gelungen, die Grundlagen der Thermodynamik besser abzusichern und sie auf neue Bereiche auszudehnen. Wir konnten bestätigen, dass der zweite Hauptsatz universell gilt, haben aber auch gefunden, dass er lange nicht so schlecht ist wie sein Ruf.

Aus dem Gleichgewicht

Kaum ein Zweig der Physik wird oft so gründlich missverstanden wie die Thermodynamik. Regelmäßig gebrauchen sowohl Laien als auch Fachleute Begriffe wie Temperatur, Druck und Energie, ohne ihre exakte Bedeutung und ihre Feinheiten zu kennen. Doch wer die Tiefen der Theorie auslotet, merkt bald, wie sehr man auf der Hut sein muss. Die Achillesferse der Thermodynamik ist, dass sie streng genommen nur gilt, wenn das untersuchte System sich in einem Ruhezustand befindet, dem so genannten Gleichgewicht. In diesem Zustand haben Systemparameter wie Masse, Energie und Form aufgehört, sich zu ändern. Werden zwei Objekte mit unterschiedlicher Temperatur zusammengefügt, so fließt Wärme vom heißeren zum kälteren. Dieser Vorgang hört auf, sobald beide dieselbe Temperatur erreichen – das heißt, sobald beide Objekte im thermischen Gleichgewicht sind. Von diesem Punkt an ändert sich nichts mehr.

Ein gängiges Beispiel ist Eis in einem Glas Wasser. Das Eis schmilzt, und das Wasser im Glas erreicht eine gleichmäßig tiefere Tempe-

In Kürze

► Verlust ist unvermeidlich – diese traurige Tatsache drückt der berühmte **zweite Hauptsatz der Thermodynamik** quantitativ aus. Doch wenn die Unordnung in der Welt fortwährend zunimmt, wie erklären wir uns dann die Selbstorganisation, die in der Natur häufig vorkommt?

► **Die klassische Thermodynamik** unterstellt, Systeme befänden sich normalerweise im Gleichgewicht. Doch derart gemütliche Bedingungen herrschen in Wirklichkeit selten.

► Ein neuer Ansatz schließt diese Lücke und zeigt, dass der zweite Hauptsatz auch fern vom Gleichgewicht gilt. **Die Entwicklung von Ordnung zu Unordnung** kann ungleichmäßig ablaufen und lässt Inseln der Selbstorganisation zu.

MICHAEL MORGENSTERN



DER ZWEITE HAUPTSATZ

Die Thermodynamik untersucht Vorgänge, bei denen Energie und Wärme ausgetauscht werden. Während der erste Hauptsatz die prinzipielle Erhaltung der Energie ausdrückt, besagt der zweite Hauptsatz: **Bei fast allen Prozessen entweicht Energie als Wärme in die Umgebung.** Solche Prozesse sind irreversibel; um sie umzukehren, muss man zusätzlich Energie aufwenden. Daraus folgt:

- ▶ Der Wirkungsgrad von Maschinen ist grundsätzlich begrenzt.
- ▶ Wärmepumpen sind effizienter als Öfen, weil sie Wärme bewegen, statt sie zu erzeugen.
- ▶ Das Löschen eines Computerspeichers ist ein irreversibler Vorgang und erzeugt deshalb Wärme.

ANWENDUNGEN I

Viele wichtige physikalische und biochemische Prozesse laufen so fern von einem Gleichgewicht ab, dass die übliche Thermodynamik sie nicht erfasst. Der Autor und seine Kollegen haben diese Beschränkung überwunden.

Mikrofluide

Durch mikroskopische Kanäle strömende Flüssigkeiten neigen zu Effekten, die bei größeren Kanälen vernachlässigbar sind, etwa zur Moleküldiffusion. Zudem sind die üblichen Strömungsgleichungen oft unlösbar. Die neue Nichtgleichgewichtstheorie der Thermodynamik umgeht diese Schwierigkeiten und vermag die grundlegenden Strömungseigenschaften einfach zu berechnen.

ratur. Unter einem Mikroskop mit molekularer Auflösung würde man jedoch lebhaftere Aktivität beobachten: Moleküle, die hektisch umherschwirren und unablässig zusammenstoßen. Doch im Gleichgewicht organisiert sich das molekulare Hin und Her so, dass das System statistisch betrachtet ruht; wenn einige Moleküle sich beschleunigen, werden andere langsamer, und die Geschwindigkeitsverteilung bleibt insgesamt gleich. Die Temperatur beschreibt diese Verteilung; tatsächlich hat der Temperaturbegriff nur Sinn, wenn das System mehr oder weniger im Gleichgewicht ist.

Daher befasst sich die Thermodynamik zunächst nur mit Situationen der Ruhe. Die Zeit spielt darin keine Rolle. Selbstverständlich steht die Natur niemals still, und Zeit ist wichtig. Alles bleibt fortwährend im Fluss. Die Tatsache, dass die klassische Thermodynamik nur für Gleichgewichtssituationen gilt, mag überraschend anmuten. In Einführungskursen wenden Physikstudenten die Theorie auf dynamische Systeme wie Automotoren an, um Größen wie den Wirkungsgrad zu berechnen. Doch bei diesen Anwendungen wird stillschweigend angenommen, dass ein dynamischer Prozess angenähert als idealisierte Abfolge von Gleichgewichtszuständen beschrieben werden kann. Das heißt, wir stellen uns vor, das System sei immer im Gleichgewicht, selbst wenn es sich von einem Augenblick zum anderen verschiebt. Infolgedessen ist der so berechnete Wirkungsgrad nur eine obere Grenze. In der Praxis erreichen Maschinen einen etwas niedrigeren Wert, weil sie unter Nichtgleichgewichtsbedingungen operieren.

Der zweite Hauptsatz drückt aus, dass eine Abfolge von Gleichgewichtszuständen in der Regel irreversibel ist; das System vermag meist nicht in seinen Ausgangszustand zurückzukehren, ohne seiner Umgebung dafür einen Preis abzuverlangen. Ein geschmolzener Eiswürfel bildet sich nicht spontan zurück; man muss ihn in den Gefrierschrank sperren und Energie aufwenden. Um diese Irreversibilität zu quantifizieren, führt der zweite Hauptsatz als Grundgröße die Entropie ein. Diese Größe wird anschaulich gern als das Maß der Unordnung im System beschrieben, aber das kann, wie ich gleich ausführen werde, leicht missverstanden werden. Zahlenmäßig ist die Entropie die ausgetauschte Wärmemenge geteilt durch die Temperatur. In einem abgeschlossenen System bleibt die Entropie entweder immer gleich oder nimmt zu.

Zum Beispiel leistet eine typische Maschine Arbeit, indem sie den Wärmefluss von einem heißen zu einem kalten Reservoir ausnutzt; das sind zwei große Massen außerhalb der eigentlichen Mechanik. Nur wenn die Reservoirs

eine konstante Temperatur beibehalten und wenn die Geräteteile keinerlei Reibung aufweisen, durchläuft die Maschine ihren Zyklus in völlig reversibler Weise, und die Gesamtentropie bleibt konstant. Da derart ideale Bedingungen in Wirklichkeit nie gelten, ist der Zyklus stets irreversibel, und die Entropie wächst. Irgendwann hat die Maschine die nutzbare Energie verbraucht, der Wärmefluss erlahmt, und die Entropie erreicht einen Maximalwert. Erst an diesem Punkt sind Reservoirs und Maschine miteinander im Gleichgewicht – und dabei bleibt es von nun an.

Die Tatsache, dass die klassische Thermodynamik Gleichgewichtssituationen voraussetzt, schränkt die Anwendbarkeit des zweiten Hauptsatzes ein. Begriffe wie Entropie und Temperatur lassen sich nicht einmal definieren, wenn das System aus dem Gleichgewicht ist. Außerdem können viele Systeme nicht wie eine Wärmekraftmaschine behandelt werden. Ein Beispiel ist der Kosmos: Wenn der Raum expandiert, kann die Entropie unbegrenzt wachsen, so dass das Universum sich zwar dem Gleichgewicht nähert, es aber niemals erreicht (siehe »Der kosmische Ursprung des Zeitpfeils« von Sean M. Carroll, Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 26). All diese Systeme haben gemeinsam, dass sie nicht einmal annähernd im Gleichgewicht sind.

Spiegelbildliche Prozesse

Nichtgleichgewichtssysteme zeigen manchmal faszinierende Verhaltensweisen, die von der klassischen Theorie nicht erfasst werden und die der Vorstellung, die Natur werde von selbst immer unordentlicher, glatt widersprechen. Betrachten wir ein alltägliches Gerät, den elektrischen Toaster. Der Draht in seinem Innern erhitzt sich, weil das Drahtmaterial dem Stromfluss elektrischen Widerstand entgegensetzt. Dem zweiten Hauptsatz zufolge ist dieser Vorgang irreversibel: Ein Toaster lässt sich nicht verwenden, um ein Stück Brot zu »enttoasten« und auf diese Weise Strom zu produzieren.

Man kann allerdings etwas Ähnliches erreichen. Indem man zwischen den Enden des Toasterdrahts eine Temperaturdifferenz erzeugt, sorgt man dafür, dass das System dauerhaft aus dem Gleichgewicht ist. Dann wird es in der Tat Strom erzeugen. Diese Umkehrung ist die Grundlage des Thermoelements, eines Geräts, das zur Temperaturmessung oder als Energiequelle verwendet wird.

Ein verwandtes Phänomen ist die Umkehr-osmose zur Meerwasserentsalzung. Bei der gewöhnlichen Osmose erzeugt unterschiedliche Salzkonzentration zu beiden Seiten einer Membran einen Druckunterschied, wodurch Wasser zur salzigeren Seite strömt und sie verdünnt.

Dadurch nähert sich das System dem Gleichgewicht. Bei der Umkehrosiose hält ein äußerer Druck das System vom Gleichgewicht fern und zwingt Wasser, zur weniger salzigen Seite zu strömen und trinkbar zu werden.

Toaster und Thermoelement sowie normale und Umkehrosiose liefern Beispiele für spiegelbildliche Prozesse. Sie sind durch die so genannte Reziprozitätsrelation verbunden, für deren Formulierung der norwegische Physiker Lars Onsager 1986 den Chemie-Nobelpreis erhielt. Diese Symmetrie folgt aus der Reversibilität der Gesetze, denen die Bewegung der einzelnen Teilchen im System gehorcht. Diese Gesetze bleiben unverändert, wenn man die Zeitrichtung umkehrt. Die Irreversibilität, die wir auf makroskopischem Niveau beobachten, entsteht erst, wenn wir große Teilchenmengen statistisch betrachten.

Die Entdeckung der Reziprozitätsrelation veränderte die Vorstellung der Physiker vom Gleichgewicht. Sie waren gewohnt, darin den am höchsten geordneten Zustand zu sehen: Zwar mögen die Moleküle maximal ungeordnet umherjagen, aber das gesamte System verhält sich ruhig, symmetrisch und geordnet. Doch wie die Reziprozitätsrelation beispielhaft zeigt, kann auch ein Nichtgleichgewichtssystem hochgradig geordnet sein. Fern vom

Gleichgewicht können spontan Gleichmaß, Symmetrie oder Inseln der Ruhe entstehen.

Ein weiteres klassisches Beispiel ist eine dünne Flüssigkeitsschicht, die von unten erhitzt wird. Wärme fließt von unten nach oben, und in der Schicht bildet sich ein vertikaler Temperaturgradient. Durch Verstärken des Gradienten lässt sich die Abweichung vom Gleichgewicht erhöhen. Bei sehr kleinen Gradienten bleibt die Flüssigkeit insgesamt in Ruhe. Doch bei genügend großem Temperaturgefälle beginnt sie sich zu bewegen. Diese Konvektion ist keineswegs chaotisch, sondern erstaunlich regelmäßig strukturiert. Kleine sechseckige Zellen bilden sich, als wäre die Flüssigkeit ein Kristall. Erst bei noch größeren Gradienten wird die Bewegung turbulent. Dieses so genannte Bénard-Phänomen demonstriert, dass ein System, während es sich vom Gleichgewicht entfernt, zwischen Ordnung und Chaos oszillieren kann.

Ein anderes Experiment beginnt mit einer ruhenden Flüssigkeit. Sie ist isotrop, das heißt, sie sieht in jeder Richtung gleich aus. Dann wird die Flüssigkeit gezwungen, ein Metallgitter mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu passieren. Obgleich hinter dem Gitter Turbulenz entsteht, strömt die Flüssigkeit immer noch in einer Richtung. Somit ist

ANWENDUNGEN II

Chemische Reaktionen und andere Prozesse wie die Kristallisation sind prinzipiell nichtlinear: Sie treten nur auf, wenn die Energie eine bestimmte Schwelle überschreitet. Noch komplexer werden sie in einem Medium, bei dem Dichte und andere Eigenschaften variieren. Die Nichtgleichgewichtstheorie vermag dennoch die Reaktionsraten vorherzusagen.

Molekülfaltung

Fäden von Aminosäuren lagern sich zu dreidimensionalen Proteinen zusammen, deren Form über ihre biologische Funktion Aufschluss gibt. Der Vorgang ist ungeheuer schwer zu erklären. Die Nichtgleichgewichtstheorie erzielte kürzlich gewisse Erfolge bei dem umgekehrten Problem, wie RNA-Moleküle sich auffalten.

HEISS ODER KALT: DIE TÜCKEN DES TEMPERATURBEGRIFFS

Auf den ersten Blick erscheint die Temperatur als einfacher, universeller Begriff. Dinge können heiß oder kalt sein, aber haben sie nicht immer eine bestimmte Temperatur? Nicht ganz. Eine Temperatur lässt sich nur Systemen zuweisen – etwa den unzähligen Molekülen in einem Glas Wasser –, die einen mehr oder weniger stabilen Gleichgewichtszustand erreicht haben. Je weiter ein System sich vom Gleichgewicht entfernt, desto verschwommener wird der Temperaturbegriff.

GLEICHGEWICHT

Ein Glas Wasser nimmt die Umgebungstemperatur an. Die Wassermoleküle kollidieren und verteilen ihre Energie so um, dass ein stabiles Geschwindigkeitsmuster entsteht. Eine einzige Zahl – die Temperatur – genügt, um dieses Muster zu beschreiben. Hier gilt die klassische Thermodynamik.

LEICHTES UNGLEICHGEWICHT

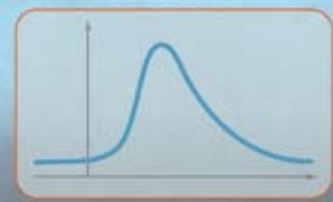
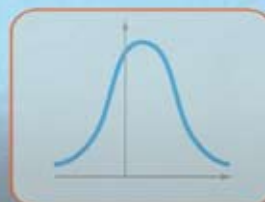
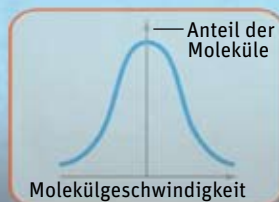
Erwärmen stört das Gleichgewicht. Doch bei mäßiger Wärmezufuhr bleiben einzelne Schichten im lokalen Gleichgewicht, und das Wasser lässt sich durch einen nach unten zunehmenden Temperaturwert beschreiben. Hier gilt die im 20. Jahrhundert entwickelte Nichtgleichgewichtsthermodynamik.

STARKES UNGLEICHGEWICHT

Bei kräftigem Erhitzen geraten die Moleküle völlig durcheinander; der Temperaturbegriff versagt. Um das System zu beschreiben, müsste man viele neue Variablen einführen und im Extremfall sogar die Molekülgeschwindigkeiten einzeln spezifizieren. Diese Situation verlangt nach einer neuen Theorie.



MOLEKÜLGESCHWINDIGKEITEN
Temperatur ist eigentlich das Maß einer ganzen Geschwindigkeitsverteilung. Bei leichter Abweichung vom Gleichgewicht ist diese Verteilung nur verschoben, doch bei starker Abweichung wird sie verzerrt und macht den Temperaturbegriff bedeutungslos.



ANWENDUNGEN III**Zellmembranen**

Um durch Zellmembranen zu schlüpfen, nutzen Moleküle verschiedene biochemische Hilfsmittel wie Ionenkanäle und Proteine, die wie eine Ratsche eine Bewegungsrichtung auszeichnen. Das Tempo dieses Vorgangs hat die Theoretiker lange verblüfft. Wie die neue Theorie zeigt, fördern gerade vermeintliche Komplikationen – große und anhaltende Abweichung vom Gleichgewicht sowie Nichtlinearitäten und Dichtefluktuationen – den Molekültransport.



Normalerweise dominiert der Trend zur Unordnung: Verschüttetes Wasser sammelt sich nicht spontan wieder im Glas.

die Flüssigkeit nicht mehr isotrop. Wenn man die Geschwindigkeit erhöht, wird die Turbulenz schließlich so groß, dass die Flüssigkeit nicht mehr in eine Richtung strömt. Jetzt ist sie wiederum isotrop. Das System ist von isotrop zu anisotrop und wieder zurück zu isotrop übergegangen – ein Wechsel von Ordnung zu Unordnung zu Ordnung.

Dass die übliche Theorie solche Phänomene nicht zu erfassen vermag, hat sich in den letzten Jahren als immer größeres Hemmnis erwiesen. Molekularbiologen und Forscher auf dem neuen Gebiet der Nanotechnik haben in physikalischen, chemischen und biologischen Systemen eine große Vielfalt von organisierten, aber immerfort wandelbaren Strukturen entdeckt. Deren Erklärung erfordert eine Theorie der Nichtgleichgewichtsthermodynamik.

Lokale Gleichgewichtszustände

Frühere Versuche, eine solche Theorie zu entwickeln, gingen vom Begriff des lokalen Gleichgewichts aus. In einem insgesamt nicht ausbalancierten System können einzelne Teile durchaus im Gleichgewicht sein. Angenommen, wir rühren einen Cocktail mit einem Stäbchen um. Durch die Bewegung des Quirls wird das Gleichgewicht gestört, kann aber in kleinen Nischen, die ihren inneren Zusammenhalt nicht verlieren, dennoch weiter herrschen. Diese kleinen Gebiete können im Gleichgewicht bleiben, wenn die auf das System wirkenden Kräfte nicht allzu groß werden und wenn seine Eigenschaften sich über kleine Distanzen nicht allzu sehr ändern. Für solche Inseln der Ruhe gelten Begriffe wie Temperatur und Entropie, obwohl deren Zahlenwerte von einer Insel zur anderen durchaus variieren können.

Wenn man beispielsweise einen Metallstab an einem Ende erhitzt, fließt Wärme durch das Metall zum anderen Ende. Der Temperaturunterschied zwischen den Enden wirkt als treibende Kraft für den Wärmefluss durch den Stab. Das gleiche Phänomen tritt bei einem Tintentropfen in Wasser auf. Hier ist der Unterschied der Tintenkonzentration die treibende Kraft, die dafür sorgt, dass die Tinte in die umgebende Flüssigkeit eindringt, bis eine gleichmäßige Färbung entsteht. Diese Kräfte sind linear: Der Wärmefluss ist proportional zur Temperaturdifferenz und der Teilchenfluss proportional zum Konzentrationsunterschied. Dies gilt sogar dann, wenn die auf das System einwirkenden Kräfte stark sind. Selbst in vielen turbulenten Strömungen sind die internen Drücke und Spannungen proportional zu den Geschwindigkeitsgradienten. Für solche Fälle formulierten Onsager und andere eine Nichtgleichgewichtstheorie und zeigten, dass der zweite Hauptsatz weiterhin gilt.

Doch wenn diese Bedingungen nicht erfüllt sind, bricht die Theorie zusammen. Bei einer chemischen Reaktion verwandelt sich eine Substanz plötzlich in eine andere – ein abrupter Wechsel, den eine nichtlineare Gleichung beschreibt. Die Theorie versagt auch, wenn das System so klein ist, dass chaotische Molekülbewegungen sein Verhalten prägen, wodurch die Systemeigenschaften über kurze Distanzen extrem variieren. Solche Fluktuationen dominieren, sobald Prozesse in mikroskopischen Systemen stattfinden, etwa beim Kondensieren von Wasserdampf und dem Transport von Ionen durch einen Proteinkanal in einer Zellmembran. In solchen Fällen sind Temperatur und Entropie keine wohl definierten Größen mehr. Was wird dann aus dem zweiten Hauptsatz?

In den letzten Jahren haben David Reguera von der Universidad de Barcelona, José M. G. Vilar vom Sloan-Kettering Institute in New York und ich die Thermodynamik für diese Bereiche erweitert. Wie wir zeigten, lösen sich viele Probleme durch einen Wechsel der Perspektive von selbst. Was wir als abrupt wahrnehmen, hängt vom Zeitmaßstab ab. Könnten wir einen der scheinbar augenblicklichen Prozesse in Zeitlupe beobachten, nähmen wir eine allmähliche Umwandlung wahr, als sähen wir einem Stück Butter zu, wie es in der Sonne schmilzt.

Der Trick besteht darin, die Zwischenstufen der Reaktion mit Hilfe neuer Variablen zu verfolgen. Ohne diesen erweiterten Rahmen bleibt das System während des gesamten Vorgangs im lokalen thermodynamischen Gleichgewicht. Die zusätzlichen Variablen bereichern das Systemverhalten. Sie definieren eine Energielandschaft, durch die sich das System bewegt wie ein Bergsteiger im Gebirge. Täler entsprechen einem Bereich niedriger Energie, in dem einmal molekulares Chaos herrscht, ein andermal Ordnung. Das System kann sich in einem Tal niederlassen und dann durch äußere Kräfte in ein anderes geschubst werden. Wenn es von Chaos beherrscht wird, kann es aus der Unordnung ausbrechen und Ordnung finden, oder umgekehrt.

Betrachten wir als Nächstes das Problem der Fluktuationen. Versagt die Thermodynamik, wenn Systeme extrem klein sind? Ein einfaches Beispiel zeigt, dass die Antwort Nein lautet. Wenn wir eine Münze nur wenige Male werfen, könnten wir zufällig einmal eine Serie von Kopf statt Zahl bekommen. Doch je öfter wir den Münzwurf wiederholen, desto zuverlässiger nähert sich das Resultat dem statistischen Erwartungswert an. Die Natur ist ein unermüdlicher Münzwerfer. Wenige Partikel, die sich in einem Behälter umherbewegen, kollidieren nur gelegentlich und können höchst un-

ORDNUNG UND UNORDNUNG FERN VOM GLEICHGEWICHT

Obwohl die Moleküle in einem System, das aus dem Gleichgewicht gerät, ein Bild hoffnungslosen Durcheinanders bieten, vermag das System gewisse Ordnungszustände zu bilden. In der klassischen Thermodynamik sind solche Übergänge nicht vorgesehen, doch die neue Nichtgleichgewichtstheorie erklärt, wie sie zu Stande kommen.

GLEICHGEWICHT

Ein Wasservolumen bei Zimmertemperatur sieht in jeder Richtung gleich aus; diese Symmetrie heißt Isotropie.

LEICHTE ABWEICHUNG

Bei Erwärmung von unten entwickelt sich im Wasser ein Temperaturgradient, doch solange der Gradient so schwach ist, den viskosen Bewegungswiderstand zu überwinden, bleibt die Flüssigkeit in Ruhe.

STÄRKERE ABWEICHUNG

Bei größerem Temperaturgefälle beginnt das Wasser sich umzuwälzen und ein geordnetes Muster von Konvektionszellen zu bilden.

STARKE ABWEICHUNG

Bei zunehmender Erhitzung bricht das regelmäßige Konvektionsmuster schließlich zusammen. Turbulentes Chaos entsteht.

EXTREME ABWEICHUNG

Bei noch stärkerer Wärmezufuhr beginnt sich das Chaos gleichmäßig zu verteilen, und die Flüssigkeit gewinnt die verlorene Isotropie zurück.



DANIELA MADRI MOLINAR

terschiedliche Geschwindigkeiten lange beibehalten. Doch selbst in einem scheinbar »kleinen« System ist die Anzahl der Teilchen viel größer, Kollisionen sind viel häufiger, und das Tempo der Teilchen wird zu einem gemeinsamen Wert ausgeglichen, der höchstens ein wenig fluktuiert. Zwar können ein paar isolierte Ereignisse völlig unvorhersehbar verlaufen, aber die allermeisten Vorgänge lassen eine gewisse Regelmäßigkeit erkennen. Darum können Größen wie der Druck fluktuieren und dennoch vorhersagbar bleiben. Aus diesem Grund herrscht der zweite Hauptsatz auch über die Welt des mikroskopisch Kleinen.

Von der Dampfmaschine zum Molekülmotor

Ursprünglich wurde die Entwicklung der Thermodynamik durch die Dampfmaschine ange-regt, doch heutzutage entwickelt sich das Gebiet angesichts der winzigen molekularen Maschinen in der lebenden Zelle weiter. So extrem unterschiedlich groß diese Maschinen sind, haben sie doch eine Funktion gemeinsam: Sie wandeln Energie in Bewegung um. Zum Beispiel liefern ATP-Moleküle den Treibstoff für die Myosinmoleküle im Muskelgewebe, die sich an Aktinfilamenten entlanghangeln und die Muskelfasern, an denen sie befestigt sind, mitziehen. Andere Motoren werden von Licht angetrieben, von Unterschieden der Protonenkonzentration oder von Temperaturdifferenzen (siehe »Molekulare Motoren« von R. Dean Astumian, Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 36). Chemische Energie vermag Ionen durch Kanäle in einer Zellmembran von einer Region niedriger Konzentration in ein Gebiet hoher Konzentration zu befördern – genau entgegen der Richtung, die sie ohne einen aktiven Transportmechanismus einschlagen würden.

Die Ähnlichkeit zwischen großen und kleinen Maschinen geht sehr weit. Fluktuationen der chemischen Energie beeinflussen einen molekularen Motor genau so, wie eine zufällig variierende Treibstoffmenge den Kolben eines Automotors beeinflusst. Darum lässt sich der lange geübte Brauch, die Thermodynamik auf große Motoren anzuwenden, auf winzig kleine Geräte ausdehnen. Zwar verfügen Physiker auch über andere mathematische Werkzeuge für die Analyse solcher Systeme, aber diese Methoden machen in der Praxis oft enorme Schwierigkeiten. Beispielsweise erfordern die Strömungsgleichungen exakte Angaben für die Randbedingungen eines Systems – bei extrem unregelmäßigem Rand eine fast unlösbare Aufgabe. Die Thermodynamik bietet eine rechnerische Abkürzung, und sie hat bereits überraschende Erkenntnisse geliefert. So haben Signe Kjelstrup und Dick Bedeaux von der Norwegischen Universität für Naturwissenschaft und Technik in Trondheim zusammen mit mir herausgefunden, dass die Wärme eine wichtige, bislang unterschätzte Rolle für die Funktion von Ionenkanälen spielt.

Alles in allem ergeben unsere Forschungen, dass die Entwicklung von Ordnung aus Chaos dem zweiten Hauptsatz nicht nur nicht zuwiderläuft, sondern in einen erweiterten thermodynamischen Rahmen bestens hineinpasst. Wir sind kurz davor, diese neue Einsicht für praktische Anwendungen zu nutzen. Das Perpetuum mobile bleibt ein Ding der Unmöglichkeit, und weiterhin gilt, dass wir im Kampf gegen Abnutzung und Verfall letztlich unterliegen müssen. Aber der zweite Hauptsatz verlangt keinen gleichförmigen Niedergang. Er lässt sich ohne Weiteres mit der spontanen Entwicklung von Ordnung und Komplexität vereinbaren. ◀



J. Miguel Rubí ist Physikprofessor an der Universidad de Barcelona (Spanien). Im Jahr 2003 erhielt er die Onsager-Medaille der Norwegischen Universität für Naturwissenschaft und Technik in Trondheim sowie den Alexander-von-Humboldt-Preis der gleichnamigen Stiftung für seine Beiträge zur Nichtgleichgewichtsthermodynamik und zur Theorie stochastischer Prozesse.

Kjelstrup, S. et al.: Active Transport: A Kinetic Description Based on Thermodynamic Grounds. In: Journal of Theoretical Biology 234(1), S. 7–12, 2005.

Reguera, D. et al.: The Mesoscopic Dynamics of Thermodynamical Systems. In: Journal of Physical Chemistry B 109(46), S. 21502–21515, 2005.

Röpke, G.: Statistische Mechanik für das Nichtgleichgewicht. Wiley-VCH, Weinheim 1987.

Vilar, José M. G., Rubí, J. M.: Thermodynamics »Beyond« Local Equilibrium. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 98(20), S. 11081–11084, 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983266.

Keine Sonnenuhr für Merkur

Am Sonnenstand die Zeit abzulesen wird mühsam bis unmöglich auf einem Planeten, dessen Bahn deutlich von der Kreisform abweicht und der sich nicht viel schneller dreht, als er umläuft.

Von Norbert Treitz

Merkur ist der innerste und kleinste Planet der Sonne. Wegen seiner großen Sonnennähe ist er nur um den Zeitpunkt seiner größten Elongation mit bloßem Auge sichtbar. Das ist zum Beispiel gegen Ende dieses Monats (April 2009) abends der Fall.

Unser schnellster Planet ist etwas kleiner – allerdings nicht leichter – als die größten Satelliten im Sonnensystem, Ganymed (von Jupiter) und Titan (von Saturn). Und seine Bahn hat bei Weitem die größte Abweichung von der Kreisform.

Das ist der Form der Bahnellipse selbst kaum anzusehen; immerhin ist sie in der einen Richtung nur 2 Prozent dünner als in der dazu rechtwinkligen (Kasten unten). Aber die Sonne sitzt nicht im Mittelpunkt dieser Ellipse, sondern in einem ihrer Brennpunkte, und der ist immerhin um ein Fünftel der großen Halbachse vom Mittelpunkt entfernt. Daher ist Merkur im Aphel (dem sonnenfernsten Punkt) anderthalbmal so weit von der Sonne entfernt wie im Perihel (dem sonnennächsten Punkt).

In Bezug auf seine Winkelgeschwindigkeit ist der Unterschied sogar noch krasser: Im Perihel hat Merkur nicht nur die maximale Bahngeschwindigkeit, sondern überstreicht, von der Sonne aus gesehen, wegen seiner großen Sonnennähe pro Zeiteinheit auch noch einen größeren Winkel am Himmel. Deshalb durchläuft er sein Perihel mit dem 1,53-Fachen seiner mittleren Winkelgeschwindigkeit um die Sonne und sein Aphel mit dem 0,68-Fachen (Kasten rechts oben).

Dagegen rotiert Merkur um sich selbst mit der üblichen Gleichmäßigkeit, und zwar rechtläufig. Wie im Fall der Venus (siehe die letzte Folge dieser Rubrik im Märzheft) stehen Rotation und Umlauf in einer Resonanz zueinander. Nach sehr genau $2/3$ eines siderischen Merkurjahrs von 88 (Erd-)Tagen, das sind also ungefähr 58 Tage, hat er eine

Umdrehung vollendet. Die Differenz der mittleren Winkelgeschwindigkeiten (in Vollwinkeln pro Merkurumlauf) beträgt $3/2 - 1 = 1/2$. Daher dauert der mittlere Sonnentag des Merkur doppelt so lang wie sein siderisches Jahr.

High Noon

Auch auf der Erde macht die Umlaufbewegung den Sonnentag länger, als er durch die Rotation allein wäre. Schon nach 23 Stunden, 56 Minuten und 4 Sekunden stehen die Sterne für einen auf der Erde ruhenden Beobachter wieder an derselben Stelle wie gestern, während die Sonne erst – im Mittel – 236 Sekunden später ihre gestrige Position einnimmt. Auf dem Merkur ist der Effekt wegen der viel langsameren Drehung viel ausgeprägter. Von einem Sonnenaufgang bis zum nächsten vergehen zwei Merkurjahre, das sind 176 Tage oder ungefähr ein halbes (Erd-)Jahr.

Im Perihel ist die Umlaufbewegung sogar so schnell, dass sie den Effekt der Rotation nicht nur abschwächt, sondern

zum Stillstand der Sonne am Merkurhimmel führt: dann nämlich, wenn seine Winkelgeschwindigkeit das Anderthalbfache der mittleren Winkelgeschwindigkeit beträgt. Da 1,53 etwas größer als 1,5 ist, bleibt die Sonne nicht nur stehen, sondern läuft sogar zeitweise rückwärts am Himmel. Das geschieht einmal pro Umlauf und damit zweimal pro Merkursonnentag, und zwar abwechselnd über zwei (zueinander antipodischen) Meridianen. Die Sonne steht dort hoch am Himmel, aber über dem Kopf des Merkurbewohners so niedrig wie möglich. Drittens läuft sie so langsam am Himmel wie sonst nie: mit Stillstand und zwi-schendrinn mit leichter Rückläufigkeit (Kasten unten). Es ist daher kein Wunder, dass es dort besonders heiß ist und dass auf einem der beiden die mit Recht so genannte Caloris Planitia (»Ebene der Hitze«) liegt.

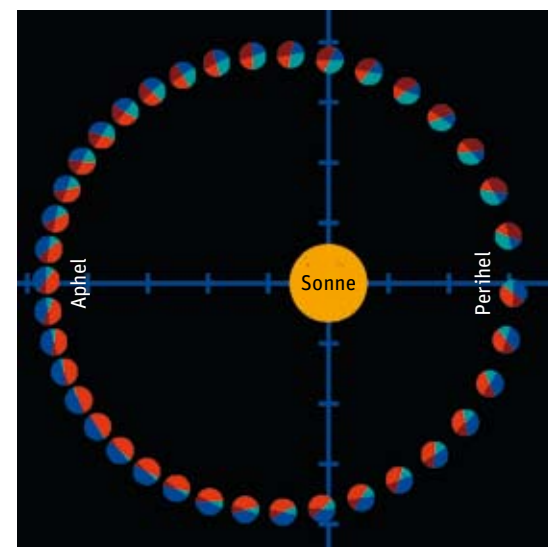
Für zwei bestimmte Meridiane auf Merkur, nämlich 90 Grad vor und hinter der Caloris Planitia, findet der Stillstand und zeitweilige Rücklauf der Son-

DIE WILDE BAHN DES MERKURS

Von zwei siderischen Umläufen des Merkurs zeigt das linke Bild nur einen, und zwar im kopernikanischen Inertialsystem. Um die Rotation des Planeten zu verdeutlichen, tun wir so, als bestünde er aus einer roten und einer blauen Hälfte. Die Tagseite ist heller dargestellt als die Nachtseite. Nach einem vollen Umlauf hat sich der Planet $+3/2$ -mal gedreht; also haben die beiden Hälften ihre Plätze vertauscht (rechts im linken Bild).

Im Horizontsystem für einen willkürlich gewählten Punkt auf dem Äquator (Bild rechts) ist der Lauf der Sonne mit-samt ihrer Entfernung zu sehen.

Für $e/a = 0,2$ ähnelt der Sonnenlauf in diesem System einer Nephroide mit Spitzen nach innen bei den Stillständen



WIE SCHNELL SIEHT DIE SONNE EINEN PLANETEN WANDERN?

Wie Johannes Kepler 1609 in seiner »Astronomia Nova« mehr versteckt als veröffentlicht hat, läuft ein Planet – wenn ihn sonst niemand stört – in einem Bezugssystem, in dem der Schwerpunkt des Sonnensystems ruht, auf einer Ellipse, in deren einem Brennpunkt dieser Schwerpunkt sitzt. Im Zeitmittel (wegen des Einflusses der größeren Planeten nicht exakt) sitzt dort auch die Mitte der Sonne.

Nennt man wie üblich die längste und die kürzeste Symmetrieachse der Kepler-Ellipse $2a$ und $2b$, so sind die Brennpunkte um die »Exzentrizität« $e = \sqrt{a^2 - b^2}$ von der Mitte entfernt.

Wir benötigen die auf die Sonne bezogene Winkelgeschwindigkeit, aber eigentlich nur für die beiden Hauptscheitel der Ellipse, die Apsiden, und im Verhältnis zu der über den ganzen Umlauf gemittelten Winkelgeschwindigkeit. Nennen wir Letztere $\omega_m = 2\pi/T$ bei der Umlaufzeit T , so ist die Winkelgeschwindigkeit im Perihel ($a - e$ von der Sonne entfernt) $\omega_p = \omega_m \sqrt{a^2(a+e)/(a-e)^3}$ und im Aphel ($a + e$ von der Sonne entfernt) $\omega_a = \omega_m \sqrt{a^2(a-e)/(a+e)^3}$. Wenn e klein gegen a ist, gelten die Näherungen $\omega_p = \omega_m (1 + 2e/a)$ und $\omega_a = \omega_m (1 - 2e/a)$.

Wie findet man diese Formeln? Nach Keplers drittem Gesetz hängt die Umlaufzeit eines Planeten im Sonnensystem nur von der großen Halbachse a seiner Ellipse ab. Daraus folgt, dass auch seine Gesamtenergie (kinetische plus potenzielle im Schwerefeld) nur von a abhängt. Ist die Ellipse ein Kreis, so ist die Winkelgeschwindigkeit ω_m konstant und die kinetische Energie gleich $m(\omega_m a)^2/2$; dabei ist m die Masse des Planeten. Seine potenzielle Energie $-mMG/a$ (M Masse des Gesamtsystems aus Sonne und Planet, G allgemeine Gravitationskonstante) ist betragsmäßig genau doppelt so groß. (Da man bequemlichkeitshalber den Nullpunkt der potenziellen Energie in die Anordnung mit einem unendlich fernen Planeten legt, erscheinen alle potenziellen Energien negativ.) Daraus ergibt sich $\omega_m^2 = MG/a^3$. Das gilt auch für nicht kreisförmige Bahnen mit großer Halbachse a .

Im Perihel ist die Gesamtenergie des Planeten gleich $m(\omega_p(a-e))^2/2 - mMG/(a-e)$; das muss gleich der Gesamtenergie $-mMG/(2a)$ sein. Aus dieser Bedingung gewinnt man die obige Formel für ω_p . Die Gleichung für das Aphel erhält man, indem man e durch $-e$ ersetzt.

ne sowohl bei ihrem Auf- als auch bei ihrem Untergang statt. Sie geht zweimal kurz nacheinander auf und zwischen durch zurück, entsprechend auch beim Untergang – ein unentschlossenes Verhalten des Sonnengottes gegenüber dem Planeten des Götterboten und dessen eventuellen Bewohnern!

Etwas genauer dauert der Merkur-Umlauf nicht $1/4$, sondern $0,24$ Erdjahre. Zwischen Venus und Merkur besteht recht genau eine $5:2$ -Resonanz.

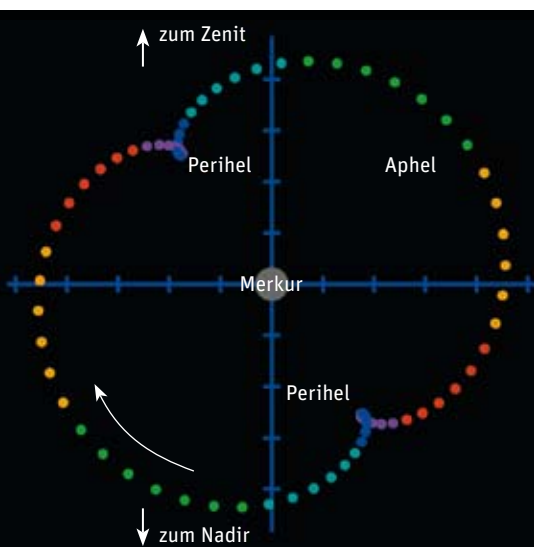
Zusammen mit der siderischen Umlaufzeit der Venus von $8/13$ Jahren käme die Merkurumlaufzeit auf $16/65$ Jahre = $0,246$ Jahre – wenn die Resonanz wirklich exakt wäre. Unsere drei innersten Planeten resonieren schon ganz schön miteinander! Schade, dass die Pythagoräer noch nicht die Rotationen der Planeten messen konnten. Sie hätten an den dabei vielfach auftretenden Verhältnissen kleiner ganzen Zahlen ihre helle Freude gehabt.

Wegen der unentschlossenen Gangart der Sonne würde der Zeiger einer Sonnenuhr auf Merkur zweimal am Tag stehen bleiben und sogar ein Stückchen rückwärtslaufen – nicht ganz das, was man von einem Zeitanzeiger erwartet. Es gibt also mindestens zwei Gründe, die gegen die Existenz von Sonnenuhren auf Merkur sprechen; nur einer davon ist das Fehlen von Bewohnern.

Wie ist es aber auf der Erde? Traditionell unterscheidet man zwischen der rohen Anzeige einer Sonnenuhr, die seltsamerweise als »wahre Ortszeit« bezeichnet wird, und der korrigierten »mittleren Ortszeit«. Was im Flugverkehr als *local time* bezeichnet wird, sind die an den Flughäfen gültigen Zonenzeiten. Im Uhrmacherhandwerk verwendet man die Begriffe Stand- und Gangabweichung. Auf den Uhrzeiger angewendet, sind das die Fehler des Winkels und der Winkelgeschwindigkeit.

Die Erde dreht sich sehr genau gleichmäßig mit $366,256$ U/J (Umdrehungen pro Jahr) und läuft im Mittel mit 1 U/J um die Sonne, aber nicht ganz so gleichmäßig, denn die Erdbahn hat die Exzentrizität $e/a = 1/60$. Das bedeutet nach der Näherungsformel (Kasten oben), dass die Winkelgeschwindigkeit im Perihel etwa um $1/30$ höher und im Aphel $1/30$ niedriger als im Mittel ist.

Im Mittel dauert der Sonnentag 236 Sekunden länger als der Sterntag. In der



(genauer: kleinen Schleifen) der dann besonders nahen Sonne.

Während eines Sonnentags läuft sie einmal um den mitrotierenden Äquatorbewohner und geht für ihn am Vormittag durch den Zenit, geht dann im Westen unter und in der ersten Nachthälfte durch den Nadir.

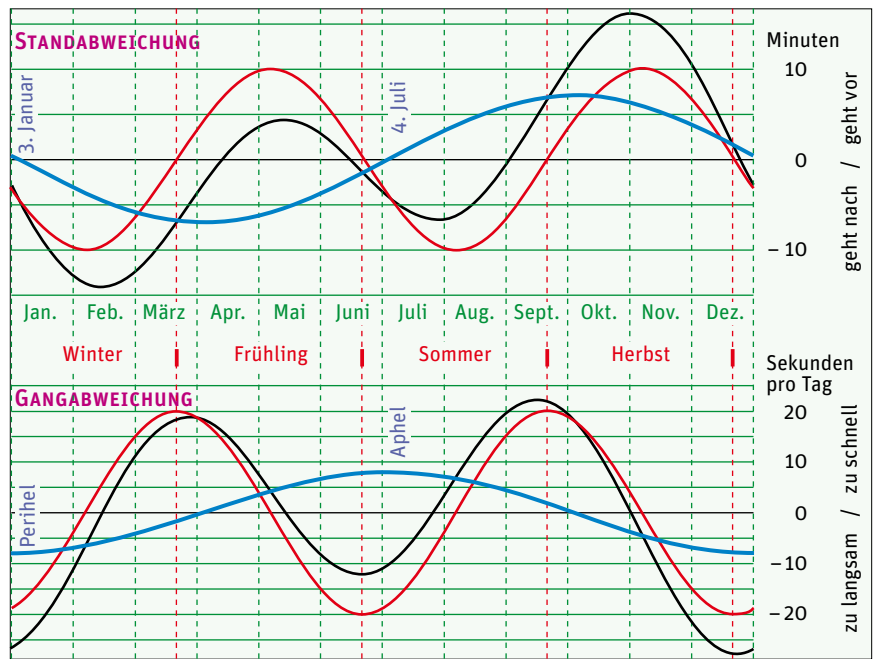
Die Bilder der Sonne (in sechs Farben pro siderischem Umlauf) haben denselben zeitlichen Abstand voneinander wie die Bilder des Merkurs im linken Bild. Für einen anderen Meridian kann das Perihel jedes zweite Mal im Zenit sein. Das ist *High Noon*: Die Sonne ist so nah wie überhaupt möglich, steht im Zenit und bleibt dort auch noch ein Weilchen, um besonders unbarmherzig zu brennen.

ALLE ABILDUNGEN DES ARTIKELS: NORBERT TREITZ

Stand- und Gangabweichung (oben und unten) einer Sonnenuhr auf der Erde. Blau die Abweichung wegen der Exzentrizität der Erdbahn, rot die wegen der Neigung der Erdachse, schwarz die Summe beider Effekte

Nähe des Perihels läuft die Sonne am Himmel um 3 Prozent schneller, daher braucht die Erddrehung 3 Prozent mehr als die 236 Sekunden zum Aufholen, dieser Sonnentag ist also um 7 Sekunden länger als 86 400 Sekunden. Dadurch bekommen wir eine Gangabweichung von 7 Sekunden pro Tag, ein halbes Jahr später dasselbe mit dem anderen Vorzeichen und zwischendurch Entsprechendes in milderer Form. Während eines Halbjahres addieren sich diese Gangabweichungen zu Standabweichungen von rund 7 Minuten mit beiderlei Vorzeichen auf, die sich im ganzen Jahr definitionsgemäß wieder aufheben.

Der Anzeigefehler der Sonnenuhr, der traditionell die merkwürdige Bezeichnung »Zeitgleichung« trägt, hat noch eine andere Komponente, die ein Halbjahr als Periode hat und von der Schrägstellung der Erdachse gegen die Erdbahnebene herrührt, der wir bekanntlich auch die Jahreszeiten verdanken. Der Fußpunkt der Sonne auf der Erde (also der Ort, für den sie jeweils gerade im Zenit steht) wandert im Jahr auf einem Großkreis, der beide Wendekreise berührt und den Äquator mit 23,5 Grad schneidet. Dort läuft er um den Faktor $\cos(23,5^\circ) = 0,917$, also um gut 8 Prozent, langsamer durch die Längendifferenzen, beim Berühren seines Wegs mit den Wendekreisen um dieselben 8 Prozent schneller. Das bringt an den Tag-



und-Nacht-Gleichen 8 Prozent von 236 Sekunden, also 20 Sekunden pro Tag Gangabweichung in der einen Richtung und an den Anfängen von Sommer und Winter die gleichen Werte in der anderen. Die daraus resultierenden Standabweichungen sind aber wegen der halb so langen Periode nicht so sehr viel größer, sondern nur 10 Minuten zu beiden Seiten. Im Extremfall zeigt eine Sonnenuhr also die Zeit um gut eine Viertelstunde falsch an (Bild oben).

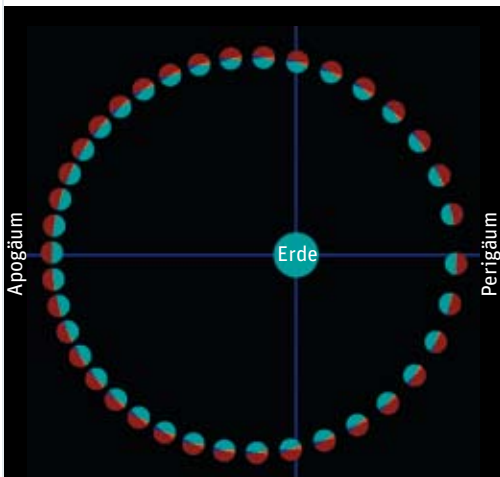
Wenn man statt eines Stabs eine Spitze als Schattengeber verwendet, kann man für die einzelnen Tage im Jahr passende versetzte Skalen für die Uhrzeit anbringen. Auf solchen kann man die mittlere Sonnenzeit (also die physikalische Zeit) ablesen, falls die Sonne nicht verdeckt wird und falls man weiß, in welchem Halbjahr man ist.

Libration des Mondes in Länge und Breite

Bekanntlich dreht sich der Mond genau einmal pro Umlauf (gebundene Rotation), und zwar als Resultat der Gezeitenreibung. Wenn seine Rotationsachse genau parallel zur Mondbahnachse wäre und seine Bahn um die Erde genau kreisförmig, dann könnten wir vom Erdmittelpunkt aus genau eine halbe Kugeloberfläche des Mondes sehen, davon einen erheblichen Teil am Rand sehr flach streifend. Für den irdischen Beobachter scheint der Mond ein bisschen zu zittern (»Libration«), so dass er etwas mehr als die Hälfte seiner Oberfläche preisgibt.

Eine der Ursachen ist derselbe Effekt, der auch die Sonnenuhr falsch gehen lässt. Die leichte Schrägstellung der Drehachse des Mondes gegen die Mondbahnachse (nicht etwa gegen die Erdbahnachse!) erlaubt uns einen Blick über die Pole, die uns jeweils etwas zugewandt sind: Libration in Breite.

Die Exzentrizität der (geozentrischen) Mondbahn ist $e/a = 0,055$. Die Winkelgeschwindigkeiten des Umlaufs sind also im Lauf eines Monats abwechselnd um 11 Prozent höher und niedriger als im Mittel. Das Bild links zeigt, wie diese Libration in Länge beim Mond wäre, wenn dessen geozentrische Ellipse nicht nur $e/a = 0,055$ als Exzentrizität hätte, sondern 0,2, also wie die Merkurbahn. Dabei sind nun alle Farben symbolisch: blau und rot die beiden (»festen«) Halbkugeln, die im Perigäum und im Apogäum der Erde zugewandt beziehungsweise von ihr abgewandt sind, und hell und dunkel nicht die von der Sonne beleuchteten, sondern die in der jeweiligen Position tatsächlich der Erde zu- und von ihr abgewandten Hälften. Hellrot erscheinen hier also zeitweise sichtbare Stücke der Rückseite. \triangleleft



Libration des Mondes in der Länge



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorlieben für erstaunliche Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

nature

Explore **nature.com/nature** and access these great features online now!

Authoritative content



Online archives



Regular supplements



Web focuses



Nature Podcasts



Video streaming



Nature News



Blogs

www.nature.com/nature

nature publishing group 

Die Neurobiologie des VERTRAUENs

Ein kleines Molekül, das eigentlich dafür bekannt ist, Geburtswehen auszulösen, bestimmt wesentlich, wie offen wir für Fremde sind.

In Kürze

- ▶ Um soziale Bindungen aufzubauen, ist **die Entwicklung von Vertrauen** notwendig. Auf Grund welcher Faktoren entscheiden Menschen, wann sie Fremden vertrauen können?
- ▶ **Das so genannte Vertrauensspiel**, ein experimenteller Verhaltenstest, hat gezeigt, dass Oxytozin dabei eine wichtige Rolle spielt. Dieses Molekül fungiert als Hormon sowie als Neurotransmitter. Signalisiert ein Fremder uns gegenüber friedliche Absichten, verstärkt es unsere Neigung, ihm zu vertrauen.
- ▶ Wenn wir **die Funktion von Oxytozin im Gehirn** besser verstehen, können wir vielleicht auch die physiologischen Ursachen für viele psychische Störungen im sozialen Bereich erkennen, wie beispielsweise den Autismus.

Von Paul J. Zak

Wenn Sie jemand dazu auffordert: Würden Sie sich einfach rückwärts in die Arme eines Fremden fallen lassen? In Gruppentherapien wird diese Übung häufig angewandt und repräsentiert eine relativ extreme Situation. Allerdings bringen die meisten Menschen im Alltag auch Fremden ein gewisses Vertrauen entgegen. Im Gegensatz zu (anderen) Säugetieren verbringen wir viel Zeit in der Nähe unbekannter Artgenossen. Menschen, die in Städten leben, bewegen sich etwa regelmäßig durch ein Meer von Fremden und entscheiden sich dabei ständig dafür, gewisse Personen eher zu meiden. Ebenso gehen sie davon aus, dass auch die anderen hauptsächlich ihr eigenes Ziel vor Augen haben und sie keinesfalls attackieren werden.

Seit einigen Jahren interessieren sich die Wissenschaftler nun dafür, wie das menschliche Gehirn darüber befindet, ob eine fremde Person vertrauenswürdig ist oder nicht. Meine Kollegen und ich konnten zeigen, dass bei diesem Vorgang ein sehr altes und kleines Molekül eine große Rolle spielt, das vom Gehirn produziert wird. Fachleute nennen es Oxytozin. Mit unseren Forschungen hoffen wir die Ursachen krankhafter Störungen im zwischenmenschlichen Bereich aufzuklären und besser behandeln zu können. Den Zusammenhang zwischen Oxytozin und Vertrauen konnte ich erst über einige Umwege

aufklären. Zusammen mit Stephen Knack, Wirtschaftswissenschaftler der Forschungsgruppe für Entwicklung der Weltbank, untersuchten wir ab 1998, warum die Einstellung der Menschen untereinander innerhalb verschiedener Länder so stark variiert. Für unser Projekt entwickelten wir ein mathematisches Modell, das im jeweiligen Land die sozialen, gesetzlichen und wirtschaftlichen Aspekte berücksichtigt, die das Zutrauen beeinflussen könnten.

Dabei fiel uns auf, dass die Vertrauensstärke einer der besten bekannten Indikatoren für den Reichtum eines Landes ist: Staaten mit einem geringen Vertrauensniveau sind in der Regel auch arm. Wie sich mit unserem Modell zeigen ließ, investieren die Menschen dieser Länder zu wenig in langfristige Projekte, die Arbeitsplätze schaffen und das Einkommen steigern. Denn für solche Geldanlagen müssten die Vertragspartner sich ja darauf verlassen können, dass Vertragsbedingungen beidseitig eingehalten werden.

Da Vertrauen offensichtlich wichtig ist, um die Armut eines Landes zu senken, fragte ich mich, welche Faktoren zwei Menschen dazu bringen, einander Glauben zu schenken. Würde man diesen Prozess verstehen, könnten politische Entscheidungsträger ihn verstärken, indem sie entsprechende Wirtschaftsstrukturen schaffen. Laborstudien haben gezeigt, dass verschiedene solcher Systeme in der gleichen Situation zu einem unterschiedlichen Vertrauensverhältnis zwischen zwei Menschen



FRAU: GETTY IMAGES, MARK ANDERSEN; MANN: GETTY IMAGES, RYAN MCVAY

führen können. Bis dahin hatte allerdings noch niemand einen überzeugenden Mechanismus vorgestellt, der klären würde, wie Vertrauen im Gehirn eigentlich entsteht. Daher beschloss ich, die neurobiologischen Grundlagen dieses Gefühls genauer zu untersuchen.

Das Hormon für Geburtswehen

Viele Ergebnisse aus der Tierforschung deuteten bereits an, dass Oxytozin dabei eine Rolle spielen könnte. Dieses kleine Protein, ein so genanntes Peptid, das aus lediglich neun Aminosäuren besteht, wird im Gehirn produziert und dient hier als Signalmolekül – als Botenstoff zwischen Nervenzellen (Neurotransmitter). Daneben fungiert Oxytozin auch als Hormon: Es wird in die Blutbahn ausgeschüttet und beeinflusst so weiter entfernte Gewebe. Bei Menschen war das Molekül bis dahin vor allem dafür bekannt, Geburtswehen auszulösen und den Milchfluss stillender Frauen anzuregen. Um die Kontraktion der Gebärmutter zu beschleunigen, erhalten rund die Hälfte aller gebärenden Frauen in den USA auch heute noch ein synthetisches Oxytozin (genannt Pitocin). Dagegen war es schwer, die weniger offensichtlichen Wirkungen des Peptids zu analysieren, denn seine Konzentration im Blut ist sehr niedrig, und es wird schnell abgebaut. Es gab jedoch die Hinweise aus Tierversuchen, dass bestimmte Säugetiere mit Hilfe von Oxytozin friedlicher zusammenleben – offensichtlich trauen sie damit einander eher. Darüber hinaus scheint bei anderen

Lebewesen das dem Oxytozin nah verwandte Vasotozin das Miteinander zu fördern.

Nach Aussage von Evolutionsbiologen tauchte Vasotozin das erste Mal vor etwa 100 Millionen Jahren bei Fischen auf. Hier fördert es offenbar die geschlechtliche Vermehrung. Es verringert für die Zeit der Eiablage bei den Weibchen die natürliche Angst vor einem herannahenden Männchen. Dieser Mechanismus hat sich laut Biologen entwickelt, da der Nutzen des Geschlechtsverkehrs – wie Nachkommen und eine größere genetische Bandbreite – die mögliche Gefahr überwiegt, dem anderen Fisch als Mittagessen zu dienen.

In Säugetieren entwickelte sich Vasotozin in zwei miteinander nah verwandte Peptide: in Oxytozin und in Arginin-Vasopressin. Ende der 1970er Jahre begonnene Untersuchungen an Nagetieren zeigten, wie beide Moleküle die Beziehung zwischen Artgenossen erleichtern. So fand Cort A. Pedersen von der University of North Carolina in Chapel Hill heraus, dass Oxytozin das Brutpflegeverhalten von Nagetiermüttern anregt.

Bald darauf untersuchten C. Sue Carter und Lowell L. Getz (beide damals an der University of Illinois in Urbana-Champaign) Oxytozin in zwei genetisch und geografisch miteinander verwandten Arten von Wühlmäusen, den Berg- und den Präriewühlmäusen (siehe »Monogamie bei der Präriewühlmaus« von C. Sue Carter und Lowell L. Getz, SdW 8/1993, S. 62). Männliche Präriewühlmäuse verhalten sich sozusagen vorbildlich: In

Vertrauen zu haben, kann schwer sein. So ist es nicht einfach, sich wie in dieser Übung in einer Gruppentherapie rückwärts in die Arme eines Fremden fallen zu lassen. Glücklicherweise gibt es die neurochemische Substanz Oxytozin, die an der Vertrauensbildung mitwirkt.

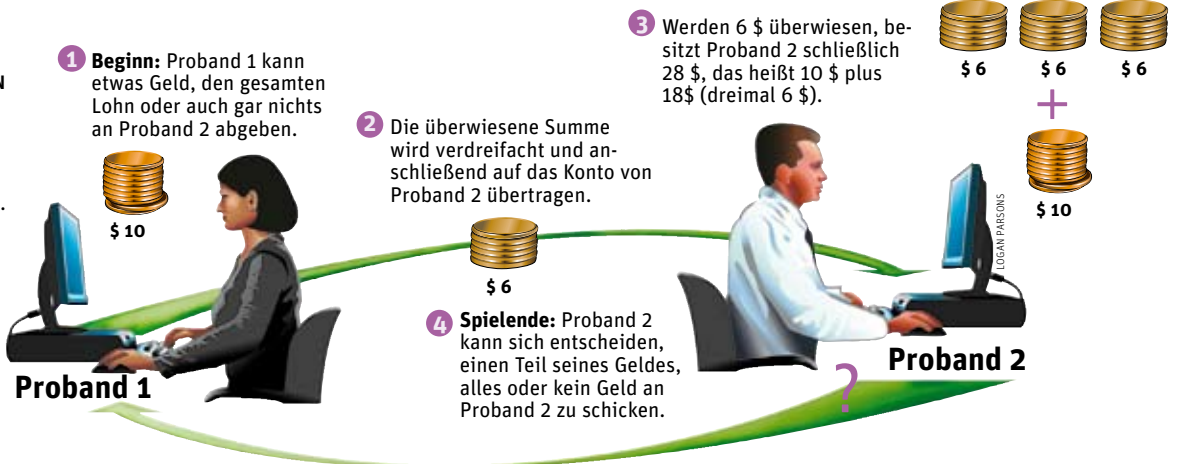
EXPERIMENTE MIT OXYTOZIN – WIE GEHT DAS VERTRAUENSSPIEL?

Der Autor Paul J. Zak und seine Kollegen untersuchten die Rolle von Oxytozin bei der Entstehung von Vertrauen, in dem sie Testpersonen (genannt Proband 1 und Proband 2) das Vertrauensspiel spielen ließen. Die Forscher fanden heraus, dass der Oxytozin-

spiegel im Blut steigt (ein Zeichen dafür, dass das Peptid im Gehirn verstärkt freigesetzt wird), wenn die Testpersonen Vertrauen zu anderen empfinden. Oxytozin verstärkt sowohl vertrauensvolles als auch vertrauenswürdiges Verhalten.

DIE GRUNDREGELN

Versuchsaufbau: Zwei Spieler sitzen so, dass sie zueinander keinen Blickkontakt haben. Zu Beginn werden ihnen die Spielregeln erklärt. Außerdem wird ihnen ein Lohn von (in diesem Beispiel) 10 Dollar zugesagt, der in ein Computerkonto eingetragen wird.



Auswertung:

Entscheidet sich Proband 1, Geld an Proband 2 zu überweisen, und schickt Proband 2 einen Teil der Einkünfte zurück an Proband 1, so gewinnen beide Parteien. Ist Proband 2 dagegen geizig, verliert

Proband 1 Geld. Die Summe, die Proband 1 an Proband 2 überträgt, ist ein Maß für das Vertrauen, das Proband 1 in Proband 2 setzt. Die Vertrauenswürdigkeit von Proband 2 wird durch die Höhe des zurückgegebenen Betrags bestimmt.

INFOS

► Während des sexuellen Höhepunkts steigt der Oxytozinspiegel stark an. Man vermutet, dass das Molekül eine Rolle dabei spielt, **zärtliche Gefühle** nach dem Geschlechtsverkehr zu empfinden, und hat es daher das Schmusehormon genannt.

► Vincent du Vigneaud vom Weill Cornell Medical College in New York gelang es 1953 als Erstem, Oxytozin zu isolieren und zu synthetisieren. Für diese Leistung erhielt er 1955 den **Nobelpreis für Chemie**.

► Bis vor Kurzem war es noch sehr schwierig, den Oxytozinwert im Blut zu bestimmen, da die Konzentrationen äußerst niedrig sind und das Hormon schnell zerfällt – bereits **nach drei Minuten** auf die Hälfte.



der Regel verbringen sie ihr ganzes Leben mit derselben Partnerin. Die Nagetiere leben in sozialen Gruppen und sind fürsorgliche Väter. Männliche Rocky-Mountains-Wühlmäuse dagegen sind rechte Flegel: Sie wechseln häufig die Partnerin, sind einzulgängerisch und ignorieren ihre Nachkommen. Carter und Getz (und inzwischen auch andere Forschergruppen) führen die großen Unterschiede im Sozialleben der beiden Wühlmausarten darauf zurück, dass sich die Rezeptoren für Oxytozin und Arginin-Vasopressin an verschiedenen Orten des Gehirns befinden. Die Neurotransmitter des Gehirns wirken, indem sie an spezifische Rezeptoren auf der Oberfläche von Nervenzellen binden. Bei den Präriewühlmäusen konzentrieren sich diese Rezeptoren in Hirnregionen, welche bei Aktivierung die Monogamie fördern. Gemeint sind Regionen des Mittelhirns, in denen die Ausschüttung des Botenstoffs Dopamin reguliert wird. Er löst bei dem Präriewühlmaus-Männchen ein angenehmes Gefühl aus und belohnt so Gemeinschaftsleben und Brutpflege.

Die Tierversuche gingen nicht der Frage nach, wie Vertrauen genau entsteht, doch sie bewiesen: Oxytozin spielt dabei eine Rolle. Daraus folgerte ich, dass dieses Molekül möglicherweise bei der Entwicklung von Zutrauen beteiligt ist, was ja vermutlich die Vorausset-

zung für Nähe ist. Etwa zur gleichen Zeit entwickelten Wissenschaftler eine Methode, kleine Änderungen der Konzentration an Oxytozin im Blut schnell und zuverlässig zu messen.

Wie lässt sich die Vertrauensstärke zwischen Fremden messen?

Die damaligen Experimente an Nagetieren deuteten darauf hin, dass friedliche Signale eines Tiers die Freisetzung von Oxytozin in dem kontaktierten Tier zur Folge hatten. So fragte ich mich, ob nicht auch bei Menschen Peptide freigesetzt werden, wenn sich ihnen ein Fremder nähert und dabei freundliche Absichten signalisiert. Daraufhin suchten meine Kollegen – Robert Kurzban (Psychologe, heute an der University of Pennsylvania) sowie William Matzner (mein damaliger Student an der Claremont Graduate University) – nach Belegen dafür. Wir wollten herausfinden, ob zwischenmenschliches Verhalten einen Einfluss auf die Oxytozinproduktion haben kann, und ob umgekehrt diese womöglich das menschliche Sozialverhalten verändert.

Wir überlegten uns, wie sich die Vertrauensstärke zwischen einander unbekanntem Menschen messen ließe. Bei Experimenten mit Nagetieren hatten Forscher bisher einfach zwei fremde Tiere zusammen in einen Käfig gesetzt und beobachtet, ob friedliches Verhal-

ERGEBNISSE:

Ein Anstieg des Oxytozinwerts erhöht das Vertrauen:

- ▶ Nachdem Proband-1-Personen Oxytozin über ein Nasenspray eingeatmet hatten, überwiesen 17 Prozent von ihnen mehr Geld als die Proband-1-Personen einer Kontrollgruppe, die lediglich ein Placebospray eingeatmet hatten.
- ▶ Unter den Proband-1-Personen (fast die Hälfte dieser Gruppe), die Oxytozin eingeatmet hatten, waren doppelt so viele Personen im Vergleich zur Kontrollgruppe, die ihren Partnern das gesamte Geld übertrugen.

Oxytozin verstärkt die Vertrauenswürdigkeit:

- ▶ Proband-2-Personen mit den höchsten Oxytozinwerten im Blut sendeten die größten Geldbeträge an Proband-1-Personen zurück.

Reagiert das Gehirn nicht richtig auf das Oxytocin, dann könnte dies Mitursache sozialer Störungen sein.

- ▶ Einige Proband-2-Personen mit außergewöhnlich hohem Oxytozinspiegel schickten kein Geld an ihren Partner zurück. Möglicherweise ist bei ihnen das Oxytozinsystem defekt und verantwortlich für eine soziale Störung.

ten des einen die Ausschüttung von Oxytozin in dem anderen Nager auslösen würde. Dagegen sind die Fähigkeiten des Menschen, eine soziale Situation einzuschätzen, viel zu hoch entwickelt, um mit Hilfe eines so einfachen Versuchsschemas erfasst werden zu können. Menschliche Reaktionen können von vielen anderen Faktoren beeinflusst werden, wie zum Beispiel dem körperlichen Erscheinungsbild einer Person, seiner Kleidung et cetera. Glücklicherweise hatten der Wirtschaftswissenschaftler Joyce Berg (University of Iowa) sowie John Dickhaut und Kevin McCabe (beide damals an der University of Minnesota) bereits Mitte der 1990er Jahre einen Test entwickelt, der das Problem umging. Hierbei demonstrieren die Versuchspersonen ihr Vertrauen in eine ihnen fremde Testperson, in dem sie dieser ihr eigenes Geld spenden. Sie schicken es an den Fremden, weil sie erwarten, dass er sich dafür erkenntlich zeigen und mehr Geld zurückschicken wird. Die Forscher nannten dies das »Vertrauensspiel«.

In meinem Labor führen wir das Vertrauensspiel folgendermaßen durch: Meine Mitarbeiter rekrutieren die Testpersonen, die sich einverstanden erklären, anderthalb Stunden mit uns zu verbringen. Dafür erhält jeder 10 Dollar (siehe Kasten oben). Anschließend bilden wir aus den Teilnehmern zufällige Paare,

die sich nicht sehen und auch nicht miteinander sprechen können. Im Folgenden sollen sie entscheiden, wie viel Geld sie an den Partner abgeben möchten. Bei jedem Versuchspaar wird eine Person Proband 1 und die andere Proband 2 genannt. Zu Beginn des Spiels erklären wir beiden Teilnehmern die Regeln. Zunächst fragt ein Computer Proband 1, ob er einen Teil seines Versuchslohns von 10 \$ dem Testpartner überlassen möchte. Der Anteil, den Proband 1 abgibt, wird verdreifacht und auf das Konto von Proband 2 überwiesen. Entscheidet sich Proband 1 etwa, 6 \$ an Proband 2 zu schicken, besitzt dieser schließlich 28 \$ (dreimal 6 \$ plus 10 \$), während Proband 1 noch 4 \$ verbleiben.

Im nächsten Schritt teilt der Computer Proband 2 mit, wie viel Geld er erhalten hat, und fragt ihn, ob er nun auch einen bestimmten Geldbetrag an Proband 1 zurücksenden möchte. Dabei ist die Entscheidung von Proband 2 allein ihm selbst überlassen. Zudem wird den Versuchsteilnehmern volle Vertraulichkeit zugesichert. Der von Proband 2 gewählte Betrag wird im Verhältnis 1:1 von seinem Konto abgezogen (das heißt, in diesem Fall wird der Geldwert nicht verdreifacht). Täuschung ist nicht möglich – die endgültige Auszahlung erfolgt auf Grund dieser Entscheidungen. Danach entnehmen wir den Testpersonen Blutproben, um ihren Oxytozingehalt zu bestimmen.

Experimentelle Wirtschaftsforscher nehmen gewöhnlich an, dass der erste Geldtransfer das Vertrauen und der zweite eher die Vertrauenswürdigkeit misst. Sie haben dieses Vertrauensspiel immer wieder in vielen Ländern durchgeführt – auch mit hohen Geldbeträgen.

Bei unseren Versuchen entschieden sich etwa 85 Prozent der Proband-1-Personen dafür, ihrem Partner Geld zu schicken. 95 Prozent der Beschenkten wiederum sandten einen Betrag an Proband 1 zurück. Interessanterweise konnten die Menschen hinterher nicht wirklich sagen, warum sie dem anderen vertrauten oder ihnen selbst vertraut wurde. Analog zu den Ergebnissen der Nagetierversuche vermutete ich, dass das Vertrauen von Proband 1 bei Proband 2 dazu führte, dass dessen Oxytozinspiegel stieg. Dabei sollte, so meine Hypothese, umso mehr Oxytozin freigesetzt werden, je mehr Geld überwiesen worden war.

Tatsächlich konnten wir zeigen, dass im Gehirn von Proband 2 nach Erhalt des Geldbetrags Oxytozin ausgeschüttet wurde. Dieser biochemische Vorgang erzeugte bei dem Probanden unserer Ansicht nach das Gefühl von »Glaubwürdigsein«. Entwickelte Proband 1 ein größeres Zutrauen und überwies einen höheren Geldbetrag, so stieg auch bei Proband 2

OXYTOZIN UND GROSSZÜGIGKEIT

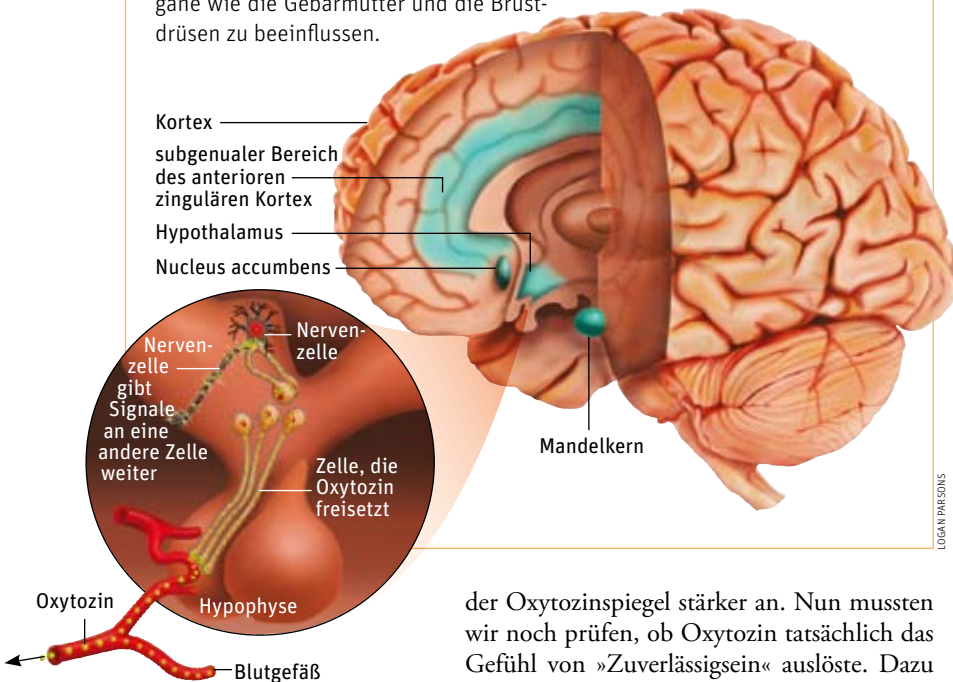
Stellen Sie sich (als Proband 1) vor, Sie sollten Ihren Einsatz mit einem Fremden teilen (Proband 2). Akzeptiert dieser Ihr Angebot, erhalten Sie beide einen bestimmten Betrag; lehnt der andere ab, gehen Sie beide leer aus. **Welche Summe würden Sie wählen?** Wenn Sie in der Rolle der anderen Person (Proband 2) wären, welche angebotene Summe würden Sie akzeptieren?

Das Spiel misst die **Großzügigkeit der Mitspieler**. Dabei wird jemand als großzügig definiert, der der anderen Person mehr anbietet, als sie benötigt. Im Labor des Autors wurde kürzlich eine Versuchsreihe zu diesem Spiel durchgeführt. Ergebnis: Die Proband-1-Personen, die zuvor Oxytozin inhaliert hatten, boten ihren Partnern einen um 80 Prozent höheren Geldbetrag an als die Personen der Kontrollgruppe, die ein Placebospray eingenommen hatten. Darüber hinaus akzeptierten alle Proband-2-Personen, die Oxytozin eingenommen hatten, den ihnen vorgeschlagenen Geldbetrag. Daraus lässt sich schließen, dass Oxytozin **unser Vertrauen in andere** fördert. Darüber hinaus stärkt es unser Bedürfnis, anderen zu helfen.

VERTRAUENSHORMON IM GEHIRN

Verschiedene Hirnbereiche setzen Oxytozin frei und reagieren auch darauf (grün gekennzeichnet). Diese Strukturen haben drei gemeinsame Merkmale: 1. Sie weisen eine hohe Dichte an Oxytozinrezeptoren auf, die die »Nachricht« an das Innere der Nervenzellen weitergeben. 2. Diese Hirnbereiche kontrollieren Gefühle und soziales Verhalten. 3. Die Bereiche haben Einfluss auf die Freisetzung von Dopamin im Mittelhirn. Die Ausschüttung dieser Überträgersubstanz bewirkt im Menschen ein angenehmes Empfinden. Dadurch belohnt und verstärkt Dopamin bestimmte Verhaltensweisen. Für die Entstehung von Vertrauen ist die Freisetzung von Oxytozin im Gehirn entscheidend, es entfaltet jedoch auch in anderen Bereichen des Körpers eine Wirkung. So geben einige Blutzellen das Hormon ins Blut ab (Detail unten links), um verschiedene Organe wie die Gebärmutter und die Brustdrüsen zu beeinflussen.

Kortex
 subgenualer Bereich
 des anterioren
 zingulären Kortex
 Hypothalamus
 Nucleus accumbens



Nervenzelle
 Nervenzelle
 gibt Signale
 an eine
 andere Zelle
 weiter
 Zelle, die
 Oxytozin
 freisetzt
 Hypophyse

Oxytozin
 Blutgefäß
 zur Gebärmutter-
 muskulatur, zu den
 Brustdrüsen, zum
 Vagusnerv und zum
 Herzen

Selektionsvorteil, die lange und intensive Bindungen zu anderen eingehen konnten – bis die Jungen eben erwachsen genug waren, um selbstständig zu leben. Während Schimpansen, unsere nächsten genetischen Verwandten, mit sieben oder acht Jahren geschlechtsreif sind, brauchen wir Menschen dafür fast doppelt so lange und müssen die ganze Zeit hindurch von unseren Eltern betreut werden (und mit ihnen verbunden bleiben). Ein Nebeneffekt der ausgedehnten Fürsorge könnte die ausgesprochene Neigung der Menschen sein, sich an andere zu binden. So fühlen sie sich auch zu Nichtverwandten hingezogen, werden Freunde, Nachbarn oder Ehepartner. Wenn diese Vermutung stimmt, brauchen wir uns nicht darüber zu wundern, dass Menschen ihr Herz auch an Haustiere hängen, an bestimmte Orte und sogar an ihre Autos.

Freundlichkeit – nur eine Sache der Chemie?

Unsere Resultate aus dem Vertrauensspiel besagten, dass nur bei Proband-2-Personen vermehrt Oxytozin ausgeschüttet wurde. Nur diese Testpersonen hatten vom Partner das Signal erhalten, vertrauenswürdig zu sein. Darüber hinaus stellten wir fest, dass Proband-1-Personen unabhängig von dem ursprünglichen Geldwert entschieden, wie stark sie sich auf den Partner verließen. In anderen Worten, sie übertrugen nicht mehr Geld an Proband-2-Personen, wenn ihre anfängliche Konzentration an Oxytozin gegenüber anderen Probanden erhöht war. Diese Beobachtung erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich. Sie stimmt aber mit den Ergebnissen aus Tierversuchen überein, die belegen, dass Oxytozin nur freigesetzt wird, wenn die Tiere sozialen Kontakt mit anderen hatten. Offensichtlich ist die Veränderung, das heißt der Anstieg des Vertrauenshormons wichtig und nicht sein absoluter Wert. Somit könnte man sich vorstellen, dass soziale Signale und Kontakte im Gehirn Schalter umlegen können. Werden sie umgelegt, spüren wir: Dieser Mensch ist uns freundlich gesinnt. Das wird durch den Anstieg des Oxytozins vermittelt.

Was würde passieren, wenn wir die Oxytozinspiegel künstlich erhöhten? Träfe unsere Schaltertheorie zu, müsste der Versuch bei Proband 1 das Vertrauen in Proband 2 erhöhen und ihn dazu veranlassen, mehr Geld an den fremden Partner zu überweisen. Dieser Fragestellung ging ich zusammen mit dem Wirtschaftsforscher Ernst Fehr und seiner Arbeitsgruppe von der Universität Zürich nach. Wir ließen 200 männliche Probanden ein oxytozinhaltiges Nasenspray inhalieren (damit der Wirkstoff direkt in das Gehirn gelangte). An-

der Oxytozinspiegel stärker an. Nun mussten wir noch prüfen, ob Oxytozin tatsächlich das Gefühl von »Zuverlässigkeit« auslöste. Dazu führten wir folgenden Kontrollversuch durch: Eine Gruppe von Teilnehmern erhielt rein zufällige Geldzahlungen, die nicht von einer anderen Person abgeschickt waren und daher auch keinen Vertrauensvorschuss auf Wechselseitigkeit bedeuten konnten. Der Test sollte ausschließen, dass Oxytozin allein auf Grund des Geldes im Gehirn freigesetzt würde. In der Tat konnten wir in dieser Kontrollgruppe keinen Anstieg des Oxytozinpegels feststellen.

Ein weiteres Ergebnis unserer Untersuchung war, dass sich Proband-2-Personen mit einem höheren Oxytozinwert vertrauenswürdiger zeigten als andere mit niedrigeren Werten: Sie sandten mehr Geld an ihre Partner zurück, die zuvor ja auch auf sie gesetzt hatten. Offenbar stimmt uns ein Fremder schon allein dadurch freundlich, dass er uns vertraut.

Warum entwickelten sich die Mechanismen der Oxytozinwirkung beim Menschen so, wie wir sie mit unseren Versuchen gemessen haben? Eine mögliche Erklärung wäre, dass wir Menschen eine sehr lange Kindheit haben. Möglicherweise besaßen die Individuen einen

schließlich verglichen wir das Verhalten dieser »Geldinvestoren« mit 200 anderen Testpersonen, die lediglich ein Placebospray eingeatmet hatten. Die Männer der Oxytozingruppe überwiesen dabei 17 Prozent mehr Geld an ihre Testpartner als die Teilnehmer der Kontrollgruppe. Besonders beeindruckend war, dass doppelt so viele Oxytozin- wie Placebo-Männer (fast die Hälfte der gesamten Gruppe) maximales Vertrauen zeigten: Sie übersandten Proband 1 nämlich ihr gesamtes Geld. Der Versuch belegte, dass ein Anstieg der Oxytozinwerte unser natürliches (und sinnvolles) Misstrauen vor Fremden verringert. Es bleibt zu erwähnen, dass einige Probanden trotz Oxytozingabe kaum verstärktes Vertrauen zeigten. Bei diesen Menschen reichte eine Zunahme des Oxytozinwertes allein noch nicht aus, um ihre Scheu vor Fremden zu überwinden.

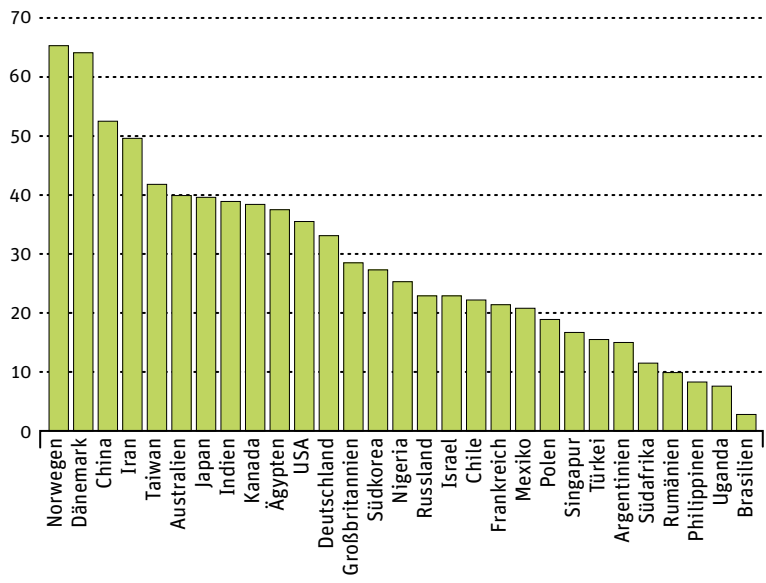
Hier möchte ich etwas klarstellen. Unsere Versuche haben nichts damit zu tun, Menschen zu manipulieren, um ihnen etwa Geld aus der Tasche zu ziehen. Die Testpersonen verwandelten sich während unseres Experiments keineswegs in willenlose Automaten. Es würde auch Vertretern oder Politikern wenig nützen, einfach Oxytozin in die Luft zu spritzen oder es ins Essen und Trinken zu mischen, um das Vertrauen anderer Menschen zu erzwingen. Oxytozin wird im Darm abgebaut, so dass es bei oraler Gabe das Gehirn gar nicht erreichen würde. Eine intravenöse oder nasale Verabreichung kann aber nicht unbemerkt erfolgen. Darüber hinaus steigt der Oxytozinspiegel des Gehirns nur unwesentlich, wenn man das Molekül verdünnt über die Luft einatmet.

Während eines Experiments erregte sich einmal eine weibliche Testperson darüber, dass ihr Partner ihr gar kein Geld überwies. Ihre Reaktion weckte in uns die Frage, was wohl in Menschen vorgeht, die Misstrauen erleben. Viele wichtige Systeme des Gehirns werden mit Hilfe zweier gegensätzlich arbeitender Kräfte kontrolliert. So wird unser Essverhalten im Wesentlichen über Hormone geregelt, die jeweils melden, wann wir hungrig oder satt sind. Soziales Verhalten könnte ähnlich reguliert werden. Oxytozin fördert sozialen Kontakt. Es fühlt sich buchstäblich gut an, wenn man das Vertrauen anderer erlebt. Dieses Gefühl wiederum wirkt darauf hin, dem Gegenüber ebenfalls zu trauen. Wie bereits erwähnt, fördert Oxytozin das Brutpflegeverhalten von Säugetiermüttern, indem es Dopamin in tieferen Bereichen des Mittelhirns freisetzt, die auch bei Angenehmem wie Sex oder Essen beteiligt sind. In den nachfolgenden Untersuchungen fanden wir wenigstens bei Männern Hinweise auf ein zusätz-

VERTRAUEN IN VERSCHIEDENEN LÄNDERN

Die Größe des Vertrauens, das fremde Menschen zueinander haben, unterscheidet sich deutlich innerhalb verschiedener Länder. Diese Untersuchung veranlasste den Autor, die Rolle von Oxytozin bei der Entwicklung von Vertrauen zu erforschen. Dabei versuchte er, die sozialen, politischen und wirtschaftlichen Bedingungen zu ergründen, welche die Antwort auf folgende Frage beeinflussen: Glauben Sie, dass man den meisten Menschen trauen kann?

Größe des Vertrauens pro Land
Prozent der Menschen, die finden, dass man den meisten Menschen trauen kann



liches Molekül, das der kontaktfördernden Wirkung des Oxytozins entgegenwirkt.

Wenn den männlichen Proband-2-Personen misstraut wurde (das heißt, wenn ihre Partner ihnen kein Geld sandten), stieg bei ihnen die Konzentration für Dihydrotestosteron (DHT), einen Abkömmling des Testosterons. Je weniger ihre Partner sich auf sie im Vertrauensspiel verließen, desto stärker stieg ihr DHT-Wert. DHT ist ein sehr leistungsfähiges Testosteron. Es steuert viele der auffälligen Veränderungen in der Pubertät männlicher Jugendlicher, wie Wachstum der Körperhaare, vermehrte Muskelbildung oder Stimmbruch. Bei hohem DHT-Spiegel steigt die Bereitschaft, sich in sozialen Situationen körperlich auseinanderzusetzen. Dieses Ergebnis belegt, dass Männer auf Misstrauen mit aggressivem Verhalten reagieren.

Frauen und Männer berichteten gleichermaßen, dass es ihnen missfiel, für nicht zuverlässig gehalten zu werden. Allerdings erfolgte bei den Frauen nicht die »heiße« physiologische Reaktion, vermehrt DHT auszuschütten. Die meisten männlichen Proband-2-Personen, denen misstraut worden war, schickten ihren Partnern einfach kein Geld zurück. Die

meisten Proband-2-Frauen dagegen reagierten proportional, das heißt sie gaben unabhängig von der beteiligten Summe ungefähr den gleichen Geldwert zurück wie den, den sie bekommen hatten. Wir halten die Frauen daher für die »kühleren« Spielpartner, ohne jedoch zu verstehen, was auf physiologischer Ebene genau passiert. Die Aussicht, mit einer aggressiven Reaktion rechnen zu müssen, stimmt uns vielleicht manchmal vertrauensvoller. Wenn wir wissen, dass ein Signal des Misstrauens den anderen wütend machen kann, versuchen wir, diese Reaktion zu vermeiden, und geben uns zutraulicher, als wir eigentlich sind.

Zwei Prozent aller Probanden verhielten sich wie Soziopathen

Mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie haben wir während des Vertrauensspiels die Hirnaktivität der Probanden beobachtet. Dabei fiel uns auf: Vertraute ein Proband seinem fremden Mitspieler, stieg seine Hirnaktivität in den tiefen Bereichen des Mittelhirns, in denen Dopamin bindet. Werden die Dopaminrezeptoren aktiviert, erleben wir ein Belohnungsgefühl. Das erklärt, warum die Proband-2-Personen, die Geld bekommen hatten, in der Regel auch eine gewisse Summe wieder zurückschickten, selbst wenn das für sie ökonomisch von Nachteil war. Offensichtlich wird die Proband-2-Person durch ihre positiven Gefühle psychisch belohnt, wenn sie Proband 1 mit Vertrauen antwortet. Daneben bestärkt dieser Mechanismus sie darin, auch in Zukunft vertrauenswürdig zu handeln.

Obwohl sich die meisten Menschen vertrauenswürdig verhielten, benahmten sich zwei Prozent unserer Probanden auffallend unzuverlässig: Sie behielten sämtliches Geld, das sie erhalten hatten, für sich. Bezeichnenderweise besaßen sie einen ungewöhnlich hohen Oxytozinspiegel. Möglicherweise liegen die Rezeptoren für Oxytozin dieser Menschen in falschen Hirnbereichen (etwa in Regionen, die die Freisetzung von Dopamin nicht beeinflussen). Eine andere Erklärung wäre, dass die Oxytozinrezeptoren dieser Testpersonen nicht funktionieren. Im letzteren Fall wären die Nervenzellen einer Oxytozinausschüttung gegenüber so gut wie unempfindlich, egal, wie stark der Wert sich verändert. Die Personen erinnerten uns insgesamt an Soziopathen, welche sich gegenüber dem Leiden anderer gleichgültig oder sogar erfreut zeigen.

Zurzeit beschäftigen wir uns in meinem Labor mit der Frage, ob ein Mangel an Oxytozin im Gehirn für Störungen des sozialen Umgangs verantwortlich sein kann. So besit-

zen zum Beispiel Menschen mit Autismus einen niedrigen Oxytozinspiegel. In einem Experiment wurde bereits versucht, das mangelnde Peptid bei autistischen Patienten zu ersetzen. Die Betroffenen nahmen nach der künstlichen Erhöhung ihres Oxytozinwerts jedoch nicht stärker am sozialen Leben teil. Möglicherweise sind bei Autisten wie auch bei den Menschen, die in unserem Spiel keinerlei Vertrauen offenbarten, diese Rezeptoren defekt.

Ebenso gibt es Patienten, deren Hirn in Bereichen mit einer hohen Dichte an Oxytozinrezeptoren verletzt ist. Sie können in der Regel nur schwer entscheiden, wem sie vertrauen können. Bei vielen neurologischen und psychiatrischen Erkrankungen verhalten sich die Patienten im sozialen Bereich auffällig. Beispiele dafür sind Schizophrenie, Depressionen, Alzheimer, Sozialphobien sowie die Huntington-Krankheit. Genau wie im Fall der gänzlich vertrauenslosen Menschen könnte auch bei solchen Leiden ein defektes Oxytozinsystem zu dem Krankheitsbild beitragen. Wenn es uns gelänge, dieses System besser zu verstehen, könnten wir daraus möglicherweise auch neue Therapieansätze für die Heilung entwickeln.

Die Oxytozinkonzentration verhält sich im ganzen Körper sehr dynamisch. Das Peptid wechselwirkt mit anderen Neurotransmittern und Hormonen, die selbst ihre Konzentration innerhalb von Minuten oder innerhalb eines Lebens verändern. So verstärkt beispielsweise Östrogen die Aufnahme von Oxytozin in das Gewebe, während Progesteron genau das Gegenteil bewirkt. Aus diesen Prozessen kann man schließen: Sowohl die Umwelt als auch innere physiologische Vorgänge beeinflussen unsere Bereitschaft, mit anderen Menschen in Kontakt zu treten. Darüber hinaus vermuten wir, dass eigene Erfahrungen den Nullpunkt unseres Oxytozinregelkreislaufs verschieben können.

Das würde auch erklären, warum sich unsere Grundeinstellung, wie leicht wir anderen Menschen vertrauen, im Lauf des Lebens ändern kann. Möglicherweise wird mehr Oxytozin freigesetzt, wenn wir Vertrauen erleben und uns dabei in einer sicheren und fürsorglichen Umgebung befinden. Die Folge wäre, dass wir dann auch eher geneigt wären, uns auf andere Menschen einzulassen. Faktoren wie Stress, Unsicherheit und Isolierung von anderen verhindern, dass sich eine vertrauensvolle Grundeinstellung entwickelt. Mit weiterer Forschung werden wir verstehen, wie wir mit Hilfe eines einfachen Peptids für völlig fremde Menschen empfinden und ihnen vertrauen. <



Paul J. Zak ist Professor für Wirtschaftswissenschaften und Gründungsdirektor des Zentrums für Neurowirtschaftswissenschaftliche Untersuchungen an der Claremont Graduate University in Kalifornien. Daneben arbeitet Paul J. Zak auch am Loma Linda University Medical Center.

Carter, C. S.: Neuroendocrine Perspectives on Social Attachment and Love. In: *Psychoneuroendocrinology* 23(8), S. 779–818, November 1998.

Cosfeld, M. et. al.: Oxytozin Increases Trust in Humans. In: *Nature* 435, S. 673–676, 2. Juni 2005.

Pedersen, C. A.: How Love Evolved from Sex and Gave Birth to Intelligence and Human Nature. In: *Journal of Bioeconomics* 6(9), S. 39–63, Januar 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983268.

Kampf den KILLERWÜRMERN

Von Patrick Skelly

Legenden besagen, dass Vampire weder Schatten noch Spiegelbild erzeugen und – in moderneren Versionen – auch nicht auf Fotos, Filmen oder Videos festgehalten werden können. Vampire gibt es natürlich nur in der Welt der Mythen; die sich in gewisser Weise ähnlich verhaltenden Schistosomen leider nicht. Diese infektiösen Saugwürmer, auch als Pärcheneigel bekannt, dringen durch die Haut in die Venen ein und ernähren sich von unserem Blut.

Die nach ihnen benannte Krankheit, die Schistosomiasis (früher auch Bilharziose benannt, nach dem Tropenarzt Theodor Bilharz, der sie 1851 bei Obduktionen in einer Klinik in Kairo entdeckte), gilt laut WHO als zweit-schlimmste Parasitenerkrankung. Nach Anzahl der Todesfälle, chronischen Erkrankungen sowie den Auswirkungen auf die soziale und ökonomische Situation wird sie nur noch von der Malaria übertroffen. Das größte Problem bei der Bekämpfung der Parasiten besteht darin, dass Schistosomen einen Weg gefunden haben, sich unsichtbar zu machen: Kameras können sie zwar erfassen, aber unser Immunsystem erkennt sie nicht als Feind.

Jahrelang haben sich Forscher darum bemüht, das Geheimnis zu lüften, wie diese parasitären Würmer es schaffen, unser Immunsystem zu unterlaufen. Versuche, Impfstoffe zu entwickeln, gab es genügend. Im geimpften Körper sollte sich das Immunsystem unverzüglich auf die Eindringlinge stürzen, eine Infektion verhindern beziehungsweise den Körper bei der Bekämpfung bereits bestehender Infektionen unterstützen. Solche Impfstoffe sind dringend erforderlich. Sie wären eine zentrale Komponente bei der weltweiten Ausrottung dieser Erkrankung. Die Ergebnisse

sind immer noch enttäuschend. Schistosomenforscher wie ich meinen aber, dass wir uns gerade an einem Wendepunkt befinden. In Genomprojekten wird momentan die DNA-Sequenz des Parasiten entschlüsselt. Außerdem sind die Spezialisten dabei, leistungsfähige neue Werkzeuge zu entwickeln, mit denen seine molekularen Geheimnisse gelüftet werden könnten. Damit sollte es gelingen, die Immunität zu steigern und die Entwicklung eines Impfstoffs zu beschleunigen.

Ein solcher wird dringend benötigt. Denn die bislang einzig verfügbare Behandlungsmethode kann die weite Verbreitung der Krankheit kaum stoppen. Mehr als 200 Millionen Menschen, vorwiegend in tropischen und subtropischen Ländern, leiden unter Schistosomiasis. Das heißt, in ihrem Blut haben sie dauerhaft Schistosomen. Bei Kindern kann eine chronische Infektion das Wachstum verzögern und kognitive Ausfälle hervorrufen. Bei allen Betroffenen kann sie Darm, Blase, Milz oder Leber schädigen; die entsprechenden Symptome reichen von blutigem Durchfall und Krämpfen bis hin zu lebensbedrohlichem Nierenversagen und inneren Blutungen. Bei Erwachsenen verursacht eine Schistosomiasis Schwäche und Arbeitsunfähigkeit.

Menschen infizieren sich beim Kontakt mit Wasser, das mit Larven (Zerkarien) ver-seucht ist. Diese sind zwar zahnlos, bohren sich aber problemlos durch die menschliche Haut und dringen in die Blutgefäße ein, wo sie sich zu erwachsenen Würmern entwickeln und paaren. Nach der Paarung beginnen die Weibchen mit der Eiablage.

Die Eier verschlimmern die ganze Sache. Pro Tag legt ein Weibchen mehrere hundert davon, gut die Hälfte gelangen über den Blutstrom in diverse Organe. Dort siedeln sie sich an und sondern – wenn sie nicht bekämpft

EIN EINDRUCKS-VOLLER FEIND

Weltweit sind **schätzungsweise 200 bis 300 Millionen Menschen infiziert**, davon mindestens 20 Millionen schwer; 200 000 sterben jährlich.

Die humanpathogenen Schistosomenarten vermehren sich zwar nicht im Menschen, können allerdings **im Blut ihrer Wirte 30 bis 40 Jahre lang überleben** und Eier produzieren.

Die Würmer, auch bekannt als **Pärcheneigel**, brachten einst eine ganze Armee zu Fall. 1948 setzten die Parasiten unzählige Soldaten der Volksrepublik China außer Gefecht, als diese sich auf einen amphibischen Angriff auf Taiwan (damals noch Formosa) vorbereiteten. Ein Historiker bezeichnete den Wurm daraufhin als »Glücksfall für Formosa«.

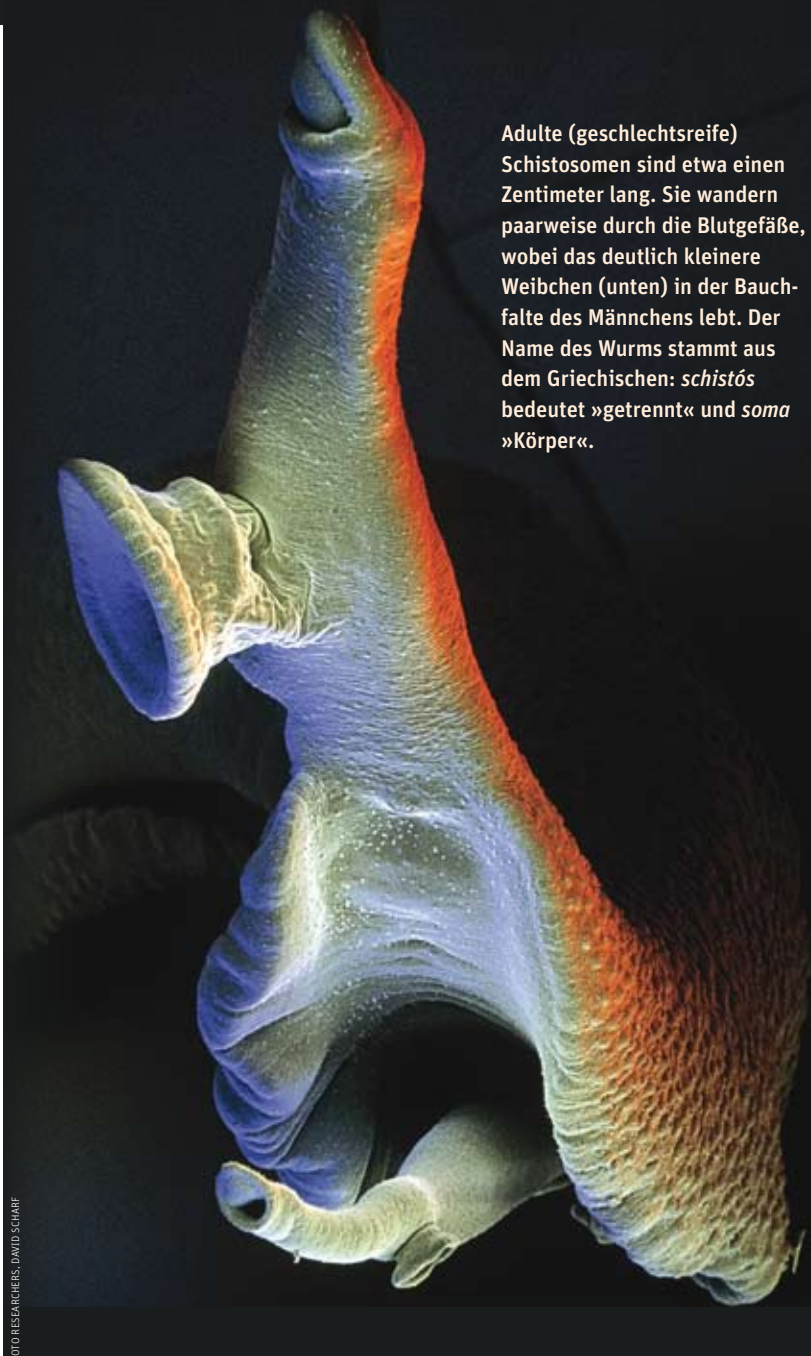
Blut saugende Würmer, die zu den Trematoden zählenden Schistosomen (früher Bilharzia genannt), gehören zu den weltweit gefährlichsten Parasiten des Menschen. Die Entzifferung ihres Genoms sowie neue genetische Methoden liefern jetzt Ansätze für einen Impfstoff.

werden – Stoffe ab, die Entzündungen auslösen. Das Immunsystem, das in der Regel die Würmer selbst nicht ausschalten kann, vermag diese akute Gefahr zwar abzublocken, allerdings nur auf Kosten der eigenen Schädigung. Zum einen bildet sich Narbengewebe, das die Organe angreift, zum anderen unterstützt die Immunreaktion die Eier sogar dabei, die Blutgefäße zu durchlöchern. Im Urogenitalsystem gelangen die Eier der Spulwurmart *S. mansoni* oder *S. japonicum* in den Darmtrakt und mit dem Stuhl in Umgebungsgewässer, wo sie sich weiterentwickeln können. Die Eier von *S. haematobium* dringen in die Blase ein und werden mit dem Urin ausgeschieden.

Bisher gibt es nur ein Medikament

Im Wasser schlüpfen aus den Eiern Larven, die in Schnecken eindringen, wo sich die Schistosomen asexuell vermehren. Danach infizieren sie – abermals ins Wasser entlassen – neue menschliche Opfer oder reinfizieren bereits befallene Menschen (siehe den Kasten auf S. 51).

Hygienische Maßnahmen und eine Dezimierung der Schneckenpopulation haben die Krankheit in vielen Ländern zwar eindämmen können. Aber in Armutsregionen, wo es an sauberem Wasser mangelt, ist die Schistosomiasis weiter auf dem Vormarsch. In den 1970er Jahren wurde das Medikament Praziquantel entwickelt. Obwohl nicht frei von Nebenwirkungen, ist es als einziges gegen alle Schistosomenarten wirksam und inzwischen sogar relativ preiswert. Zudem kann es schon bei einmaliger Einnahme mit Erfolg gegen eine bestehende Infektion eingesetzt werden. Aber da sich die Menschen oft mehrfach infizieren, besteht die Gefahr, dass die Schistosomen bald resistent werden. Es sind bereits Fälle bekannt, bei denen eine höhere Dosis des

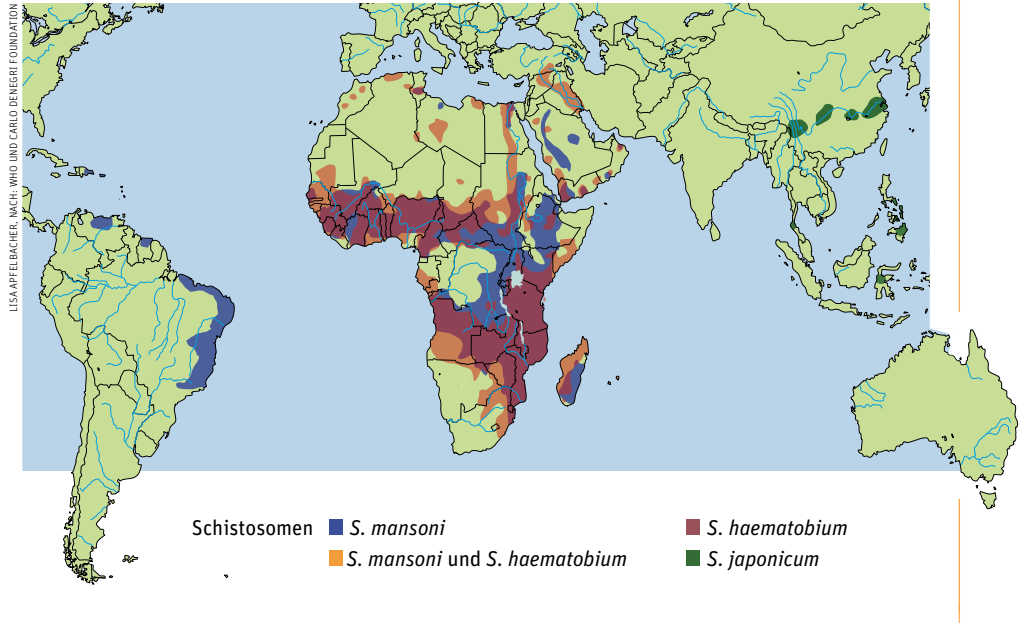


Adulte (geschlechtsreife) Schistosomen sind etwa einen Zentimeter lang. Sie wandern paarweise durch die Blutgefäße, wobei das deutlich kleinere Weibchen (unten) in der Bauchfalte des Männchens lebt. Der Name des Wurms stammt aus dem Griechischen: *schistós* bedeutet »getrennt« und *soma* »Körper«.

PHOTO RESEARCHERS, DAVID SCHARF

WO DIE PROBLEME LIEGEN

Schistosomiasis ist eine parasitäre Infektionskrankheit, die vorwiegend von drei für Menschen bedrohlichen Arten verursacht wird. Da sich die Parasiten über Wasser verbreiten, das mit Harn oder Stuhl kontaminiert ist, treten sie besonders in Gebieten mit fehlenden sanitären Einrichtungen auf. Etwa 85 Prozent der Fälle betreffen das Afrika südlich der Sahara.



INFOS

- ▶ Schistosomen stammen ursprünglich wahrscheinlich aus Asien und breiteten sich von dort nach Indien und Afrika aus. Nach Amerika gelangten sie **im Blut afrikanischer Sklaven**.
- ▶ Da die Saugwürmer keinen After haben, »verbrechen« sie die Abfallprodukte und lassen sie über die Blutbahn des Wirts abtransportieren.
- ▶ Die Reproduktionsorgane der Weibchen reifen erst im dauerhaften Paarungskontakt mit Männchen; entfernt man ein Weibchen aus der Bauchfalte des Männchens, entwickeln sich die Paarungsorgane zurück.
- ▶ Die Larven der Schistosomen konkurrieren in Schnecken oft mit anderen Parasiten, die diese Larven gern verspeisen. Das nutzen Forscher, indem sie diese Konkurrenten in Gewässer einbringen, um **die Wurmpopulationen zu dezimieren**.
- ▶ Schistosomen, die vorwiegend Wasservögel infizieren, lösen beim Menschen einen unangenehmen Juckreiz aus – auch Bade-, Zerkarien-Dermatitis oder »Weierhübel« genannt.
- ▶ Schistosomen vermehren sich in aquatisch lebenden Schnecken, wo sie Menschen anstecken können – ein **Problem für Stauseen** wie etwa den Drei-Schluchten-Damm in China (Foto).



Wirkstoffs erforderlich war – ein deutliches Zeichen für eine beginnende Resistenz.

Aus diesem Grund und weil Vorbeugung immer noch die beste Medizin ist, sind die Gesundheitsbehörden brennend an einem Impfstoff zur Bekämpfung der Parasiten interessiert. Der sollte natürlich möglichst wirksam und einfach anwendbar sein. Normalerweise werden für Impfstoffe abgetötete oder inaktivierte Erreger (Pathogene) oder bestimmte Teile eines von dem Pathogen produzierten Moleküls (oft Proteine) herangezogen. Sie sollen dem Immunsystem eine echte Infektion vorgaukeln, auf dass dieses mit Abwehrmaßnahmen reagiert: Das Immunsystem stimuliert auf eine solche Immunisierung hin Zellen, die die Moleküle der Pathogene erkennen und eliminieren. Einige der Zellen bilden danach so genannte Gedächtniszellen. Diese bleiben in steter Alarmbereitschaft und greifen bei der nächsten Infektion den Krankheitsauslöser sofort mit speziellen Antikörpern und weiteren Waffen an.

Anfangs rechneten die Forscher nicht damit, dass die Entwicklung eines Impfstoffs gegen Schistosomiasis so schwierig sei. Der Lebenszyklus des Wurms schien genug Ansatzpunkte für eine Intervention unseres Immunsystems zu bieten. Aber diese Annahme erwies sich als Trugschluss, die Impfstoffentwicklung gestaltete sich alles andere als einfach.

Dass man Schistosomen ursprünglich für einfach zu bekämpfende Parasiten hielt, lag an ihrer relativen Größe und der Tatsache, dass diese sich im Körper nicht sonderlich tarnen. Der erste Anblick eines ausgewachsenen Wurms erstaunt meine Doktoranden immer wieder. Diese jungen Biologen sind mit mikroskopisch kleinen Bakterien und Viren vertraut, die in unserem Körper leben und oft dem Angriff des Immunsystems ausweichen, indem sie sich im Innern von körpereigenen Zellen verstecken oder die Immunzellen durch massive Reproduktionsraten überfordern. Ein Virus oder Bakterium kann im Lauf einer Infektion Millionen von Nachkommen erzeugen, wenn nicht sogar Milliarden.

Schistosomen dagegen sind so groß, dass man sie mit bloßem Auge sehen kann. Ein ausgewachsener Wurm wird etwa einen Zentimeter lang. Außerdem handelt es sich bei den Würmern, die am Tag eins die Infektion auslösen, um dieselben, die noch Tage, Jahre oder Jahrzehnte später vorhanden sind. Sie vermehren sich im menschlichen Körper nicht weiter, es sei denn durch eine erneute Infektion.

Die Evolution hat den Schistosomen keine sonderlich angenehme Brutstätte zugewiesen; die Blutbahn erscheint für Parasiten nicht eben ein idealer Lebensraum. Blut ist zwar nährstoffreich, andererseits sind die Adern aber auch Patrouillenstrecken unserer Immun-

WIE DER KREISLAUF FUNKTIONIERT

Der komplizierte Lebenszyklus

der Schistosomen hat zwei Phasen: asexuelle Vermehrung als Larven in Schnecken (im Zwischenwirt) sowie Entwicklung der Adulten und deren paarungsinduzierten Eiablage in der Blutbahn des Menschen. Die Eier sind für die Auswirkungen der Infektion verantwortlich (rechte Spalte).

- 1 Eier gelangen über Urin oder Stuhl infizierter Menschen ins Süßwasser.
- 2 Aus den Eiern schlüpfen Wimperlarven, so genannte Mirazidien, und dringen in Schnecken ein.
- 3 In den infizierten Schnecken können sich die Larven vermehren und wiederholt ihre Form ändern, bis sie die charakteristische humaninfektiöse Gestalt angenommen haben.



WIE WURMEIER EINE CHRONISCHE KRANKHEIT AUSLÖSEN

Die Eier der Schistosomen schädigen den Körper, indem sie in Gewebe eindringen und eine zerstörerische Immunreaktion auslösen.

Bei Infektionen mit den Saugwurmartens *S. mansoni* und *S. japonicum* sind oft Leber und Darm von solchen Reaktionen betroffen; es kann zu blutigem Durchfall, tödlichen inneren Blutungen und möglicherweise Dickdarmkrebs kommen.

Die Eier von *S. haematobium* können die Harnwege und Nieren schädigen und unter Umständen Blasenkrebs verursachen.



Schistosomen-Ei

FOTO SCHISTOSOMEN-EI: PHOTO RESEARCHERS, NIBSC; ILLUSTRATION: DANIELA NODDI MOLNAR

zellen, selbst wenn diese aus guten Gründen die Würmer nicht attackieren. Abgesehen von ihrer Größe und Aggressivität besitzen Schistosomen noch weitere Eigenschaften, die Wege aufzeigen, wie das Immunsystem auf die Invasoren aufmerksam gemacht werden könnte, wenn die Voraussetzungen stimmen. Ein Anzeichen hierfür ist die heftige Reaktion des Körpers auf die Eier der Saugwürmer.

Sterbende Parasiten als Impfstoff

Eigentlich gibt es ja auch nichts wirklich immunologisch Unsichtbares hinsichtlich der Moleküle, aus denen der Wurm aufgebaut ist. R. Alan Wilson und seine Kollegen von der University of York in England sowie andere Forschergruppen konnten im Tiermodell zeigen, dass eine hoch dosierte Injektion mit bestrahlten, also tödlich verletzten (jedoch nicht abgetöteten) Schistosomen eine starke Immunreaktion hervorruft.

Die sterbenden Parasiten fungieren als wirksamer Impfstoff und schützen das Tier gegen einen späteren Angriff von gesunden Schistosomen. Leider ist ein vergleichbarer Ansatz zur Impfung von Menschen nicht praktikabel. Immerhin haben Tierexperimente die Hoffnung geweckt, dass sich Impfstoffe auf Basis eines einzelnen Moleküls beziehungsweise einer Mischung ausgewählter Moleküle kostengünstig und in ausreichender

Menge entwickeln lassen. Ideal wäre natürlich ein (Kombi-)Impfstoff, der sich gleichermaßen gegen alle drei humanpathogenen Wurmartens richtet, nämlich *Schistosoma mansoni*, *S. haematobium* und *S. japonicum*. Vorerst konzentrieren sich die Wissenschaftler jedoch auf die Suche nach einem Impfstoff, der zumindest eine der drei Spezies bekämpfen kann, bevor sie versuchen, alle mit einem Streich auszuschalten.

Bislang wurden zwar verschiedene Schistosomenmoleküle auf ihre Eignung als Impfstoff untersucht, der große Durchbruch blieb aber aus. Immerhin hat sich eines der Moleküle als hinreichend wirksam erwiesen, um nun in einer großen klinischen Studie der Phase III geprüft zu werden – der letzten Stufe der Wirksamkeitsprüfung am Menschen, die vor der Zulassung eines Pharmaprodukts steht. Dieser Impfstoff, entwickelt am Pasteur-Institut im französischen Lille, enthält die in *S. haematobium* exprimierte Variante eines 1987 entdeckten Proteins, die Glutathion-S-Transferase. Alle Experten hoffen nun, dass sich die Substanz als erfolgreich erweist, während die Jagd nach anderen Impfstoffkandidaten weitergeht.

Natürlich sind Erkenntnisse darüber, wie Schistosomen ihrer Entdeckung durch das Immunsystem entgehen, für die Impfstofffrage von äußerster Wichtigkeit. Die Parasiten

In Kürze

- ▶ **Schistosomen** verursachen weltweit eine Krankheit, die zu Arbeitsunfähigkeit und sogar zum Tod führen kann, dies vor allem in den Regionen südlich der Sahara.
- ▶ Trotz Behandlung kommt es regelmäßig zu **Reinfektionen**.
- ▶ Bisher gibt es **keinen wirksamen Impfstoff**. Ein Kandidat wird momentan in einer **großen klinischen Studie am Menschen** geprüft. Neue genetische Erkenntnisse nähren die Hoffnung auf die Entwicklung neuer Bekämpfungsstrategien.

ERNEUT INFIZIERT

Nur wenige Menschen entwickeln eine Immunität gegen den Wurm, Reinfektionen sind an der Tagesordnung. Denn in vielen Gebieten, wie hier in Morogoro in Tansania, fehlt es an sauberen Gewässern – etwa um die Wäsche zu waschen oder um zu baden. Nur Impfstoffe könnten hier wirklich helfen.



PHOTO: RESEARCHERS / WHO / I.D.R. ANDY CRUMP

verfügen offenbar über etliche Tricks, deren Entlarfung den Forschern verrät, warum sie für unsere Abwehr unsichtbar bleiben. So sind die Saugwürmer mit einer Vielzahl von Molekülen bewaffnet, mit denen sie das Immunsystem lahmlegen oder »blenden« können. Kalyanasundaram Ramaswamy und seine Kollegen an der University of Illinois haben beispielsweise gezeigt, dass einige Schistosomenmoleküle – zumindest im Reagenzglas – die Immunzellen an ihrer Ausbreitung hindern oder ihren Tod induzieren können.

Außerdem weisen einige der kürzlich identifizierten Gene der Schistosomen Ähnlichkeiten zu menschlichen Genen auf, die in Immunzellen aktiviert sind. Andere Gene kodieren für Rezeptoren (Andockstellen), die mit humanen Rezeptoren eng verwandt sind und Zytokine (kleine Moleküle, die die Aktivität der Immunzellen steuern) oder Hormone (die Nachrichten zwischen Zellen über größere Distanzen übermitteln können) binden. Die Vermutung liegt nahe, dass die Parasiten davon profitieren, Moleküle abzufangen, die normalerweise als Botenstoffe agieren und unserem Körper ermöglichen, auf Infektionen zu reagieren. Die Würmer nutzen ihre Rezeptoren, um die interzelluläre Kommunikation effektiv auszuspionieren. Sie sammeln Informationen über ihre Umgebung und bereiten Gegenmaßnahmen vor, noch bevor unsere Immunzellen eine Chance haben anzugreifen.

Außerdem verfügen Schistosomen über so etwas wie eine Tarnkappe: eine ungewöhnliche Hülle, die als Tegument bezeichnet wird. Die meisten Parasiten sind von einer öligen Einzelmembran umgeben. Außer der Membran trägt das Tegument sogar noch eine zweite äußere Membran, die durch ständige Umbauten dazu beiträgt, dass sich der Parasit dahinter verbergen kann. Damit bietet diese Hülle dem Wurm beim Durchwandern unserer Blutbahn beträchtlichen Schutz, in den Händen der Wissenschaftler hingegen ist sie jedoch extrem empfindlich.

Die Fragilität des Teguments macht es schwierig, selbst einfachste Fragen zu seiner Biologie zu klären, etwa aus welchen Proteinen es aufgebaut ist, oder ob irgendwelche davon aus der Oberfläche herausragen. Gerade die letzte Frage ist für Impfstoffentwickler von größtem Interesse, da sich die meisten erfolgreichen Impfstoffe gegen Proteine oder andere Moleküle richten, die sich auf der Oberfläche eines Pathogens befinden.

Wir wissen immerhin, dass diese Außenhülle sogar humane Moleküle aus dem Blut einlagern kann. So lassen sich auf der Oberfläche des Wurms zum Beispiel unsere eigenen Blutgruppenmoleküle (die die Blutgrup-

pen A, B et cetera definieren) nachweisen. Umstritten ist allerdings die Hypothese, nach der diese »gestohlenen« humanen Moleküle als Tarnung dienen und die eigenen Moleküle des Parasiten so abschirmen, dass diese für unser Immunsystem unsichtbar sind.

Jahrzehntelang bemühten sich Forscher, diesen Tarnungsoptionen des Wurms mit den klassischen Werkzeugen der Molekularbiologie zu Leibe zu rücken. Nach der Isolierung einzelner Schistosomenproteine und ihrer Gene versuchten sie, die Funktion der Proteine zu verstehen und viel versprechende Moleküle dann in Impfstoffe umzuwandeln. Dieser sorgfältige, aber zeitaufwändige Prozess kann inzwischen durch neue Technologien und Verfahren beschleunigt werden.

Mit dem Ziel vor Augen, dass sich mit einem Katalog aller Proteine des Wurms sämtliche bekannten und noch unbekannt Tricks der Würmer überwinden lassen, entziffern die Forscher derzeit das gesamte Genom des Organismus, also die komplette Sequenz der DNA, die für die Konstruktion jedes einzelnen Proteins quasi als Blaupause dient.

Zehnmal größer als das Malariagenom

Aber wie so vieles andere bei diesen Lebewesen erschien dieses Ziel anfangs unerreichbar. Zum einen haben Schistosomen mit 270 Millionen Basenpaaren (DNA-Einheiten) das größte Genom eines Parasiten, das Biologen je entzifferten. (Das Genom des Malariaparasiten *Plasmodium* ist nicht einmal ein Zehntel so groß.) Zum anderen war die Entdeckung entmutigend, dass fast die Hälfte des Genoms aus repetitiven DNA-Sequenzen besteht, deren Funktion weit gehend unbekannt ist. Repetitive DNA macht es den Forschern besonders schwer, eine komplette Gensequenz zu ermitteln und daraus proteinkodierende Abschnitte abzuleiten.

Dennoch gelang es vor Kurzem in einem internationalen Projekt unter Leitung von Philip T. LoVerde, inzwischen an der Southwest Foundation for Biomedical Research in San Antonio (Texas), das Genom von *S. mansoni* zu sequenzieren. Auf Grund der schon erwähnten repetitiven DNA-Sequenz wurden ihre einzelnen Puzzleteile bisher noch nicht zu einer kompletten Genkarte des Organismus zusammengesetzt. Trotzdem sind die Wissenschaftler davon überzeugt, alle wichtigen Informationen in den Händen zu halten; die Sequenz selbst steht zur allgemeinen Analyse online zur Verfügung (www.tigr.org/tdb/e2k1/sma1/). Parallel dazu erstellt das Chinese National Human Genome Center in Schanghai derzeit eine komplette Liste aller bei *S. japonicum* aktiven Gene.



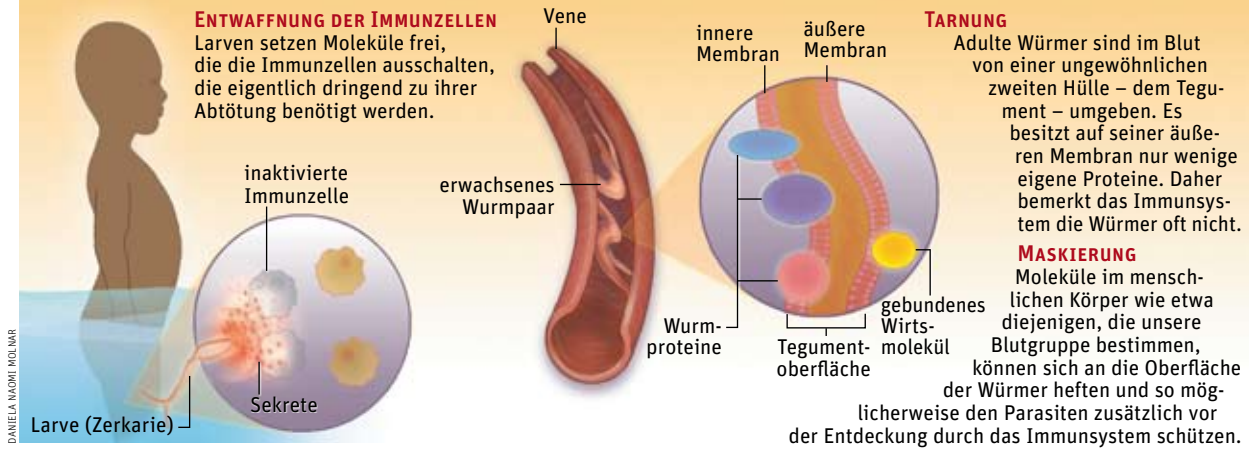
UNIVERSITÄT GIESSEN

Der Molekulargenetiker und Parasitologe Christoph Greveling erforscht an der Universität Gießen die molekularen Vorgänge der Männchen-Weibchen-Interaktion bei den Schistosomen.

WIE DIE WÜRMER UNSER IMMUNSYSTEM ÜBERLISTEN

Schistosomen haben viele Möglichkeiten, sich unserem Immunsystem zu entziehen; einige sind hier gezeigt. Zur Entwicklung wirksamer Impfstoffe müssen die Forscher wurmeigene

Moleküle finden, die eine Immunantwort auslösen, sobald sie Menschen verabreicht werden, und die nicht durch derartige Mechanismen ausgehebelt wird.



Mit dem vollständigen Schistosomengenom lässt sich nun jedes Gen vor dem Hintergrund des gesamten Organismus betrachten. So haben wir schon gelernt, dass der Parasit mehr als eine Variante mancher Proteine besitzt, die als Zielmoleküle (*targets*) einer vakzininduzierten Immunreaktion in Frage kommen; diese Varianz könnte es den Würmern erlauben, bei einem Immunangriff auszuweichen – indem sie eine nicht betroffenen Variante nutzen. Mit der Genomanalyse ist es nun möglich, gemeinsame strukturelle Merkmale von Proteinen zu identifizieren und diese dann als Grundlage eines Impfstoffs zu verwenden, so dass kein Wurm mehr dem Angriff des Immunsystems entkommt.

Alex Loukas und seine Kollegen am Queensland Institute of Medical Research in Australien haben sich die Genomsequenz auf andere Weise zu Nutze gemacht: Sie haben das Erbgut des Saugwurms auf Proteine hin durchforstet, die aus dem Tegument herausragen, so genannte Tetraspanin-Moleküle. Diese besitzen lange Segmente an hydrophoben Aminosäuren, die gut die ölige Oberfläche der äußeren Membran umspannen könnten; außerdem zwei hydrophile Proteinschlaufen, die an der Oberfläche exponiert sein könnten.

Vor Kurzem veröffentlichte das Loukas-Team Ergebnisse, nach denen eine Impfung von Mäusen mit zwei der neu identifizierten Proteine, das so genannte TSP-1 und TSP-2, bei erwachsenen Tieren die Zahl der Würmer als auch der Eier erheblich reduzierte; im Fall von TSP-2 um über die Hälfte. Weiterhin fanden die Australier Antikörper bei einigen Menschen, die vermutlich resistent gegen

Schistosomen waren, weil sie sich trotz nachweislicher jahrelanger Exposition nicht infiziert hatten. Bei diesen Menschen entdeckten die Forscher im Blut Antikörper gegen TSP-2, wohingegen sie bei chronisch infizierten Patienten keine Antikörper nachweisen konnten. Das lässt vermuten, dass die molekulare Erkennung von TSP-2 die Komponente einer seltenen natürlichen Immunität gegen Schistosomen darstellt und das Protein daher für einen Impfstoff nützlich sein könnte.

Die Arbeiten der Australier sind auch noch aus einem zweiten Grund ermutigend. Man könnte sich ja darüber wundern, dass Moleküle, die bei einer natürlichen Infektion keine Immunreaktion im menschlichen Körper auslösen, dies tun, wenn sie als Impfstoff verabreicht werden. Wie Loukas und andere in Mäuseexperimenten zeigen konnten, kommt es offenbar darauf an, wie die Moleküle dem Immunsystem präsentiert werden. So können sie tatsächlich manchmal eine starke Schutzwirkung auslösen.

Parallel zur Untersuchung des Genoms arbeiten Forscher daran, die Funktion der Proteine zu verstehen, die der Parasit herstellt. Damit lassen sich geeignete Impfstoffkandidaten identifizieren. Es kann sich um Moleküle handeln, die der Wurm zum Überleben oder zur Eiablage im menschlichen Körper benötigt.

Denn eine Immunreaktion, die sich gegen genau diese Moleküle richtet, sollte im Prinzip den Parasiten abtöten oder zumindest seine Eiproduktion beeinträchtigen. Solche Proteinfunktionen können uns auf die richtige Spur führen. So stießen vor einigen Jahren Charles Shoemaker von der Tufts Cummings

EIN POSITIVER NEBENEFFKT?

Zumindest in Tierexperimenten können Schistosomen eine Reihe von Erkrankungen verhindern oder mildern: etwa die Autoimmunkrankheit Morbus Crohn, eine beim Menschen auftretende chronisch entzündliche Darmerkrankung (Kolitis). Joel Weinstock, heute an der Tufts University School of Medicine, konnte mit seinen Kollegen an Mäusen mit Kolitis zeigen, dass diese nach Injektion von Schistosomeneiern weniger unter Schwellungen im Darm litten und **besser vor einer tödlichen Entzündung geschützt waren** als nicht behandelte Mäuse.

Offensichtlich lösen Eiproduktion und Morbus Crohn diametral entgegengesetzte Immunreaktionen aus. Bei diesem immunologischen Tauziehen hat die von den Eiern ausgelöste Reaktion die Oberhand. Wissenschaftler suchen nun nach den dafür verantwortlichen Molekülen, die sich als wirksame Medikamente bei Autoimmunerkrankungen erweisen könnten.

KANDIDATEN FÜR IMPFSTOFFE



Schistosomenpaar

PHOTO RESEARCHERS, NIBSC

Der Impfstoffkandidat, der sich im fortgeschrittensten Teststadium befindet, ist das Schistosomenprotein Glutathion-S-Transferase (Sm28GST). In einigen im Tiermodell durchgeführten Studien mit diesem Wirkstoffkandidaten überlebten weniger Würmer als üblich. Diejenigen, die überlebten, produzierten weniger Eier.

Kürzlich wurden weitere Schistosomenproteine mit verheißungsvollem Impfstoffpotenzial identifiziert. Darunter die Tetraspanine, die bei erwachsenen Würmern aus der äußeren Membran herausragen und so hervorragende Ziele für die Abwehr darstellen können. In ersten Studien sorgten Tetraspanin-Impfstoffe für einen gewissen Schutz vor Infektionen.

Weitere Kandidaten sind Nährstofftransporter, die zur Nährstoffaufnahme in direktem Kontakt zum Wirtsblut stehen müssen und demnach dem Immunsystem zugänglich sein müssten. Auch zeigen Moleküle Impfstoffpotenzial, die von den Parasiten abgegeben werden, um die Infektion aufrechtzuerhalten – zum Beispiel Proteine, die Wirtsmoleküle abbauen oder die antiparasitäre Immunantwort abschwächen.

genen. Aber mein Labor und das von Tim Yoshino von der University of Wisconsin-Madison haben großen Nutzen aus dem Buch der Nobelpreisträger von 2006 gezogen, Andrew Z. Fire von der Stanford University und Craig C. Mello von der University of Massachusetts Medical School in Worcester. Wir haben die dort beschriebene RNA-Interferentechnik zur Stilllegung von Schistosomen-Genen adaptiert (siehe »Zensur in der Zelle« im Spektrum-Dossier »Das neue Genom«, 1/2006, S. 42). Von diesem Ansatz erhoffen wir uns die Gene der von den Schistosomen ausgeschiedenen Proteinen abzuschalten, um ihre Funktion aufzuklären.

Bald werden Impfstoffforscher über weitere neue Werkzeuge verfügen, mit denen sich Funktionen von Schistosomenproteinen entschlüsseln lassen: wo sie lokalisiert sind, wann sie im Lebenszyklus des Parasiten hergestellt werden. In erster Linie zu nennen sind hier Paul Brindley von der Tulane University in New Orleans, Christoph Grevelding von der Universität Gießen sowie Edward Pearce von der University of Pennsylvania in Philadelphia. Sie haben Methoden zur Herstellung transgener Schistosomen entwickelt, mit denen es möglich sein wird, ausgewählte Proteine des Parasiten mit unterschiedlichen Markern (*tags*) zu versehen. Damit sollten die Wissenschaftler die Produktion und Lokalisation der Proteine problemlos verfolgen können. Neben anderen Vorteilen könnte diese Technik die Frage klären, welche Proteine normalerweise am Aufbau des Teguments beteiligt sind und aus dessen Oberfläche herausragen. Einen anderen Ansatz verfolgt Karl Hoffmanns Labor an der University of Cambridge. Dort werden so genannte DNA-Mikroarrays (die *Genchips*) entwickelt. Sie sollen jetzt entschlüsseln, welche Gene oder Genrepertoires in jedem einzelnen Entwicklungsstadium der Schistosomen an- oder abgeschaltet werden.

All diese neuen Ansätze können weit über das Impfstoffproblem hinaus zu Anwendungen führen. Mit der Kenntnis des gesamten Genoms sollten sich auch Proteine identifizieren lassen, die nur bei Schistosomen vorkommen und die sie für ihr Überleben benötigen; damit könnten Medikamente entwickelt werden, die gegen genau diese Proteine gerichtet sind und ausschließlich die gefährlichen Saugwürmer vernichten, ohne den Patienten zu schädigen.

Allerdings wird es noch ein steiniger Weg sein, bis ein wirksamer Impfstoff eingesetzt werden kann. Aber es bleibt spannend zu sehen, wie sich die Schistosomenforschung heute in Richtungen entwickelt, die vor ein paar Jahren noch undenkbar waren. <

School of Veterinary Medicine und ich auf bestimmte Proteine, die uns als Impfstoffkomponenten geeignet erschienen, da sie an der Aufnahme von Nährstoffen (Zuckern und Aminosäuren) beteiligt sind. Die Schistosomen schlingen diese Substanzen aus dem Wirtsblut nicht nur in ihren Mund, sondern nehmen sie auch über ihr Tegument auf – und hierfür brauchen sie Transportproteine. Wir wissen, dass die Moleküle nur dann korrekt arbeiten, wenn sie in direktem Kontakt mit dem Blut ihres Wirts stehen. Damit bilden sie ein attraktives Ziel für Impfstoffe. Denn eine gegen sie gerichtete Immunreaktion sollte sowohl den Parasiten selbst schädigen (die Proteine sind auf seiner Oberfläche lokalisiert) als auch seine Fähigkeit reduzieren, Nährstoffe aus dem Blut aufzunehmen.

Überlegungen zur Funktion haben uns auch darauf gebracht, einen Impfstoff aus bestimmten Proteinen herzustellen, die der Parasit abgibt. Auf den ersten Blick mag das abstrus wirken: Eine Immunantwort, die sich gegen solche Moleküle richtet, würde ja buchstäblich ihr Ziel verpassen, da diese Moleküle schließlich bereits vom Wurm wegschwimmen. Wenn jedoch Komponenten des Immunsystems an solche Faktoren binden und damit die Sekrete davon abhalten, wichtige Aufgaben für den Parasiten zu erfüllen, könnte der Impfstoff die Überlebenschancen des Wurms senken. Ein naheliegender nächster Schritt wäre, die für die abgesonderten Stoffe verantwortlichen Gene eins nach dem anderen auszuschalten, um festzustellen, welches am dringendsten benötigt wird und demnach der beste Kandidat für ein solches Vorgehen wäre. Bis vor Kurzem gab es noch keine Standardwerkzeuge zum Ausschalten von Schistosomen-



Patrick Skelly hat an der Australian National University in Canberra promoviert. Er ist Assistant Professor am Department für Biomedical Sciences der Tufts University in Medford (Massachusetts) und Präsident der New England Association of Parasitologists.

Grevelding, C. G.: Transgenic Flatworms. In: Maule, A. G. et al. (Hg.): Parasitic Flatworms. CABI, Wallingford UK, S. 149–166, 2006.

McManus, D. P., Loukas, A.: Current Status of Vaccines for Schistosomiasis. In: Clinical Microbiology Reviews 21(1), S. 225–242, Januar 2008.

Skelly, P. J., Wilson, R. A.: Making Sense of the Schistosome Surface. In: Advances in Parasitology 63, S. 185–284, 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983269.

Sollen wir künftige Generationen ihrem Schicksal überlassen und angesichts des Klimawandels nur unser eigenes Wohl im Auge haben?

Die Ethik des KLIMAWANDELS

Als Verursacher der Erderwärmung müssen wir unser eigenes Wohlergehen gegen die Gefahr abwägen, dass sich durch unser Tun die Lebensbedingungen unserer Enkel gravierend verschlechtern. Das verlangt nicht nur ökonomischen Sachverstand, sondern auch gewissenhafte ethische Betrachtungen.

Von John Broome

Wie sollen wir mit dem Klimawandel umgehen? Das ist eine zutiefst ethische Frage. Die Natur- und Wirtschaftswissenschaften können dabei helfen, die Ursachen und Folgen der Erderwärmung aufzudecken. In ihr Ressort fällt es auch, mögliche Gegenmaßnahmen vorzuschlagen. Aber was wir wirklich tun sollen, hängt letztlich von ethischen Erwägungen ab.

Zwar gehören nicht alle Fragen nach dem richtigen Handeln in den Bereich der Ethik. Wenn es etwa darum geht, wie ich einen Golfclub führen soll, spielen moralische Überlegungen keine Rolle. Die Klimafrage hat jedoch auf jeden Fall eine ethische Komponente; denn jeder ernsthafte Vorschlag muss zwischen widerstreitenden Interessen unterschiedlicher Personen vermitteln. Maßnahmen zum Schutz des Klimas erfordern, dass einige heute lebende Menschen – vor allem die besser gestellten – den Ausstoß von Treibhausgasen verringern, um künftige Generationen vor der Gefahr einer trostlosen Existenz in einer immer heißer werdenden Welt zu bewahren. Und bei Interessenskonflikten sind Fragen nach der richtigen Handlungsweise immer eine Sache der Ethik.

Der Klimawandel wirft eine ganze Reihe solcher Fragen auf. Wie sollen wir, die wir heute leben, das Wohl künftiger Generationen, die doch wahrscheinlich über mehr materielle Güter verfügen werden, im Vergleich zu unseren eigenen Lebensbedingungen einschätzen? Viele Menschen, einige schon auf der Welt und andere noch ungeboren, werden an den Folgen des Klimawandels sterben. Ist jeder Tod gleich schlecht, oder zählt er weniger, wenn die Person erst in ferner Zukunft stirbt? Viele Menschen werden umkommen, bevor sie Nachwuchs haben. Ist es verantwortlich, diese ungeborenen Kinder um ihre Lebenschance zu bringen? Begehen die reichen Nationen durch die Emission von Treibhausgasen ein Unrecht gegenüber der armen Weltbevölkerung? Wie soll man die geringe, aber doch reelle Gefahr in Ansatz bringen, dass der Klimawandel zu einer globalen Katastrophe führt?

Viele ethische Probleme lassen sich mit etwas gesundem Menschenverstand lösen. Wirklich komplizierte philosophische Überlegungen sind selten nötig. Was den Klimawandel angeht, haben wir alle bis zu einem gewissen Grad das Rüstzeug, die daraus resultierenden ethischen Fragen anzugehen. So lautet ein elementares moralisches Prinzip, welches die allermeisten Menschen anerkennen, dass niemand sich einen Vorteil verschaffen sollte, indem er einer anderen Person Schaden zufügt. Selbstverständlich lässt es sich manchmal nicht vermeiden, andere zu schädigen, und

In Kürze

- ▶ Unter den **Folgen des Klimawandels** haben ganz überwiegend künftige Generationen zu leiden. Allerdings werden sie, sofern die Weltwirtschaft weiter wächst, auch reicher sein als wir heute.
- ▶ Unsere Generation muss mit Hilfe der Expertise von Ökonomen entscheiden, ob sie ihr Möglichstes zur **Vermeidung künftiger Schäden** tut oder die reicheren nachfolgenden Generationen den Schlamassel allein ausbaden lässt.
- ▶ Ökonomen können es nicht vermeiden, bei der Formulierung ihrer Empfehlungen **ethische Prämissen** einfließen zu lassen.
- ▶ Die Gefahr, dass der Klimawandel eine **globale Katastrophe** verursacht – und sei sie noch so gering –, birgt zusätzlich ein schweres ethisches Dilemma.

Auf wie viel müssen wir verzichten, um das Leben von Menschen in der Zukunft zu verbessern, die vermutlich reicher sind als wir?

gelegentlich macht man es unabsichtlich. Aber wann immer das geschieht, sollte man dem Betroffenen einen Ausgleich zugestehen.

Der Klimawandel wird Schäden verursachen. Hitzewellen, Stürme und Überschwemmungen werden viele Menschen töten und noch weitaus mehr in Mitleidenschaft ziehen. Opfer fordern werden auch tropische Krankheiten, die sich bei zunehmender Erwärmung ausbreiten. Änderungen in der Verteilung, Häufigkeit und Stärke von Niederschlägen werden lokal zu einer Verknappung von Nahrungsmitteln und zu Engpässen bei der Trinkwasserversorgung führen. Es wird Völkerwanderungen mittelloser Flüchtlinge geben, die durch den Anstieg des Meeresspiegels und andere klimabedingte Veränderungen ihre Heimat verloren haben.

Bislang liegen nur wenige Zahlen über die Höhe der Schäden durch den Klimawandel vor. Allerdings liefern manche Statistiken Hinweise auf die Größenordnung. So hat die Hitzewelle des Jahres 2003 in Europa schätzungsweise 35000 Menschen das Leben gekostet. Von den Überflutungen 1998 in China waren 240 Millionen Menschen betroffen. Laut Weltgesundheitsorganisation dürfte bereits im Jahr 2000 die Zahl der jährlichen To-

desopfer durch den Klimawandel mehr als 150000 betragen haben.

Jeder von uns verursacht täglich Emissionen von Treibhausgasen. Autofahren, die Nutzung von Elektrizität oder der Kauf von Gütern, deren Herstellung oder Transport Energie benötigt – all diese Aktivitäten führen zum Ausstoß von Kohlendioxid, das zum Klimawandel beiträgt. In diesem Sinne schädigt alles, was wir zu unserem eigenen Wohltun, andere Menschen.

Nur eine Kosten-Nutzen-Frage?

Vielleicht können wir gegenwärtig gar nichts daran ändern und wussten in der Vergangenheit nicht, was wir anrichten. Aber das oben erwähnte elementare ethische Prinzip verlangt von uns, zu versuchen, unser Verhalten zu ändern und die Personen, die wir schädigen, abzufinden. Zudem lehrt es uns, dass Kosten-Nutzen-Gesichtspunkte zwar von Bedeutung, aber nicht allein entscheidend sind.

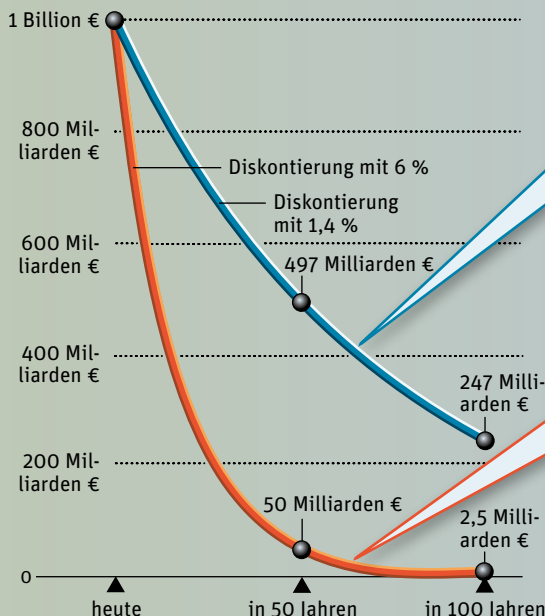
Nehmen Sie an, Sie feiern eine Party bis zum Morgengrauen und Ihr Nutzen und der Ihrer Freunde ist für Sie größer als der Schaden Ihres Nachbarn, der diese Nacht nicht schlafen kann. Das gibt Ihnen nicht das moralische Recht zu dieser Party. Ähnliches gilt bei

WAS IST UNS DIE ZUKUNFT WERT?

Ökonomen bewerten künftige Güter in der Regel niedriger als gegenwärtige. Aber wie groß soll der Abzug oder Diskont sein? Beträgt der Wertminderungssatz sechs Prozent pro Jahr, dann sind Güter, die ich in einem Jahr für eine Milliarde Euro bekomme, heute nur 940 Millionen wert (genauer 941,8 Millionen, da die Wirtschaftswissenschaftler stetig diskontieren). Kürzlich kamen die Ökonomen Nicholas Stern und William Nordhaus auf der Basis unterschiedlicher Wertminderungssätze zu völlig anderen Schlussfolgerungen darüber, welche Opfer wir im Rahmen des Klimaschutzes zu Gunsten künftiger Generationen bringen sollten.

AUSWIRKUNGEN DER DISKONTIERUNG AUF DEN WERT KÜNFTIGER GÜTER

Die Grafik zeigt, wie der Gegenwartswert von Gütern, die dereinst eine Milliarde Euro kosten werden, vom Zeitpunkt, an dem sie zur Verfügung stehen, und vom angenommenen Wertminderungssatz abhängt.



Der von Nicholas Stern verwendete Wertminderungssatz von 1,4 Prozent gewichtet das Wohlbefinden künftiger Generationen relativ hoch. Güter, die man in 100 Jahren für eine Billion Euro bekommt, sind demnach heute 247 Milliarden wert. Laut Stern wäre es deshalb ein Gebot der Fairness gegenüber unseren Nachfahren, ein Prozent der weltweiten jährlichen Wertschöpfung, also rund 400 Milliarden Euro, für die Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen aufzuwenden.



Mit einem Wertminderungssatz von sechs Prozent sorgt sich William Nordhaus wesentlich weniger um das Wohlbefinden künftiger Generationen als Stern. Güter im Wert von einer Billion Euro in 100 Jahren veranschlagt er heute nur mit 2,5 Milliarden. Die Kosten umfassender Maßnahmen zur Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen lassen sich da kaum rechtfertigen.



einem Industrieprojekt, das in der nahen Zukunft Vorteile bringt, aber Treibhausgase ausstößt, die Menschen Jahrzehnte später schädigen. Nehmen wir wieder an, dass der Nutzen dieses Projekts seine langfristigen nachteiligen Folgen überwiegt. Auch daraus folgt noch nicht, dass es umgesetzt werden sollte. Wer den Nutzen hat, kann ihn nicht einfach gegen die Schäden der anderen aufrechnen.

Auch wenn die Abwägung von Kosten und Nutzen die Frage, was wir angesichts des Klimawandels tun sollen, nicht abschließend beantworten kann, kommt ihr allerdings eine wichtige Rolle zu. Die Kosten der Reduktion von Treibhausgasen sind das Opfer, das die heutige Generation zu erbringen hat, um den Klimawandel einzudämmen. Wir müssen unsere Häuser besser isolieren und dürfen nicht so viel reisen, nicht so viel Fleisch essen und generell nicht so verschwenderisch leben. Der Nutzen des Klimaschutzes ist die Bewahrung besserer Lebensumstände für künftige Generationen: Sie werden weniger unter der Ausbreitung von Wüsten, unter dem Verlust ihrer Heimat durch den Anstieg des Meeresspiegels oder unter Überflutungen, Hungersnöten und der allgemeinen Zerstörung der Natur leiden.

Die Abwägung des Nutzens einiger Menschen gegen die Kosten anderer ist eine Sache der Ethik. Kosten-Nutzen-Analysen sind allerdings auch eine Spezialität der Ökonomen. Sie verfügen über ausgefeilte Methoden dafür, die sich in komplexen Situationen anwenden lassen. Deshalb können die Wirtschaftswissenschaften bei der Beurteilung der Erderwärmung der Ethik helfend zur Seite stehen.

In dem 2006 vorgelegten »Stern-Report zur Ökonomik des Klimawandels« haben Nicholas Stern und seine Kollegen vom britischen Finanzministerium die ethischen Hintergründe des Problems berücksichtigt. Unter dieser Prämisse kommen sie beim Vergleich von Kosten und Nutzen des Klimawandels zu dem Ergebnis, dass die Vorteile einer Verringerung der Emission von Treibhausgasen die Kosten bei Weitem übersteigen. Ihre Untersuchung hat bei Wirtschaftswissenschaftlern heftige Kritik hervorgerufen. Diese wenden vor allem ein, dass ökonomische Schlussfolgerungen nicht auf ethischen Prämissen beruhen sollten. Außerdem ergaben Studien von anderen Wirtschaftswissenschaftlern wie William Nordhaus von der Yale University in New Haven (Connecticut), dass rasches Handeln keineswegs nötig sei.

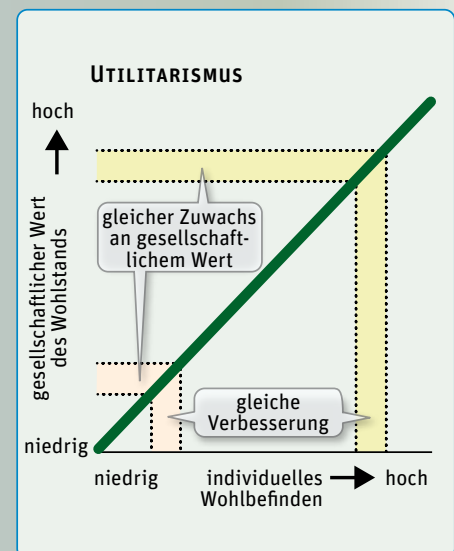
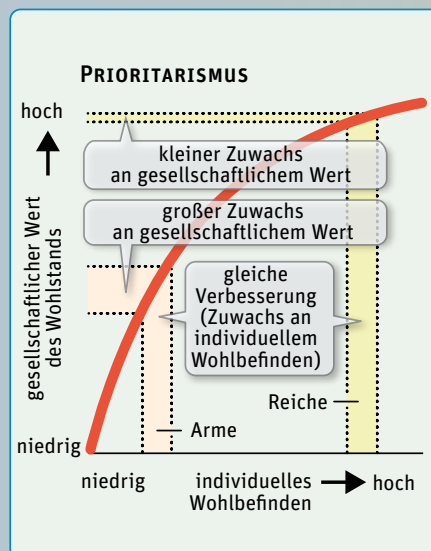
Beide Einwände hängen zusammen. Stern kommt vor allem deshalb zu anderen Schlussfolgerungen als Nordhaus, weil er aus ethischen Gründen in seiner Studie einen viel niedrigeren Wertminderungs- oder Diskontie-



Auf der kleinen Insel Sarichef im Nordwesten Alaskas hat die rasche Erderwärmung eine verheerende Erosion der Küste bewirkt. Grund ist das Auftauen der Permafrostböden und der Rückgang des Meereises, das als Bollwerk gegen Sturmfluten wirkte. Die Bewohner des Eskimodorfes Shishmaref planen deshalb notgedrungen die Aufgabe ihrer Ortschaft und den Umzug auf das Festland.

WIDERSTREIT DER PHILOSOPHEN

Philosophische Theorien unterscheiden sich darin, wie sie den gleichen Gewinn bei Reichen oder Armen gesellschaftlich bewerten. Für Anhänger des Prioritarismus zählt der Zuwachs an Wohlbefinden bei Bedürftigen mehr. Der Utilitarismus stuft ihn bei Reichen und Armen dagegen gleich hoch ein.



Ist der Tod eines Kindes im Jahr 2109 weniger schlimm als der eines Kindes heute?



runungssatz (*discount rate*) verwendet. Ökonomen billigen Gütern, die erst in der Zukunft zur Verfügung stehen, im Allgemeinen einen geringeren Wert zu als solchen, über die man heute schon verfügen kann: Sie diskontieren sie. Der Abzug fällt dabei umso höher aus, je weiter in der Zukunft ein Gut zu haben ist. Der Diskontierungssatz gibt an, wie schnell sich der Wert eines Gutes mit der Zeit vermindert (Kasten auf S. 58). Nordhaus schätzt ihn auf 6 Prozent pro Jahr, Stern auf nur 1,4 Prozent.

Damit bewertet Nordhaus Güter, die in 100 Jahren einen Wert von einer Billion Euro haben, heute gerade einmal mit 2,5 Milliarden. Für Stern dagegen sind die gleichen Güter im Jahr 2109 gegenwärtig 247 Milliarden Euro wert. Demnach hat in seiner Analyse jedes Kosten- oder Nutzenniveau in 100 Jahren ein 100-mal größeres Gewicht als in der Studie von Nordhaus.

Die Differenz im Wertminderungssatz der beiden Ökonomen reicht aus, um die Unterschiede in ihren Schlussfolgerungen zu erklären. Der größte Teil der Kosten von Maßnahmen gegen den Klimawandel fällt in naher Zukunft an, weil die heutige Generation ihren Konsum einschränken muss. Der Nutzen dagegen kommt überwiegend erst in 100 bis 200 Jahren zum Tragen. Weil Stern diesen zukünf-

tigen Nutzen in heutigem Geld höher ansetzt als Nordhaus, kann er höhere gegenwärtige Ausgaben für den Klimaschutz rechtfertigen als dieser.

Warum diskontiert man überhaupt zukünftige Güter – seien es solche materieller Art wie Autos und Nahrungsmittel oder Dienstleistungen wie Haare schneiden und Zähne ziehen? Die meisten Ökonomen gehen von einem kontinuierlichen Wachstum der Weltwirtschaft aus. Zukünftige Generationen sollten demnach im Durchschnitt über mehr Güter verfügen als wir. Je mehr Güter man aber hat, desto geringer ist der relative Wert aller noch hinzukommenden. Deshalb scheint es ökonomisch vernünftig, sie mit einem Abschlag zu versehen. Die Einrichtung eines Badezimmers im Haus verbessert die Lebensqualität erheblich. Ein zweites Bad ist zwar schön, steigert das Wohlbefinden aber nicht mehr im gleichen Maß. Besitztümer haben somit »einen abnehmenden Grenznutzen«, wie Ökonomen sagen.

Womöglich gibt es noch einen zweiten, rein ethischen Grund, Güter, die relativ reiche Personen erhalten, zu diskontieren. Gemäß dem so genannten Prioritarismus sollte die Gesellschaft einen bestimmten Nutzenzuwachs – verstanden als Steigerung des individuellen Wohlbefindens – für eine reiche Person geringer veranschlagen als für eine ärmere.

WIE BEWERTET MAN EINE GLOBALE KATASTROPHE?

Der Klimawandel wirft noch wesentlich schwierigere und wichtigere ethische Fragen auf als die Wahl des richtigen Wertminderungssatzes. Ein Problem ist das mögliche Auftreten einer globalen Katastrophe. Die Berichte des Weltklimarats enthalten verschiedene Szenarien, wie sich die globale Durchschnittstemperatur ändert, wenn die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre einen Wert erreicht, der 550 ppm (millionstel Volumenanteile) Kohlendioxid entspricht – ein Niveau, das in den nächsten Jahrzehnten erwartet wird. Nach den meisten dieser Projektionen besteht eine Wahrscheinlichkeit von mindestens fünf Prozent, dass die globale Mitteltemperatur um acht Grad Celsius ansteigt.

Eine so drastische Erwärmung birgt ein gewisses Risiko – auch wenn sich das nicht genau quantifizieren lässt –, dass ein großer Teil der Menschheit zu Grunde geht oder unsere Art sogar völlig ausgelöscht wird. Dieser Schaden wäre so schlimm, dass er selbst bei Multiplikation mit seiner sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit alle anderen negativen Folgen des Klimawandels um Größenordnungen übersteigen würde. Ihn zu bewerten ist deshalb ein drängendes, aber auch extrem schwieriges ethisches Problem.

Dabei muss man versuchen, den ideellen Schaden durch den vorzeitigen Tod eines Menschen in Euros zu bemessen. Das mag hartherzig klingen, aber die Bewertung eines Menschenlebens dient heute schon als wichtige Grundlage politischer Entscheidungen. So

hat die Weltgesundheitsorganisation einen Indikator für das Leid entwickelt, das Menschen durch Krankheiten bis hin zum vorzeitigen Tod widerfährt. Sie verwendet ihn auch schon dafür, die Schäden des Klimawandels abzuschätzen.

Aber man kann die Überlegungen noch weiter treiben. Wenn die Menschheit ausstirbt oder großenteils zu Grunde geht, werden Milliarden von Menschen nicht geboren, die andernfalls das Licht der Welt erblickt hätten. Auch das wäre schlimm. Falls allerdings die Nichtexistenz einen Schaden darstellt, ist es einer, den niemand erleidet, da ja diejenigen, die er betrifft, gar nicht erst geboren wurden. Kann es so einen Schaden überhaupt geben?

Einige Philosophen verneinen das. Sie sind der festen Überzeugung, dass das Aussterben oder der Kollaps der Menschheit keinen anderen Schaden verursacht als den des vorzeitigen Todes. Andere Denker sehen im Verlust an zukünftigen Menschen dagegen ein sehr großes Übel. Falls sie Recht haben, müsste man diesen Verlust quantifizieren.

Die Bewertung von realen und potenziellen Menschenleben ist eine der schwierigsten und strittigsten Fragen der praktischen Philosophie. Aber solange es darauf keine befriedigende Antwort gibt, ist es unmöglich, die schädlichen Folgen des Klimawandels abschließend zu beurteilen.

Damit bevorzugt diese ethische Theorie schlechter gestellte Personen. Ihr steht der Utilitarismus gegenüber, der dafür plädiert, einen Nutzenszuwachs immer gleich zu bewerten – unabhängig davon, wem er zugutekommt. Die Gesellschaft sollte nur danach streben, die Gesamtwohlfahrt aller Mitglieder zu maximieren – ohne Rücksicht darauf, wie die Reichtümer zwischen den einzelnen Personen verteilt sind (Kasten auf S. 59).

Eine reichere Welt von morgen

Wie hoch also sollte der Wertminderungssatz sein? Was bestimmt die Rate, mit der sich der Nutzen zukünftigen Konsums pro Jahr verringert? Zunächst einmal spielen einige nicht ethische Faktoren eine Rolle. Dazu gehört insbesondere die Wachstumsrate der Wirtschaft, die angibt, in welchem Maße künftige Generationen im Durchschnitt besser gestellt sind als wir und somit weniger zusätzlichen Nutzen aus weiteren Gütern ziehen. Je höher das Wirtschaftswachstum, desto höher sollte der Wertminderungssatz sein.

Ethische Gesichtspunkte sind aber auch zu berücksichtigen. Wie soll der Wohlstand unserer reicheren Nachfahren im Vergleich zu unserem bewertet werden? Falls man den Prioritaristen folgt, müsste er weniger stark ins Gewicht fallen, weil die kommenden Generationen eben reicher sind. Gemäß der utilitaristischen Theorie sollte man den Wohlstand zukünftiger und heute lebender Menschen dagegen gleich gewichten. Der Prioritarismus fordert also einen hohen Wertminderungssatz, der Utilitarismus einen niedrigeren.

Das hat eine paradoxe, ja geradezu fatale Konsequenz. Die meisten Debatten über Ungleichheit finden in oder zwischen relativ reichen Staaten statt, die sich Gedanken darüber machen, welche Opfer sie für die vergleichsweise armen Nationen bringen sollten. Wenn wir aber künftige Generationen betrachten, dann geht es darum, auf was wir, die relativ Armen, zu Gunsten unserer vergleichsweise reichen Nachfahren verzichten sollten. Der Prioritarismus verlangt normalerweise mehr von den entwickelten Staaten als der Utilitarismus. Mit Blick auf die Zukunft fordert er weniger.

Die Rolle der zeitlichen Distanz

Es gibt noch eine weitere ethische Überlegung, die sich auf die Wahl des Wertminderungssatzes auswirkt: Manche Philosophen sind der Meinung, dass uns mehr an denen gelegen sein sollte, die uns zeitlich nahe stehen, als an denjenigen in ferner Zukunft. In diesem Fall sollte der künftige Wohlstand allein wegen der großen zeitlichen Distanz diskontiert werden.

Diese Position wird als reine Zeitpräferenz bezeichnet. Daraus folgt beispielsweise, dass der Tod eines zehnjährigen Kindes in 100 Jahren eher in Kauf zu nehmen wäre als der eines zehnjährigen heute. Nach Auffassung anderer Philosophen sollten wir dagegen zeitlich neutral sein, weil der bloße Zeitpunkt, zu dem ein Schaden auftritt, nicht für seine Bewertung von Belang sein kann. Die reine Zeitpräferenz steht für einen relativ hohen, die zeitliche Neutralität für einen niedrigeren Wertminderungssatz.

Um diese entscheidende Größe zu ermitteln, müssen die Ökonomen also zumindest zwei ethische Fragen beantworten. Halten sie es mit dem Prioritarismus oder dem Utilitarismus? Folgen sie der Theorie einer reinen Zeitpräferenz oder bleiben sie zeitlich neutral?

Profunde Antworten darauf lassen sich leider nicht eben mal schnell mit dem gesunden Menschenverstand finden; sie tangieren komplexe, tiefgründige Probleme der Moralphilosophie. Deren Vertreter nähern sich solchen Fragestellungen, indem sie eine streng formale Analyse mit intuitiven Überlegungen verbinden. Wegen dieser intuitiven Komponente, die natürlich subjektiv gefärbt ist, liefern moralphilosophische Betrachtungen selten eindeutige Ergebnisse. Als Philosoph vermag ich nicht mehr zu tun, als nach bestem Wissen

Ausbleibende Niederschläge und das Ableiten von Flüssen zur Bewässerung haben in Chinas Region Minquin diesen ehemaligen Stausee komplett ausgetrocknet.



PETER ARNOLD INC. / ISTOCKPICTURES



John Broome ist Professor für Moralphilosophie an der University of Oxford (England). Zuvor hat er an der University of Bristol Wirtschaftswissenschaften gelehrt. Er ist Mitglied der British Academy und der Royal Society of Edinburgh sowie auswärtiges Mitglied der Schwedischen Akademie der Wissenschaften. Aus seiner Feder stammen die Bücher »Weighing Goods«, »Counting the Cost of Global Warming«, »Ethics out of Economics« und »Weighing Lives«.

Climate Change 2007. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2007.

Harsanyi, J. C.: Rational Behavior and Bargaining Equilibrium in Games and Social Situations. Cambridge University Press, 1977.

Nordhaus, W. D.: Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change. MIT Press, 1994.

Stern, N. et al.: Stern Review on the Economics of Climate Change. Cambridge University Press, 2007.

Wetzman, M. L.: A Review of the Stern Review of the Economics of Climate Change. In: Journal of Economic Literature 45(3), S. 703–724, September 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983273.

und Gewissen zu urteilen und dieses Urteil auf die Argumente zu stützen, die mir nach gründlicher Analyse am stichhaltigsten erscheinen. Aus Platzgründen kann ich meine Überlegungen hier nicht im einzelnen darlegen. Ich habe sie im 10. Kapitel meines Buchs »Weighing Goods« (Blackwell, 1991) und in Abschnitt 4.3 von »Weighing Lives« (Oxford, 2004) erörtert. Hier muss ich mich auf die Schlussfolgerungen beschränken. Demnach sind der Prioritarismus und die reine Zeitpräferenz unangebracht.

Marktzens als Wertminderungssatz?

Stern kommt zu den gleichen ethischen Schlussfolgerungen. Da Utilitarismus und zeitliche Neutralität beide einen niedrigen Wertminderungssatz nahe legen, hält er vor dem Hintergrund seiner ökonomischen Modellierung 1,4 Prozent für angemessen. Daraus ergibt sich, wie gesagt, dass wir weit reichende Maßnahmen ergreifen sollten, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. Kritiker lehnen diesen ethischen Ansatz jedoch ab und halten Stern vor, dass seine Politikempfehlung auf einem zweifelhaften Fundament ruht. Die meisten Ökonomen sind gegen jegliche explizite ethische Erwägung beim Bestimmen des Wertminderungssatzes. Um ihn festzulegen, nehmen sie einfach die Zinssätze des Geldmarktes, auf dem heutiges gegen künftiges Geld getauscht wird.

Lässt sich das rechtfertigen? Ich denke, nein. Der Wert eines Guts hängt von Angebot und Nachfrage ab. In die Nachfrage aber gehen auch Vorlieben ein, die dadurch auf den Märkten sichtbar werden. Zum Beispiel beeinflussen Geschmackspräferenzen die relative Bewertung von Äpfeln und Orangen, was sich auf deren Preis auswirkt. Aber der Wert, der dem Wohlbefinden zukünftiger Generationen beigemessen werden sollte, ist keine Geschmackssache, sondern Ergebnis eines ethischen Urteils, wie wir oben gesehen haben.

Offenbart der Geldmarkt vielleicht automatisch die ethischen Urteile der Menschen über das künftige Wohlbefinden? Ich bezweifle das. Die Erfahrung lehrt, dass Personen, die Geld leihen und verleihen, oft ihr künftiges Wohl weniger stark gewichten als ihr momentanes. Zwar sind die meisten von uns vermutlich nicht so töricht, das eigene Wohlbefinden im Alter für nicht so wichtig zu erachten wie das in der Jugend. Aber unser Verhalten wird vielfach von einem ungeduldrigen Streben nach kurzfristigen Vorteilen beherrscht, das die Bewertung unserer eigenen Zukunft in den Hintergrund drängt. Die gleiche Ungeduld dürfte bewirken, dass wir das Wohlergehen künftiger Generationen, so sehr

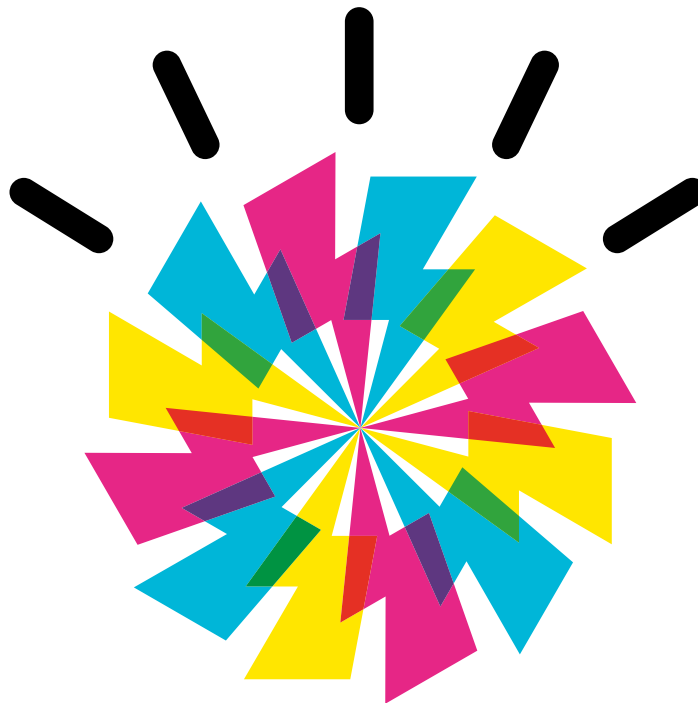
wir es im Prinzip anerkennen, in der praktischen Realität aus den Augen verlieren.

Nehmen wir aber trotzdem einfach einmal an, dass das Marktverhalten der Menschen tatsächlich ihre Werturteile widerspiegelt. Ist diese Bewertung dann ethisch ausgewogen, so dass wir den Geldmarktzins als Wertminderungssatz übernehmen können? Viele Ökonomen interessiert das nicht. Sie behaupten einfach, dass der Markt eine demokratische Willensbildung widerspiegelt. Damit überlassen sie ethische Urteile der Öffentlichkeit, statt sie selbst zu treffen. So betonen auch Sterns Kritiker ihren zutiefst demokratischen Standpunkt und werfen ihm vor, in selbstherrlicher Weise seine eigenen ethischen Ansichten anderen aufzwingen zu wollen.

Doch damit unterliegen sie einem Missverständnis darüber, was eine Demokratie ausmacht. Demokratie benötigt Debatten und Beratungen genauso wie Abstimmungen. Ökonomen – heißen sie nun Stern oder Nordhaus – sind gar nicht in der Lage, ihre Vorstellungen anderen einfach aufzuzwingen. Sie können nur Empfehlungen formulieren und diese begründen. Die Bestimmung des richtigen Wertminderungssatzes benötigt eine ausgefeilte Theorie, welche die Öffentlichkeit nicht ohne Beratung durch Experten entwickeln kann. Den Ökonomen fällt im politischen Prozess die Aufgabe zu, solche Theorien auszuarbeiten. Sie sollten ihre bestmöglichen Empfehlungen präsentieren, gestützt auf ihre stichhaltigsten Argumente. Sie müssen aber auch willens sein, miteinander die ethische Basis ihrer Schlussfolgerungen zu diskutieren. Am Ende sollten die politischen Willensträger als Repräsentanten der Gesellschaft mit Unterstützung der Experten zu eigenen Entscheidungen kommen und danach handeln. Ohne die Einbeziehung von Fachleuten wären diese Entscheidungen dilettantisch und damit fragwürdig.

Zur Bestimmung des Wertminderungssatzes sind ethische Überlegungen unverzichtbar. Doch wirft der Klimawandel noch viele andere ethische Probleme auf. Dazu gehört insbesondere die Frage nach einer möglichen globalen Katastrophe. Sie wird im Kasten auf S. 60 behandelt.

Die Entscheidung darüber, welche Opfer wir bringen sollten, um den Klimawandel zu begrenzen, erfordert ernsthaftes Nachdenken über schwierige moralische Fragen. Eine Ethik des Klimawandels zu entwickeln, ist genauso schwer wie die naturwissenschaftliche Analyse des Problems. Auf beiden Feldern gibt es nach wie vor viele ungelöste Punkte. Im Interesse unserer Enkel, ja der Zukunft der Menschheit überhaupt, müssen wir mit allen Kräften daran arbeiten, sie zu klären. ◀



Stromnetze, die mitdenken.

Es ist noch nicht allzu lange her, da galten unsere Stromnetze als Inbegriff des weltweiten Fortschritts. Sie brachten erschwingliche Energie in unsere Häuser, Städte, Straßen und Fabriken – und veränderten dadurch die Welt.

Aber zu jener Zeit war Energie billig, Umweltfolgen spielten kaum eine Rolle – und das merkt man den Netzen bis heute an: Gespeist von einer relativ kleinen Zahl großer Kraftwerke, sind die Netze darauf ausgelegt, den Strom an die Verbraucher zu verteilen – und zwar nur in eine Richtung. Einer dynamischen, weltweit vernetzten Energieversorgung mit ständigen Schwankungen bei Angebot und Nachfrage sind sie nicht gewachsen.

Dieser Mangel an Flexibilität und Effizienz hat einen hohen Preis. Jedes Jahr geht in unseren Netzen genug Energie verloren, um damit Deutschland, Indien und Kanada ein Jahr lang mit Strom zu versorgen.

Wenn es gelänge, das US-amerikanische Netz nur 5% effizienter zu machen, entsprächen die eingesparten Emissionen dem Ausstoß von 53 Millionen Autos. Wir verschwenden Milliarden, um Strom zu erzeugen, der nie irgendwo ankommt.

Zum Glück kann man unsere Stromversorgung intelligenter gestalten. Man kann vom Stromzähler zu Hause bis zu den Turbinen im Kraftwerk (oder zu Windparks,

Solaranlagen usw.) jeden Teil des Netzes in ein gemeinsames System einbinden.

Diese Vernetzung liefert neue Daten, aus denen wir mit modernen Analyseverfahren wertvolle Erkenntnisse gewinnen können. Mit deren Hilfe wiederum können Privatkunden und Unternehmen ihren Stromverbrauch effizienter gestalten. Versorgungsunternehmen können ihre Netze besser auslasten. Und Regierungen gezielt die Umwelt und die natürlichen Ressourcen schonen. Das ganze System kann effizienter, zuverlässiger, anpassungsfähiger werden. Oder kurz: smarter.

Erste Projekte mit smarten Netzen zeigen, dass sich allein bei privaten Verbrauchern die Stromkosten um 10% reduzieren, die Last zu Spitzenzeiten sogar bis zu 15%. Was wäre, wenn wir dieses Projekt auf Unternehmen, Behörden, Universitäten usw. ausweiten?

Deshalb arbeiten wir mit Stromversorgern an der schnellen Einführung „smarter“ Stromnetze. Wir beteiligen uns an Projekten zur automatisierten Verbrauchserfassung. Und wir erforschen neue Wege, um Überkapazitäten zu speichern und bei Bedarf wieder ins Netz einzuspeisen.

Unsere Stromnetze können wieder ein Symbol des Fortschritts werden. Die Voraussetzungen dafür haben wir. Also: Machen wir unseren Planeten ein bisschen smarter. Mehr dazu unter ibm.com/think/de/energy



Weiter im grünen Bereich

■ Trotz Wirtschaftskrise kaufen die Verbraucher mehr grüne Waren denn je. Bei einer Befragung von 9000 Erwachsenen in neun Ländern durch die Boston Consulting Group erklärten 34 Prozent der angesprochenen Personen, 2008 systematisch auf umweltfreundliche Produkte geachtet und sie bevorzugt erworben zu haben – gegenüber nur 32 Prozent im Jahr davor.

Was noch mehr überrascht: 24 Prozent der Befragten hielten einen (begründet) höheren Preis für gerechtfertigt und akzeptabel – vier Prozent mehr als 2007. Zwar halten sich die Menschen bei ausgesprochen teuren grünen Gütern wie Hybridautos zurück. Doch für Lebensmittel aus ökologisch kontrolliertem Anbau und Energiesparlampen geben sie weiterhin bereitwillig Geld aus. Viele Teilnehmer der Studie sagten sogar, dass sie bei einem größeren Angebot an umweltfreundlichen Produkten noch häufiger darauf zurückgreifen würden.

Kate Wilcox

Bodenentgiftung mit Pflanzen

■ Jedes Jahr wird in Europa auf 900 000 Hektar Ackerland Raps als Rohstoff für Biodiesel angebaut. Aber könnte die Pflanze vielleicht noch einen zweiten ökologischen Zweck erfüllen? Wissenschaftler um Olivia Odhiambo am Institute of Technology in Carlow (Irland) versuchen sie nun auch für die Reinigung der Umwelt einzusetzen.

Bergbau und Industrie verschmutzen den Boden zum Teil mit Schwermetallen wie Arsen, Kupfer und Nickel und machen ihn so unbrauchbar für die Landwirtschaft. Zwar können einige nicht kommerziell angebaute Pflanzen darauf wachsen und dabei sogar die Metalle aufnehmen und entfernen. Potenziell nützliche Feldfrüchte wie Raps gedeihen dagegen nur schlecht. Odhiambo fragte sich nun, ob vielleicht Bakterien, die Pflanzen beim Umgang mit Metallen und bei der Fixierung von Luftstickstoff helfen, gleichzeitig dafür sorgen könnten, dass Ölsamen auch auf verseuchten Böden sprießen.

Dazu isolierte die Forscherin drei Bakterienstämme, darunter eine Mutante

von *Pseudomonas fluorescens*, die das Wachstum von Bäumen an belasteten Standorten fördern. Zunächst stellte sie fest, dass diese Bakterien Raps auf sauberem Boden besser gedeihen lassen. Dann machte Odhiambo den Test mit verseuchter Erde. Vorläufigen Befunden zufolge verhalten die Bakterien den Pflanzen tatsächlich auch in diesem Fall zu einem besseren Wachstum – vermutlich, weil sie die Metalle binden und sie so aus dem Verkehr ziehen.

Ob Raps in Symbiose mit Mikroben wirklich genügend Schadstoffe aufnehmen kann, um den Boden nennenswert zu entgiften, hält der Botaniker Leon Kochian von der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York) allerdings für eine offene Frage. Dennoch lohnt sich der Versuch. Im Erfolgsfall könnte man die Pflanze, die unter sehr verschiedenartigen Klimabedingungen gedeiht, rund um den Globus zur Bodenentgiftung anbauen – und dann aus den Samen Biotreibstoff gewinnen.

Melinda Wenner

Intel spart Geld mit Umweltschutz

■ Für Firmen kann es sich finanziell auszahlen, Betriebseinrichtungen so zu konzipieren, dass sie die Umwelt möglichst wenig belasten. Diese Erfahrung macht Intel gerade mit zwei großen neuen Gebäudekomplexen, die es derzeit errichtet: einem Zentrum für Forschung und Entwicklung im israelischen Haifa und einer 2,5 Milliarden Dollar teuren Fertigungsanlage für integrierte Schaltkreise in der Hafenstadt Dalian im Nordosten Chinas. »Wir

haben keinen Mangel an grünen Projekten, die sich innerhalb von drei Jahren amortisieren«, erklärt Todd Braddy, für Umweltschutz zuständiges Vorstandsmitglied von Intel.

Das Gebäude in Haifa, das noch in der ersten Jahreshälfte fertig gestellt werden soll, genügt den Standards des Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) für umweltfreundliches, ressourcenschonendes und nachhaltiges Bauen, das vom U.S. Green Building Council 1998 entwickelt wurde. Die dafür aufgewendeten 600 000 Dollar sollten schnell wieder hereinkommen, da die eingesetzten »grünen« Technologien die Betriebskosten um 200 000 Dollar jährlich senken. So werden die Zimmer mit Abwärme der vielen Computer im Rechenzentrum beheizt und nicht mit einem konventionellen Heizkesselsystem. Außerdem erhalten drei Viertel der Büroräume so viel Tageslicht, dass auf künstliche Beleuchtung verzichtet werden kann, was den Strombedarf deutlich reduziert.

Die Fertigungsanlage in Dalian soll nächstes Jahr in Betrieb gehen. Sie wird



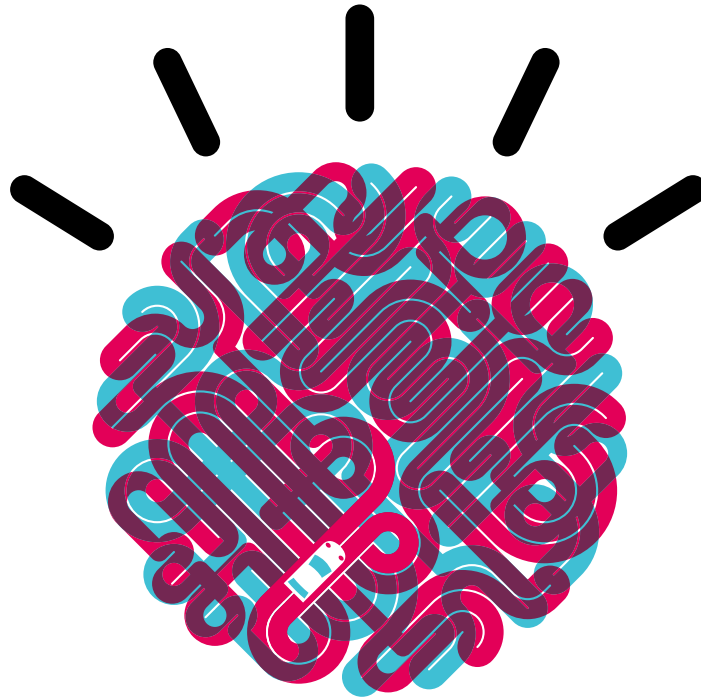
Im chinesischen Dalian baut Intel diese umweltfreundliche Fertigungsanlage für Chips – hier als Modell.

über ein ausgedehntes System zur Rückgewinnung von Wärme verfügen. Dadurch braucht sie nur einen mit Erdgas betriebenen Heizkessel, während bei einer Anlage dieser Größenordnung üblicherweise drei benötigt werden. Die Gebäude sind so angeordnet, dass sie die Sonne auf ihrer täglichen Bahn optimal für Beleuchtung und Heizung nutzen und zugleich bei Bedarf im Sommer kühlende Winde aus der Bucht auffangen. Außerdem soll die Fertigungsanlage nur sehr geringe Mengen an Dämpfen aus perfluorierten Verbindungen emittieren, die zur globalen Erwärmung beitragen.

Stephen D. Solomon



Entwurf des Intel Green Building in Haifa



Unterwegs in eine smarte Welt.

2007 begann eine neue Zeitrechnung. Zum ersten Mal in der Geschichte lebte der größte Teil der Weltbevölkerung in Städten. Schon 2010 wird es 59 Ballungsräume mit mehr als 5 Millionen Einwohnern geben – 50 % mehr als noch 2001.

Viele der neuen Stadtbewohner werden ein Auto mitbringen. Und sie werden Produkte konsumieren, die in LKWs angeliefert werden. Keine guten Aussichten für alle, die heute schon täglich genervt im Stau stehen.

Die simple Wahrheit ist: Die Infrastrukturen und Verkehrsmanagement-Systeme von heute sind dem weltweiten Verkehrsaufkommen nicht gewachsen. Allein die Staus in der EU haben 2007 mehr als 135 Mrd. Euro gekostet, Umweltfolgen nicht mitgerechnet.

Höchste Zeit also für intelligentere Lösungen, die den städtischen Verkehr als ein Gesamtsystem begreifen. Als ein Netz von Verbindungen, das wiederum mit allen anderen Systemen in Wechselwirkung steht, die das Leben und Arbeiten in Städten betreffen: Logistikketten, Umwelt, Unternehmen ...

Intelligentes Verkehrsmanagement ist zwar noch lange nicht die Regel. Aber es ist auch keine Science Fiction. An vielen Orten ist es schon heute Realität, auch dank der Hilfe von IBM.

In Stockholm hat ein dynamisches Mautsystem das Verkehrsaufkommen in der Innenstadt um 20 % reduziert, Wartezeiten um 25 % und Emissionen um 12 %. In Singapur helfen Echtzeit-Daten von Sensoren und Rechenmodelle, das Verkehrsgeschehen mit 90-prozentiger Sicherheit vorherzusagen. Und in Kyoto simulieren Stadtplaner Verkehrssituationen mit Millionen von Fahrzeugen, um die Folgen für die Stadt zu analysieren.

All das ist möglich, weil Städte ihr Verkehrssystem mit mehr „Intelligenz“ ausstatten können. Sie können Straßen, Brücken, Kreuzungen, Verkehrsschilder, Ampeln und Mautsysteme miteinander vernetzen. Solche „smarten“ Systeme können Pendlerströme besser regeln, Stadtplaner mit besseren Informationen versorgen, die Produktivität von Firmen erhöhen und die Lebensqualität steigern. Sie können Staus vermeiden, den Benzinverbrauch und die CO₂-Emissionen senken.

Menschen und Güter von A nach B zu bringen ist ein Kernproblem der Urbanisierung. Im 20. Jahrhundert hat man deshalb Städte und Länder mit Autobahnen vernetzt. Im 21. Jahrhundert werden „smarte“ Verkehrssysteme die Schrittmacher des Fortschritts sein.

Also: Machen wir unseren Planeten ein bisschen smarter. Mehr dazu unter ibm.com/think/de/traffic





KLAUS TSCHIRA STIFTUNG

»Carpe Diem«

Wer aus der Wissenschaft den Sprung in die Unabhängigkeit wagen will, hat heute eine kleinere Markteintrittshürde zu überwinden als früher, dafür ist aber die Konkurrenz viel größer – findet der Mitgründer von SAP, Klaus Tschira, heute geschäftsführender Gesellschafter der Klaus Tschira Stiftung.

Im Jahr 1940 geboren, studierte **Klaus Tschira** Physik in Karlsruhe. Von 1966 bis 1972 arbeitete er als Systemberater bei der IBM in Mannheim. Zusammen mit dem Mathematiker Hans-Werner Hector, den Nachrichtentechnikern Dietmar Hopp und Hasso Plattner sowie dem Betriebswirtschaftler Claus Wellenreuther gründete Klaus Tschira 1972 die SAP Systemanalyse und Programmentwicklung, seit 1976 mit Sitz in Walldorf. 1988 wurde daraus die SAP Aktiengesellschaft Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung; seit 2005 ist das Akronym der offizielle Firmenname.

1998 schied Tschira aus dem Firmenvorstand aus und rief eine Stiftung zur Förderung von Naturwissenschaft, Mathematik und Informatik mit Sitz in Heidelberg ins Leben. Zwei Jahre später folgte die Gründung des EML (European Media Laboratory) und wenig darauf der EML Research gGmbH; beide sind Forschungseinrichtungen im Bereich Informatik.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Tschira, als Sie 1966 nach einem Physikstudium bei IBM in Mannheim anfangen, erlitten Sie offenbar gleich einen Kulturschock.

Klaus Tschira: Ja, als Erstes bekam ich die Aufgabe, einen Fehler in der Lohnbuchhaltung zu beheben. Das war doch weit weg von der Forschung.

Spektrum: Und haben Sie den Fehler gefunden?

Tschira: Nein. Die Einerstelle war verschwunden. Berechnungen sollten doppelt durchgeführt und die Ergebnisse abgeglichen werden. Nur dann könnte man dem Ergebnis trauen. Das war hier nicht geschehen. Wir konnten den Leiter vom Lochkartensaal diplomatisch zum Eingeständnis bringen.

Spektrum: Das hatte mit Grundlagenforschung nicht mehr viel zu tun.

Tschira: Ich war ziemlich blauäugig. Bevorzogen hatte ich mich auf eine Stelle zur Optimierung von Kundenprozessen. Der einzige Großrechner stand damals bei der BASF.

Spektrum: Und danach?

Tschira: Ich hatte Klein- und später Großkunden zu betreuen. Im Wildwuchs selbst gebastelter Systeme erkannten wir sofort, dass die Buchhaltung vereinheitlicht werden müsste. Das

haben wir dann gemacht, indem wir 1972 die Firma SAP gründeten. Geld hatten wir wenig, aber das machte nichts. Wir hatten Kunden.

Spektrum: Hatten Sie Angst vor dem Scheitern?

Tschira: Eigentlich nicht, mein Diplomvater Gottfried Falk sagte zu mir: Zwischen den Erhaltungssätzen etwa der Energie und der Erhaltung des Geldes in der Buchhaltung gibt es durchaus Parallelen. Und ich dachte: Es ist mir egal, welche Ableitung ich gleich null setze.

Spektrum: Damals gab es noch keine Informatik ...

Tschira: Nein, solche Fächer wurden erst gegründet. An der damaligen TH Karlsruhe belegte ich Analogrechnen und Programmierung in Algol 60.

Spektrum: Was ist heute anders?

Tschira: Die Situationen sind natürlich nicht vergleichbar. Damals war die Einstiegshürde hoch, dafür die Konkurrenz vergleichsweise kaum vorhanden. Heute ist es umgekehrt: Die Einstiegsbarrieren sind niedrig, dafür trifft man auf einen dicht besetzten Markt. Damit muss man rechnen.

Spektrum: Also ist es heute leichter, eine Firma zu gründen?

Tschira: Nicht unbedingt. Leichter ist es heute dank der zahlreichen Anbieter von



KLAUS TSCHIRA STIFTUNG

Kinder und Jugendliche an die Naturwissenschaften heranzuführen ist – neben der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses und der Vermittlung von Forschung durch die Medien – ein Schwerpunkt der Klaus Tschira Stiftung. Dazu dient auch die Veranstaltung »Explore Science« in Mannheim. Jedes Jahr lösen etwa 2000 Schülerinnen und Schüler in miteinander konkurrierenden Gruppen knifflige Aufgaben, die Kenntnisse in den Naturwissenschaften und der Mathematik erfordern (im Bild eine selbst konstruierte Wurfmaschine).

Risikokapital, also Venture Capital (VC). Aber dazu müssen die Leute auch ihre Scheu aufgeben, Fremdkapital aufzunehmen.

Spektrum: Reicht das?

Tschira: Nein. Wir haben das damals geschafft, aber wir hatten auch Zeit. Heute gibt es diese Zeit nicht mehr. Die Märkte sind besetzt, jeder kann sich für 'n Appel und 'n Ei einen Rechner leisten, mit dem sich anspruchsvolle Anwendungen machen lassen. Und gute Ideen liegen in der Luft!

Spektrum: Also gehe ich zu einer VC-Firma.

Tschira: Ja, aber nur mit einem guten Businessplan. Es empfiehlt sich also, von Anfang an jemanden in das Startteam aufzunehmen, der sich mit BWL auskennt. Viele in Deutschland, die sich selbstständig machen, haben eine gute Idee, vielleicht eine Ahnung, wo man sie gebrauchen kann, aber eine Abneigung gegen VC-Kapital. Das ist fatal.

Spektrum: Aber sie machen sich abhängig; viele fürchten das Scheitern.

Tschira: VC-Firmen wollen, dass ihre Start-up-Firmen wachsen und gedeihen. Doch manch einer ist lieber 100-Prozent-Eigentümer einer Firma mit einer Million Umsatz als Ein-Prozent-Teilhaber einer 100-Millionen-Firma. Gute

Ideen werden dann woanders realisiert, siehe MP3.

Spektrum: Wie haben Sie Ihr Team gebildet?

Tschira: Wir waren vier mit naturwissenschaftlichem Hintergrund, einer mit betriebswirtschaftlichem. Unser Problem war damals, die Anwendungen zu standardisieren – davon mussten wir die Firmen erst überzeugen. Jeder hat seine eigene Lösung gestrickt. Standardsoftware hatte keinen guten Ruf. Buchhaltung erschien uns am besten für eine Standardisierung geeignet. So kam es dann auch.

Spektrum: Hatten Sie Patente? Was war damals, was ist heute die Bedeutung von Patenten?

Tschira: Die sind schon wichtig. Schon damit man nicht Gefahr läuft, dass jemand, der an einer ähnlichen Idee arbeitet, diese wegschnappt. Wir hatten das Problem damals nicht, unsere Idee war eben ziemlich revolutionär, aber auch richtig. Wir waren ein Team, das sich gut ergänzte, und keine Einzelkämpfer. Bei IBM liefen Wetten, wie lange wir durchhalten werden.

Spektrum: So viel Zeit hatten Sie also auch nicht.

Tschira: Natürlich haben wir geschafft wie die Brunnenputzer. Wir haben nicht erwartet zu scheitern. Wir rechneten da-

mit, dass wir das Doppelte verdienen und das Dreifache arbeiten müssen wie bei der IBM. Wenn es umgekehrt gekommen wäre, hätten wir das auch billigend in Kauf genommen.

Spektrum: Gab es Momente, in denen es bei der SAP schlingerte?

Tschira: Ja, nämlich als IBM eine eigene Buchhaltungssoftware ankündigte. Ein Jahr lang konnten wir dann keine Buchhaltungssoftware verkaufen. Wir lebten in dieser Zeit von unseren Einführungsprojekten.

Spektrum: Wie geht man mit dem Scheitern um? Was ist Ihr Rat für junge Firmengründer?

Tschira: Bei uns hat man leicht den Makel des Pleitiers, aber es kommt darauf an, wie man Pleite macht – intelligent oder dumm. In den USA sagt man von einem, der scheitert: Der weiß zumindest, wie es nicht geht. Wenn man blindlings Risiken eingeht, kann man allerdings gleich in eine Spielbank gehen. Gefahren muss man nüchtern sehen. Am besten hat man Ideen, die andere brauchen, aber noch nicht artikulieren können. Die liegen eben nicht immer in der Luft. ◀

Das Interview führte **Reinhard Breuer**, Chefredakteur von »Spektrum der Wissenschaft«.



MIT FRIEDR. GEN. VON SELMA GEBNER: WWW.ANTHROPMIE.DE

Von Wolfgang Achtner

So beschlich mich in sehr langsamer Weise der Unglaube, bis ich schließlich gänzlich ungläubig wurde.« Sukzessive, so erinnerte sich Charles Darwin in seiner Autobiografie, sei sein Glaube zerfallen, habe er sich zum Atheisten gewandelt. Und dies, obwohl er gerade der Naturtheologie nach den Lehren William Paleys (siehe Kasten S. 72) wesentliche Anregungen verdankte. Nicht nur missfiel ihm die »abscheuliche« christliche Lehre: »Ich kann es kaum begreifen, wie jemand wünschen könne, sie möge wahr sein; denn dann zeigt das Evangelium, dass die Ungläubigen, und ich müsste zu ihnen meinen Vater, meinen Bruder und nahezu alle meine besten Freunde zählen, ewig Strafe verbüßen müssen.«

Mehr noch hielt Darwin jede Religion für eine primitive Form der Welterklärung, die von der Wissenschaft längst überholt worden sei. Und diese habe durch »Vervollkommnung der Vernunft und Vermehrung der Kenntnisse« die traurigen Folgen von Religiosität

überwunden, als da wären »Aberglaube, Gottesgerichte, Menschenopfer und Hexenverfolgung«, Darwin zufolge Erscheinungen, die den »Verirrungen der Instinkte bei den Tieren« vergleichbar seien.

Selbst für die Ausbildung moralischen Verhaltens, das dem nackten Egoismus des *survival of the fittest* – am ehesten mit »Überleben des Bestangepassten« zu übersetzen – offenkundig entgegensteht und somit zunächst ein theoretisches Problem der Evolutionslehre darstellte, sei kein Glaube an höhere Wesen erforderlich. Moralität erkläre sich bereits aus dem Nutzen sozialer Bindungen für den Einzelnen wie für das Überleben ganzer Gruppen. Immerhin billigte Darwin der Religion auf diesem Gebiet eine gewisse förderliche Wirkung zu – nämlich durch die Angst vor göttlicher Strafe.

Solche Urteile waren Öl auf das Feuer seiner Gegner. Mit seinem Werk »Die Entstehung der Arten« hatte er 1859 Gläubige und Kirchen brüskiert. Den Menschen als Abkömmling von Affen zu zeichnen, die Hand Gottes durch den Mechanismus der Selektion

»**DER GLAUBE** ist eine Waffe im Kampf ums Dasein«

Religion oder Evolution? Anders als Charles Darwin war sein Zeitgenosse, der Zoologe Gustav Jaeger, nicht bereit, diesen Gegensatz als gegeben zu akzeptieren. Mit seinen Ideen gilt er heute als Vordenker der Soziobiologie.

SERIE: EVOLUTION

| | |
|---|------------|
| Teil I: Evolution – Gruppe oder Individuum? | SdW 1/2009 |
| Teil II: Missverständnisse um Darwin | SdW 2/2009 |
| Teil III: Der Ameisenforscher. Bert Hölldobler im Porträt | SdW 3/2009 |
| Teil IV: Evolution und Religion | SdW 4/2009 |

zu ersetzen – Blasphemie! Umso mutiger sind aus heutiger Sicht die alten Versuche einiger weniger zu nennen, Religion und Evolutionslehre miteinander zu verbinden. Beispielsweise entwickelten sich in den Vereinigten Staaten Spielarten eines christlich modifizierten Darwinismus. So ersetzte der Botaniker Asa Gray (1810–1888) von der Harvard University das Zufallsprinzip der Evolution durch die lenkende Hand des Schöpfers, freilich mit dem gleichen Ergebnis: Anpassung an Umweltveränderungen.

All diese Ansätze und Modelle blieben Fußnoten der Geschichte. Erst in den letzten Jahren, nach einer Umwandlung der westlichen Welt zu mehr und mehr säkularen Staaten, erfährt Religiosität wieder Aufmerksamkeit, auch seitens der Forschung. Religion und Mystik werden selbst zu Forschungsobjekten (siehe den folgenden Beitrag S. 74). Hirnforscher untersuchen die neuronalen Prozesse beim Meditieren, Genetiker fahnden nach Genvarianten für eine religiöse Disposition, Soziobiologen fragen nach dem Vorteil von Glaubenssystemen und Ritualen für das



MIT FOT. GEN. VON SELMA GIEGER, WWW.ANTHROPINE.EDU

Der deutsche Zoologe und Mediziner Gustav Jaeger (1832–1917) bemühte sich vergeblich, eine Brücke zwischen Darwins Evolutionslehre und dem christlichen Glauben zu schlagen. Wirtschaftlich erfolgreich war er durch die Entwicklung spezieller Wollkleidung.

RELIGION ALS FORSCHUNGS-OBJEKT

Weltweit untersuchen Wissenschaftler heute in Experimenten, inwieweit Religionen einen positiven Effekt auf Gesundheit, Lebenserwartung und sogar auch auf das Fortpflanzungsverhalten haben. Dabei stellen sich ihnen Fragen wie: Lassen sich Konzepte wie **Selektion, Mutation und Variation auf Religion** übertragen? Wenn ja, wer oder was selektiert: die Umwelt, der Mitmensch, der Zufall – oder gar ein Gott? Worin besteht der Überlebensvorteil? Was wäre Träger einer Variation, das Genom, der Einzelne oder eine Gruppe? Im ersten Fall müsste es allgemeine **Merkmale menschlicher Religiosität** geben, im zweiten stellt sich das Problem der Interaktion zwischen biologisch konstitutionell vorgegebener und kulturell erworbener Religiosität, im letzten beispielsweise die Frage nach der Balance von Gruppen- und Einzelinteressen.

Überleben des Einzelnen beziehungsweise einer Gruppe im täglichen Daseinskampf.

Doch manches, was nun an Theorien gebildet wird, ist bereits vor 150 Jahren überlegt, doch dann wieder vergessen worden. Zu diesen Vordenkern gehörte auch der deutsche Zoologe und Mediziner Gustav Jaeger (1832–1917). Als seiner Zeit weit voraus ist er heute allenfalls als Gründer eines Modehauses in Erinnerung.

Ein Schwabe in Wien

Der Sohn eines schwäbischen Dorfpfarrers und Heimatforschers war ein Querdenker. Statt in die Fußstapfen des Vaters zu treten, wie es dessen Wunsch war, versagte er absichtlich bei der Aufnahmeprüfung des theologischen Stifts in Urach – und studierte an der dortigen Universität stattdessen Medizin und Zoologie. Nach seinem Studium verschlug es Jaeger nach Wien, zunächst als Hauslehrer einer Industriellenfamilie. 1864 gründete er im Prater den ersten zoologischen Garten der Stadt. Im Zuge des so genannten Deutschen Kriegs zwischen dem Königreich Preußen und dem Deutschen Bund im Jahr 1866 musste der Schwabe Österreich verlassen. Mit seiner Familie – er hatte 1860 eine Pfarrerstochter geheiratet und war Vater von neun Kindern – zog er nach Stuttgart. Jaeger lehrte dort an der Technischen und der Tierärztlichen Hochschule sowie an der Akademie Hohenheim Zoologie und Physiologie, praktizierte als Arzt und forschte zu verschiedenen Themen, unter anderem zur Vererbungslehre, einem Schwachpunkt der Evolutionslehre: Ohne Kenntnis von Chromosomen und Genen zu haben, war die zelluläre Grundlage jeglicher erblichen Verän-

derung (Mutation) ungewiss. Der Freiburger Zoologe August Weismann (1834–1914) löste dieses Problem mit seiner »Keimplasmatheorie«, die Jaegers Thesen berücksichtigte (siehe Kasten unten).

Um die Jahrhundertwende hatte es der schwäbische Gelehrte zu beträchtlichem Wohlstand gebracht – als erfolgreicher Textilhersteller. Denn bei der Erforschung von Duftstoffen und ihrer Bedeutung für die menschliche Psyche war Jaeger zu der Überzeugung gelangt, im Hautfett gelöste Substanzen, von ihm als Anthropine bezeichnet, verliehen nicht nur einen individuellen Geruch, sondern seien auch für das Wohlergehen existenziell. Wollene Stoffe wären dann aber der Gesundheit förderlicher – hygienischer – als solche aus Pflanzenfasern.

Ab 1879 ließ Jaeger entsprechende Textilien, er sprach von »Normalkleidung«, in einer Stuttgarter Wirkwarenfabrik herstellen. Mit großem Verkaufserfolg – Hygiene war ein Schlüsselbegriff jener Zeit. In den folgenden Jahren eröffnete er Verkaufsfilialen in England und Amerika. Zum Kundenkreis zählten so illustre Persönlichkeiten wie der deutsche Industrielle Robert Bosch, der britische Dandy Oscar Wilde und der norwegische Polarforscher Fridtjof Nansen. Noch heute zählt das Unternehmen Jaeger in England zu den Luxusmarken – es war Großbritannien 1919, zwei Jahre nach dem Tod des Firmengründers, im Versailler Vertrag als Kriegsschädigung zuerkannt worden.

Mochte sich Jaeger auch dem Wunsch seines Vaters widersetzt und eine naturwissenschaftliche statt einer theologischen Laufbahn eingeschlagen haben, war er gleichwohl gläu-

Darwin und die Gene



In seinem epochalen Werk »Die Entstehung der Arten« konnte Darwin keinerlei Erklärung zum Erbgeschehen selbst anbieten. Neun Jahre später, 1868, unterbreitete er eine »provisorische Hypothese«, wie seines Erachtens neue Varianten eines Merkmals von den Eltern an die Nachkommen weitergegeben werden könnten. Dies geschehe über zahllose »unendlich kleine« stoffliche Teilchen, die er Gemmulae (Keimchen) nannte. Sie würden von den Zellen des Organismus freigesetzt und »durch den ganzen Körper frei circulieren« (siehe Grafik links). In ihnen sei gewissermaßen die Essenz der jeweiligen Körperteile zu finden, aus denen sie stammten. Die Keimzellen (Samen- oder Eizellen) in den Fortpflanzungsorganen würden sie aufnehmen. Jede Zelle des Körpers steuere damit zur Vererbung bei.

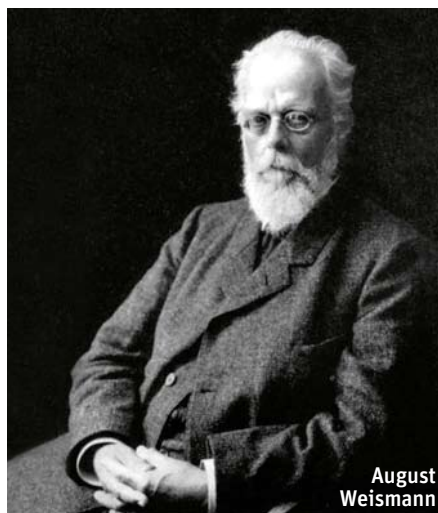


AKG BERLIN (AQUARELL VON GEORGE RICHMOND)

Bereits 1838, zwei Jahre nach seiner Reise mit der »Beagle«, entwarf Charles Darwin Grundzüge der Evolutionstheorie, die ihn vom gläubigen Christen zum Atheisten werden ließ (das Porträt entstand 1840). Gustav Jaeger hat Darwin ein Exemplar seines Buchs geschickt und Darwin hat es nachweislich gelesen und sogar mit Anmerkungen versehen, aber in seinen weiteren Schriften keinen Bezug darauf genommen.

Die Erklärung mag uns heute abwegig erscheinen, aber die mendelschen Regeln wurden erst um 1900 wiederentdeckt, und der Begriff Gen stammt aus noch etwas späterer Zeit.

Der Mediziner August Friedrich Leopold Weismann (1834–1914, rechts) entwickelte dagegen in den 1880er Jahren eine als Keimplasmatheorie bezeichnete Vorstellung. Ihr zufolge blieben einzig in der »Keimbahn« – der Zelllinie, die von der befruchteten Eizelle zu den späteren Keimzellen führt – die »Rezepte« für alle Teile des Organismus vorhanden. Auf alle anderen Zellen würden nur jene verteilt, die für ihre jeweilige Aufgabe nötig seien. Die Rezepte steckten als Anlagen im »Keimplasma«, so die historische Bezeichnung für die Vererbungs-substanz.



AUS: EDWIN G. CONKLIN, AUGUST WEISMANN, APS PROCEEDINGS 1915, VOL. 54, NO. 220

August Weismann

biger Protestant. Es muss nicht verwundern, dass eine Versöhnung von Evolutionslehre und Christentum dem umtriebigen Schwaben am Herzen lag, der mit Darwin korrespondierte. Im Unterschied zu den üblichen Gegenüberstellungen von Glaubensinhalten und wissenschaftlichen Alternativen stellte er zwei neue und auch empirisch überprüfbare Fragen. Die erste lautete: Leisten Religionen, in welcher Form auch immer, einen positiven Beitrag zur Lebensbewältigung, bieten also im Sinn Darwins einen Überlebensvorteil? Und die zweite: Falls ja, sind manche dabei vorteilhafter als andere? Seine Forschungsergebnisse publizierte er 1869 unter dem Titel »Die Darwin'sche Theorie und ihre Stellung zu Moral und Religion«. Darwinistisch urteilte Jaeger: »Der Glaube ist eine Waffe im Kampf ums Dasein.«

Gegen seinen funktionsorientierten Ansatz ließe sich einwenden, dass es in den Religionen nicht primär um das Überleben geht, sondern um die Wahrheit des Geglauten und um den in sich gültigen Eigenwert des religiösen Vollzugs. Dass es geradezu zum Wesen einer Religion gehört, sich funktionalem Denken zu entziehen. Tatsächlich werden diese Argumente in Diskussionen unserer Tage ins Feld geführt, wenn Soziobiologen die Religion zum Gegenstand ihrer Forschung machen. Ende des 19. Jahrhunderts aber war Jaeger der Zeit voraus. Er konkretisierte seine Fragen: »Was leistet die Religion für die Bildung und Vertheidigungsfähigkeit der Gesellschaft, was leistet sie für die Vervollkommnung und Vertheidigungsfähigkeit des Einzelnen?« Jaeger hatte also von vornherein neben der Individual- auch die Gruppenselektion im Blick, bei Darwin war letztere nur ein wenig beachteter Neben aspekt.

Um diese Fragen zu beantworten, unterteilte der Forscher die ihm bekannten Glaubenssysteme in Naturreligionen und so genannte ethische Religionen. Ersteren unterlegte er, wie zu seiner Zeit üblich, ein Stufenmodell, das vom Fetischismus zur Verehrung der Elemente Wasser, Feuer, Erde und Luft führte, über die personifizierten Naturgötter aufstieg und als höchste Stufe konsequenterweise den Atheismus erreichte. In der Philosophie der Griechen fanden die Naturreligionen demgemäß ihren Höhepunkt. Deren überragende Leistungen für die Menschheitsgeschichte erkannte Jaeger durchaus an. Doch um zu einer Naturwissenschaft fortzuschreiten, fehlten dieser Naturreligion seines Erachtens »der Ernst des Ringens und die Zähigkeit des Glaubens«. Und um den Zusammenhalt einer Gesellschaft und ihre innere Entwicklung zu sichern, mangelte es ihnen an

ethischer Kraft, wie gerade die Antike gezeigt habe: Griechenland zersplitterte in Kleinstaaten, denn größere Gesellschaften seien auf der Grundlage von Naturreligionen nicht zu steuern und ab einer gewissen gesellschaftlichen Entwicklungshöhe untauglich zur Selbsterhaltung.

Anders hingegen sei es mit den ethischen Religionen, in deren Zentrum das durch Verhaltensnormen geregelte Verhältnis von Mensch zu Mensch und von Mensch zu Gott stehe. Auch hier griff Jaeger auf ein Stufenmodell zurück, von Ahnenkulten über Judentum und Islam zum Christentum, das den Menschen mit den besten Waffen im Kampf ums Dasein ausstatte und daher in der Zukunft weltweit alle anderen aus dem Feld schlagen dürfte. Denn die Religion Israels stelle zwar geistige Ressourcen zum Überleben zur Verfügung – für den Einzelnen etwa das unverwundliche Gottvertrauen, für die Gesellschaft die durch Furcht und Ehrfurcht garantierte Einhaltung von Geboten. Da sich das Judentum aber nur aus den eigenen Stammesgenossen regeneriere, bliebe die Zahl der Gläubigen stets beschränkt.

Nächstenliebe – ein Selektionsvorteil

Der Islam andererseits erlaube zwar größere Staatenbildung, gebe aber auf Grund eines fatalistischen Schicksalsglaubens nicht die notwendige innere religiöse Absicherung und Kraft. Das Christentum stelle demgegenüber für den Einzelnen wie für die Gesellschaft die höchstmöglichen Ressourcen zur Selbsterhaltung bereit. Gerade dieser Religion wohne ein steter Ansporn zum Fortschritt, zur beständigen Veränderung und Verbesserung inne. Darwinistisch gesprochen sei die Variantenbildung ein diesem Glaubenssystem inhärentes Prinzip. Für den Einzelnen bestehe dieser Ansporn einerseits im Gebot der Gottesliebe, das seelische und geistige Kräfte mobilisiere, einschließlich des zur Erforschung der Natur unerlässlichen Stehvermögens, andererseits im Glauben an die Unsterblichkeit der Seele. Gerade das lebenslange Bemühen, ewiges Leben zu erreichen, fördere die ethische Entwicklung.

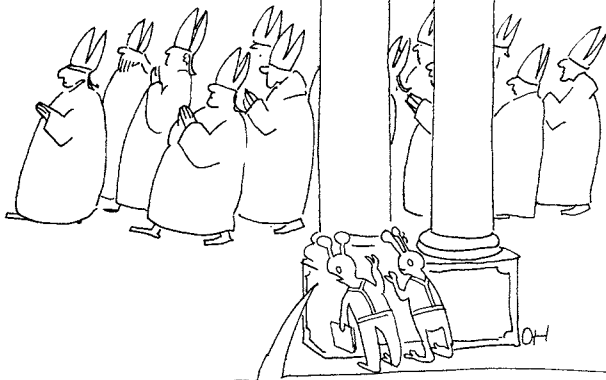
Schließlich begünstige das Prinzip der christlichen Nächstenliebe die Arbeitsteilung innerhalb der Gesellschaft, so dass jeder seine soziale Nische finden könne. Diese Variantenbildung sei ein Selektionsvorteil und lasse die Zahl der Menschen wachsen. Ein Gedanke, der modern anmutet: Heute geht der Heidelberger Religionswissenschaftler Michael Blume einem solchen Zusammenhang von Fortpflanzung und Religiosität nach.



William Paley

NATUR UND RELIGION

Schon die Scholastiker des Mittelalters hatten versucht, Gott auch durch Vernunft zu erkennen und im »Buch der Natur« zu lesen, wie es der Apostel Paulus lehrte. Diese Tradition führten die Naturtheologen bis ins 19. Jahrhundert fort. Dass alle Lebewesen offenkundig an ihre jeweilige Umwelt angepasst waren, erschien ihnen als deutlicher **Beweis für das Wirken eines Schöpfers** und für dessen Weisheit. Tatsächlich verdankte die Evolutionslehre Werken wie der 1802 erschienenen »Natural Theology« von William Paley wichtige Anregungen und Konzepte.



DAS SIND DIE RANGHÖCHSTEN MÄNNCHEN,
SIE SOLLTEN DAHER DIE HÖCHSTE
FORTPFLANZUNGSRATE HABEN!

»Kant sagt: Die Dogmen der Religion sind Postulate der praktischen Vernunft. Ich sage: Sie sind Forderungen des Selbsterhaltungstriebes, und denen könnt ihr euch durchaus nicht entziehen.« Während der Philosoph Immanuel Kant (1724–1804) aus den Grenzen der rationalen Erkenntnismöglichkeiten folgerte, weder Gott noch der freie Wille noch die unsterbliche Seele seien theoretisch zu beweisen, gleichwohl aber notwendig zur Begründung der Moral und somit Forderungen regelgeleiteten Handelns (der so genannten praktischen Vernunft), kam Jaeger aus Sicht der Evolutionstheorie zum gleichen Schluss: Religion sei zur Selbsterhaltung der Menschheit unabdingbar. Den Kritikern Darwins hielt Gustav Jaeger entgegen: »So hat uns denn unsere rein objektive, nur von praktischen Rücksichten geleitete Untersuchung nicht nur gezeigt, dass Religion eine Waffe im Kampf ums Dasein ist, sondern auch, dass die christliche Religion im Vergleich mit allen anderen Religionsformen das höchste leistet, und daraus mögen Sie entnommen haben, dass der Darwinianer in Sachen der Religion auf dem Boden des Christentums steht.«

Diese enthusiastische Einschätzung würden heute wohl weder Evolutionsforscher noch Religionswissenschaftler teilen. Zwar ist das Christentum derzeit tatsächlich weltweit die quantitativ stärkste Religion, die historischen Gründe dafür sind aber sicher komplexer als in Jaegers Modell vorgesehen. Überdies ist eine wertende Kategorie als höchste Entwicklungsform in der Lehre Darwins nicht enthalten, auch nicht für den Menschen als Krone der Schöpfung. Dennoch: Jaeger war ein Pionier und seiner Zeit weit voraus. Er hat Christen einen Weg aufgezeigt, ihren Glauben mit der Evolutionslehre zu vereinbaren. ◀



Wolfgang Achtner ist Hochschulpfarrer und Privatdozent an der Justus-Liebig-Universität Gießen. Er begründete und leitet das Transscientia Institut für interdisziplinäre Wissenschaftsentwicklung, Philosophie und Religion: www.transscientia.de.

Jaeger, G.: Die Entdeckung der Seele I+II. E-Book. Fotografie des Originals der 3. Auflage von 1884, Selma-Grönbeck, Schützlingen 2007.

Jaeger, G.: Die Darwin'sche Theorie und ihre Stellung zu Moral und Religion. Julius Hoffmann, Stuttgart 1868.

Sobol', S. L. (Hg.): Charles Darwin. Erinnerungen an die Entwicklung meines Geistes und Charakters (Autobiografie). Tagebuch des Lebens und Schaffens 1838–1881. Urania, Leipzig 1959.

Vaas, R., Blume, M.: Gott, Gene und Gehirn. Warum Glaube nützt. Die Evolution der Religiosität. Hirzel, Stuttgart 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983270.

Veranstaltungen im Darwin-Jahr unter: www.darwin-jahr.de



wichtige onlineadressen

- ▶ **Brainlogs**
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de
- ▶ **Managementwissen**
per Fernlehre kostengünstig
ortsunabhängig erwerben
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter
www.cqa.de
- ▶ **Ingwer und Meerrettich**
zur wirkungsvollen Entzündungshemmung
bzw. Antibiose bei Pferd und Mensch
www.freenet-homepage.de/Brosig-Pferde-Ingwer/
- ▶ **Kernmechanik –**
Können Sie das Rätsel
der Kernstrukturen und
Dipolmomente lösen?
www.kernmechanik.de
- ▶ **KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de
- ▶ **WISSENSlogs**
Science unplugged
www.wissenslogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 98,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

iq media-marketing gmbh
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: susanne.foerster@iqm.de

Müssen wir glauben?

Atheismus wird immer einen schwereren Stand haben als Religion, denn eine Vielzahl kognitiver Besonderheiten prädisponiert uns Menschen dazu, an etwas zu glauben.

Von Pascal Boyer

Ist Religion ein Produkt der menschlichen Evolution? Schon die Frage allein bereitet vielen Menschen, ob religiös oder nicht, Unbehagen – wenn auch aus unterschiedlichen Gründen. Manche Gläubige befürchten eine zersetzende Wirkung für den Glauben, würde man die ihm zu Grunde liegenden Prozesse durchschauen. Andere Menschen haben Sorge, es könnte alles, was sich als Teil unseres entwicklungsgeschichtlichen Erbes erweist, als gut, wahr, notwendig oder unausweichlich gedeutet werden. Wieder andere, darunter viele Wissenschaftler, tun die ganze Sache mit einem Achselzucken ab; in ihren Augen ist Religion kindischer, ja gefährlicher Unsinn.

Solche Reaktionen erschweren es, das Wie und Warum für die Allgegenwart religiösen Gedankenguts in menschlichen Gesellschaften zu ergründen – doch gerade dieses Verständnis wäre im gegenwärtigen Klima des religiösen Fundamentalismus besonders bedeutsam. Ist Religion also eine der zahlreichen Konsequenzen, die sich aus der Sorte Gehirn ergeben, mit der wir ausgestattet sind? Mit dieser Fragestellung können wir ausloten, welche Formen von Religion der menschlichen Psyche gewissermaßen von der Natur in die Wiege gelegt wurden. Wir können ferner untersuchen, welche stillschweigenden Annahmen sich selbst die unterschiedlichsten Religionen teilen und wie Religion und ethnische Konflikte zusammenhängen. Und schließlich dürfen wir eine Einschätzung wagen, welche realistische Aussichten auf Verbreitung des Atheismus bestehen.

Der Ansatz, Religion aus evolutionärer und kognitiver Sicht zu erforschen, ist in den letzten zehn Jahren herangereift. Bei ihm geht es nicht etwa darum, das Gen oder die Gene für

religiöses Empfinden dingfest zu machen. Auch nicht darum, einfach entwicklungsgeschichtliche Szenarien zu ersinnen, die zu Religion in der heutigen Form geführt haben könnten. Die ihn verfolgenden Forscher tun wesentlich Besseres. Sie stellen neue Hypothesen auf und machen überprüfbare Voraussagen. Sie fragen, was an der Natur des Menschen Religion möglich und erfolgreich macht. Religiöses Denken und Verhalten lässt sich als Teil der naturgegebenen menschlichen Fähigkeiten betrachten, genau wie das Schaffen von Musik, politischen Systemen, familiären Beziehungen oder ethnischen Bündnissen. Hierzu gewonnene Erkenntnisse aus den Bereichen kognitive Psychologie, Neurowissenschaften, Kulturanthropologie und Archäologie dürften unsere Sicht der Religion wandeln.

Gebaut auf Annahmen

So lautet ein wichtiger Befund: Menschen sind sich nur einiger ihrer religiösen Vorstellungen bewusst. Sie wissen zwar durchaus ihre Glaubensgrundsätze darzulegen, etwa, dass es einen allmächtigen Gott und Weltenschöpfer gibt oder dass Geister sich im Wald verbergen. Doch wie kognitionspsychologische Untersuchungen gezeigt haben, gehen derartige explizit zugängliche Überzeugungen stets einher mit einer Vielzahl stillschweigender Annahmen, die einer bewussten Prüfung im Allgemeinen nicht zugänglich sind.

Beispielsweise offenbarten einschlägige Experimente, dass die meisten Menschen höchst anthropomorphe Gottesvorstellungen hegen, völlig unabhängig von ihren expliziten Glaubensüberzeugungen. Erzählt man Probanden eine Geschichte, in der ein Gott mehrere Probleme zugleich löst, so finden sie das recht plausibel, da Göttern üblicherweise unbegrenzte kognitive Kräfte zugeschrieben werden.

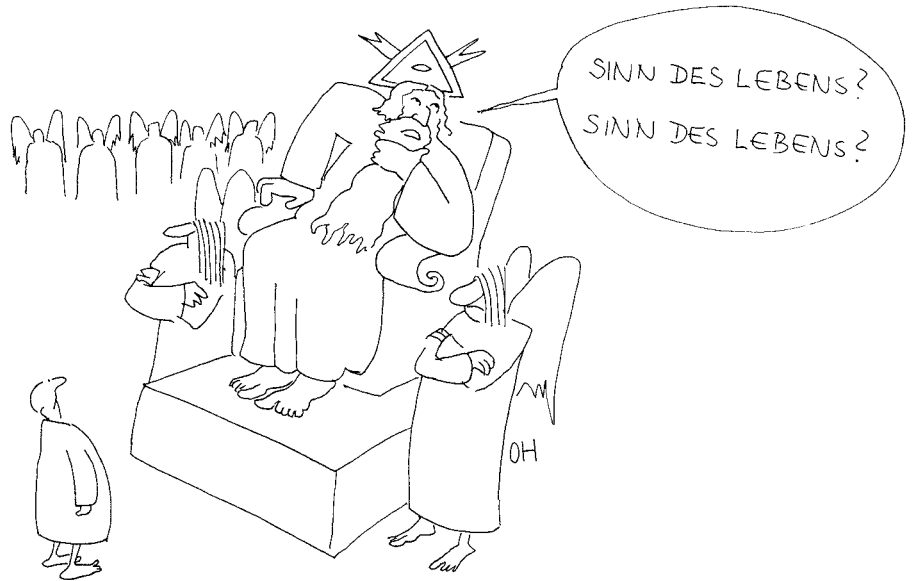
Der Geist verfügt über **Myriaden verschiedener Glaubensnetzwerke**, die dafür sorgen, dass **Behauptungen religiöser Natur** vielen Menschen ganz natürlich erscheinen

Sollen die Versuchspersonen die Geschichte aber nur kurz darauf mit ihren eigenen Worten wiedergeben, erzählen die meisten, der Gott habe eine Aufgabe bewältigt und sich dann der nächsten zugewandt. Implizit gehen sie also davon aus, dass das höhere Wesen so ähnlich denkt wie sie selbst und dass seine Wahrnehmung, Erinnerung, Logik und Motivation auf menschliche Weise funktionieren. Solche Erwartungen sind den Betreffenden nicht bewusst und stehen häufig im Widerspruch zu deren expliziten Glaubensvorstellungen.

Bewusste Glaubensinhalte unterscheiden sich je nach Herkunft stark voneinander. Dagegen ähneln sich die stillschweigenden Annahmen in verschiedenen Kulturen und Religionen außerordentlich, wie Forschungen ergaben. Diese Ähnlichkeiten könnten in den Eigentümlichkeiten des menschlichen Gedächtnisses wurzeln. Experimenten zufolge merken sich Menschen offenbar Geschichten am besten, die zwei Dinge kombinieren: sowohl widernatürliche physische Großtaten (Figuren gehen durch Wände oder versetzen sich augenblicklich an einen entfernten Ort) als auch glaubhaftes menschliches Erleben (Wahrnehmungen, Gedanken, Absichten). Vielleicht gründet der kulturelle Erfolg von Göttern und Geistern auf dieser Vorliebe unseres Gedächtnisses.

Der Mensch neigt darüber hinaus dazu, soziale Beziehungen mit allen möglichen nicht physisch Anwesenden zu unterhalten, sogar von frühester Jugend an. Anders als sonstige soziale Lebewesen kann er sehr gut Beziehungen zu Protagonisten über deren physische Gegenwart hinaus herstellen und pflegen. Beispielsweise schließen soziale Rangordnungen und Bündnisse zeitweilig abwesende Mitglieder ein. Das geht aber noch weiter. Von Kindesbeinen an stellen Menschen dauerhafte, belastbare und bedeutsame Beziehungen her zu fiktiven Gestalten, erträumten Freunden, verstorbenen Verwandten, unsichtbaren Helden und fantasierten Gefährten. Möglicherweise verfeinert der Mensch seine im Vergleich zu anderen Primaten überragenden sozialen Fertigkeiten sogar durch fortwährendes Üben mit vorgestellten oder abwesenden Partnern.

Nur ein kleiner Schritt liegt zwischen dem Vermögen, Bindungen mit derartigen nicht-physischen Wesen einzugehen, und dem, sich Geister, tote Urahnern und Götter vorzustellen, die weder sicht- noch greifbar, aber dennoch sozial eingebunden sind. Dies könnte erklären, warum in den meisten Kulturen zumindest einige der dort verehrten oder ge-



fürchteten übermenschlichen Wesen moralische Bedeutung haben. Oft werden sie als etwas beschrieben, was nur über moralisch relevante Handlungen völlige Verfügungsgewalt hat. Wie Experimente zeigen, ist der Gedanke »Die Götter wissen, dass ich das Geld gestohlen habe« viel natürlicher als »Die Götter wissen, dass ich zum Frühstück Müsli gegessen habe«.

Bedürfnis nach Sicherheit

Erste erhellende Einsichten, was religiöse Rituale anbelangt, ergeben sich zudem aus der Neurophysiologie des zwanghaften Verhaltens bei Mensch und Tier. Solche Verhaltensweisen beinhalten stereotype, ständig wiederholte Handlungen. Die Betroffenen meinen sie unbedingt ausführen zu müssen, auch wenn sich meist kein eindeutiges, beobachtbares Ergebnis zeigt. Ein solches Ritual wäre etwa, sich dreimal über die Brust zu streichen und dabei eine festgelegte Formel zu murmeln. Ritualisiertes Verhalten findet sich auch bei Patienten mit Zwangsstörungen und in den festen Gewohnheiten kleiner Kinder. In diesem Zusammenhang sind Rituale im Allgemeinen mit Vorstellungen verknüpft, die um Verschmutzung und Reinigung oder Gefahr und Schutz kreisen, ferner mit dem Gefühl, beispielsweise zwingend bestimmte Farben oder Zahlen verwenden zu müssen, oder mit dem Bedürfnis, ein sicheres, geordnetes Umfeld zu schaffen.

Wir wissen heute, dass das menschliche Gehirn über eine Reihe von Sicherheits- und Vorsorgenetzwerken verfügt. Sie sind dazu da, potenziellen Gefährdungen etwa durch Beutegreifer oder Krankheitserreger vorzubeugen. Diese Netzwerke lösen spezielle Verhaltensweisen aus, zum Beispiel die Umgebung zu mustern oder sich zu waschen. Tun diese Systeme des Guten zu viel, erzeugen sie krankhaft zwanghaftes

nature

Das englische Original dieses Artikels erschien unter dem Titel »Religion: Bound to believe?« in Nature 455, S. 1038–1039, 23. Oktober 2008.

Verhalten. Möglicherweise aktivieren religiöse Aussagen zu Reinheit, Unsauberkeit oder heimlichen Gefahren durch lauernde Teufel diese Netzwerke ebenfalls, so dass rituelle Vorsichtsmaßnahmen wie Säubern, Kontrollieren oder Abgrenzen eines heiligen Bezirks intuitiv eine gewisse Sogwirkung entfalten.

Schließlich belegen sozial- und evolutionspsychologische Studien eine spezifisch menschliche Fähigkeit, Bündnisse einzugehen. Und die hat Einfluss auf Religion. Eine Besonderheit unserer Spezies sind umfangreiche, stabile Allianzen zwischen nicht miteinander verwandten Individuen, wobei der Kitt dieser Bündnisse wechselseitiges Vertrauen ist. Der Mensch entwickelte die dafür nötigen kognitiven Werkzeuge. So kann er

- die Verlässlichkeit der anderen einschätzen,
- sich an frühere Interaktionen erinnern und daraus auf den Charakter seiner Mitmenschen schließen,
- aufwändige, schwer zu fälschende Bindungssignale aussenden und erkennen.

Diese »Koalitionspsychologie« spielt eine Rolle bei der Dynamik öffentlich demonstrierter religiöser Bindung. Erklären sich Menschen zu Anhängern eines bestimmten Glaubens, binden sie sich an Behauptungen, für die es keinen Beweis gibt und die in anderen religiösen Gruppen als offensichtlich falsch oder lächerlich gelten könnten. Eine derartige Verpflichtung signalisiert die Bereitschaft, die jeweilige Gruppennorm zu übernehmen, und dies aus keinem anderen Grund, als dass sie eben die Gruppennorm ist.

Stellt also Religion eine Anpassung oder ein Nebenprodukt unserer Evolution dar? Vielleicht finden wir eines Tages überzeugende Belege dafür, dass zur Zeit unserer Vorfahren eine Fähigkeit zu religiösem Denken – nicht »Religion« in der heutigen gesellschaftspolitisch institutionalisierten Form – das Überleben förderte. Vorerst stützen die Daten eine bescheidenere Schlussfolgerung: Religiöses Denken ist anscheinend eine emergente Eigenschaft unserer normalen kognitiven Fähigkeiten.

Religiöse Begriffe und Handlungen bemächtigen sich unserer kognitiven Ressourcen – wie es auch etwa Musik, bildende Kunst, Kochkunst, Politik, Wirtschaft und Mode tun. Überwältigt werden wir von Religion einfach deswegen, weil sie, psychologisch gesprochen, so etwas wie überoptimale Auslösereize liefert. Genau wie Gemälde und Skulpturen im Allgemeinen symmetrischer und satter in den Farben sind als ihre Vorbilder in der Natur, stellen religiöse Protagonisten stark vereinfachte Versionen von abwesenden menschlichen dar – und religiöse Rituale hochstilisierte Versionen von Vorsichtsmaßnahmen. Ihre Macht bezieht

Religion auch daraus, dass sie das Ausprägen bestimmter Verhaltensweisen erleichtert. Dies gilt etwa für das Bekenntnis zu einer Gruppe, das umso glaubwürdiger wirkt, wenn es sich als Anerkennung bizarrer oder schwer begreiflicher Überzeugungen ausdrückt.

Wir sollten nicht versuchen, einen einzigen, besonderen Ursprung von Gläubigkeit dingfest zu machen, denn es gibt keine eigens für Religion reservierte Sphäre in unseren Köpfen. Verschiedene kognitive Systeme sind zuständig für Repräsentationen von übernatürlichen Mächten, ritualisierten Verhaltensweisen, Gruppenbindung und so weiter, genau wie Farbe und Form eines Objekts von verschiedenen Teilbereichen des visuellen Systems verarbeitet werden. Anders gesagt: Was einen Gottesbegriff überzeugend macht, ist nicht dasselbe wie das, was einem Ritual intuitiv Macht oder einer moralischen Norm Selbstvidenz verleiht. Die meisten organisierten Religionen von heute stellen sich selbst als etwas dar, was all diese verschiedenen Elemente – Ritual, Ethik, Metaphysik, soziale Identität – zu einer einzigen, in sich stimmigen Doktrin und Praxis vereint. Doch das ist pure Werbung. In der menschlichen Kognition bleiben diese Bereiche getrennt. Wie aus dem vorhandenen Datenfundus hervorgeht, verfügt der Geist nicht über ein einziges Glaubensnetzwerk, sondern über Myriaden unterschiedlicher Netze, die alle dazu beitragen, dass religiöse Behauptungen vielen Menschen ganz natürlich erscheinen.

Die Ergebnisse dieses kognitiv-evolutionären Ansatzes stellen zwei zentrale Dogmen der meisten etablierten Religionen in Frage: dass erstens ihr jeweils spezielles Kredo sich von allen anderen (angeblich irrigen) Glaubensvorstellungen unterscheidet und dass zweitens nur außergewöhnliche Ereignisse oder die faktische Gegenwart übernatürlicher Mächte religiöse Ideen geformt haben könnten. Das Gegenteil trifft zu: Heute wissen wir, dass alle Formen von Religion auf ganz ähnlichen stillschweigenden Annahmen beruhen und dass es zur Vorstellung übernatürlicher Kräfte nicht mehr bedarf als eines normalen menschlichen Gehirns, das normal Information verarbeitet.

Die Kenntnis dieser Schlussfolgerungen, ja sogar ihre Anerkennung, dürfte wohl kaum eine religiöse Bindung unterminieren. Irgendeine Form von religiösem Denken stellt für unsere kognitiven Systeme offenbar den Weg des geringsten Widerstands dar. Dagegen ist Unglaube im Allgemeinen das Ergebnis bewusster, mühevoller Arbeit gegen unsere natürlichen kognitiven Veranlagungen – und daher kaum dazu angetan, die am einfachsten zu verbreitende Weltanschauung sein. ◀



Pascal Boyer arbeitet an den Fachbereichen Psychologie und Anthropologie der Washington University in St. Louis (Missouri).

© Nature Publishing Group
www.nature.com/nature

Boyer, P.: Und Mensch schuf Gott. Klett-Cotta, Stuttgart 2004.

Boyer, P., Wertsch, J. V. (Hg.): Memory in Mind and Culture. Cambridge University Press (voraussichtlich Juni 2009).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983271.

1959

Das Faulenzerherz

»Diesen Begriff führte Dr. W. Raab, University of Vermont, ... in die medizinische Fachsprache ein. Dies Faulenzerherz entstehe infolge der Motorisierung und Automatisie-

rung und vor allem durch unzweckmäßige Freizeitgestaltung ... Dabei spiele in den USA die ›Volkverblödmassmaschine Television‹ eine große Rolle. ... Durch Mangel an Bewegung komme es zu einer vegetativen Umstellung, eine adrenergische Tendenz trete hervor. ... Dadurch komme es zu einer Neigung zu Angina pectoris und Herznekrose.« *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 84. Jg., Nr. 14, 3. April 1959, S. 703

Seebelüftung

»Zwei Seen wurden künstlich belüftet, ein kleinerer von 7,1 m Tiefe und 1250 m² Fläche während des Sommers und ein See von 6,1 ha Fläche während zweier Winter. Durch ein auf den Grund des Sees verlegtes Rohr mit zahlreichen kleinen Öffnungen wurde Preßluft von 1 at Druck zugeführt ... Der Effekt trat sehr rasch ein: Schon nach etwa 4½ Stunden

war das Temperaturgefälle, das zwischen Oberfläche und tieferen Wasserschichten bestand, fast völlig ausgeglichen; lösliche Phosphorsalze, die sich sonst in einer Zone von 2 bis 3 m Tiefe anreichern und in lebenswichtigen Zonen fehlen, verteilen sich gleichmäßig, und der Sauerstoffgehalt des Wassers stieg merklich an.« *Die Umschau*, 59. Jg., Heft 7, 1. April 1959, S. 216



Die zivile Energiegewinnung durch Kernfusion ist auch heute noch Zukunftsmusik.

Energie durch Kernfusion

»Die Bemühungen, mit Hilfe der thermonuklearen Reaktion, also durch die Verschmelzung, die ›Fusion‹ leichter Atomkerne, Energie zu gewinnen, werden in zahlreichen Ländern mit viel Nachdruck und unter Aufwand beträchtlicher Mittel weitergeführt. ... Von den verschiedenen Geräten, die bereits ausprobiert wurden, sind vor allem zwei nach (dem) Prinzip der elektrodenlosen Ringentladung gebaut: das amerikanische ›Perhasatron‹ (von perhaps = vielleicht) in Los Alamos (Abb.) und das wesentlich größere ›Zeta-Gerät ... in Harwell. ... (Bislang) sind alle Versuche insofern gescheitert, als sie ... kein Anzeichen einer thermischen Kernfusion erkennen ließen.« *Kosmos*, 55. Jg., Heft 4, April 1959, S. 137–142

Erforschung der neueren Strahlung

»Ein radiologisches Institut wird ... in Heidelberg unter Prof. Lenards Leitung bereits zu Ostern 1909 eröffnet werden. Es wird dies das erste reichsdeutsche Institut sein, das speziell für die Erforschung der neueren Strahlungen, namentlich derjenigen des Radiums, ausgerüstet ist und es sind bedeutsame Fortschritte in der Erkenntnis dieses gegenwärtig im Mittelpunkt des Interesses stehenden Gebietes zu erwarten ... Auch die praktischen Anwendungen der Radiologie, namentlich auf medizinischem Gebiete, werden gebührende Pflege finden.« *Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Neue Folge* Bd. 8, Nr. 15, 11. April 1909, S. 239

Die Idee der »Chemotherapie«

»Es ist der Gedanke von der chemischen Verwandtschaft ... Derartige Betrachtungen führten Ehrlich schon beim Studium der Immunkörper zu der wichtigen Anschauung, daß die vom Körper gebildeten Anti-Stoffe sich mit den Substanzen, gegen die sie gerichtet sind, chemisch verbinden ... Im Sinne der Chemotherapie mußte es nun aber auch möglich sein, künstliche chemische

Substanzen aufzufinden, deren Tropie spezifisch gegen Infektionserreger gerichtet ist. Überhaupt erschien die Bekämpfung der Infektionskrankheiten ... als eine nächstliegende Aufgabe der Chemotherapie, weil der Körper gegen diese Infektionen genügend wirksame Antikörper nicht zu bilden vermag.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 24. Jg., Nr. 17, 29. April 1909, S. 217

Verkannte Erfindung

»Tachypod nennt der Dozent Petrini in Upsala ein von ihm konstruiertes neues Fortbewegungsmittel. ... Das Heruntertreten bewegt den Tachypod vorwärts, während ein Emporheben des Fußes zur Aufwicklung des bewegenden Seiles dient, ohne daß die Vorwärtsbewegung unterbrochen wird.« *Die Umschau*, 13. Jg., Nr. 17, 24. April 1909, S. 367

1909

So schnell wie ein Fahrrad, bietet jedoch mehr Armfreiheit



Turbulenzen um die **FLUIDMECHANIK**

Unter den gegenwärtig schwersten Problemen der Mathematik ist auch eines, das seine Brisanz aus der Natur der Flüssigkeiten und Gase bezieht. Gesucht ist eine Lösungstheorie für die Navier-Stokes-Gleichungen.

Von Thomas Sonar

Unter den »Millennium«-Problemen, auf deren Lösung das Clay Mathematics Institute im Jahr 2000 jeweils eine Million Dollar ausgesetzt hat, bewegen sich die meisten in großer Abstraktionshöhe, fern von jeder physikalischen Realität (siehe die bisherigen Folgen dieser Serie). Dagegen wirkt das – ebenfalls auf der Millenniumsliste zu findende – Problem der Navier-Stokes-Gleichungen in seiner Realitätsnähe geradezu ordinär. Diese Gleichungen beschreiben die Bewegung ganz gewöhnlicher Fluide; unter diesem Oberbegriff pflegt man Flüssigkeiten und Gase zusammenzufassen.

Wer wissen will, wie sich ein Fluid unter gewissen Bedingungen verhält, kann das im Prinzip durch ein physikalisches Experiment ausfindig machen. Und wo das unpraktikabel ist, helfen heute zahlreiche Computerprogramme. Bauingenieure berechnen mit ihnen

die dynamischen Windlasten, die auf hohen Gebäuden liegen, und man kann die Strömungsverhältnisse um ein schnelles Auto (Bild S. 86), einen ICE oder ein Flugzeug bestimmen, ohne diese Geräte auch nur im Modell bauen zu müssen. Jedes Computerprogramm für CFD (*Computational Fluid Dynamics*, numerische Strömungsmechanik) muss Lösungsstrategien für die Navier-Stokes-Gleichungen anbieten, sonst wäre mit Autobauern und Ingenieurbüros kein Geschäft zu machen. Selbst Hollywood hat diese Gleichungen entdeckt, etwa wenn es um eine realistische Wasserströmung um den Bug der »Titanic« geht.

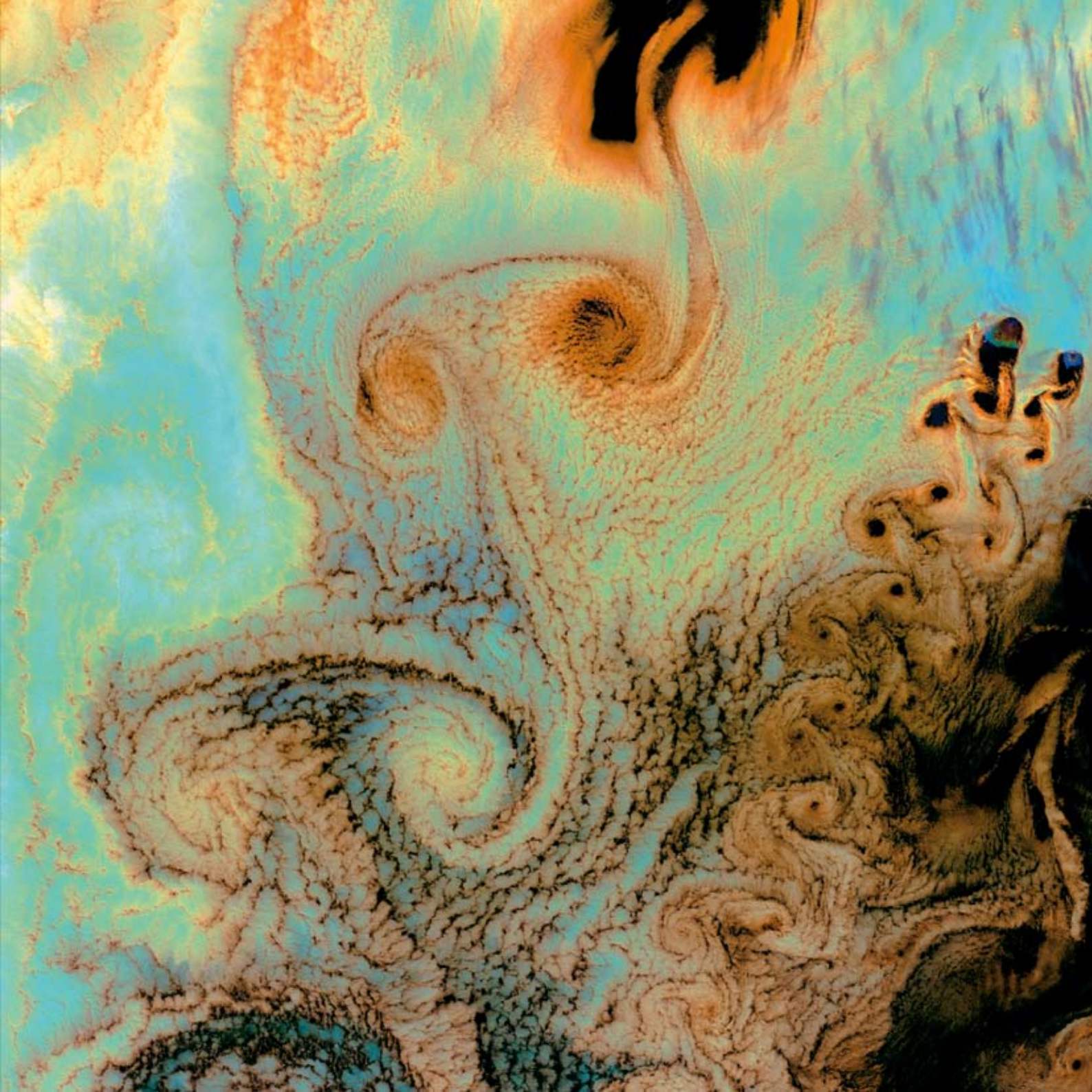
Die Lösungen dieser Gleichungen scheinen also höchstens noch Alltagswert zu haben. Warum finden sie sich dann auf der Liste der berühmten Clay-Probleme wieder? An Gleichungen, die mit jedem besseren Computerprogramm lösbar sind, würde doch sicher kaum ein gesteigertes Interesse bestehen?

Ein Vergleich mit einem sehr klassischen Gebiet möge zur Klarheit beitragen. Für die

SERIE: DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

| | | |
|------------|--|-------------|
| Teil I: | Interview mit Gerd Faltings Die riemannsche Vermutung | SdW 09/2008 |
| Teil II: | Das Komplexitätsproblem $P = NP$ | SdW 10/2008 |
| Teil III: | Goldbachsche Vermutung und Primzahlzwillingsvermutung | SdW 12/2008 |
| Teil IV: | Die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer | SdW 01/2009 |
| Teil V: | Die ABC-Vermutung | SdW 02/2009 |
| Teil VI: | Hierarchien des Unendlichen | SdW 03/2009 |
| Teil VII: | Das Navier-Stokes-Problem | SdW 04/2009 |
| Teil VIII: | Das Yang-Mills-Problem | SdW 05/2009 |
| Teil IX: | Was ist Mathematik? | SdW 06/2009 |

Von einem Hindernis, das einer gleichmäßigen Strömung im Weg steht, lösen sich abwechselnd rechts- und linksdrehende Wirbel ab und werden von der Strömung mitgenommen: eine so genannte Kármán-Wirbelstraße. In der Falschfarben-Satellitenaufnahme oben sind es Inseln der Aleuten-Kette vor Alaska, welche die gleichmäßigen Ostwinde über dem Nordpazifik stören. Unten eine numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen: Fluid trifft von links auf ein kreisförmiges Hindernis. Dargestellt sind einzelne Partikel, die man sich in das Fluid gestreut vorstellen kann.



OBEN: NASA / USGS EROS DATA CENTER, LANDSAT 7.
UNTEN: ARBEITSGRUPPE STEFAN TUREK, TU DORTMUND



Beschreibung von Naturvorgängen durch mathematische Gleichungen hat Isaac Newtons Punktmechanik die Maßstäbe gesetzt. Es seien endlich viele Massenpunkte, zum Beispiel die Himmelskörper unseres Sonnensystems, gegeben, dazu deren Orte und Geschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt. Außerdem sei das Naturgesetz, das ihre Bewegung beschreibt, in unserem Beispiel das Gravitationsgesetz, stetig, das heißt, es gibt keine plötzlichen Änderungen der Kräfte unter einer sehr geringen Änderung des Systemzustands. Unter diesen Voraussetzungen ist jeder folgende Systemzustand eindeutig bestimmt. Die Mathematik ist in dieser Hinsicht ein getreues Abbild der (deterministischen) Natur: Gleiche Anfangsbedingungen ergeben stets gleiches Verhalten.

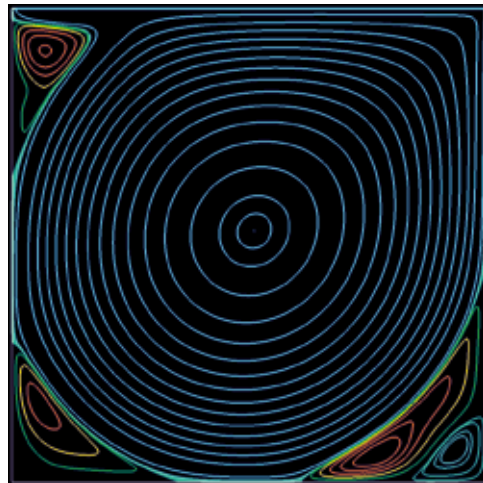
Genau diese wünschenswerte Eigenschaft ist für die Navier-Stokes-Gleichungen verletzt. Es ist bis heute nicht gelungen zu beweisen, dass eine Lösung dieser Gleichungen zu einer gegebenen Anfangsbedingung unter allen Umständen existiert und eindeutig bestimmt ist. Die Situation ist so unübersichtlich, dass das Clay Institute nicht etwa die Aufgabe gestellt hat, einen Existenz- und Eindeutigkeitsatz für die Navier-Stokes-Gleichungen zu beweisen. Vielmehr gibt es den Millionenpreis bereits für »wesentliche Fortschritte« auf diesem vertrackten Gebiet.

Was macht diese Allerweltsgleichungen so überaus schwer? Eine schnelle, vorläufige Antwort lautet: Es handelt sich um partielle Differenzialgleichungen, im Gegensatz zu den gewöhnlichen Differenzialgleichungen der Punktmechanik. Bei letzteren sind endlich

viele Funktionen der Zeit gesucht, die ihrerseits den Ort und die Geschwindigkeit jedes Beteiligten in Abhängigkeit von der Zeit beschreiben. Neben den unbekannt Funktionen selbst geht auch deren zeitliche Änderungsrate, die Ableitung nach der Zeit, in die

In Kürze

- ▶ Die **Navier-Stokes-Differenzialgleichungen** beschreiben die Strömungen von Fluiden (Flüssigkeiten und Gasen).
- ▶ Sie modellieren ein Fluid als ein **Kontinuum**, das heißt eine physikalische Größe, die in jedem Punkt in Raum und Zeit einen definierten Wert hat.
- ▶ Bis heute ist es nicht gelungen, die **Existenz und Eindeutigkeit** für Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen zu beweisen.
- ▶ Ein wesentliches Hindernis auf dem Weg zu diesem Beweis ist das Phänomen der **Turbulenz**.



ARBEITSGRUPPE STEFAN TÜREK, TU DORTMUND

Wasser, das in einer Ausbuchtung unterhalb eines Kanals steht, wird durch das im Kanal von links nach rechts strömende Wasser mitgerissen. Die entstehende Wasserwalze setzt in den Ecken kleine, gegenläufige Walzen in Bewegung, die wiederum noch kleinere, und so weiter. Stromlinien im Uhrzeigersinn sind durch blaue, solche im Gegenuhrzeigersinn durch rote Farbtöne gekennzeichnet. Der *driven cavity flow* ist ein beliebter Prüfstein für Algorithmen der Strömungsmechanik. Dieses Bild haben Sven Buijssen, Jens Acker und Abderrahim Ouazzi vom Institut für Angewandte Mathematik der Technischen Universität Dortmund berechnet.

DIE EULER-GLEICHUNGEN

Bei der Herleitung der Gleichungen der Fluidmechanik, insbesondere der Euler- und der Navier-Stokes-Gleichungen, pflegen die Physiker sich ein sehr kleines »Testvolumen« vorzustellen, sozusagen einen Käfig, der ortsfest in das strömende Fluid gehängt wird, ohne dessen Bewegung auch nur im mindesten zu beeinträchtigen. Dann denken sie darüber nach, welche Effekte den Zustand des Fluids im Käfig beeinflussen können.

- ▶ Erstens wirkt im Allgemeinen eine äußere Kraft, typischerweise die Schwerkraft.
- ▶ Zweitens folgt die Bewegung des Fluids dem Druck, der im Fluid selbst herrscht, genauer gesagt, den Druckunterschieden. Flüssigkeiten und Gase neigen dazu, dorthin zu strömen, wo der Druck geringer ist.
- ▶ Drittens wird der Inhalt des Käfigs selbst permanent ausgetauscht. Zum Beispiel wird bei entsprechend gerichteter Strömung Fluid nach rechts aus dem Käfig hinaus transportiert, und von links strömt neues nach und bringt seine – möglicherweise andere – Geschwindigkeit mit.

Diese – und weitere – Effekte kann man mathematisch ausdrücken. Über das ganze Käfigvolumen genommen, sind diese Formeln sehr kompliziert und unhandlich. An dieser Stelle kommt das machtvolle Standardhilfsmittel der Infinitesimalrechnung (»Analysis«) zur Anwendung: Man lässt den Käfig bis auf einen Punkt zusammenschrumpfen. Was zuvor eine Differenz zwischen dem Zustand des Fluids an der rechten und der linken Käfigwand war, wird zu einer räumlichen Ableitung. Damit erhält man Differenzialgleichungen, das heißt, Gleichungen, die Werte und Ableitungen von unbekannt Funktionen miteinander verknüpfen. Dabei beziehen sich alle diese Werte und Ableitungen stets auf denselben Punkt im Raum und denselben Zeitpunkt.

Bezeichnen wir mit u, v, w die Geschwindigkeitskomponenten der Strömung in x, y - und z -Richtung und mit f, g, h die Komponenten einer äußeren, gegebenen Kraft. Das Zeichen $\partial u / \partial t$ steht für die Änderung der Geschwindigkeitskomponente u mit der Zeit t (das ist die x -Komponente der Beschleunigung), entsprechend

Gleichungen ein, denn nach Newtons zweitem Gesetz der Mechanik ist Kraft gleich Masse mal Beschleunigung, und Beschleunigung ist die zeitliche Ableitung der Geschwindigkeit.

Dagegen besteht die Beschreibung eines Fluids aus einer Funktion des Orts und der Zeit. So bezeichnet eine Unbekannte wie $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ die Geschwindigkeit des Fluids am Ort \mathbf{r} zur Zeit t . Neben den zeitlichen Ableitungen, die wieder aus Newtons zweitem Gesetz herühren, gehen jetzt auch noch Ableitungen nach dem Ort in die Gleichungen ein, weil der Zustand eines Fluids an einem Punkt die Zustände in der unmittelbaren Nachbarschaft dieses Punkts beeinflusst. An die Stelle der endlich vielen unbekanntenen Positionen in der Punktmechanik treten gewissermaßen die unendlich vielen Werte der Funktion $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$, die es zu einem Zeitpunkt t zu bestimmen gilt.

Partielle Differenzialgleichungen sind also sozusagen »um den Faktor unendlich« schwerer als gewöhnliche. Aber das ist nur ein kleiner Teil der Erklärung. Im Folgenden will ich Ihnen die Navier-Stokes-Gleichungen etwas genauer vorstellen und die ihnen eigenen Schwierigkeiten herausarbeiten.

Dass ein und dieselbe Gleichung das Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen beschreiben soll, ist zunächst gewöhnungsbedürftig. In unserer Alltagserfahrung scheinen sich Wasser und Luft völlig verschieden zu verhalten. Aber das ist weit gehend darauf zurückzuführen, dass das eine Medium pro Volumeneinheit ungefähr tausendmal so viel Masse aufbringt wie das andere (also die tausendfache Dichte hat). Das wiederum geht in die Gleichungen nur mit einem konstanten Faktor ein, der an dem

Verhalten der Lösungen nichts Grundsätzliches ändert.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Kompressibilität. Luft lässt sich in der Fahrradpumpe ohne Weiteres mit Muskelkraft auf ein kleineres Volumen zusammendrücken, während Wasser inkompressibel ist, was man bei einem fehlgeschlagenen Sprung vom Fünfmeterbrett eindrucksvoll zu spüren bekommt. Merkwürdigerweise ist die Erfahrung mit der Fahrradpumpe durchaus untypisch. Bei der Umströmung von Gebäuden, Fahr- und Flugzeugen verhält sich Luft bis etwa zu Geschwindigkeiten von 300 Kilometern pro Stunde tatsächlich inkompressibel.

Es macht die Navier-Stokes-Gleichungen nicht prinzipiell schwieriger, sondern nur unübersichtlicher, wenn neben der Geschwindigkeit auch die Dichte des Fluids eine von Ort und Zeit abhängige Unbekannte ist. Deswegen wollen wir uns im Folgenden auf den inkompressiblen Fall beschränken.

Eine kurze Geschichte der Navier-Stokes-Gleichungen

Bereits im Jahr 1755 vollendet Leonhard Euler in seiner Arbeit »Principes généraux du mouvement des fluides« die klassische Hydrodynamik, genauer, die Mechanik der reibungsfreien Fluide. In dieser Arbeit leitet er aus fundamentalen Prinzipien der Mechanik, die er selbst einige Jahre zuvor postuliert hat, ein System von Gleichungen her, die heute allgemein »Euler-Gleichungen« genannt werden (Kasten unten). Ihm gelingt es auch als Erstem, eine saubere Definition für den Druck p in einem Fluid zu geben.



Schuf die Grundlagen der klassischen Hydromechanik: Leonhard Euler (1707–1783)

bezeichnet $\partial p/\partial z$ die Änderung des Drucks in z-Richtung und so weiter. Mit diesen Bezeichnungen lauten die eulerschen Differenzialgleichungen

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} &= f \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} &= g \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} &= h\end{aligned}$$

In dem gesamten Gleichungssystem erkennt man das newtonsche Gesetz »Kraft ist Masse mal Beschleunigung« wieder: Beschleunigung (der jeweils erste Term, zum Beispiel $\partial u/\partial t$) plus Effekt der Fluidbewegung (die nächsten drei Terme) plus Kraft durch Druck (zum Beispiel $\partial p/\partial x$) gleich äußere Kraft. Dass die äußere Kraft und nur sie auf der rechten Seite der Gleichung steht, ist Konvention.

Nur die Masse ist in den Gleichungen nicht wiederzufinden. In einem Fluid ist Masse gleich Dichte mal (Käfig-)Volumen. Das Volumen hat man beim Herleiten der Gleichung herausdividiert (und die Definition der äußeren Kraft entsprechend angepasst), bevor man den Käfig zusammenschrumpfen ließ. Die Dichte dagegen ist nur deswegen nicht in der Gleichung enthalten, weil man sie als konstant voraussetzt. In der hier wiedergegebenen Form gelten die eulerschen Gleichungen für eine inkompressible Strömung, kurz (und sprachlich schief) als »inkompressible Euler-Gleichungen« bezeichnet.

Mit dem Formalismus der Vektoranalysis lassen sich diese drei Gleichungen sehr elegant zu einer einzigen zusammenfassen. Man führt den Geschwindigkeitsvektor $\mathbf{v} = (u, v, w)$ und den Kraftvektor $\mathbf{f} = (f, g, h)$ ein. Mit dem Operator $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ schreiben sich die Euler-Gleichungen

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p = \mathbf{f}.$$

Bei den eulerschen Gleichungen handelt es sich um ein System von drei Gleichungen für die vier gesuchten Größen u , v , w und p ; das ist also eine zu wenig. Diese fehlende Gleichung liefert der Satz von der Erhaltung der Masse, der für inkompressible Strömungen die Form

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

oder, in Vektorschreibweise,

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

annimmt. Diese spezielle Summe aus den räumlichen Änderungen der Geschwindigkeitskomponenten heißt die »Divergenz« der Geschwindigkeit. Inkompressible Strömungen in unserem Sinne sind damit solche, in denen das Geschwindigkeitsfeld divergenzfrei ist.

Euler hat seine Gleichungen übrigens für den Fall kompressibler Strömungen hergeleitet; die inkompressible Variante folgt dann aus der Annahme, dass die Dichte des Fluids zeitlich und räumlich konstant ist.

Aus heutiger Sicht erscheinen die Euler-Gleichungen als eine unvollständige Version der Navier-Stokes-Gleichungen; aber alles, was diese so schwierig macht, ist in den Euler-Gleichungen bereits enthalten – und noch mehr. Eine entscheidende Schwierigkeit ist die

Nichtlinearität: Die Summe zweier Lösungen ist im Allgemeinen keine Lösung.

Das steht in auffälligem Gegensatz zu den üblichen Gleichungen, die Wellenphänomene beschreiben. Diese sind linear, das heißt, ihre Lösungen, darunter auch Wasserwellen, pflügen sich störungsfrei zu überlagern. Daraus folgt auch, dass die Lösungen linearer Differenzialgleichungen nicht wesentlich komplizierter werden können als die Rand- und Anfangsbedingungen. Das sind die äußeren Umstände, etwa die Form des Gefäßes, in dem die Strömung stattfindet, oder der Anfangszustand, in den man das Fluid versetzt, bevor man es sich selbst überlässt. Dagegen kann im nichtlinearen Fall schon eine sehr einfache Geometrie ein Fluid zu einem sehr komplizierten Verhalten zwingen (Bilder S. 79, 81 und 84).

Schlimmer noch: Bei den Euler-Gleichungen können zwei ursprünglich getrennte Strömungen mit verschiedenen Geschwindigkeiten aufeinandertreffen und dabei die merkwürdigsten Phänomene auslösen. Im Treffpunkt der beiden Ströme »weiß die Geschwindigkeit nicht«, welchen der beiden Werte sie annehmen soll, mit dem Effekt, dass an dieser Stelle die Funktion keinen eindeutigen Wert oder zumindest keine Ableitung nach dem Ort mehr hat.

Retter der Differenzierbarkeit: die Viskosität

In beiden Fällen kann von einer Lösung der Gleichung nicht mehr die Rede sein, weil gewisse Terme in der Gleichung nicht definiert sind. Daran scheitert ein allgemeiner Existenz- und Eindeutigkeitsatz für die eulerschen Gleichungen.

Da aber Fluiden in der Natur derartige Identitätsprobleme fremd sind, muss den Euler-Gleichungen noch eine entscheidende Zutat fehlen. Der bekannte Strömungsmechaniker Gregori Tokaty beschrieb Euler als einen genialen Schneider, der mit seinen Gleichungen eine schöne Hose angefertigt hat, die aber leider keine Knöpfe aufweist.

Was die Hose am Rutschen und die Strömungen am Zusammenbrechen hindert, ist die allgegenwärtige Reibung, die man innerhalb von Fluiden als Viskosität bezeichnet. Bei Flüssigkeiten wie Honig oder Schmieröl ist einem das Phänomen geläufig; dass aber auch bei der Luft die Zähigkeit eine entscheidende Rolle spielt, ist abermals gewöhnungsbedürftig. Die Wissenschaft benötigte denn auch geraume Zeit, um eine Theorie viskoser Fluide zu finden.

Zwar hat bereits Isaac Newton im zweiten Buch seiner »Philosophiae naturalis principia mathematica« aus dem Jahr 1678 die Hy-



Entwickelte die allgemeinen Methoden der Kontinuumsmechanik: Augustin Louis Cauchy (1789 – 1857)

DIE NAVIER-STOKES-GLEICHUNGEN

Für eine räumlich dreidimensionale, inkompressible Strömung lauten die Navier-Stokes-Gleichungen

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= f \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= g \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= h \end{aligned}$$

Zu den Euler-Gleichungen ist ein Viskositätsterm hinzugekommen; er besteht aus dem Viskositätskoeffizienten ν mal einer speziellen Summe zweiter Ableitungen, die man als den Laplace-Operator bezeichnet und den man mit dem großen griechischen Delta abkürzt:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

In Vektorschreibweise lauten die Navier-Stokes-Gleichungen

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \nabla p + \nu \Delta \mathbf{v} = \mathbf{f}.$$

Der Satz von der Erhaltung der Masse, hier in der Form der Divergenzfreiheit, bleibt natürlich auch für die Navier-Stokes-Gleichungen bestehen.

pothese formuliert, dass in viskosen Fluiden in den Berührungsflächen der Fluidteilchen Scherkräfte auftreten, die der Relativgeschwindigkeit proportional sind. Erst 150 Jahre später jedoch gelingt dem französischen Ingenieur Claude Louis Marie Henri Navier der Durchbruch. Am 18. März 1822 wird seine Arbeit »Mémoire sur les lois du mouvement des fluides« der Académie française in Paris vorgelegt.

Navier ist kein Ingenieur in unserem heutigen Sinn, sondern ein Produkt der damals neuen Polytechnischen Hochschulen. Als Absolvent der »École Polytechnique« verfügt er über eine gediegene theoretische Ausbildung, die weit in die Mathematik und die Mechanik hineinreicht. Später besucht er noch die »École des Ponts et Chaussées«, eine »École d'application«, und lernt dort die Anwendungen kennen. Durch die Verbindung außerordentlich profunder theoretischer Kenntnisse mit dem Wissen um die Probleme der Anwendung gehört Navier zur wissenschaftlichen Elite seines Landes.

Vom Atomismus des Pierre-Simon de Laplace (1749–1827) angezogen, wendet sich Navier der Molekulartheorie zu, die damals geradezu in Mode ist. Das Modell für die Wechselwirkungen zwischen den Atomen liefert Newtons Physik des Sonnensystems; Atome sollen sich also in etwa so bewegen wie die Planeten auf ihren Bahnen, die durch die Gravitationskraft gebunden sind. Navier, der sich zu Anfang des 19. Jahrhunderts einen Namen durch den Entwurf dreier neuer Brücken über die Seine gemacht hat, wendet die Molekulartheorie in der Elastizitätstheorie an und kombiniert sie schließlich mit den kontinuumsmechanischen Methoden seiner Vorgänger, vor allem des Mathematikers Augustin Louis Cauchy (Bild links), der bereits 1821 erstmals den allgemeinen Spannungszustand in einem kontinuierlichen Material erfassen konnte. Auf dieser Theorie kann Navier nun aufbauen und sich den zähen Fluiden zuwenden.

Die Herleitung im »Mémoire« ist sehr kompliziert und für uns, die wir ganz im Rahmen der Kontinuumsmechanik zu denken gewohnt sind, nur schwer verständlich. Navier postuliert eine anziehende Kraft zwischen je zwei Molekülen, die mit deren Abstand rapide abfällt, und gelangt von dieser Voraussetzung in bewundernswerter Weise zu einer brauchbaren Gleichung. Er erkennt, dass ein zähes Fluid an den Wänden eines Rohres nicht reibungslos entlanggleiten kann, sondern dass an der Wand seine Geschwindigkeit gleich null sein muss. Das nennt man heute die »No-Slip-Randbedingung«.



COLLECTION: ÉCOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSÉES (ENPC)

Erarbeitete ein mathematisches Modell für die Bewegung zäher Fluide unter der Annahme molekularer Kräfte:
Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836)



PUBLE ROMAIN

Entwarf ein ebensolches mathematisches Modell ohne die Annahme molekularer Kräfte:
Adhémar Barré de Saint-Venant (1797–1886)

EIN STARKER JAHRGANG ...



... ist die CD-ROM 2008 von **Spektrum der Wissenschaft**. Sie 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 **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** 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)

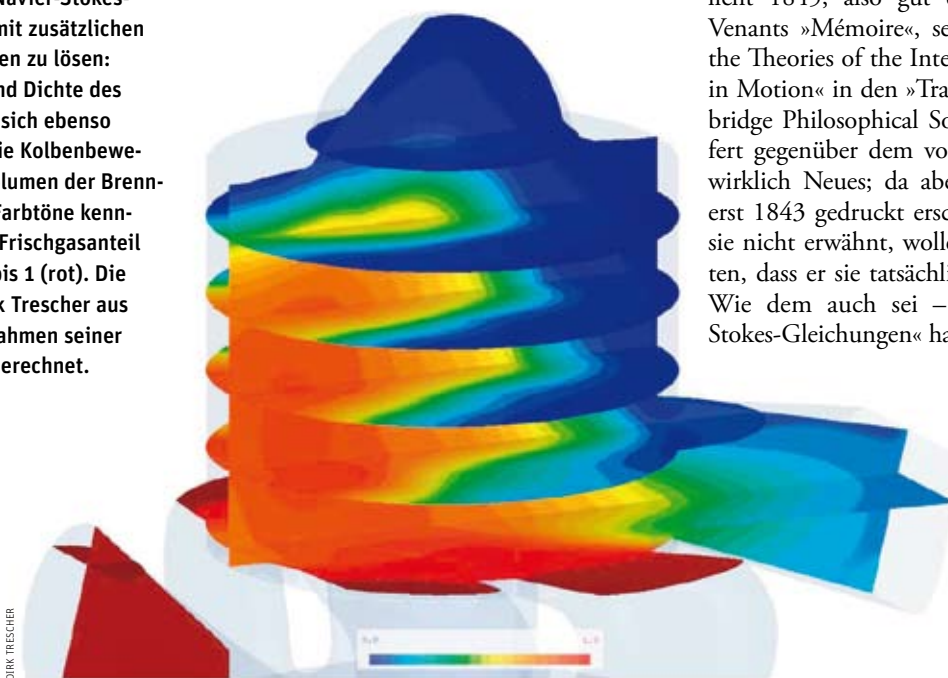
www.spektrum.com/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel.: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751 | service@spektrum.com



Die Gleichung trägt auch seinen Namen, obgleich sein Beitrag im Wesentlichen von Saint-Venant vorweggenommen wurde: George Gabriel Stokes (1819–1903)

Strömungsmechanik »innen«: Bei einem Zweitaktmotor ist der Zylinder so zu konstruieren, dass das (nach rechts) ausströmende Abgas und das im selben Arbeitstakt (von links) einströmende Frischgas sich möglichst wenig vermischen. Zur Simulation sind die Navier-Stokes-Gleichungen mit zusätzlichen Schwierigkeiten zu lösen: Temperatur und Dichte des Gases ändern sich ebenso wie – durch die Kolbenbewegung – das Volumen der Brennkammer. Die Farbtöne kennzeichnen den Frischgasanteil von 0 (blau) bis 1 (rot). Die Grafik hat Dirk Trescher aus Freiburg im Rahmen seiner Dissertation berechnet.



Ein Vergleich seiner Theorie mit (nicht ganz sauber durchgeführten) Experimenten liefert Abweichungen und macht ihn wieder unschlüssig. Auch aus diesem Grund ist wohl Naviers Nachfolgern die Art der Herleitung nicht ganz geheuer, zumal da noch die Rolle einiger Größen zu klären ist, die Navier aus Konsistenzgründen einführen musste. Aber die Gleichungen sind nun da und tun gute Dienste. Den nachfolgenden Wissenschaftlern bleibt die Aufgabe, sichere Fundamente für sie nachzutragen.

Während 1831 der berühmte Siméon-Denis Poisson (1781–1840) sich noch einmal mit molekulartheoretischen Methoden den zähen Fluiden zuwendet, dabei Naviers Ergebnisse deutlich klarer formuliert, aber nicht über sie hinauskommt, erzielt sein Landsmann Adhémar Barré de Saint-Venant (Bild S. 83 unten) einen echten Fortschritt in der Theorie viskoser Strömungen, und zwar ohne Annahmen über molekulare Kräfte zu Hilfe zu nehmen.

In seiner Arbeit »Mémoire sur la dynamique des fluides«, die am 14. April 1834, also ziemlich genau 12 Jahre nach Naviers Werk, vor der Académie française gelesen wird, legt Saint-Venant den Schwerpunkt seiner Modellbildung auf die Relativgeschwindigkeiten der Flüssigkeitsteilchen, wobei »Teilchen« im Sinn der Kontinuumsmechanik als »ein kleines Teil von Fluid« zu verstehen ist. Bewegen sich zwei benachbarte Fluidteilchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, so entsteht durch die innere Reibung im Fluid eine Schubspannung. Diese physikalische Größe hat wie der Druck die Dimension Kraft durch Fläche, steht aber an-

ders als die durch den hydrostatischen Druck p hervorgerufenen Normalspannungen nicht senkrecht auf der Grenzfläche der beiden Fluidteilchen, sondern ist tangential zu ihr gerichtet. Saint-Venant muss als einzige Hypothese die Annahme aufstellen, dass die Schubspannungen in Richtung der Gleitung – der Relativbewegung der beiden Fluidteilchen – auftreten und zu deren Geschwindigkeit proportional sind. Diese Hypothese ist die im Rahmen der Kontinuumsmechanik einzig mögliche. Sie verallgemeinert nichts anderes als die bereits von Newton postulierte Hypothese über die Schubspannungen in Fluiden.

Die so modellierte Viskosität wirkt ausgleichend: Aus einem abrupten Geschwindigkeitsunterschied zwischen benachbarten Fluidteilchen macht sie alsbald einen allmählichen, »glatten« Übergang. Dieser Effekt ist der Wirkung der Diffusion oder der Wärmeleitung vergleichbar und wird auch so modelliert, nämlich durch die Summe der zweiten räumlichen Ableitungen der Geschwindigkeitskomponenten mal einem Proportionalitätsfaktor, dem Viskositätskoeffizienten ν (kleines griechisches ν ; siehe Kasten S. 82).

Es ist dieser Ausgleichseffekt, der die Entstehung der oben beschriebenen Singularitäten der Euler-Gleichungen im Keim erstickt. Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen sind also »gutartiger« als solche der Euler-Gleichungen, allerdings leider nicht gutartig genug.

Der Beitrag von Navier zu der Gleichung mit dem Doppelnamen ist unstrittig. Wer aber ist der zweite Namensgeber? Der Brite George Gabriel Stokes (Bild links) veröffentlicht 1845, also gut elf Jahre nach Saint-Venants »Mémoire«, seine Abhandlung »On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion« in den »Transactions of the Cambridge Philosophical Society«. Sein Werk liefert gegenüber dem von Saint-Venant nichts wirklich Neues; da aber dessen Arbeit auch erst 1843 gedruckt erschienen ist und Stokes sie nicht erwähnt, wollen wir ihm zugutehalten, dass er sie tatsächlich nicht gekannt hat. Wie dem auch sei – der Name »Navier-Stokes-Gleichungen« hat sich durchgesetzt.

Einige der Schwierigkeiten mit diesen Gleichungen haben sogar ihr Abbild in der Natur. Lässt man Wasser langsam durch ein horizontales Glasrohr strömen und gibt einen Farbtropfen hinzu, dann kann man ein faszinierendes Phänomen beobachten, das Physiker und Mathematiker seit vielen Jahrzehnten bewegt, dessen eigentlicher Erklärung man allerdings noch nicht nähergekommen ist: Der Farbtropfen entwickelt sich zu einem Faden, der nach einer gewissen Lauflänge zu verwirbeln beginnt und sich dann in einer chaotischen Weise mit dem Wasser vermischt. Die Strömung ist turbulent geworden!

Ein inhärentes Problem: Turbulenz

Das Phänomen wird heute im großen Maßstab technisch genutzt. So weiß man, dass turbulente Strömungen weniger Widerstand erzeugen als laminare, also nicht turbulente, Strömungen. Moderne Motorradhelme sehen häufig aus wie Golfbälle: Die Vertiefungen machen die Strömung turbulent und verringern dadurch den Luftwiderstand.

Bis heute ist man einem echten Verständnis des Phänomens nicht wesentlich näher gekommen. In den Verfahren der numerischen Strömungsmechanik behilft man sich mit so genannten Turbulenzmodellen, von denen es ganze Familien gibt, die je nach Anwendungsbereich zu mehr oder weniger brauchbaren Ergebnissen führen. Es ist schmerzlich und für die mathematische Behandlung der Navier-Stokes-Gleichungen außerordentlich hinderlich, dass wir trotz größter Anstrengungen in diesem Punkt nur sehr wenig wissen.

Kommen wir auf unsere Eingangsfrage zurück. Die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen gehört heute zum Standard der Ingenieurskunst. Viele bunte Bilder von Strömungen beweisen das. Wozu sucht man dann noch nach einem Existenzsatz? Gerade aus Kreisen der Ingenieure schlägt den Mathematikern hier oft Unverständnis entgegen.

Hier gilt es, auf zweierlei hinzuweisen: Die numerischen Algorithmen lösen keineswegs die Navier-Stokes-Gleichungen, sondern Näherungen derselben. So werden zum Beispiel Ableitungen (»Differenzialquotienten«) durch Differenzenquotienten ersetzt, oder man sucht nicht direkt nach der richtigen Lösung, sondern nach demjenigen Exemplar aus einem eingeschränkten Sortiment von Funktionen, das der richtigen Lösung am nächsten kommt. Man ersetzt gewissermaßen die Frage durch eine leichtere Frage, die der ursprünglichen möglichst nahekommt, und hofft, dass die Antwort auf die leichte Frage derjenigen auf die echte Frage ebenfalls nahekommt. Das ist aber keineswegs automatisch der Fall, sondern



MIT FROL. GEN. VON THOMAS SONAR

will im Einzelfall bewiesen werden. Wie aber soll man beweisen, dass zwei Antworten nahe beieinander liegen, wenn man noch nicht einmal weiß, ob es die »echte« Antwort überhaupt gibt?

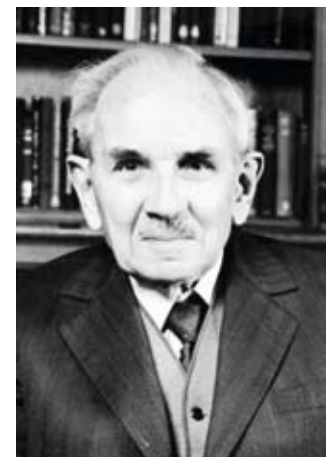
Der in der Ingenieurpraxis weit verbreitete Glaube, der Vergleich einer numerischen Lösung mit experimentellen Daten sei Verifikation genug, ist ein Irrglaube. Man kann zwar ein Turbulenzmodell so lange feinjustieren, bis die numerische Lösung die experimentellen Daten mit großer Genauigkeit reproduziert. Damit hat man jedoch noch kein belastbares Wissen über die Natur der Turbulenz erworben. Möglicherweise muss man schon beim nächsten Problem, das in einem anderen Geschwindigkeitsbereich liegt, das Turbulenzmodell durch ein anderes ersetzen.

Darüber hinaus wird ein verborgener liegendes Problem gern übersehen: Die Navier-Stokes-Gleichungen sind lediglich ein mathematisches Modell für die Strömung eines viskosen Fluids! Der Glaube, dass reale Strömungen sich tatsächlich nach den Navier-Stokes-Gleichungen verhalten, ist durchaus verständlich und ehrenhaft – wer möchte schon an den Grundlagen der Kontinuumsmechanik zweifeln? –, aber eben nur ein Glaube.

Modell und Realität

Im Gegensatz zu Navier, Saint-Venant und Stokes können wir heute sogar sicher sein, dass diese Gleichungen das Verhalten eines Fluids nur angenähert wiedergeben. Bereits dadurch, dass wir mit unserer Funktion v arbeiten, nehmen wir stillschweigend an, dass es da ein einheitliches Medium gebe, das zu jedem Orts- und Zeitpunkt eine wohldefinierte Geschwindigkeit besitze, und dass nicht etwa, wie es der Realität entspricht, ungeheuer viele Moleküle sehr chaotisch umherfliegen und miteinander Impuls und Energie austauschen.

Schon Leonardo da Vinci studierte intensiv das Phänomen der Turbulenz.



AUS: JEAN LERAY, MATHÉMATICIEN DU XXE SIÈCLE, VON LAURENT GUILLOPE, UNIVERSITÉ PERMANENTE DE NANTES, 17.11.2006

Fand die bisher beste Annäherung an eine Lösungstheorie der Navier-Stokes-Gleichungen, nämlich einen Existenzsatz für schwache Lösungen: Jean Leray (1906–1998)

Strömungsmechanik »außen«: Die Umströmung eines fahrenden Autos (hier ein Audi A2) ist für Luftwiderstand und Fahrverhalten von entscheidender Bedeutung. Vor allem hinter dem Heck ist das Strömungsmuster sehr kompliziert. Just für derartige Anwendungen erweist sich ein Verfahren, das von den Boltzmann-Gleichungen hergeleitet ist (*lattice Boltzmann method*), als geeigneter als eine schlichte Diskretisierung der Navier-Stokes-Gleichungen. Dieses Strömungsfeld wurde für die Audi AG mit dem System PowerFLOW berechnet. Die Visualisierung stammt von Martin Schulz von der Firma science + computing ag in Tübingen.

Die Variable v am Ort r ist streng genommen bereits ein Mittelwert über ein kleines Volumen in der Umgebung des Punkts r .

In der Tat kann man eine Strömung auch auf der Ebene der Moleküle modellieren. Die kinetische Gastheorie stellt dafür die theoretischen Grundlagen bereit, einschließlich eines Modells für die Interaktion der Moleküle. Das ergibt ein System von gewöhnlichen Differenzialgleichungen – für jedes Molekül sechs Stück (für die drei Komponenten von Ort und Geschwindigkeit). Da schon ein Gramm Luft ungefähr 10^{23} Moleküle enthält, ist eine rechnerische Lösung dieses Gleichungssystems jenseits alles Vorstellbaren. Aber man kann aus diesen so genannten Boltzmann-Gleichungen – benannt nach Ludwig Boltzmann (1844–1906), dem Schöpfer der kinetischen Gastheorie – die Navier-Stokes-Gleichungen herleiten, unter gewissen Zusatzannahmen, die den genannten Mittelungsprozess genauer beschreiben.

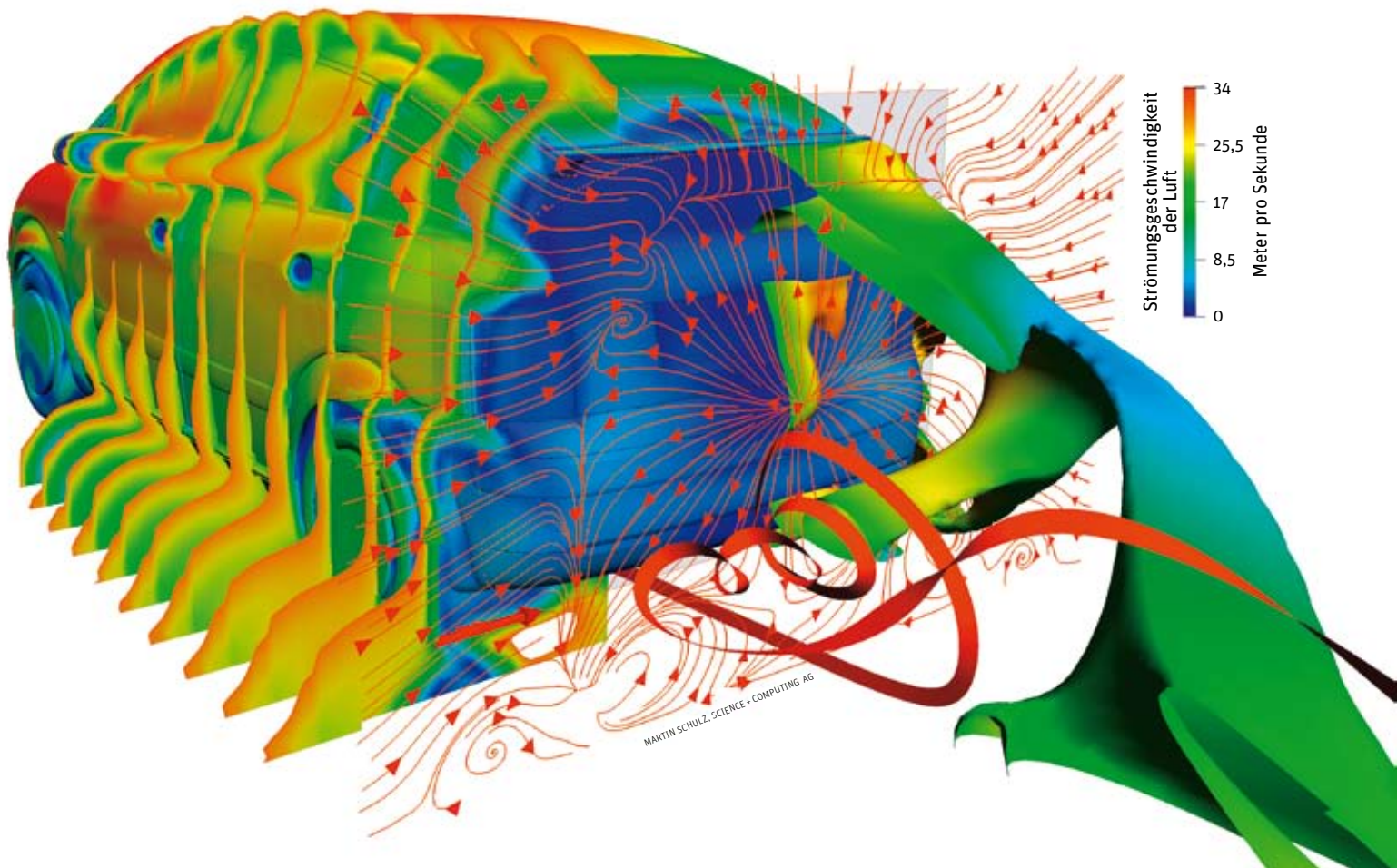
Vielleicht ist diese Mittelung ja ungeschickt oder fehlerhaft. Vielleicht ist die korrekte Beschreibung der Viskosität nicht die Summe der zweiten Ableitungen, sondern man muss noch vierte, sechste oder höhere Ableitungen mit einbeziehen. Die Idee ist keineswegs aus der Luft gegriffen. Höhere Ableitungen treten unvermeidlich auf, wenn man – durch die so genannte Taylor-Entwicklung – einen Funkti-

onswert durch den Wert derselben Funktion an einem benachbarten Ort ausdrücken will. Allerdings fallen in den üblichen Herleitungen diese höheren Ableitungen wieder heraus, wenn man das kleine Testvolumen auf null schrumpfen lässt.

Vor einigen Jahren hat der tschechische Mathematiker Jindřich Nečas (1929–2002) mit einem solchen alternativen Modell für die Viskosität gearbeitet. Seine Hoffnung dabei war, für eine so modifizierte Gleichung einen Existenzsatz beweisen zu können. Hätte er Erfolg gehabt, so hätte man argumentieren können, dass eben nicht die Navier-Stokes-Gleichungen, sondern Gleichungen höherer Ordnung die korrekte Beschreibung für reale Fluide seien. Nečas hat dieses Ziel jedoch nicht erreicht, so dass die Navier-Stokes-Gleichungen nach wie vor das Beste sind, was wir haben.

Das Clay-Problem

Nachdem ein Existenz- und Eindeutigkeitsatz zurzeit in weiter Ferne zu liegen scheint, konzentriert man sich auf Zwischenziele. Auch das Clay Institute hat solch ein Zwischenziel gesetzt: Gibt es eine offensichtlich unphysikalische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen? Wenn ja, dann wäre klar, dass die Gleichungen eine unzureichende Beschreibung der Realität sind. Gelingt es jedoch auszuschließen, dass



gewisse unphysikalische Lösungen auftreten, so kommt man dem eigentlich gesuchten Beweis zumindest ein Stück näher.

Unphysikalisch wäre zum Beispiel eine Lösung, bei der die gesamte kinetische und potenzielle Energie des Systems zunimmt; denn da die Reibung Bewegungsenergie in Wärme umwandelt, kann die restliche Energie höchstens abnehmen. Diesen Fehler macht eine Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen sicher nicht, wie relativ einfach zu beweisen ist. Es wäre aber auch schon unphysikalisch, wenn die – insgesamt endliche – Energie des Systems sich in der Umgebung eines einzigen Punktes konzentrieren und dort gegen unendlich streben würde. Dieses Phänomen nennen die Fachleute einen *blow-up*.

Machen wir folgendes Gedankenexperiment: In einem Eimer befindet sich Wasser, das wir mit einem großen Löffel in eine Drehbewegung versetzen. Nachdem die Drehung gut in Gang gekommen ist, definieren wir die rotierende Strömung zu einem bestimmten Zeitpunkt als Anfangswert für die Navier-Stokes-Gleichungen. Kann im Mittelpunkt des Eimers die Geschwindigkeit immer weiter anwachsen und damit die Energie der Strömung an diesem Punkt gegen unendlich gehen? Da lacht der Ingenieur, denn so ein Verhalten ist in einem Wassereimer noch nie beobachtet worden. Aber gibt es einen Mechanismus, der bei der Lösung der Gleichungen einen solchen *blow-up* verhindern würde? Wir kennen andere nichtlineare Differenzialgleichungen, bei denen es *blow-up*-Phänomene durchaus gibt!

Auf der Suche nach Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen geht man heute bevorzugt einen indirekten Weg. Man betrachtet eine komplette Funktion, zum Beispiel eine Lösung der Gleichungen, als einen einzelnen Punkt in einem – unendlichdimensionalen – abstrakten Raum. Bewegt man sich ein kleines Stück in diesem Funktionenraum, so geht man von einer Funktion allmählich zu einer ähnlichen Funktion über. Man kann eine Folge solcher Funktionen betrachten und es so einzurichten versuchen, dass diese Folge gegen einen Grenzwert strebt.

Nur müssen die Funktionen in diesem Raum hinreichend oft differenzierbar (»glatt«) sein, damit man überhaupt nachsehen kann, ob sie die Gleichungen erfüllen oder wie groß die Abweichung ist, wenn sie das nicht tun. Funktionen mit Knicken oder Sprüngen sind also nicht zugelassen. Es stellt sich heraus, dass Räume differenzierbarer Funktionen in einem gewissen Sinn sehr »unwegsam« sind. Nur allzu leicht gerät man beim Wandern auf verbotenes Terrain, sprich an eine nicht glatte Funktion.

Man begibt sich daher in einen größeren Funktionenraum, in dem es auch Funktionen mit Knicken und Sprüngen gibt. Durch einen Kunstgriff (»Multiplikation mit Testfunktionen« und »partielle Integration«) gelingt es auch für diese eigentlich unzulässigen Funktionen zu bestimmen, wie weit sie von einer Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen abweichen. In diesen größeren Räumen ist es einfacher, Funktionenfolgen zu finden, bei denen diese Abweichung immer geringer wird. Im Grenzwert einer solchen Folge – wenn er denn existiert – ist die Abweichung null, wie bei einer richtigen Lösung. Eine solche Funktion nennt man eine »schwache Lösung« der Navier-Stokes-Gleichungen, weil sie eine Lösung unter abgeschwächten Bedingungen ist.

In mehreren Arbeiten aus den 1930er Jahren gelang es Jean Leray (Bild S. 85 unten), Existenzaussagen für solche schwachen Lösungen zu gewinnen. Nun ist das mathematische Vorgehen vorgezeichnet: Mit den schwachen Lösungen in der Hand muss man zeigen, dass einige von ihnen in der Tat glatte Lösungen sind. Erst diese Regularitätsaussage liefert die Existenz (und hoffentlich auch die Eindeutigkeit) von glatten Lösungen, von denen wir hoffen dürfen, dass sie die realen Strömungen beschreiben. Da aber sperren sich die Navier-Stokes-Gleichungen!

Leray konnte die Existenz glatter Lösungen nur bis zu einer endlichen Zeit beweisen, also nicht für alle Zeiten. Im Fall einer dreidimensionalen Strömung, die den gesamten Raum ausfüllt (es treten also keine diffizilen Untersuchungen von Randbedingungen auf), gibt es so einen Existenzsatz nicht! Alle Versuche sind bisher gescheitert, denn je regulärer die schwachen Lösungen werden, desto mehr neigen sie dazu, so genannte Singularitäten wie die in der Mitte des Wassereimers zu entwickeln.

Untersuchungen der letzten Jahre haben sich daher darauf konzentriert, die Menge der Punkte (ihr »Hausdorff-Maß«) abzuschätzen, in denen Singularitäten auftreten können. Viele Mathematiker ersten Ranges haben sich an den Forschungen bis heute beteiligt. Nach wie vor ist die zurzeit beste Abschätzung in einer 1982 veröffentlichten Arbeit von Caffarelli, Kohn und Nirenberg zu finden.

Es gibt also zwei denkbare Lösungen des Clay-Problems. Man zeigt entweder, dass unter realistischen Annahmen eine für alle Zeiten glatte Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen existiert, oder, dass im Allgemeinen ein *blow-up* auftritt. In jedem Fall wäre das Ergebnis ein ungeheurer Fortschritt in der Theorie der Navier-Stokes-Gleichungen und der partiellen Differenzialgleichungen überhaupt. ◀



Thomas Sonar hat in Hannover studiert und in Stuttgart promoviert. Nach Stationen beim DLR in Göttingen (siehe seinen Artikel »Die Berechnung reagierender Hypererschallströmungen«, Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 72) und an der Universität Hamburg ist er Professor für Technomathematik an der Technischen Universität Braunschweig und Abteilungsleiter der Abteilung »Partielle Differenzialgleichungen« am Institut »Computational Mathematics«.

Caffarelli, L. et al.: Partial Regularity of Suitable Weak Solutions of the Navier-Stokes Equations. In: Communications in Pure and Applied Mathematics 35, S. 771–831, 1982.

Euler, L.: Principes généraux du mouvement des fluides (1755). Opera Omnia II 12, S. 54–91.

Szabó, I.: Geschichte der mechanischen Prinzipien. 3. Auflage, Birkhäuser, Basel 1996.

Temam, R.: Navier-Stokes Equations. 2. Auflage, North-Holland, Amsterdam 1985.

Tokaty, G. A.: A History and Philosophy of Fluid Mechanics. Dover, New York 1994. Nachdruck der Originalausgabe von 1971.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983272.

LOG-IN ins GEHIRN

Wie weit ist die Entwicklung einer Gehirn-Maschine-Schnittstelle gediehen? Werden wir eines Tages Informationen aus dem Internet direkt in unser Gedächtnis laden und Maschinen perfekt mit der Kraft unserer Gedanken steuern können?

Von Gary Stix

Die Konsequenzen wissenschaftlichen Fortschritts für eine ferne Zukunft vorzudenken, ist das weite Feld utopischer Romane und Filme. Zu den beliebtesten Sujets gehört es, die Grenzen zwischen Mensch und Maschine auszuloten. Häufig wird etwa gefragt, ob eine intelligente, Gefühle entwickelnde Kreation nicht als Mensch zu gelten hat – bestehe sie nun aus Stahl und Elektronik wie im Film »I Robot« (2004) oder sei sie als Androide gezüchtet wie im Kultfilm »Blade Runner« (1982).

Rasante technische Fortschritte in der Informationstechnik wie in der Biotechnologie inspirierten den amerikanischen Autor William Gibson 1984, diese Sichtweise zu variieren: In seiner Roman-Trilogie »Neuromancer« und den Werken der damit begründeten Gattung Cyberpunk werden Menschen zu einer Maschinenwelt, die von ihrer eigenen biologischen Sphäre kaum noch zu unterscheiden ist. Die Romanfiguren tauchen in Computernetzwerke ein und müssen sich dort künstlicher Intelligenzen erwehren (in der Spielfilm-Trilogie »Matrix« haben diese die Menschheit längst versklavt). In Tad Williams »Otherland«-Romanen erhoffen sich kriminelle Superreiche Unsterblichkeit durch Digitalisierung ihrer Persönlichkeit – und natürlich die Herrschaft über die Netze. Im japanischen Animationsfilm »Ghost in the Shell« soll die Verpflanzung des Gehirns in einen Cyborg der gesellschaftlichen Elite ewiges Leben und Superkräfte verleihen – bis es einem Hacker gelingt, alle Firewalls zu durchdringen und die Betroffenen umzuprogrammieren.

Zukunftsforscher analysieren aktuelle Entwicklungen und Trends mit anderen Prämissen als Sciencefiction-Autoren; ihnen geht es nicht um Dramatik und Heldentum. Dennoch verblüfft es, wenn trotz düsterer Szenarien à la »Otherland« der Futurologe Ray Kurz-

weil in seinem Buch »The Singularity is Near – When Humans Transcend Biology« (2005) eine gewisse Form der Unsterblichkeit für wahrscheinlich hält: durch einen digitalen Download unseres Gehirns mit allem Wesentlichen, was uns mit unserem Denken und Fühlen ausmacht, in einen stationären Computer oder mobilen Roboter (siehe auch seine Beiträge SdW-Spezial 4/1999, S. 48 und SdW-Dossier 6/2007, S. 77). In Wahrheit sind wir dem Traum vom ewigen Leben jedoch kaum näher als zu Zeiten René Descartes'. Der französische Philosoph sann im 17. Jahrhundert über den Dualismus von Körper und Geist nach und folgerte, dass das denkende Bewusstsein eine von Materie losgelöste Existenz haben kann. Die Überwindung der letzten Grenze zwischen Organismus und Technik liegt noch in weiter Ferne.

Per Drag and Drop ins Gehirn?

Wenn in absehbarer Zeit schon keine vollständige Verschmelzung der Welten möglich ist, wie steht es dann mit einem »Download« komplexer Informationen von einem maschinellen Wissensspeicher in das menschliche Gehirn? Werden wir eines Tages ein Werk wie »Krieg und Frieden« oder gar – als Reminiszenz an »Matrix« – ein Handbuch zum Fliegen eines Hubschraubers von einer Festplatte herunterladen können?

Solche Fragen sind keineswegs rein akademischer Natur. Zu verstehen, wie die aus Licht-, Schall-, Geruchs- oder Berührreizen hervorgehenden Eindrücke in langlebige Erinnerungen übersetzt werden, ist immens wichtig. Mit diesem Wissen ließen sich vielleicht Neuroprothesen konstruieren, um Alzheimerpatienten dabei zu helfen, neue Gedächtnisinhalte aufzubauen (siehe Kasten S. 92/93).

Ob dunkel oder strahlend hell, all die Visionen und Prognosen setzen zunächst einmal verlässliche Schnittstellen zwischen der organischen und der technischen Welt voraus, etwa in Form spezieller, in das Gehirn im-

In Kürze

► Spekulationen von Futurologen und Sciencefiction-Autoren zufolge wird es Menschen eines nicht mehr allzu fernen Tages möglich sein, ihr **Gehirn mit Computern zu verbinden**.

► Einfache, Hirnsignale erfassende (auslesende) **Schnittstellen existieren bereits** – um einen Mauszeiger oder eine Armprothese zu steuern. Wie weit sich die Technik insgesamt noch entwickeln lässt, ist derzeit schwer einzuschätzen.

► Zumindest ist eine Art »Nürnberger Trichter« nicht völlig undenkbar, der textliche oder andere komplexe Informationen in eine Hirnstruktur einspeist, die zur **Bildung neuer Gedächtnisinhalte** führt. Ohne wesentlich tiefere Einblicke in die Funktionsweise des Gehirns wird das jedoch nicht gelingen.



plantierter Mikrochips oder Elektrodensysteme nebst einer Verbindung zur Außenwelt. Ein »auslesendes« Neurointerface würde die natürliche elektrische Aktivität unseres Nervensystems registrieren, ein »einschreibendes« hingegen erzeugt darin Nervenimpulse.

Erste – periphere – Neuroschnittstellen, die elektrische Spannungen über Elektroden weitergeben, wurden seit den 1980er Jahren Tausenden von Menschen eingesetzt: Cochlea-Implantate, die den Hörnerv Tauber oder schwer Hörbeschädigter stimulieren und so Informationen übermitteln, die ein Prozessor aus dem mittels Mikrophon aufgenommenen Schallsignal aufbereitet hat (SdW 6/2004,

S. 42). Obendrein sind seit Längerem »Sch-chips« in der Entwicklung, die als künstliche Netzhaut bei Erblindeten fungieren sollen (SdW 10/2005, S. 90 und SdW-Dossier 6/2007, S. 14).

Solche Implantate sitzen gewissermaßen erst an Außenstellen des Gehirns. Wie steht es aber mit dem Zentralnervensystem selbst? Hier wird seit einigen Jahren der umgekehrte Weg getestet, nämlich die Übertragung von elektrischen Signalen aus dem Gehirn an eine Maschine. Forscher um John Donoghue von der Brown University in Providence (Rhode Island) implantierten 2004 einem Querschnittgelähmten erstmals einen Multi-Elek-

Mit technischen Mitteln neurale Prozesse modifizieren zu können, diese Vorstellung inspirierte zahlreiche Sciencefiction-Autoren und Futurologen.

Was geschehen kann, wenn die Grenzen zwischen Mensch und Maschine aufgehoben werden, gehört zu den beliebtesten Sujets der Sciencefiction.

troden-Array namens »BrainGate«. Dieses »Tor zum Gehirn« griff von mehreren Dutzend Neuronen der motorischen Hirnrinde Signale ab, über die der Patient dann per »Gedankenkraft« eine Handprothese steuern konnte.

Ohne Operation kommt die Aufnahme und Analyse von Elektroenzephalogrammen aus. Das EEG zeigt ein summarisches Abbild der schwankenden neuralen Aktivität, abgegriffen von der Kopfhaut. Spezialkappen, die aussehen wie eine mit Elektroden übersäte Bademütze, können einem gelähmten und nicht mehr sprechfähigen Patienten dazu verhelfen, mit einem Cursor Buchstaben auf einem Bildschirm anzusteuern. Einer der führenden Wissenschaftler auf diesem Gebiet ist der Neuropsychologe Niels Birbaumer von der Universität Tübingen.

Für das viel ehrgeizigere Ziel aber, Informationen wie über einen Nürnberger Trichter direkt in jene Hirnstruktur einzuspeisen, die zum Aufbau eines Langzeitgedächtnisses unerlässlich ist, müssen Technologien erst entwickelt werden. Zwei der wichtigsten Probleme sind:

- ▶ eine zuverlässige, möglichst risikoarme Schnittstelle, die elektrische Signale von einer Welt in die andere transferiert (siehe auch mittleres Element im Kasten S. 92/93),
- ▶ eine Übersetzung des zu Lernenden in die Sprache der Neurone, damit sich das Gewünschte übermitteln lässt.

Wie Lösungen beider Probleme aussehen könnten, das lassen die Arbeiten führender Forscher auf diesem Feld aber schon ansatzweise erahnen.

Bereits bei den Grundprinzipien der Schnittstellen gilt es abzuwägen. Wenn sich über Elektroden oder Chips im Hirngewebe eine verlorene oder beeinträchtigte Funktion wiederherstellen lässt, dann mögen die Risiken tolerabel sein. Eine derart invasive Methode dürfte aber für Gesunde kein praktikables Vorgehen sein, um sich etwa Goethes »Faust« einzuverleiben.

Niels Birbaumer meint, man könne mit nicht invasiven Verfahren möglicherweise die »Signatur« bestimmter Worte ermitteln – das Aktivitätsmuster, das sich aus einem EEG extrahieren lässt, wenn wir etwa an jene Worte denken. Um herauszufinden, welche Region des Gehirns diese Signatur hervorbringt, könnte man Bereiche der Hirnrinde systematisch durch eine so genannte transkraniale Magnetstimulation von außen hemmen. Soll ein Proband an ein bestimmtes Wort denken, das Aktivitätsmuster stellt sich aber nicht ein wie zuvor, hat die gehemmte Region offenbar mit diesem Wort zu tun. Ein-

mal zugeordnet, ließen sich die betreffenden Muster in diesem Areal bei Bedarf erneut aktivieren, um den Begriff aufzurufen – zumindest theoretisch. Andere Forscher glauben, dass an invasiven Verfahren kein Weg vorbeigeht, da nur mit Hilfe von Elektroden im Gehirn das Neuronennetzwerk gezielter abgehört beziehungsweise einmal angesprochen werden kann.

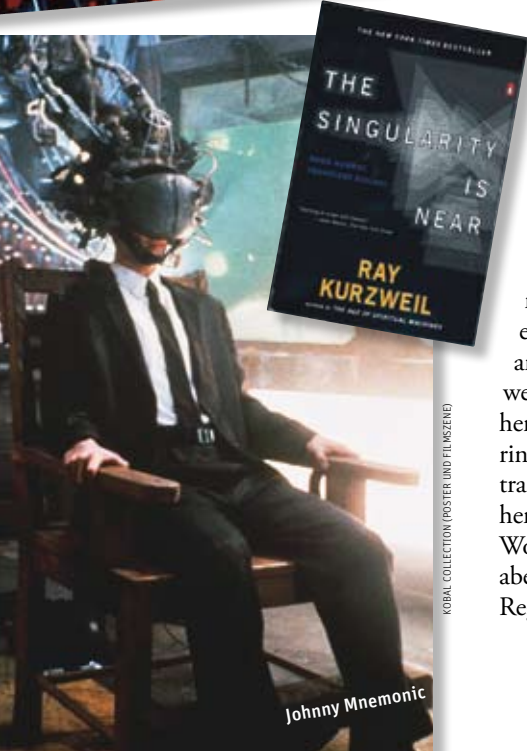
Elektroden für Hirnschrittmacher

Zu der benötigten feineren Ortung solcher Elemente könnte vielleicht eines der Experimente verhelfen, die Hightech-Neuroimplantate verwenden. Beispielsweise entwarf Philip R. Kennedy von der Firma Neural Signals in Duluth (Georgia) zusammen mit Forscherkollegen eine kegelförmige Elektrode, in die Nervenzellen einwachsen können. In der sprachmotorischen Hirnrinde erfasst sie den Output einiger Neurone, deren Signale unter anderem die Stellung von Lippen, Zunge und Kiefer bei der Produktion von Lauten steuern.

Erstmals wurde 2004 einem fast völlig gelähmten Schlaganfallopfer ein solches Implantat (mit Sendereinheit) als Schnittstelle zu einem Computer eingesetzt. Dieser interpretiert die drahtlos übermittelten Signale und steuert einen Sprachsynthesizer. Bislang gelang es dem Patienten damit zwar nur, Vokale zu bilden, doch das ist ein wichtiger Schritt zu ganzen Worten. Umgekehrt ließe sich dieser Interface-Typ auch zur Aktivierung einer Gruppe einzelner Neurone nutzen.

Ein noch feiner auflösendes Elektrodensystem dürfte man mit so genannten Nanotubes, Kohlenstoffröhrchen mit Durchmessern von weniger als 100 Nanometern, erreichen. Auf Grund ihrer äußerst geringen Dimensionen sowie ihrer elektrischen und mechanischen Eigenschaften könnten sie zum Beispiel leicht an einzelnen Nervenzellen Signale mit hoher zeitlich-räumlicher Auflösung abnehmen.

Jun Li von der Kansas State University in Manhattan (Kansas) und seine Kollegen haben gemäß dieser Idee eine bürstenartige Struktur mit beschichteten biokompatiblen Nanoborsten konzipiert, die elektrische Impulse übertragen oder aufnehmen kann. Der Nanotechnologe sieht verschiedene Anwendungen, etwa für Stimulationselektroden von »Hirnschrittmachern«. Diese tief ins Gehirn reichenden Elektroden sollen die Stimmung schwer Depressiver aufhellen oder Bewegungsstörungen von Parkinsonpatienten lindern (siehe SdW 9/2007, S. 42). Nutzbar wären die Nanoborsten laut Jun Li auch, um vom Gehirn aus eine Armprothese zu steuern. Selbst die Muskulatur von Astronauten auf



KOBAL COLLECTION (POSTER UND FILMSZENE)

langen Weltraumflügen ließe sich so trainieren – um dem Muskelschwund entgegenzuwirken, der sich bei Schwerelosigkeit unweigerlich einstellt.

Was die Wunschträume anbelangt, ein Kapitel Infinitesimalrechnung oder vor dem Urlaub schnell noch ein Französisch-Wörterbuch ins Gedächtnis überspielen zu können, müssen wir erst viel genauer verstehen, wie Sprachinformation durch Neurone und neuronale Signale kodiert, wie sie in das Netzwerk von Milliarden von Nervenzellen und Billionen von Synapsen unseres Gehirns eingespeist und dort repräsentiert wird.

Den neuronalen Kode zu entschlüsseln ist eine der größten Herausforderungen für die Hirnforschung. Der ältesten Theorie nach dient die Frequenz, mit der ein Neuron elektrische Spannungsspitzen (*spikes*) generiert, der Kodierung von Information. Für manche, einfache Stimuli mag eine solche Verschlüsselung genügen. Sie wäre jedoch wohl kaum ausreichend, um einen Marcel Proust oder einen Richard Feynman einzuspielen. Neuere Arbeiten konzentrieren sich auf die genauen Zeitabstände zwischen den einzelnen *spikes* (Zeitkodes) und auf die zeitlich-räumlich wechselnden Aktivitätsmuster, wenn Gruppen von Neuronen feuern (Populationskodes, siehe linkes Element im Kasten S. 92/93).

Elektronische Gedächtnishilfe

Am Verständnis des Kodes arbeiten auch Teams um Theodore W. Berger von der University of Southern California (USC) in Los Angeles und Samuel Deadwyler von der Wake Forest University in Winston-Salem (North Carolina). Gemeinsam tüfteln diese Gruppen an einer elektronischen Version des Hippocampus, einer der ältesten Strukturen des Gehirns im so genannten Temporallappen. Eine solche Prothese soll zunächst einmal Patienten helfen, deren Hippocampus durch einen Schlaganfall oder eine Demenzerkrankung wie Alzheimer geschädigt wurde. Denn diese Hirnstruktur – an der Innenseite eines jeden Schläfenlappens – spielt eine wichtige Rolle bei der Bildung neuer Gedächtnisinhalte.

Den Forschern gelang es immerhin, einen solchen Schaltkreis für eine Ratte aufzubauen. Das Tier lernte durch Drücken eines bestimmten Hebels, Wasser zu erhalten. Normalerweise hätte sein Hippocampus nun Signale generiert, um diese Erfahrung Bereichen der Hirnrinde zu übermitteln, die frisch Erlerntes langfristig speichern. Das biologische Original wurde aber chemisch vorübergehend stillgelegt. Drückte das Tier den richtigen Hebel, wurden alle Signale, die für den Hippocampus bestimmt waren, etwa Sinnesinformationen,



in den Mikrochip gespeist. Dieser generierte sodann nach Aussage der Wissenschaftler genau die Signale, die auch der Hippocampus erzeugt hätte. Das Experiment belegte, dass der künstliche Output des Chips in diesem speziellen Fall den biologischen wirklich imitierte. Das ist ein großer Schritt auf dem Weg zur Entzifferung der Kodierung höherer Verhaltensweisen.

Wären die Kodes für einen einfachen Satz oder gar für Schillers »Lied von der Glocke« oder eines technischen Handbuchs ermittelt, könnte man sie theoretisch via Elektrodenarray in einen intakten Hippocampus oder sogar direkt in die Hirnrinde einspeisen. Verständlicherweise gehört auch das amerikanische Militär zu den Interessenten – so unterstützt auch das US-Verteidigungsministerium (die DARPA) entsprechende Forschungen. »Eine typische Anwendung, die das Verteidigungsministerium gerne realisiert sähe, wäre das Einspeisen neurokodierter Informationen zum Fliegen einer F15«, verrät Hirnforscher Berger. »Matrix« lässt grüßen.

So einfach die Idee hinter dem künstlichen Hippocampus klingt, wirft sie doch bereits jetzt zahlreiche Fragen auf. Würde ein solches Implantat etwa im Gehirn schon vorhandene Gedächtnisinhalte überschreiben? (Johnny Mnemonic, Held einer Erzählung von William Gibson, hatte genau dieses Problem: Als Kurier speicherte er geheime Informationen in seinem Gehirn, musste diese aber innerhalb von 24 Stunden wieder auslesen, wollte er bestimmte eigene Erinnerungen behalten.) Wäre etwa der Kode für »Fest gemauert in der Erde« für alle Menschen gleich, unabhängig von der Muttersprache? Würden sich die hippocampalen Kodes sauber in andere Verschaltungen einfügen, die den richtigen semantischen Rahmen herstellen? Oder könnte Fausts Erkenntnis »Das also war des Pudels Kern« nicht mit dem Teufel Mephisto, son-

Ein vom Hals abwärts gelähmter Patient fährt hier »kraft seiner Gedanken« eine virtuelle Straße entlang. Eine Elektrodenkappe erfasst dazu seine Hirnströme. Auf diese Weise soll er einmal seinen Rollstuhl in der Realität lenken können.

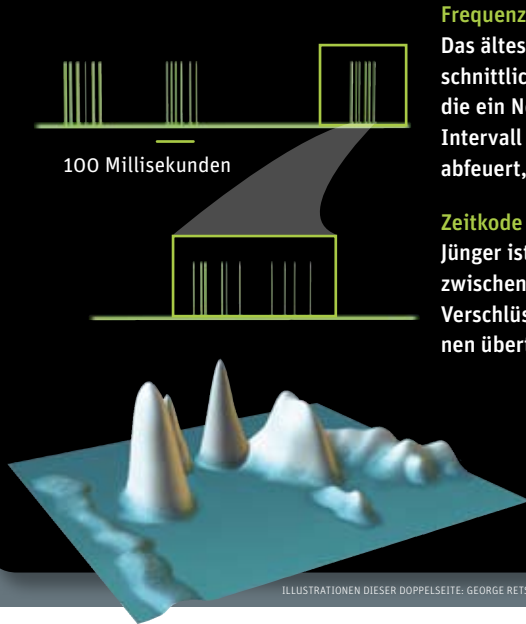


Dieser Affe lernte, mittels seiner neuronalen Signale einen Roboterarm zu bewegen und so Leckerbissen zu erhalten.

Wie man den kompletten »Faust«, ein schwieriges Lehrbuch oder andere komplexe Informationen vielleicht direkt in das Gehirn eingeben könnte, dafür liefert die aktuelle neurowissenschaftliche Forschung gewisse Anhaltspunkte. Versucht wird etwa für prosaischere Anwendungen, den neuronalen Kode zu ent-

schlüsseln, in dem Informationen als Input für einen Output umgesetzt sind. Des Weiteren gilt es, eine verlässliche Verbindung zwischen Gehirn und Elektronik herzustellen. Ob die Hindernisse auf dem Weg zur Konstruktion eines Einlesegeräts für das Gehirn je überwunden werden können, ist ungewiss.

DREI TYPEN NEURALER KODES



Frequenzkode

Das älteste Modell geht davon aus, dass die durchschnittliche Zahl von elektrischen Impulsen (*spikes*), die ein Neuron als Reaktion auf einen Input in einem Intervall von beispielsweise 100 Millisekunden abfeuert, seinen Informationsoutput verschlüsselt.

Zeitkode

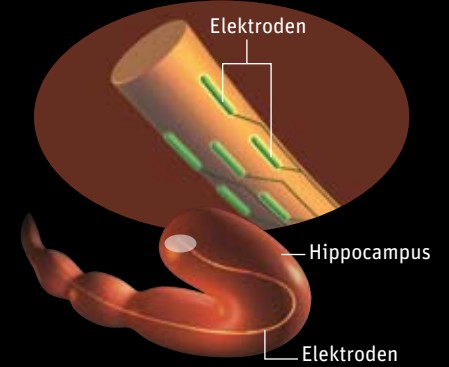
Jünger ist die Annahme, dass der zeitliche Abstand zwischen zwei *spikes* des Intervalls ebenfalls der Verschlüsselung dient und zudem mehr Informationen übertragen kann als der Frequenzkode.

Populationskode

Modernste Untersuchungen beschäftigen sich mit Populationskodes: Aktivitätsmustern, die beim Feuern ganzer Neuronengruppen entstehen und die zeitlich und räumlich variieren.

ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: GEORGE RETSECK

ANSCHLUSS GESUCHT



Gehirnzellen mit technischen Geräten verlässlich und ohne Risiken zu verschalten, ist eine enorme Herausforderung: Verbindungen können verrutschen, sich lösen oder Infektionen verursachen. Heutige Elektrodensysteme sprechen Hirnareale überdies noch sehr ungenau an.

dern mit Informationen für Haustiere assoziiert werden?

»Es reicht nicht, viele Signale aufzuzeichnen, zu interpretieren und dann mit bestimmten Verhaltensweisen in Bezug zu setzen«, kritisiert Henry Markram, Leiter des Bereichs Neurowissenschaften und Technologie an der Technischen Hochschule von Lausanne. Denn Neurone oder Neuronengruppen können einen gegebenen Input auf vielen Pfaden in einen bestimmten Output umwandeln. »Solange es viele verschiedene Wege gibt, sind wir einer Lösung nicht einmal auch nur nahe«, sagt Markram.

Die Forscher des Blue Brain Project, das Markram 2005 gründete und seitdem leitet, wollen das Gehirn durch Computersimulationen auf zellulärer und molekularer Ebene nachbauen. In einer ersten Stufe modellieren sie einen winzigen Ausschnitt des Rattenhirns, danach wollen sich die Forscher das menschliche Gehirn vornehmen. Für diese zweite Stufe benötigen sie aber einen Computer, der 1000-mal mehr leistet als derzeitige Superrechner. Am Ende hofft Markram, die Funktionsweise der neuronalen Prozesse aufgedeckt und ihren Kode entschlüsselt zu haben. Der könnte dann deutlich von dem abweichen, was in den heutigen Lehrbüchern steht. »Ich glaube, es wird

einen konzeptionellen Durchbruch geben, mit gravierenden Auswirkungen auf unsere Wahrnehmung der Realität«, sagt der Südafrikaner. »Das wird eine ganz große Sache. Wahrscheinlich ist das auch der Grund, warum das Problem kaum zu bewältigen ist.«

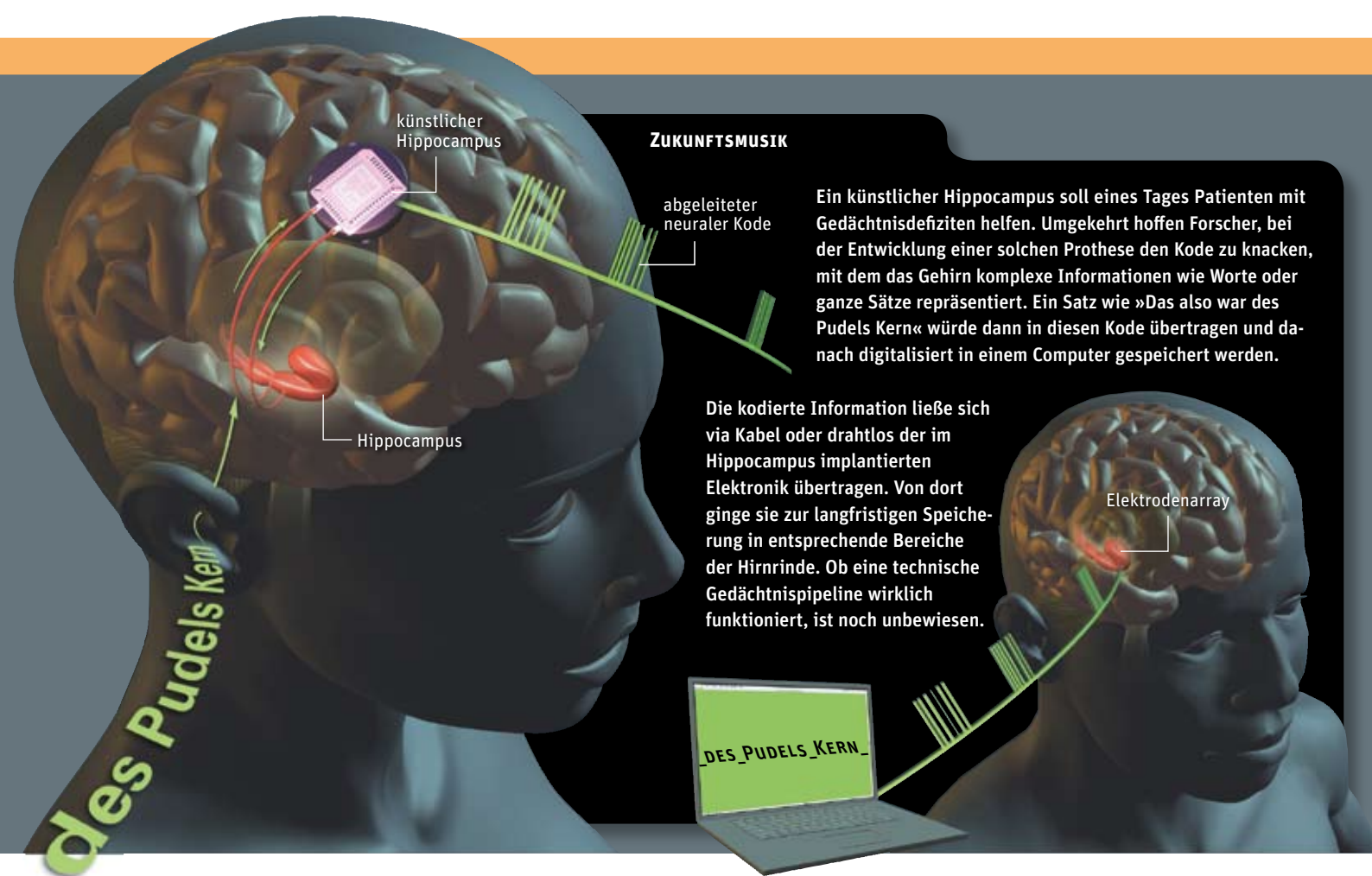
Gelähmte Gliedmaßen bewegen

Angeht die großen Herausforderungen deutet sich eine Grenze für die Neurotechnologie an. Das Zusammenschalten künstlicher Nervenzellen, um die unzähligen Verbindungen herzustellen, die eine Erinnerung ausmachen, ist etwas ganz anderes, als eine Gruppe von Bits auf einer Festplatte zu speichern.

»Um komplexe Informationen wie den Inhalt eines Buchs abzuspeichern, müsste man eine enorme Zahl von Zellen aus weiten Bereichen des Nervensystems dazu bringen, miteinander zu interagieren«, bemerkt der Neurowissenschaftler John P. Donoghue, dessen Team BrainGate implantierte. »All diese Neurone gleichzeitig ansprechen, damit sie die korrekten Informationen in ihren synaptischen Verbindungen speichern – das könnte man nicht. Nach heutigem Wissensstand würde ich sagen, dass die Speicherung solcher komplexer Informationen nicht möglich ist.«

Donoghues eigene Erwartungen nehmen sich bescheidener aus, haben aber dafür eine Chance auf technische Umsetzung. In den





ZUKUNFTSMUSIK

Ein künstlicher Hippocampus soll eines Tages Patienten mit Gedächtnisdefiziten helfen. Umgekehrt hoffen Forscher, bei der Entwicklung einer solchen Prothese den Kode zu knacken, mit dem das Gehirn komplexe Informationen wie Worte oder ganze Sätze repräsentiert. Ein Satz wie »Das also war des Pudels Kern« würde dann in diesen Kode übertragen und danach digitalisiert in einem Computer gespeichert werden.

Die kodierte Information ließe sich via Kabel oder drahtlos der im Hippocampus implantierten Elektronik übertragen. Von dort ginge sie zur langfristigen Speicherung in entsprechende Bereiche der Hirnrinde. Ob eine technische Gedächtnispipeline wirklich funktioniert, ist noch unbewiesen.

nächsten fünf Jahren, so seine Prognose, werden implantierte »auslesende« Multi-Elektroden-Arrays so weit entwickelt sein, dass ein vollständig Gelähmter mit einer Arm-Hand-Prothese eine Tasse anheben und daraus trinken kann. Und in nicht allzu ferner Zukunft könnten künstliche, mit dem Gehirn rückkoppelnde Gliedmaßen ihm wohl sogar ermöglichen, sich frei zu bewegen.

Auch vor diesem Ziel liegen noch etliche Schritte. Gert Pfurtscheller und seine Kollegen von der Technischen Universität in Graz berichteten 2007 von einem vollständig Gelähmten, der dank einer nicht invasiven Mensch-Maschine-Schnittstelle kraft seiner Gedanken immerhin in der virtuellen Realität eine Straße entlangsteuerte (Foto S. 91 oben). Ein weiterer Pionier auf diesem Gebiet, Miguel A.L. Nicolelis von der Duke University in Durham (North Carolina), hatte erstmals einen Affen über eine Schnittstelle mit einem Roboterarm gekoppelt (siehe seinen Beitrag in SdW 1/2003, S. 74). Nun erforscht der Neurowissenschaftler, wie solche verdrahteten Tiere ein Bewusstsein für Bewegung und Berührung entwickeln, unabhängig vom sensorischen Input des eigenen Körpers. »Einigen physiologischen Indizien zufolge« – so Nicolelis – »fühlen sie sich während des Experiments mehr mit dem Arm des Roboters als mit ihrem eigenen verbunden.«

Kurzum: Der Download eines Düsenjet-Handbuchs wird also wie der des »Faust« auf sich warten lassen, ebenso der Cyborg, der ein menschliches Gehirn in einem Maschinenkörper für die Ewigkeit bewahrt. Auch militärische Anwendungen wie eine künstliche Netzhaut, die einem Elitesoldaten beim Kampf gegen Terroristen das Nachtsehvermögen einer Eule verleiht, dürfte noch lange nicht an das biologische Original heranreichen, von den Risiken der Operation ganz abgesehen. Von den Entwicklungen werden auf absehbare Zeit vor allem Taube, Blinde, Gelähmte und Patienten mit Gedächtnisdefiziten profitieren.

Vielleicht gehören einmal aber auch Schüler zu den Nutznießern. Denn die Simulationen der Lernvorgänge im Gehirn würden Pädagogen vielleicht neue Wege zu einem besseren Unterricht weisen. »Sie können ein Bildungsförderungsprogramm erstellen, das ganz gezielt darauf ausgerichtet ist, in möglichst kurzer Zeit bestimmte Fähigkeiten zu erwerben«, glaubt Henry Markram vom Blue Brain Project. Das wäre zwar nicht so spannend wie ein direkter Anschluss des Internets an das Gehirn oder ein komplettes Eintauchen in eine virtuelle Realität. Aber wenn man die Helden der Cyberpunk-Romane und -Filme um ihre Meinung fragen könnte, hätten wohl die meisten liebend gern auf solche Möglichkeiten verzichtet. ◀



Gary Stix ist Redakteur bei »Scientific American«.

Berger, T. W., Glanzman, D. L. (Hg.): Toward Replacement Parts for the Brain: Implantable Biomimetic Electronics as Neural Prostheses. MIT Press, Cambridge 2005.

Gazzaniga, M. S.: Human: The Science Behind What Makes Us Unique. Ecco, New York 2008.

Kurzweil, R.: The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology. Penguin Books, London 2007.

The Singularity. IEEE Spectrum, Special Report, Juni 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983267.

MIKROMOTOREN

Drehen und Wippen

Winzige Motoren verrichten unsichtbar ihren Dienst in Festplatten und anderem nützlichen Gerät.

Von Mark Fischetti

Ob Digitalkamera, Handy oder Netbook – tragbare Geräte werden immer kleiner. Nach wie vor bieten Festplatten die größten Speicherkapazitäten für Bits und Bytes. Sollen sie schrumpfen, müssen auch die Motoren kleiner werden, welche die Platten drehen oder die Schreib-Lese-Köpfe bewegen.

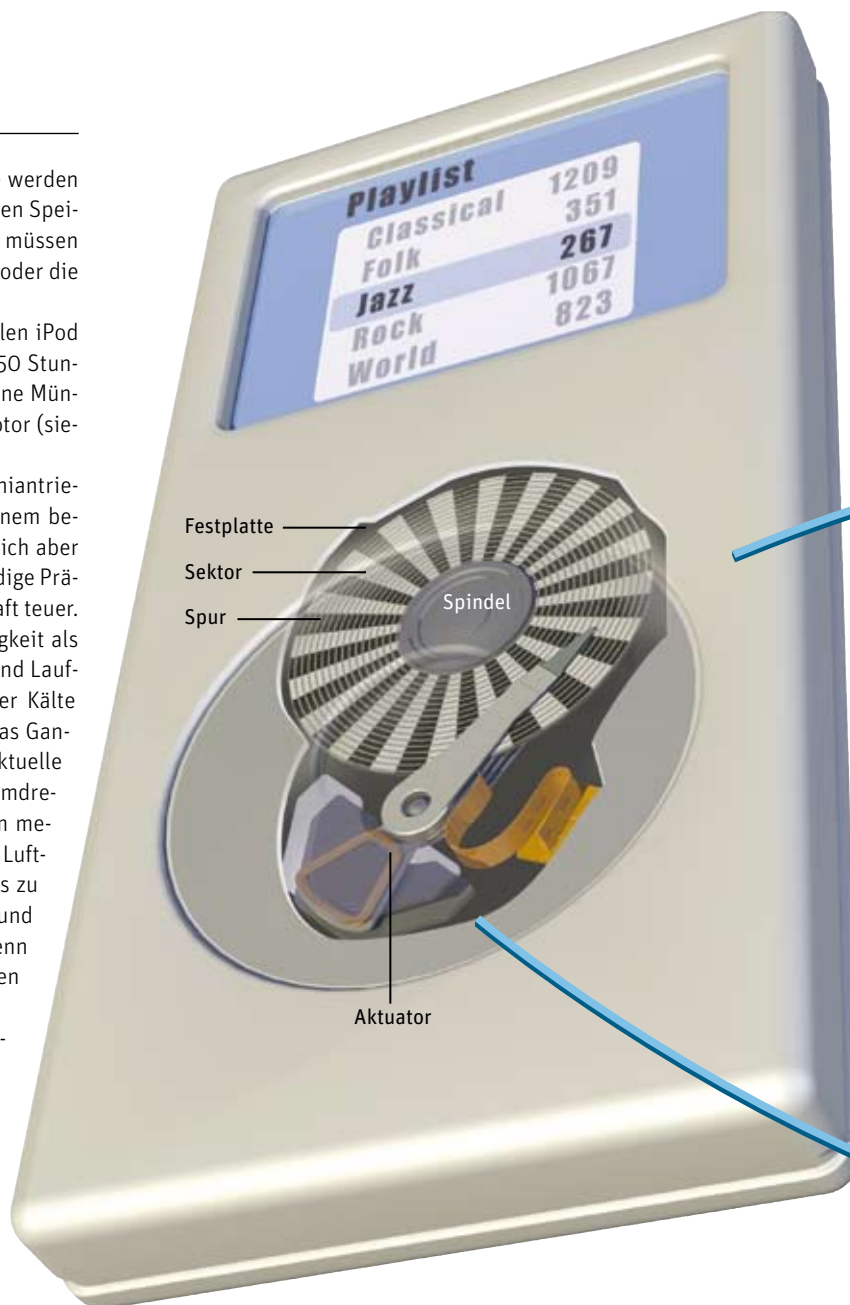
Auf die 120 Gigabyte fassende Speicherplatte des aktuellen iPod Classic zum Beispiel lassen sich 30 000 Musikstücke oder 150 Stunden Videofilm ablegen. Dabei ist die Festplatte dünner als eine Münze und wird von einem Spindelmotor angetrieben, dessen Rotor (siehe Grafik) nur zwei Millimeter dick ist.

Wie bei größeren Elektromotoren bestehen auch diese Miniantriebe aus einem unbeweglichen Magneten, dem Stator, und einem beweglichen Teil im Innern des Stators, dem Rotor. Der dreht sich aber nicht auf kleinen Kugel- oder Walzenlagern, denn die notwendige Präzision von 0,05 Mikrometern zu erreichen wäre damit sündhaft teuer. Stattdessen verwenden Mini- und Mikromotoren eine Flüssigkeit als Lager, typischerweise ein Öl. Das reduziert zudem Reibung und Laufgeräusche. Allerdings darf der dünne Film weder bei großer Kälte steif werden noch bei großer Hitze reißen, und dicht muss das Ganze auch noch sein. Immer höhere Geschwindigkeiten – aktuelle 1,8-Zoll-Modelle für tragbare Computer erreichen 5400 Umdrehungen pro Minute – beanspruchen die Schmierfilme zudem mechanisch sehr stark. Noch schnellere Rotationen ermöglichen Luftlager – bei großen Computerfestplatten sind damit bereits bis zu 30 000 Umdrehungen pro Minute möglich. Neben Größe und Präzision ist auch Stromsparen ein Thema der Entwickler, denn der Spindelmotor verbraucht den größten Teil der benötigten Energie.

Für kleinformatige Datenträger verwenden Hersteller zunehmend Flash-Speicher, die keine beweglichen Teile und keinen Motor benötigen. Der derzeit kleinste Elektroantrieb auf dem Markt kommt auch nicht in einer Festplatte, sondern in der Medizin zum Einsatz. Mit seinen 1,9 Millimeter Durchmesser passt er in feine Katheter und treibt Operations- und Diagnosegeräte an, die endoskopisch in den Körper eingeführt werden.

Mit dem Mikrobot, den der australische Wissenschaftler James Friend im Februar vorstellte, könnte die minimalinvasive Medizin noch eine neue Dimension erreichen. Der winzige Roboter soll dereinst in menschliche Blutgefäße gespritzt werden, um dort zum Beispiel autonom kleine Eingriffe vorzunehmen. Sein Antrieb basiert auf dem Piezoeffekt (siehe Kasten) und ist mit 250 Mikrometer Durchmesser etwa so dick wie drei Haare.

MARK FISCHETTI ist Redakteur bei »Scientific American«.



Festplatten, wie sie zum Beispiel in vielen MP3-Playern eingebaut werden, brauchen einen Motor, um die Magnetscheibe zu drehen, damit der richtige Sektor unter den Lesekopf zu liegen kommt. Ein zweiter Motor bewegt den Lesekopf vor und zurück, um zur Datenspur zu gelangen.

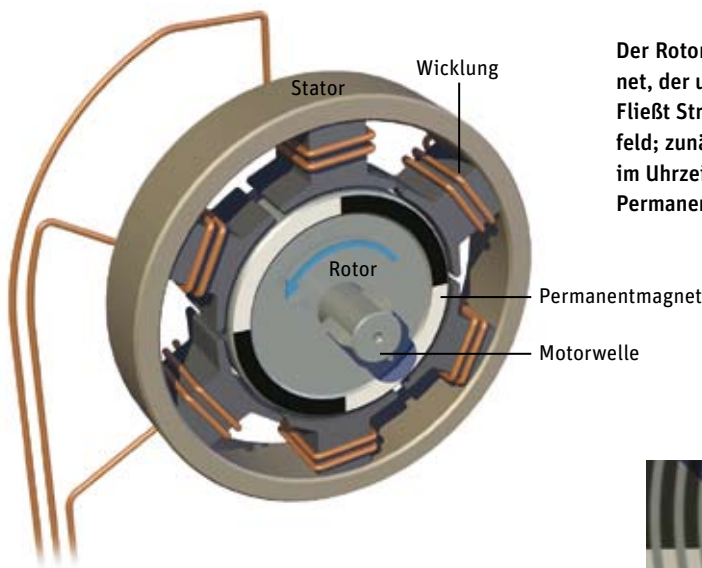
WUSSTEN SIE SCHON?

► **Piezelektrische Keramiken** ändern ihre Form, wenn elektrische Felder angelegt werden. Diese Technik wird insbesondere für Stellantriebe genutzt, die Objekte auf Bruchteile von Nanometern exakt positionieren sollen. Um bei gleicher Präzision einige Zentimeter Stellweg zu erreichen, bauten Ingenieure eine Art Piezohundertfüßler. Seine Beinchen können sich heben und senken, aber auch nach vorne und nach hinten bewegen. Jedes schiebt das Objekt ein Stück weiter. Solche Motoren lassen sich beispielsweise zum Verstellen optischer Linsen einsetzen.

► **Auch im Modellbau** ist Miniaturisierung Trumpf. Faulhaber, ein deutscher Hersteller von Kleinstantrieben, entwickelte einen Elektromotor für eine knapp sechs Zentimeter lange und nur 36

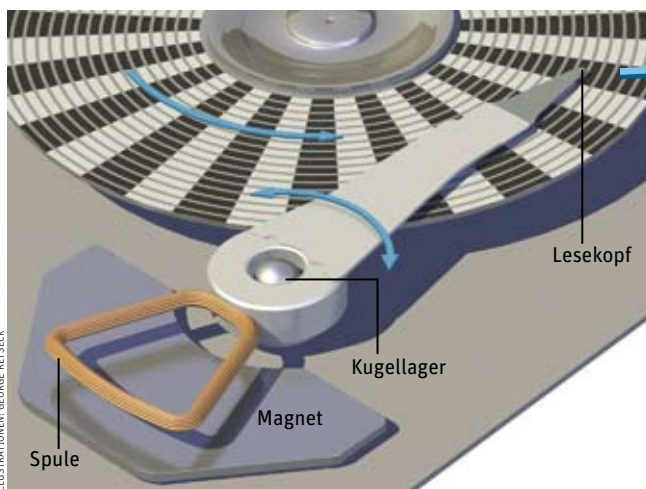
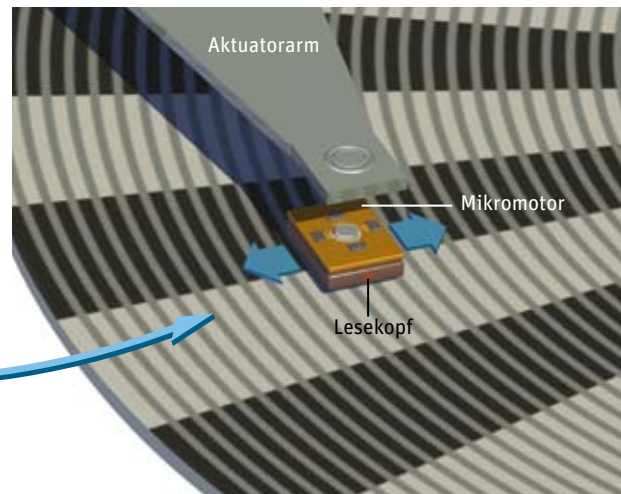
Gramm schwere »Dampflok«. Ein Problem bestand darin, bei der geringen Masse Unwuchten zu vermeiden. Es wurde durch eine Schwungmasse auf der Motorwelle gelöst, die um maximal 0,03 Millimeter nach oben oder zur Seite ausschlagen kann.

► **Schon lange arbeiten Forscher** daran, die molekularen Motoren der Zellen als Antrieb zu nutzen. Mit dem Enzym ATPase ist das im Experiment schon gelungen. Es misst nur zwölf Nanometer in Höhe und Breite und unterstützt die Synthese des Energieträgers ATP (Adenosintriphosphat). Dazu rotiert ein äußerer Ring des Enzyms und bringt die ATP-Bausteine so nah zusammen, dass sie sich verbinden können. Diese Bewegung nutzten Wissenschaftler der University of California, um Plastik Kügelchen im Kreis zu drehen.



Der Rotor des Spindelmotors ist meist ein Permanentmagnet, der unbewegliche Stator hingegen ein Elektromagnet. Fließt Strom durch dessen Wicklungen, entsteht ein Magnetfeld; zunächst um den obersten Zinken, dann nacheinander im Uhrzeigersinn um alle anderen. Seine Polarität stößt den Permanentmagneten des Rotors ab, und die Welle dreht sich.

Den Arm, der den Schreib-Lese-Kopf einer Festplatte trägt, bewegte bislang ein Aktuator mittels Schwingspulentechnik: Strom fließt durch eine Wicklung, die sich in einem stationären Magnetfeld befindet, und die Spule wird seitlich ausgelenkt.



Mittlerweile sind die Datenspuren auf Festplatten nur noch einige zehntel Mikrometer breit – zu schmal für einen Schwingspulentechnik-Aktuator. Geeignete Mikromotoren verwenden elektrische Felder, um die notwendige Bewegung zu erzeugen.

ILLUSTRATIONEN: GEORGE RETSECK

ELEKTROAUTOS

die rollenden Stromspeicher

Der Trend zum Elektroauto findet unerwartete Unterstützung bei Stromversorgern. Die nämlich müssen mit einem wachsenden Anteil von Wind- und Sonnenstrom zurechtkommen, der aber nur unregelmäßig ins Netz eingespeist wird. Können Millionen von Elektroautos das schwankende Angebot abpuffern?

In Kürze

- ▶ Das »Betanken« von **Millionen von Elektroautos** würde, wenn sich elektrische Mobilität überhaupt als praktikabel und vorteilhaft erweist, auch die Stromnetze stark belasten.
- ▶ Gleichzeitig könnten Elektroautos jedoch bei deren Lastmanagement eine wichtige Rolle spielen, indem sie als Zwischenspeicher für Energie dienen. In Zukunft könnte eine **Vehicle-to-Grid**-Infrastruktur die Grundlage für die Anbindung der Autos an die Netze darstellen.
- ▶ Noch aber gehen die Forscher kleinere Schritte. Mittels **»Smart Metering«-Technologie** und variablen Tarifen für Industrie und Haushalte soll die Netzauslastung optimiert werden.

Von Reinhard Löser

Obwohl kaum ein Exemplar beim Händler steht, spricht alle Welt von Elektrofahrzeugen. Schließlich bieten sie offenkundige Vorteile: Der »lokal emissionsfreie« Antrieb ist immerhin dort abgasfrei, wo sich das Auto tatsächlich bewegt. Die Ökobilanz ist aber selbst dann nicht schlecht, wenn der Kohlendioxid ausstoß im Kraftwerk einbezogen wird, das den Strom produziert.

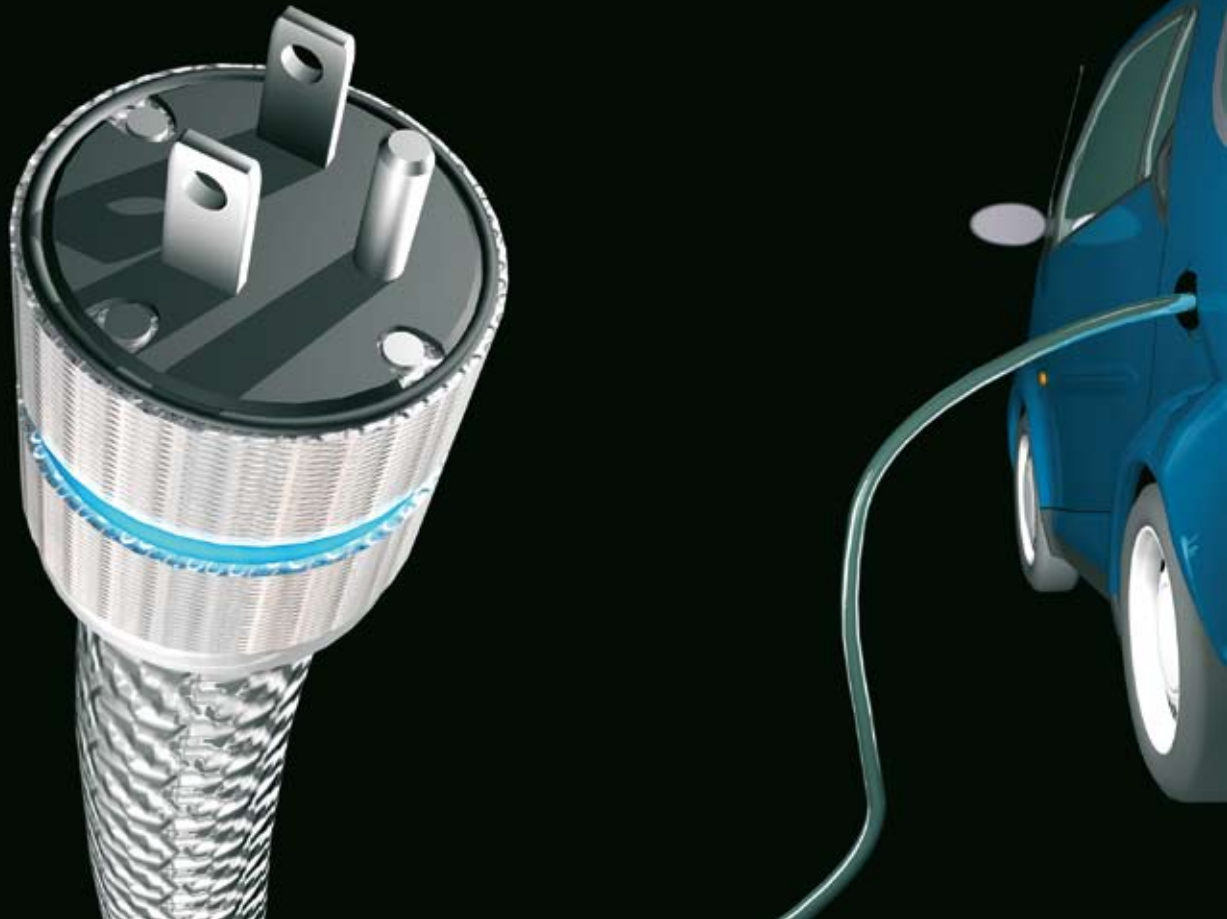
Beim »Smart ed« beispielsweise (siehe »Die Zukunft fährt elektrisch«, SdW 3/2009, S. 88), der 15 Kilowattstunden (kWh) in seinen Bordakku speichert und damit etwa 115 Kilometer weit kommt – also 13 kWh auf 100 Kilometer verbraucht –, beläuft sich der CO₂-Ausstoß auf 78 Gramm pro Kilometer.

Dieser Wert beruht auf dem mit rund 600 Gramm pro kWh behafteten deutschen Strommix und ist, verglichen mit dem europäischen Grenzwert von 120 Gramm pro Kilometer (siehe Kasten »Autos müssen abspecken« auf S. 100), der ab 2015 gilt, ein bedeutender Fortschritt.

Je größer der Anteil von Elektroautos auf den Straßen, desto stärker ließe sich der Kohlendioxidanteil des Verkehrssektors absenken, der heute 18,6 Prozent beträgt. So richtig umweltfreundlich wird der Antrieb allerdings erst, wenn ausschließlich »grüne« Energie getankt wird, die aus regenerierbaren Quellen wie Sonne, Wind und Wasser kommt. Dann könnte der Verkehr völlig unabhängig von fossilen Kraftstoffen werden. Deren Fördermaximum nämlich haben wir bereits erreicht oder gar schon überschritten,

SERIE: AUTOS DER ZUKUNFT

| | | |
|------------------|---|--------------------|
| Teil I: | Wie Nano das Auto verändert | SdW 02/2009 |
| Teil II: | Die Zukunft fährt elektrisch | SdW 03/2009 |
| Teil III: | Elektroautos – die rollenden Stromspeicher | SdW 04/2009 |
| Teil IV: | Intelligente Sicherheitssysteme | SdW 05/2009 |



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIGANIM

während die Nachfrage nach den restlichen Vorräten immer weiter wächst. Zeit also, sich ernsthaft mit der elektrischen Mobilität zu beschäftigen.

In jüngster Zeit katapultierten Fortschritte in der Batterietechnik insbesondere bei Lithiumionen-Systemen (siehe ebenfalls SdW 3/2009) die Elektrofahrzeuge in eine höhere Liga. Statt praxisferne Konzeptvehikel mit nur geringer Reichweite zu präsentieren, führen die Konzerne nun Flottenversuche mit Hunderten von Autos durch. Doch woher soll, wenn sich die Technik durchsetzt, der benötigte Strom kommen?

Solange nur Experimentalfahrzeuge an die Steckdosen rollen, fallen der neue Bedarf und die Infrastruktur in Form einiger hundert Spezialtankstellen nicht ins Gewicht. Anders sieht es aus, wenn die Elektromobile eines Tages auf den Massenmarkt kommen und als Großverbraucher auftreten. »Autoleute behandeln ein E-Auto immer noch wie ein Bügeleisen«, schüttelt Tomi Engel von der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie (DGS) den Kopf. Sie stellten sich vor, man könne es nach Lust und Laune an die Steckdose hängen. Doch dann stießen die Netze schnell an ihre Grenzen. »Ein Auto ist ein ganzes Haus auf vier Rädern mit einem Strombedarf von

zwei Megawattstunden im Jahr«, wenn man eine durchschnittliche Fahrleistung von rund 12 000 Kilometern jährlich zu Grunde legt.

Alle in Deutschland zugelassenen Pkw verbrauchen in Form von Benzin und Diesel eine Energiemenge, die fast der gesamten Bruttostromerzeugung von etwa 600 Terawattstunden (TWh, 1 Terawattstunde = 1 Milliarde Kilowattstunden) entspricht. Es ist utopisch, diese Flotte über Nacht auf Strombetrieb umrüsten zu wollen. Belässt man es aber vorerst bei der einen Million Elektroautos, die von der Bundesregierung für 2020 angestrebt werden, sind nur rund drei TWh an elektrischer Energie aufzubringen.

Was hindert uns noch?

Dies klingt noch immer nach viel, macht aber lediglich ein halbes Prozent des derzeitigen deutschen Strombedarfs aus. Selbst der elektrifizierte öffentliche Nah- und Fernverkehr, so Engel, zieht jährlich 15 TWh Strom problemlos aus dem Netz – knapp drei Prozent des Bruttostromverbrauchs. Und allein der Stand-by-Verbrauch von elektrischen Geräten in privaten Haushalten wird auf 20 TWh pro Jahr geschätzt.

Warum also werden E-Fahrzeuge nicht einfach schnell eingeführt? Unter anderem ha-

Anschluss gesucht: Falls das Elektroauto eines Tages auf den Massenmarkt kommt, werden auch Veränderungen unserer Energieinfrastruktur nötig. Das kleine Bild unten zeigt den Mitsubishi i-Miev. Der Viersitzer kommt 2010 auf den europäischen Markt, soll sich in sieben Stunden an der Haussteckdose aufladen lassen und kommt mit voller Batterie 160 Kilometer weit.

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk



MITSUBISHI MOTORS

pert es bei der allgegenwärtigen Bereitstellung von Strom, insbesondere wenn er emissionsfrei erzeugt sein soll, ebenso wie bei der Netzintegration. Und schließlich müssen Autonutzer erst einmal davon überzeugt werden, dass die Infrastruktur steht und die Kosten kalkulierbar sind.

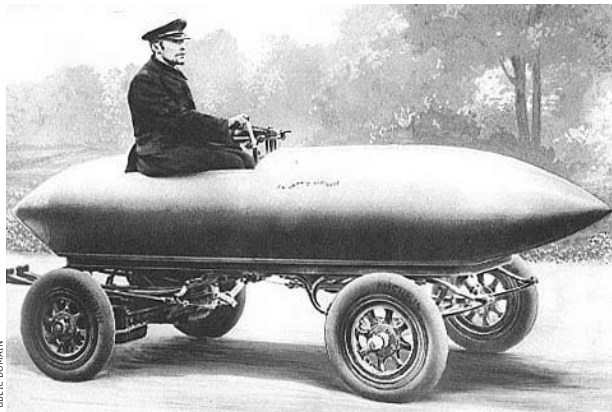
Doch vielleicht lassen sich ihre Interessen ja mit denen der Stromanbieter vereinbaren?

»Im Netz wollen wir zwar einen steigenden Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien«, sagt Matthias Kurth, Präsident der Bundesnetzagentur. Die Bundesbehörde ist unter anderem für den Wettbewerb unter den Stromversorgern zuständig. »Doch deren Volatilität, hauptsächlich die der Windkraft, führt zu zusätzlichem Bedarf an Reservekapazitäten.« Das verursacht erhebliche Kosten sowohl im

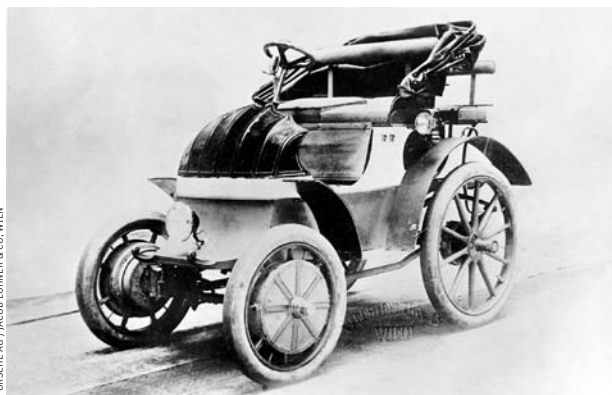
DAS AUTO WIRD ELEKTRISCH

Am Anfang war das Elektrofahrzeug (»Electric Vehicle«, EV), und zwar lange vor seinen von Verbrennungsmotoren angetriebenen Geschwistern. Erinnert sei an das erste Batteriefahrzeug mit wiederaufladbarer Batterie von Robert Anderson im schottischen Aberdeen aus dem Jahr 1839, die Oberleitungsbusse, die Siemens & Halske 1881 in Berlin auf die Straßen schickten, oder an den Lohner Porsche von 1900, der als erstes Hybridfahrzeug der Welt gelten kann. In der Folgezeit machten billige und überall verfügbare Kraftstoffe den Elektrofahrzeugen allerdings den Garaus.

Doch es erwies sich als praktisch, den Verbrennungsmotor nicht mit Muskelkraft und Handkurbel anzuwerfen, sondern dies einem elektrischen Starter zu überlassen. Auch Lichtmaschine, »Winker« und weitere Bedienelemente verhalfen dem Strom



Bei Achères nahe Paris fuhr Camille Jenatzys Elektromobil im April 1899 über 100 Kilometer pro Stunde schnell.



Erstes Serien-Hybridfahrzeug mit Verbrennungsmotor und elektrischen Radnabenmotoren: der Lohner Porsche von 1900

zum Wiedereinzug ins Auto. Heute sind sich die Ingenieure einig, dass »Elektromobilität« nicht erst beim Elektroantrieb beginnt, sondern bei Starterbatterie, Lichtmaschinengenerator und Nebenaggregaten.

Und sie finden überall Optimierungspotenzial: Immer noch sind im Auto Keilriemen zu finden, die etwa die Wasser- und Benzinpumpe oder die Lichtmaschine antreiben. Befreit man diese mit Hilfe von elektrischen Systemen aus der mechanischen Dauerkopplung, laufen sie nur noch bei Bedarf – das spart Kraftstoff. Auch der Leerlauf, der eigentlich nur das wiederholte Starten vermeiden soll, wird heute allmählich durch eine elektrische Start-Stopp-Funktion (»Micro Hybrid«) ersetzt.

Selbst das Brennstoffzellenauto (»Fuel Cell Vehicle«, FCV) kann als Elektrofahrzeug gelten, weil Achsen und Räder elektrisch angetrieben werden. Dabei liefert die Brennstoffzelle kontinuierlich Strom und erhält bei Bedarf Unterstützung von der Batterie, die ebenfalls überschüssige Energie sammelt.

Bei den inzwischen klassischen Hybriden (»Hybrid Vehicle«, HV) arbeitet ein gängiger Verbrennungsmotor als Hauptantrieb. Ein sekundärer Elektromotor unterstützt ihn, sorgt auch für die Start-Stopp-Automatik, liefert gegebenenfalls einen »Boost« (also ein zusätzliches Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen wie beim Anfahren und Beschleunigen) und wandelt Brems- und Roll-Energie durch Rekuperation wieder in elektrischen Strom um, der die Batterie auflädt. Eine Verlängerung der Reichweite von Elektrofahrzeugen erreicht man schließlich mit einem »Range Extender«, einem gleichmäßig bei optimalem Wirkungsgrad arbeitenden Verbrennungsmotor. Dieser lädt ausschließlich die Batterien und verbraucht nur wenig Kraftstoff.



Die Berliner »BZ am Mittag« ließ 1920 Botendienste noch per Elektrowägelchen erledigen.

Bereich der Netze als auch des Kraftwerkbaus, die schon heute in einer Größenordnung von jährlich sechs bis sieben Milliarden Euro liegen. Und das, obwohl erst 22 Prozent der installierten Kraftwerksleistung von knapp 130 Gigawatt (GW, Milliarden Watt) aus erneuerbaren Energien stammen. (Dabei ist Wasserkraft, weil sie sich kontrolliert einspeisen lässt, nicht berücksichtigt.) Dieser Anteil könnte laut Bundesnetzagentur bis 2020 jedoch auf 37 Prozent steigen.

Energieerzeuger und -verteiler interessieren sich darum für jegliche Technologie, mittels derer sich die Transportwege von Strom und der Bedarf an Reservekapazitäten verringern lässt. Die E-Mobile kommen ihnen gerade recht. Wann immer eine Autobatterie betankt wird, tritt sie zwar als zusätzlicher Verbraucher im Netz auf. Weil Fahrzeuge in der Regel aber »Stehzeuge« sind, nämlich während 97 Prozent ihrer Lebensdauer nicht genutzt werden, könnte man sie, entsprechende Infrastruktur vorausgesetzt, auch ganz anders einsetzen. Entweder die Versorger rufen die in ihren Batterien gespeicherte Energie bei Engpässen kurzfristig ab, oder sie dienen ihnen bei Überschüssen als Stromspeicher, der die Netze entlastet.

Sekundengenau abfangen

Voraussetzung für die effektive Einbindung von E-Fahrzeugen ins Netz ist allerdings, dass nicht jeder seine Batterien nach Belieben lädt. Stattdessen müssen die Bedürfnisse von Autonutzern, Netzbetreibern und Energiedienstleistern gleichermaßen berücksichtigt werden. Ein intelligentes Management könnte dies leisten, zumal EVs meist nachts geladen werden dürften, wenn im Netz ohnehin Energieüberangebot herrscht.

Für dieses Konzept hat sich der Begriff »Vehicle to Grid« (V2G) etabliert. Bereits eine Million Elektroautos könnten rund drei Gigawatt so genannte positive beziehungsweise negative Regelleistung bereitstellen. Kommt eine weitere Million hinzu, wäre schon die Leistung der Pumpspeicherkraftwerke erreicht, wie sie zur Feinjustierung der Auslastung in die heutigen Netze integriert sind. So könnten sich die Schwankungen, die Zeiten starken Windes oder schwacher Last hervorrufen, sekundengenau abfangen lassen, ebenso wie Extremsituationen, wenn beispielsweise morgens die Industriemaschinen ihren Betrieb aufnehmen, während gleichzeitig Flaute herrscht.

Eine grundlegend neue Infrastruktur der Energieverteilung ist für V2G indessen nicht notwendig. Stromkabel finden sich »im Zehn-Meter-Abstand« und »Steckdosen sind allgegenwärtig«, sagt auch E.ON-Chef Wulf Ber-

DIE RENAISSANCE DER ELEKTROFAHRZEUGE

Eine erste, nur kurz währende Renaissance der Elektromobilität begann vor rund 15 Jahren, zunächst in den USA, um dann auf Europa überzugreifen. Auslöser war allerdings politischer Zwang. Einige US-Bundesstaaten unter Führung von Kalifornien wollten der Umweltverschmutzung mit CO₂-freien Fahrzeugen (»Zero Emission Vehicles«, ZEV) zu Leibe rücken. 1998 sollten zwei Prozent, 2003 schon zehn Prozent der in den einzelnen Bundesstaaten zugelassenen Neufahrzeuge eines Herstellers in die Kategorie ZEV fallen – unter Androhung empfindlicher Strafen bei Nichterreichung dieser Ziele.

Fieberhaft stürzte sich die Branche daraufhin in die Entwicklung von Elektroautos, elektrischen Antrieben und Batterien. Es entstanden das »EV1« von General Motors, das anfangs mit Blei-, später mit Nickel-Cadmium-Batterien ausgerüstet wurde und in über tausend Exemplaren auf die Straße kam, der Ford THINK (der inzwischen an eine norwegische Firma verkauft wurde und recht erfolgreich ist), der Toyota »RAV 4 EV« und viele andere.

Anfangs sorgte die US-Regierung sogar für finanzielle Anreize. Doch die Fahrer mochten die zu schweren Autos nicht und manch einer, der einen Achtzylinder mit vier Litern Hubraum gewohnt war, vermisste das »Röhren« des Motors. Zudem steckte die Batterietechnik noch in den Kinderschuhen und selbst lange Ladezeiten erlaubten nur bescheidene Reichweiten. So kam, was kommen musste: Im Einvernehmen zwischen Autolobby und Politik wurden die Gesetze aufgeweicht und die Elektropioniere auf den Schrottplatz geschleppt. Denn selbst wenn man Brennstoffzellenfahrzeuge und Benziner mit sehr geringem Verbrauch in die Rechnung einbezog, blieben die Ziele unerreichbar. Für

Zum konsequenten Bau kleinerer und leichter Fahrzeuge haben selbst die kalifornischen Misserfolge nicht geführt. Der »Chevrolet Volt« von GM (Bild) soll 2010 auf den Markt kommen, eine Variante davon, der »Opel Ampera«, geht bald darauf in Europa an den Start.



GENERAL MOTORS

den Todesstoß sorgte schließlich die Regierung in Washington, als sie bundesstaatliche Sonderregelungen beim Umweltschutz verbot.

Der Versuch mit Tausenden von Fahrzeugen hinterließ dennoch Positives: Die Erfahrungen mit der Speichertechnik sowie die erfolgreichen PR-Aktionen bei Einführung des »EV1« mit Stars wie Tom Hanks oder Mel Gibson griff Toyota bei Entwicklung und Markteinführung des Hybridmodells »Prius« wieder auf. Der rasche Durchbruch des Prius – bereits Mitte 2008 überschritt das Modell die Schwelle von einer Million Exemplaren – war nicht zuletzt auch ein PR-Erfolg.

Derzeit sind weltweit rund 800 Millionen Pkw unterwegs, Nutzfahrzeuge nicht eingerechnet. In Deutschland beispielsweise kommen auf 100 Einwohner 70 Pkw. Der Wirkungsgrad der im Verkehr eingesetzten flüssigen Energie beträgt aber weiterhin nur bescheidene 10 bis 15 Prozent. Auch darum ist Elektromobilität wieder brandaktuell. Sie könnte den Klimaschutz befördern und antizipiert zugleich die bevorstehende Erdölverknappung sowie die damit einhergehende Verteuerung und gibt eine Antwort auf das Mobilitätsbedürfnis eines stets wachsenden Anteils der Weltbevölkerung.



Künftige Stromtankstellen dürften eher unspektakulär wirken und vor allem auf Parkplätzen errichtet werden. Das Bild oben zeigt ein Modell der kalifornischen Firma »Better Place«. Eine Einrichtung wie im Bild rechts, die heutigen Tankstellen ähnelt, würde hingegen voraussetzen, dass sich Batterien im Minutentempo laden lassen.



AUTOS MÜSSEN ABSPECKEN

Der Automarkt steht vor seinem vielleicht größten Umbruch. Der Höhepunkt der Erdölförderung ist erreicht oder überschritten und die Politik erhöht den Druck. Neufahrzeugflotten müssen die Ende 2008 von der Europäischen Union verabschiedeten Reduktionsziele bis 2015 erfüllen, sonst drohen Strafzahlungen. Noch 1998 hatten die Konzerne Gesetzesauflagen mit dem Versprechen abwehren können, den CO₂-Ausstoß bis Ende 2008 freiwillig auf durchschnittlich 140 Gramm pro Kilometer (g/km) zu reduzieren. Doch das Ziel wurde um 20 g/km und damit überdeutlich verfehlt. 2006 veröffentlichte die EU einen ernüchternden Zwischenstand: Ford: 157 g/km, Opel: 161 g/km, Volkswagen: 172 g/km, BMW: 187 g/km, Audi: 188 g/km, Mercedes Benz: 192 g/km. Nur der Smart konnte mit 119 g/km glänzen.

Nun gilt als gesetzliche Grenze ab 2015 ein Wert von 120 g/km. Im Jahr 2012 müssen ihn zunächst nur 65 Prozent der Neuwagen erfüllen, dann steigt der Wert stufenweise und liegt drei Jahre später bei 100 Prozent. Für große Fahrzeuge gelten dabei weniger strenge Grenzwerte als für Kleinwagen.

Den Konzernen wird das Erreichen der Limits dadurch erleichtert, dass ihnen dazu zwei Wege offenstehen. Mittels motortechnischer Maßnahmen müssen sie den Ausstoß ihrer Fahrzeuge auf lediglich 130 g/km reduzieren. Eine Senkung um weitere zehn Gramm sollen sie durch andere Verbesserungen etwa am Rollwiderstand der Reifen, am Gewicht oder durch den Einsatz von Biokraftstoffen erreichen.

Bis 2020 aber soll der Emissionsgrenzwert in der EU auf durchschnittlich 95 Gramm pro Kilometer abgesenkt werden. Mit Verbrennungsmotoren ist das nicht zu schaffen. Und weil bis 2020 auch eine Million Elektroautos auf deutschen Straßen fahren sollen, betteln deutsche gemeinsam mit anderen europäischen Herstellern die EU derzeit um mindestens 40 Milliarden Euro Entwicklungshilfe an.

notat. Er versucht einerseits, der Autobranche den Strom schmackhaft zu machen, und stellt gleichzeitig dem Energiekunden sinkende Entgelte in Aussicht, die dank der optimierten Auslastung möglich würden. Ganz selbstlos ist er dabei allerdings nicht, könnte er doch den teuren Kapazitäts- und Netzausbau elegant auf viele Schultern verteilen.

Längst stehen die Konzerne daher in den Startlöchern: Daimler kooperiert mit RWE, BMW mit Vattenfall und Volkswagen mit E.ON. Siemens erprobt in Erlangen und Neuperlach seine e-Konzepte auf eigene Faust. Im Nachbarland wiederum arbeiten etwa PSA Peugeot Citroën und der französische Energieversorger EDF bei V2G zusammen.

Besonders spannend ist das Konzept der Firma Better Place aus Palo Alto. Bis 2012 will sie ein flächendeckendes und massenmarkttaugliches Netz für Elektroautos entwickeln. Zum einen setzen die Kalifornier auf Netzanschlüsse für das schnelle Laden von reinen Elektroautos und von Plug-in-Hybriden wie dem Plug-in Toyota Prius, dem Chevrolet Volt von General Motors oder dem künftigen Opel Ampera, der auf dem Volt aufbaut. (In Plug-in-Hybriden arbeitet eine Kombination aus Benzin- und Elektromotor, zusätzlich sind die Batterien am Netz aufladbar.) Bei Bedarf tauscht das Unternehmen die Batterien sogar komplett aus, was an speziellen Stationen binnen weniger Minuten möglich ist. Better Place betreibt aber auch kleine Wasserstoffherzeuger für Brennstoffzellenautos, »Elektrolyseure«, wie sie etwa der Honda FCX benötigt.

Doch das Unternehmen geht noch einen Schritt weiter. Gegründet vom ehemaligen SAP-Vorstand Shai Agassi plant es, eines Tages nur noch die Dienstleistung »Elektromobilität« zu verkaufen. Wie ein Mobilfunkbetreiber will es mit den Kunden Verträge über Fahrleistungen abschließen – pauschal oder nach gefahrenen Kilometern – und dafür Autos und Infrastruktur bereitstellen. Dafür rüstet sich die Firma durch Geschäftsanbahnungen mit den Regierungen von über 25 Ländern, darunter Dänemark, Israel und Australien, und mit fast allen großen Autofirmen, darunter als Erste Renault und Nissan.

In Europa steht zwar bereits heute eine nennenswerte Zahl von Stromtankstellen, doch sind sie meist nur traurige Überbleibsel der ersten Renaissance der Elektromobilität vor über einem Jahrzehnt (siehe Kasten S. 99). Entsprechend viel bleibt zu tun. Großprojekte wie in London, Berlin oder Rom machen nun den Anfang. Strom gibt es zwar überall, muss aber erst »tankbar« gemacht werden. Ladestationen müssen bei Wind und Wetter funktio-

nieren (in Skandinavien klappt das inzwischen auch bei minus 35 Grad Celsius), Stecker müssen zu jedem Fabrikat und Stromanbieter passen und auch die Frage, ob die Kabel zur Steckdose oder zum Auto gehören, ist noch nicht geklärt.

Selbst das scheinbar einfache Problem der Kabellänge, wobei Bequemlichkeit gegenüber Sicherheit vor Stromschlägen abgewogen werden muss, harrt noch einer Lösung, ebenso die Frage, wo am Auto es angeschlossen werden soll. Wahrscheinlich wird die Autosteckdose nach dem Vorbild des VW Citystromer oder des Audi Duo hinter dem vorderen Nummernschild verborgen sein. Damit lässt sich die häufigste Form des Parkens nutzen, nämlich senkrecht etwa zur Parkhauswand oder zum Bordstein.

Die Batterien ließen sich zwar auch per Induktionsschleife aufladen, wie dies der öffentliche Personennahverkehr vor Kreuzungen und Ampeln bereits teilweise praktiziert. Dabei fällt der Wirkungsgrad der Energieübertragung allerdings auf 95 Prozent ab, vor allem die induktive Rückspeisung ins Netz ist zu teuer und umständlich.

Wie ein zweiter Backofen

Bislang finden Autofahrer, die mit einer Tankfüllung rund 600 Kilometer weit kommen, entlang dieser Strecke durchschnittlich 40 Tankstellen. Denselben Komfort erwarten sie auch von einer künftigen elektrischen Infrastruktur, wie sie zunächst in den Ballungsräumen entstehen dürfte. Weil das Aufladen von Batterien indessen mehr als nur ein paar Minuten Zeit kostet, kommen als Tankstellen vor allem Garagen, Parkhäuser und Parkplätze in Frage. Vielleicht werden auch ganze Straßenabschnitte für EVs reserviert werden. Der europaweit tätige Parkhausbetreiber Apcoa Parking arbeitet schon heute an einem Netz von Ladestationen und denkt sogar über einen Batteriewechselservice nach.

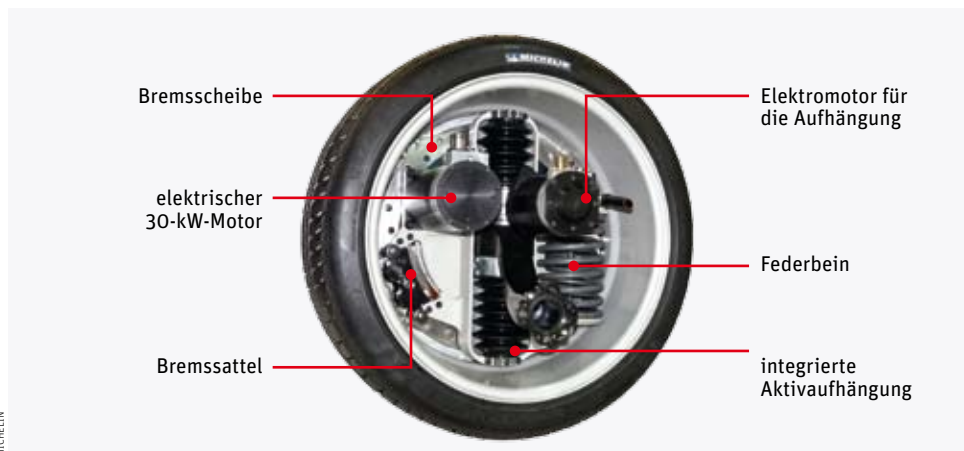
EXPERIMENT IM CHINESISCHEN MASSSTAB

Was europäische Autofirmen und Stromversorger nur allmählich erproben, ist im Reich der Mitte schon gängige Praxis. Denn die überbordenden chinesischen Großstädte ersticken in Smog und Autoabgasen. Neben dem Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs, insbesondere von S- und U-Bahnen, liegt der Einsatz von E-Fahrzeugen dort auch im Individualverkehr nahe. Während Elektrofahrzeuge zunächst rigoros verboten wurden – das Energieangebot galt als zu knapp –, sind in den vergangenen fünf Jahren rund 60 Millionen Elektroroller auf die Straßen gelangt. Mittlerweile werden im traditionellen Land des Radfahrens fast nur noch Zweikrafträder mit Elektroantrieb gefertigt.

Sein Knowhow demonstrierte China auch während der Olympiade in Peking. 50 elektrische Busse für Sportler und Funktionäre, so berichtet Hurbaatur Solonggod, Manager des chinesischen Batterieherstellers Guon Mengguli Corporation (MGL), legten während des Sportfests über 100 000 Kilometer ohne den kleinsten Zwischenfall zurück. In einer Batteriestation wurden die von MGL entwickelten Lithiumionen-Akkus vollautomatisch binnen weniger Minuten ausgetauscht und die leeren Exemplare mit Nachtstrom wieder aufgeladen. Per Satellit ließ sich sogar der Ladezustand jeder einzelnen Batterie überwachen. In der Regel schafften es die Busse, die für den »Ernstfall« einen benzinbetriebenen Range Extender an Bord hatten, mit einer Batterieladung 180 Kilometer weit, erreichten aber auch bis zu 300 Kilometer.

Meist aber wird man sein EV in der heimischen Garage tanken. Dabei gelangen pro Stunde rund 3,5 kWh in die Batterien, wenn ein dreiphasiger Hausanschluss bei 220 Volt und 16 Ampère genutzt wird – das entspricht dem Bedarf eines zweiten Backofens. Wer 100 Kilometer weit fahren will, wofür ein Elektroauto bis zu 20 kWh benötigt, muss die Batterien also mindestens fünf Stunden lang an die Steckdose hängen. Doch vier Fünftel aller Fahrten sind kürzer als 40 Kilometer, so dass die Hälfte der Zeit in der Regel ausreicht.

Kommen allerdings Gäste zu Besuch, die ebenfalls an die Steckdose wollen oder müssen, kann sich die abgerufene Leistung allerdings schnell auf 30 Kilowatt belaufen – mehr, als das ganze Einfamilienhaus sonst be-



Ein »aktives Rad« mit elektrischem Radnabenmotor entwickelt der französische Reifenhersteller Michelin unter anderem gemeinsam mit der chinesischen MGL Corporation (siehe auch Kasten oben). Dank der »Active Wheel«-Technik, durch die sich das Auto regelrecht in die Kurve legen würde, ließe sich auf Kupplung, Getriebe und Antriebswelle verzichten – und damit auf Gewicht, verschleißanfällige Teile und Wirkungsgradverluste.

ZUKUNFT ODER SACKGASSE?

Sie tanken an einem »smart grid« und verbessern dadurch die Effizienz unserer Energieversorgung. Sie verschonen die Umwelt mit Kohlendioxid und Dreck und lärmern nicht einmal. Das klingt gut, doch Elektroautos – erst recht ökologisch korrekte Elektromobilität – sind Zukunftsmusik, trotz aller gegenwärtigen Euphorie. Würden wir heute mehr Strom benötigen, käme er wohl aus einem Kohlekraftwerk. Kaufen wir einfach das nächstbeste Elektrofahrzeug, müsste die Familie zusammenrücken und schaffte auf einen Rutsch kaum mehr als 200 Kilometer. Obendrein müsste das Auto zum Batterientausch wohl nach einigen Jahren in die Werkstatt – zu Kosten, zu denen man sich einen kompletten heutigen Kleinwagen leisten kann.

Was Elektroautos wirklich taugen, wird erst die Zukunft zeigen. Viele Studien laufen erst an, immerhin tüfteln kleine Teams weltweit an Pilotprojekten. Doch sie alle arbeiten mit vorläufigen Daten. Die wichtigsten Fragen können auch sie noch nicht beantworten. Kommt der Ausbau der erneuerbaren Energien schnell genug voran? Lässt sich der Energieinhalt von Batterien ausreichend vergrößern, ihre Zyklenfestigkeit und Zuverlässigkeit steigern? Wie können wir sie entsorgen oder recyceln? Müssen wir über leichtere Autos nachdenken oder das Mieten von Mobilität an Stelle des Kaufs von Autos? Wie »smart«



wäre ein intelligentes Netz, das nach eigenem Ermessen unsere Batterien leeren darf? Wäre der Tank immer dann voll, wenn wir dies brauchten? Und sind überhaupt vernünftige Wirkungsgrade erzielbar?

Dranbleiben müssen wir dennoch. Was sonst haben wir dem Klimawandel entgegensetzen, der Verknappung von Öl, der Verschmutzung der Umwelt durch Abgase? In Indien und China brächte selbst ein Drei-Liter-Auto keine akzeptable Umwelt- und Rohstoffbilanz zu Stande. Natürlich ist der Eindruck berechtigt, dass der vermeintliche Boom der Elektroautos vor allem ein Marketingphänomen ist. Stromversorger würden nur allzu gerne ins Tankstellengeschäft einsteigen, während Autokonzerne in ihrer Furcht vor existenzbedrohenden Absatzkrisen sich wenigstens als zukunftsicher ausweisen wollen (und damit gegebenenfalls als Bezugsberechtigte für Staatsmilliarden).

Doch was ihnen nutzt, muss dem Rest der Welt nicht schaden. Wenn sie die Technik voranbringen, bietet das Elektroauto große Chancen. Allerdings nicht von heute auf übermorgen. Der Praxistest auf breiter Front steht den Autos erst noch bevor. Und die zahlreichen Marktprognosen wirkten viel weniger beeindruckend, wenn nicht die schon erfolgreichen Hybridvarianten die Zahlen in die Höhe trieben. *Thilo Körkel*

SIND ELEKTROAUTOS »STROMFRESSER«?

»Konkrete Prognosen sind Schall und Rauch«, sagt Tomi Engel von der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie über die Zukunft der Elektromobilität. Denn Daten über tatsächliche Nutzungsarten, Fahrzeug- und Motortypen sowie künftige technische Neuerungen – bei den Autos selbst ebenso wie bei ihrer Integration in die Stromnetze – liegen noch kaum vor. »Doch bereits die Größenordnung des grob geschätzten Stromverbrauchs zeigt, dass dieser kaum ins Gewicht fällt.«

Engel kalkuliert den Energiebedarf für eine Million Elektroautos vom Hybridfahrzeug bis zum reinen E-Mobil – auf 1,5 bis 3 Terawattstunden (TWh). Diesen könnten fast allein jene Fotovoltaikanlagen decken, die im Jahr 2008 in Deutschland neu installiert wurden und jetzt jährlich rund 1,5 TWh in die Netze speisen. Die Tabellen zeigen weitere Vergleichszahlen sowie den Kohlendioxidausstoß unterschiedlicher Fahrzeugflotten.

| | 1 Million Elektroautos | (öffentlicher) Nah- und Fernverkehr | Beleuchtung in Haushalten | Stand-by-Betrieb von Elektrogeräten (geschätzt) | elektrische Widerstandsheizungen (in jeder 25. Wohnung) | Nettostromverbrauch Deutschland |
|---|--------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---|---|---------------------------------|
| jährlicher Stromverbrauch in Deutschland (2007) | 1,5 bis 3 TWh (Prognose) | 16 TWh | 11 TWh | 20 TWh | 35 TWh | 541 TWh |

| | Elektroauto (Verbrauch: 10 bis 20 kWh/100 Kilometer) | VW-Flotte | Mercedes-Benz-Flotte | Fiat-Flotte (EU-Bester) | Deutschland (2007) / davon Straßenverkehr (2006) |
|---|--|-----------|----------------------|-------------------------|--|
| CO ₂ -Ausstoß in Gramm/Kilometer (Neuzulassungen 2007) | 60 bis 120 (bei heutigem Strommix) | 167 | 184 | 137 | 857 / 146 |

STEUERN PER TARIF

Intelligente Stromzähler (»Smart Meter«)

speichern Verbrauchs- und Lastdaten und besitzen Kommunikationsschnittstellen, über die sowohl der Kunde als auch – per Fernabfrage – das Energieunternehmen das Nutzungsverhalten einsehen können. Raffiniertere Exemplare sind über zusätzliche Datenverbindungen an einzelne Verbraucher gekoppelt und können so Kühlgeräte, Wäschetrockner oder Backofen, aber auch Geräte im Stand-by-Betrieb minutengenau überwachen. So fallen Stromfresser auf und ihre Aktivität lässt sich – unter Umständen vollautomatisch – in verbrauchsarme Stunden verlegen. Die Messgeräte machen auch neue Mehrwertdienste auf der Basis kundenspezifischer Tarife möglich und erlauben überdies die Integration



»Smart Meter« – unscheinbare Geräte mit großem Anwendungspotenzial

dezentraler Stromerzeuger ins Netzmanagement.

Ziel der Technik ist, die Gesamtnachfrage und Netzauslastung über die Strompreise zu steuern. So lassen sich Investitionen für den Spitzenlastausbau oder die Kompensation hoher Stromvolatilität vermeiden oder zeitlich verschieben. In vielen Ländern wie in Italien oder Schweden sind »Smart Meter« bereits Pflicht. In Deutschland hingegen müssen sie erst ab

2010 eingebaut werden und dann auch nur in Neubauten oder im Rahmen umfassender Haussanierungen. Unterdessen fördern die Ministerien für Wirtschaft und für Forschung bereits vorbereitende Projekte wie »Smart Metering«, »DEMAX« und »Intellekon«.

nötigt. Parkhäuser müssten sich gar auf einige hundert bis einige zehn Millionen kW einrichten. Und wenn eines Tages Millionen von Fahrzeugen nachts am Netz hängen, reicht der Strom dann noch aus, bleibt das Stromnetz stabil?

Doch Angebot und Nachfrage lassen sich wahrscheinlich über den Preis regeln. Intelligente, vernetzte Stromzähler könnten für eine ausgewogene Netzauslastung sorgen. Solche »Smart Meter« (siehe dazu den Kasten oben) würden Anreize setzen, Batterien genau dann aufzuladen, wenn der Strom besonders günstig ist. So ließen sich insbesondere die Überschüsse aus der Windkraft verwerten. Und wenn die Batterien im Gegenzug wieder Energie einspeisen, erhielten die Autohalter eine Vergütung ähnlich jener, die auch den Erzeugern von Wind- und Solarstrom gezahlt wird.

Gerade einmal zwei Euro Umsatz – in drei Stunden

Erfahrung mit der »Smart Meter«-Technik besitzt beispielsweise E.ON. Als zweitgrößter Anbieter betreibt der Konzern in verschiedenen europäischen Ländern schon fast zwei Millionen dieser zunächst für Industrie und Haushalt entwickelten Geräte. Nun setzt er sie im Feldversuch mit 20 Plug-in-Hybriden vom Typ VW Golf »TwinDrive« ein, damit sie in Zeiten hohen Stromangebots gezielt das Ladegerät zuschalten.

Der Energieversorger EnBW hat sich unterdessen vorgenommen, auf Basis eines intelligenten Zählers ein universelles Lade- und Abrechnungssystem zu entwickeln. Es soll ein bestimmtes Elektroauto automatisch erkennen – unabhängig davon, an welcher Tank-

stelle es steht –, die geflossene Strommenge dem jeweiligen Stromlieferanten zuordnen und online abrechnen.

Damit alles so »einfach, komfortabel und sicher wie beim Handy« wird, wie RWE-Vorstandsvorsitzender Jürgen Großmann fordert, ist aber noch ein ganzes Stück Weg zurückzulegen. Auch neue Geschäftsmodelle müssen entwickelt werden, denn heute kostet der Bezahlvorgang an einer Stromtankstelle mehr als die dabei gelieferte Energie. Außerdem steht den hohen Investitionsvorleistungen ein Umsatz von gerade einmal ein oder zwei Euro entgegen – bei einer Ladezeit von drei Stunden.

Eine Frage bleibt ohnehin noch offen: Wie teuer oder billig kommt uns das elektrische Rollen zu stehen? Auf eine Antwort mag sich heute noch keiner festlegen und selbst Thomic Ruschmeyer, Vorsitzender des Bundesverbands Solare Mobilität (bsm), bremst die aufkeimende Elektro euphorie: »Elektrisches Fahren wird wohl nicht billiger als heute das Fahren mit Öl.« Denn wir werden nicht einfach nur die Autos wechseln. Ressourcenknappung, wachsendes Umweltbewusstsein und wachsende Bedürfnisse in den sich entwickelnden Ländern dieser Erde werden unser gesamtes Mobilitätsverhalten verändern. Vielleicht nehmen Elektrofahrzeuge dabei künftig einen zentralen Platz ein. Nicht zufällig trägt »Better Place« einen hoffnungsträchtigen Namen. ◀

*Wird es mit künftigen Autos kaum noch zu Unfällen kommen? Im nächsten Teil unserer Serie, der in der Maiausgabe erscheint, berichten wir über **Sicherheit in Fahrzeugen**.*



Reinhard Löser ist promovierter Physiker, habilitierter Volkswirt sowie intimer Kenner der Automobilindustrie. Als freier Autor lebt er in Ebenhausen bei München.

Franken, M.: Aufruf zur Elektro-Evolution. In: neue energie 8, S. 47–52, August 2008.

Janzig, B.: Strom nach Bedarf. In: neue energie 8, S. 60–62, August 2008.

Jensen, D.: Wettrennen der Konzepte. In: neue energie 8, S. 54–59, August 2008.

Tollefson, J.: Charging up the Future. In: Nature 456, S. 436–440, 27. November 2008.

Auto der Zukunft. Sonderausgabe 1/2009 von Technology Review, Heise, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/983274.

MATHEMATIK

Kapitel –1, π und 0,000000001

Peter Bentley kennt sich mit den Meistern der Zahlen besser aus als mit den Zahlen selbst.

Bedenkt man, wie tief die Mathematik unsere Gesellschaft durchdringt, erscheint es kaum vorstellbar, wie Menschen einst ohne Zahlen auskommen konnten. Forscher interpretieren rund 30 000 Jahre alte Kerbmuster auf steinzeitlichen Tierknochen als ihre frühesten überlieferten Spuren. Namen gaben ihnen unsere Vorfahren wahrscheinlich erst, als sie sesshaft wurden und zu zählen begannen, wohl um effizienter miteinander Handel zu treiben. Peter J. Bentley, Computerwissenschaftler am University College London, erzählt in optisch sehr ansprechender Form ihre Geschichte.

Zahlenmystik: Ausgerechnet die Zwei repräsentierte für die frühen Christen den Teufel oder die Trennung zwischen Seele und Gott. Aus dem Freskenzyklus »Die Verdammten« von Luca Signorelli; Cappella di San Brizio im Dom von Orvieto



Anders als üblich beginnt das Buch nicht mit Abschnitt eins, sondern »–1«; es folgen noch Kapitel wie 0,000000001, Pi und sogar i . Der Autor nutzt diese originelle Zählweise für flott geschriebene historische Abstecher in die Geschichte der Zahlen und Zahlenmengen, abgerundet durch biografische Einschübe über jene Wissenschaftler, die sich um die Erforschung der zugehörigen Teildisziplin verdient gemacht haben. Während dieses Ritts durch die Jahrhunderte zeichnet Bentley die Entwicklungen in der Mathematik nach, von der Erfindung der Null über den Prioritätsstreit zwischen Leibniz und Newton zur Einführung der Infinitesimalrechnung bis hin zu Benoît Mandelbrots wundersamen Fraktalen.

So berichtet der Autor über die dunklen Machenschaften der Pythagoreer, die das Wissen um die Existenz der mit ihrem Weltbild nicht konformen irrationalen Zahlen unbedingt für sich behalten wollten und des-

halb der Legende nach den griechischen Gelehrten Hippasos aus ihrer Gemeinschaft verstießen, nachdem dieser das Geheimnis ausgeplaudert hatte. Damit nicht genug: Nach einer Version der Geschichte erkrankte er auf hoher See, wobei die Pythagoreer sogar noch nachgeholfen haben sollen. Bentley erzählt, wie Georg Cantor (1845–1918) mit seinem Diagonalargument das Unendliche greifbar machte, während Kurt Gödel (1906–1978) den Mathematikern später ihre Grenzen aufzeigte. Eine Synthese findet das Buch in einer Gleichung, die einst Leonhard Euler (1707–1783) aufgestellt hatte und manchen Mathematikern heute als schönste Formel ihres Fachs gilt, weil sie wichtige Zahlen aus den verschiedensten Teildisziplinen vereint und somit die Vielfalt der Mathematik widerspiegelt: $0 = 1 + e^{i\pi}$.

Das Buch glänzt mit zahlreichen Abbildungen und kommt mit relativ wenigen Formeln aus. Einzelne erklärungsbedürftige Aspekte handelt Bentley in separaten Kästen ab. Dennoch lassen seine Ausführungen mitunter Fragen offen. So betont er in einem Abschnitt die Bedeutung starker Primzahlen für die moderne Kryptografie mit veröffentlichtem Schlüssel; an eine allgemein verständliche Erklärung des zu Grunde liegenden Verfahrens wagt er sich



jedoch nicht heran. Entscheidend für die Sicherheit der verschlüsselten Daten ist zudem weniger die von Bentley angeführte Identifizierung starker Primzahlen (dafür gibt es spezielle Tests), sondern vielmehr das Faktorisierungsproblem: Um den privaten Schlüssel zu knacken, muss man eine sehr große Zahl in Primfaktoren zerlegen, was einen ungeheuren Aufwand erfordert.

Ein zweites Beispiel: Im achten Kapitel preist der Autor die eulersche Zahl e als »die größte Erfindung«; ohne sie wären »die Fortschritte in der Wissenschaft und Technik der letzten Jahrhunderte unmöglich ge-

wesen«. Warum diese Zahl so wichtig ist und welche Erfindungen wir ihr verdanken, verrät Bentley allerdings nicht.

Ein Blick auf das Literaturverzeichnis zeigt, dass der Autor sich vorrangig mit den Biografien berühmter Mathematiker befasst hat, um die Menschen hinter den großen Ideen vorzustellen. Das ist ihm auch durchaus gelungen; allerdings kommen dadurch die mathematischen Hintergründe zu kurz. Unglücklicherweise haben sich zudem kleinere Fehler eingeschlichen – etwa bei Jakob Bernoullis (1655–1705) Zinseszinsfolge, die den Mathematiker einst auf die

Spur von e gebracht hatte. An manchen Stellen hinterlässt die Lektüre des Buchs deshalb ein recht unbefriedigendes Gefühl.

Christoph Marty

Der Rezensent arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Dortmund.

Peter J. Bentley

Das Buch der Zahlen

Das Geheimnis der Zahlen und wie sie die Welt veränderten

Aus dem Englischen von Carsten Heinisch. Primus, Darmstadt 2008. 272 Seiten, € 39,90

ENERGIE

Wieder gelbe Gefahr?

Ausgewiesene Chinakenner nehmen chinesische Bedrohungsszenarien unter die Lupe und decken ungeahnte Zusammenhänge auf.



Xuewu Gu, Ordinarius an der Ruhr-Universität Bochum und einer der beiden Autoren, ist in China geboren und dort aufgewachsen, hat seine akademischen Weihen aber in Deutschland erhalten. Das ist ungewöhnlich und das Thema China immer noch exotisch. Das wirklich Besondere an diesem Buch ist jedoch, dass sich ein Regionalwissenschaftler und ein Politökonom an ein Thema wagen, das normalerweise von Physikern und Ingenieuren besetzt ist. Das mit über 500 Literaturzitaten gespickte Werk kann als Lese-, Sach- oder Abenteuerbuch durchgehen. Es ist voller Daten und Fakten und liest sich trotzdem nicht trocken. Stets wird man Erbauliches, Bemerkens- oder Wissenswertes darin finden. Und vor allem präsentieren die Autoren Schlussfolgerungen, die überhaupt nicht dem Mainstream entsprechen.

Bei den dauerhaft zweistelligen Zuwachsraten seiner Industrieproduktion hat China inzwischen auch im Energieverbrauch mit 1,7 Milliarden Tonnen Öleinheiten alle anderen Länder – bis auf die USA (2,3 Milliarden Tonnen) – abgehängt. Zwar kann die Volksrepublik ihren Energiebedarf zum Großteil durch eigene Ressourcen decken, aber beim Öl klafft zunehmend eine Lücke. So wird nach der Prognose der Energy Information Administration (EIA) China in zwei Jahren 52 Prozent und 2015 bereits 62 Prozent seines Ölbedarfs durch Importe befriedigen müssen. Diese Einschätzung muss nicht zwangsläufig zu den vorschnellen Ur-

teilen und bekannten Klischees vom aggressiven »Energiehunger« führen, wie die Autoren überzeugend nachweisen. Sie belegen, dass der Vorwurf, die Volksrepublik gehe weltweit mit zweifelhaften, ja sogar militärischen Mitteln auf eine skrupellose Einkaufstour, eher vom Westen gestreut wird als auf Fakten beruht.

Der chinesische Energiebedarf wird zu fast 90 Prozent durch einheimische Quellen gedeckt, vornehmlich Kohle, die zwei Drittel des Primärenergieverbrauchs ausmacht. China ist mit 1,2 Milliarden Tonnen pro Jahr der größte Kohleproduzent der Welt – mit allen Folgen für die Umwelt. Die Wasserkraft steuert in China knapp sieben Prozent zum Energieaufkommen bei, ihr Anteil an der Stromproduktion beträgt sogar 20 Prozent. Auch damit liegt China weltweit an der Spitze (vor Kanada). Für ein Viertel der Energieversorgung wird jedoch Erdöl benötigt, 80 Prozent davon für die Schwerindustrie und den Güterverkehr. Diesen in den nächsten Jahren weiter steigenden Bedarf kann die Volksrepublik jedoch nur zur Hälfte durch einheimische Vorkommen decken.

Das ist immer noch relativ günstig im Vergleich zu den USA, die 67 Prozent (Deutschland: 100 Prozent) ihres Erdöls importieren müssen. Noch liegt China beim Erdölimport mit 3,2 Millionen Barrel pro Tag an dritter Stelle nach den USA (13,7) und Japan (5,2), gefolgt von Deutschland (2,6) und Frankreich (2,0 Millionen Barrel pro Tag). Gleichwohl ist dieser Bedarf dem Westen

ein Dorn im Auge. Bei Erdgas, das bislang im Reich der Mitte kaum Anwendung findet, wird es ähnlich kommen.

Für den Erwerb von Ölfeldern, Förderungslizenzen oder ganzen Unternehmensteilen finden die großen chinesischen Ölkonzerne nur Partner in Staaten, die sich wirtschaftlich-politisch vom Westen abgrenzen, etwa Russland, Iran, Angola, Sudan oder Venezuela. Das aber schürt den Argwohn der Vereinigten Staaten, und der Westen fällt in diesen Chor ein. Dabei – so weisen die Autoren nach – hat kaum ein anderes von Energieimporten abhängiges Land insgesamt eine so geostrategisch ausgewogene Ölimportstruktur. Insbesondere scheint China Konflikten um Öl aus naheliegender Quellen aus dem Weg gehen zu wollen, indem es auf die oben genannten Regionen sowie auf kleinere Vorkommen in Afrika ausweicht. Auch dass die chinesische Armee und Marine aufgerüstet werde, um die Ölimporte durch die Straße von Malakka zu sichern, erweist sich nach den Untersuchungen von Gu und Mayer als unhaltbar und sagt »wenig über Chinas Energiepolitik und viel über amerikanischen Verfolgungswahn«.

Es ist klar, dass in China die Kohleverstromung mit einer kolossalen CO₂-Produktion einhergeht: Das Land ist für über 15 Prozent des globalen Kohlendioxidstoßes verantwortlich, nur die Emissionen der USA sind größer. Auch Gu und Mayer bestätigen, dass es der Regierung schwerfällt, ein konkretes Ziel für die Eindämmung der CO₂-Emissionen zu benennen. Aber das Programm zum weiteren Ausbau der Kohle in China birgt Überraschungen: Man will nicht nur die weit gehende Unabhängigkeit von Energieimporten sichern und Strom über den eigenen Bedarf hinaus produzieren, um ihn in den kommenden Jahren exportieren

zu können, sondern sukzessive auch alle ineffizienten Dreckschleudern außer Betrieb nehmen. Die Senkung der Umweltbelastung steht in den jüngsten Beschlüssen von Partei- und Staatsführung oben auf der Agenda. Die neu installierten Kraftwerke können heute Wirkungsgrade bis zu 38 Prozent vorweisen, Werte, die im industriell fortgeschrittenen Westen Neid hervorrufen. Und schließlich soll Kohle in großem Maßstab über die Verflüssigung (Fischer-Tropsch-Synthese) zu chemischen Produkten veredelt werden, was den Importbedarf bei Rohöl weiter senkt.

Der Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch ist in China genauso groß wie in Deutschland – rund acht Prozent, die sich bis 2020 verdoppeln sollen. Bereits heute kann das Reich der Mitte knapp zwei Drittel der weltweit installierten Solaranlagen für sich reklamieren. Auch in der Fotovoltaik steigt die chinesische Produktion für den Weltmarkt rapide. Die Wasserkraft soll massiv ausgebaut werden, ebenso die Windkraft und die Biomasseverwertung. Geothermie-, Wellen- und Ge-

zeitenkraftwerke sind geplant. Das Programm der chinesischen Führung verfolgt einen doppelten politischen Aspekt: Es soll die gigantischen Umweltverschmutzungen eindämmen und mit dem lokal regional erzeugten Strom auch in die abgelegenen Provinzen sozialen Wohlstand bringen.

Händeringend sucht die chinesische Industrie Unterstützung aus dem Ausland für Forschung, Entwicklung und Finanzierung. Überall, wo etwas vorbildlich funktioniert, spielen internationale Kooperationen eine wichtige Rolle.

Da Chinas Energiebedarf einen sehr großen Einfluss auf die globalen Energiemärkte und Rohstoffvorkommen hat und die Schadstoffemissionen des Landes die Einsparungseffekte in anderen Ländern konterkarieren, bleibt nur ein logischer Schluss: Die anderen Länder können sich weder einen Planeten ohne China basteln noch können sie durch Vorwürfe und Schuldzuweisungen von außen etwas bewirken. Sondern sie müssen durch Technologietransfer den Energiehunger mitten in China stillen hel-

fen. Das ist denn auch die Quintessenz des Buchs.

Das Renommee der Wissenschaftler und die Literaturliste, die belastbare internationale Quellen zitiert und unsereinen unzugängliche chinesische Originalquellen bemüht, lassen keinen Raum für Zweifel an der Datenlage. Die Autoren wollen ihren Beitrag zur Bewusstseinsbildung von Regierungen, Unternehmen und Öffentlichkeit leisten, damit Chinas Energiepolitik in einem realistischen Bild erscheint und klar wird, dass unser aller Zukunft von der weiteren Entwicklung in China abhängt. Dem kann man sich nur anschließen. Fabelhaft zu lesen ist es ohnehin.

Reinhard Löser

Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Ebenhausen bei München.

Xuewu Gu, Maximilian Mayer

Chinas Energiehunger: Mythos oder Realität?

Oldenbourg, München 2007.

207 Seiten, € 24,80

URGESCHICHTE

Genießer als Motoren der Evolution

Nicht die Not macht erfinderisch, sondern der Überfluss; und Bier war die Grundlage der neolithischen Revolution, so die unkonventionelle These des Ökologen Josef Reichholf.



Zu Beginn der Jungsteinzeit, vor etwa 15 000 bis 11 000 Jahren, gab es in einigen Regionen einen ständigen Mangel an Jagdwild und pflanzlichen Nahrungsmitteln. Um nicht zu verhungern, mussten sich die Jäger und Sammlerinnen etwas einfallen lassen. Sie sammelten die Körner von Wildgetreide, verwendeten den Großteil davon als Saatgut und machten durch Züchtung das Korn immer ertragreicher. Gleichzeitig domestizierten sie Säugetierarten wie Rinder und Schweine und konnten sich so regelmäßig mit Fleisch versorgen. So oder so ähnlich lautet die gängige Erklärung für die »neolithische Revolution«, die Erfindung und Einführung der Landwirtschaft.

Falsch, behauptet der Münchener Evolutionsbiologe und Ökologe Josef Reichholf und führt – neben zahlreichen weiteren Befunden – zwei Hauptargumente an. Erstens sind die Körner des Wildgetreides so winzig und so mühsam aus den Spelzen zu lösen, dass der Arbeitsaufwand in keinem Verhältnis zum Ertrag gestanden hätte. Mit einer Jahresernte hätte eine Familie allenfalls einige Wochen überleben, jedoch unmöglich den Winter überstehen können. Zweitens habe es gerade dort, wo die Landwirtschaft ihren Ursprung hat, im Gebiet des »Frucht-

Bier trinkende Sumerer

baren Halbmonds«, gegen Ende der letzten Eiszeit ein geradezu üppiges Angebot an protein- und stärkereicher Kost gegeben. »Wo der Boden fruchtbar ist, wachsen einjährige Gräser in Massen, und das wiederum ergibt bestes Weideland für jene Tiere, die die Menschen gejagt haben. Da muss es also nicht Mangel, sondern Überfluss an Fleisch gegeben haben ... Es gab also keine Notwendigkeit, auf das Kauen von harten Grassamen umzusteigen.«

Die sesshafte Lebensweise hätte sogar der Jagd geschadet. Jäger erbeuten erheblich weniger, wenn sie nicht mehr im Stande sind, den umherziehenden Wildherden zu folgen. Bezeichnenderweise haben die Ureinwohner Australiens sich niemals auf die Landwirtschaft eingelassen, obwohl ihr botanisches und zoologisches Wissen dafür ohne Weiteres ausgereicht hätte und obwohl sie mit einer an Ressourcen knappen Umwelt zurechtkommen mussten.

Dagegen setzt Reichholf sein Gegenmodell: Getreide diene zunächst nicht in erster Linie zum Essen, sondern zum Bierbrauen! Dazu war keine große Kunstfertigkeit erforderlich. Es genügte, eine geringe Menge Getreidekörner zu zerstampfen und

reichlich Wasser und etwas Speichel hinzuzufügen, und die alkoholische Gärung entstand von selbst. Dieses primitive Bier war zwar trübe und leicht verderblich, aber es schmeckte angenehm süß und war noch dazu ziemlich nahrhaft.

Erst brauen, dann Brot

»Sumerer vor einem großen Topf, die mit Rohrhalmen Bier schlürfen – das ist die älteste Darstellung, die wir überhaupt von der Nutzung von Getreide haben, während die Herstellung von Brot aus Körnern erst viel später dokumentiert ist ... Das indogermanische Wort ›brauda‹ ist die Wurzel von ›Brot‹ und ›brauen‹ – aber ›brauen‹ ist älter«, so Reichholf in einem Interview zum Buch mit der Münchener »Abendzeitung«.

Konsumiert wurde das Bier bei großen kultischen Festgelagen, zu denen man auch von weither anreiste. Die Gäste brachten allerlei Wildgetreidesamen mit. Aus dieser Vielfalt gingen schließlich Hybride hervor, die für einen großflächigen Anbau hinreichend ergiebig waren. Haustiere dienten vor allem dazu, das Wildbret-Angebot während der Gelage um weitere Delikatessen zu bereichern.

Womöglich wurden diese Festgelage von religiösen Spezialisten veranstaltet, die genau wussten, wie sie kollektive Rauschzustände erzeugen konnten, ohne dass das Ganze außer Kontrolle geriet. Die frühesten dauerhaften Siedlungen wären demnach aus Kultstätten hervorgegangen – und hätten schon existiert, als die Einführung der Landwirtschaft noch in weiter Ferne lag. »Alle frühesten bekannten menschlichen Bauten, wie zum Beispiel Göbekli Tepe in der Südtürkei, haben eindeutig dem Kult und damit dem Feiern von Festen gedient. Und wir haben noch einen weiteren interessanten Befund: Alle Ackerbaukulturen sind alkoholtoleranter als Jäger-Sammler-Kulturen. Das Feuerwasser hat bekanntlich den Indianern eher zugesetzt als die Gewehre. Indios und Aborigines können dagegen mit Rauschdrogen besser umgehen: mit Tabak, Hanf oder Meskalin.«

Nicht der Hunger, sondern das Bedürfnis nach kollektiven Rauschzuständen stünde damit am Anfang der Geschichte der menschlichen Zivilisation. Der Hopfen, ein enger Verwandter des Hanfs, wurde ursprünglich als Rauschdroge benutzt. Zeitweise war es sogar üblich, dem Bier Bilsen-

PRAKTISCHES AUS DEM LESERSHOP

SAMMELKASSETTE



Die Sammelkassette von Spektrum der Wissenschaft bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).

FRÜHSTÜCKSBRETTCHEN



Damit der Tag gut anfängt: Unsere Frühstücksbrettchen (2 Stück) mit wissenschaftlichen Motiven kurbeln garantiert Ihren (Bildungs-)Hunger an! Wahlmöglichkeit: zwei Brettchen mit Mathematikmotiven oder zwei Brettchen mit Astromotiven. Je Set € 9,80 (zzgl. Versand)

REGENSCHIRM »SONNENFRAKTALE«



So macht Ihnen auch der heftigste Schauer nichts mehr aus. Der etwa 75 cm lange Schirm mit 8 Fiberglasschienen hat einen blauen Polyesterüberzug und ist mit seinem ansprechenden Fraktalmotiv ein echter »Hingucker«. Mit seinem Durchmesser von fast 130 cm auch bestens für zwei Personen geeignet. € 25,- (zzgl. Porto/Versand)

kraut zuzusetzen. Von diesem Gewächs soll sich der Name der Stadt Pilsen herleiten.

Reichhofs heterodoxe Evolutionsbiologie fußt auf der Hypothese, dass wesentliche evolutionäre Errungenschaften – darunter das Fliegen und das menschliche Denk- und Sprachvermögen – nicht in der Not, sondern im Gegenteil in Situationen des Überflusses entstanden seien. Das belegt er durch eine lange Kette von Indizien auch für die Entstehung der Landwirtschaft.

Die Sache hat allerdings einen Haken. Außer im Nahen Osten ist die Landwirtschaft auch in Zentralamerika und in Nordostasien erfunden worden. Doch es hat nicht den Anschein, dass man hier Mais und

dort Reis angebaut hätte, um reichlich mit Alkohol versorgt zu sein.

Offenbar ist es erforderlich, Reichhofs Theorie um Überlegungen des amerikanischen Archäologen Brian Hayden zu ergänzen. Demnach war es der Statuswettbewerb der Reichen, der zur Erfindung der Landwirtschaft geführt und fast alle bedeutenden Innovationen der Zivilisation hervorgerufen hat. Immerhin deutet einiges darauf hin, dass etliche wilde Pflanzen- und Tierarten allein deswegen domestiziert worden sind, weil die Reichen unablässig auf der Suche nach prestigeträchtigen Attraktionen für ihre Festgelage waren. Was erklärt, warum der Flaschenkürbis, die Ki-

chererbse und Chili zu den ältesten Kulturpflanzen überhaupt gehören.

Reichhofs Buch bietet nicht nur eine gewagte, aber erklärungskräftige Theorie, sondern auch eine Fülle verblüffender Fakten und Einsichten. Ein großer Wurf.

Frank Ufen

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.

Josef H. Reichholf

Warum die Menschen sesshaft wurden

Das größte Rätsel unserer Geschichte

S. Fischer, Frankfurt am Main 2008.

315 Seiten, € 19,90



MEDIZIN

Würmer als Freunde und Helfer

Vor lauter Hygiene haben wir vergessen, wie nützlich unsere äußerst anhänglichen mikroskopischen Begleiter sein können.

Es fällt kaum jemanden auf: Wenn wir über Infektionskrankheiten sprechen, nutzen wir permanent militärische Begriffe. Wir kämpfen gegen pathogene Mikroorganismen, betrachten Viren als Feinde der Menschheit, benutzen Medikamente als Waffen und allerlei giftige Putzmittel zur Ausrottung der ungeliebten Biester. Eine besonders aggressive Variante der weißen Blutkörperchen heißt Killerzelle, und Immunzellen werden gemeinhin als die Schnelle Eingreiftruppe des Körpers bezeichnet. Da passt es ins Bild, dass der Gesundheitsminister der USA Surgeon General heißt.

Der größte Reichtum des Menschen ist seine Gesundheit, sagen der Volksmund und die Philosophen. Daraus lässt sich eigentlich nur eines ableiten: Ohne Krankheit wäre das Leben ein Paradies auf Erden, und Mikroben hindern uns daran, diesen idealen Zustand zu erreichen.

Doch was wäre, wenn Infektionen gar nicht unser Feind wären, sondern einfach eine Kraft, mit der wir zu leben lernen können wie mit der Schwerkraft? Was würde sich ändern, wenn wir Erreger nicht als Feinde, sondern einfach als Familienmitglieder betrachteten? Wir haben sie uns nicht ausgesucht, aber unser Leben ist ohne sie nicht vorstellbar. Wir hätten nicht nur ein neues Denkmodell zum Umgang mit krankmachenden Mikroorganismen, sondern würden vermutlich auch neue therapeutische Ansatzpunkte entdecken, die bislang von der Forschung vernachlässigt wurden.

Marlene Zuk, Evolutionsbiologin an der University of California in Riverside, hält einen solchen Paradigmenwechsel für längst überfällig. Infektionskrankheiten gab es schon immer, sagt die Professorin und belegt dies mit einer Fülle gut zusammengefasster wissenschaftlicher Fachliteratur. Es wird sie auch immer geben. Sie sind normal, natürlich und – das ist das Neue an der These – für unser kollektives Wohlbefinden sogar unerlässlich.

Krankheitserreger sind selbst Lebewesen und unterliegen deshalb den Gesetzen der Evolution. Ihr Schicksal ist durch Koevolution eng mit unserem verwoben. Insbesondere haben sie auch uns geformt, seit unsere Vorfahren vor rund drei Millionen Jahren von den Bäumen kletterten. In einem komplexen Ökosystem entwickeln sich Lebewesen stets gemeinsam; »Kosten« und »Nutzen« sind also für die beteiligten Spezies nicht prädestiniert, sondern entwickeln sich auf Populationsebene in einem dynamischen Gleichgewicht.

In Bezug auf Krankheitserreger ermöglicht dieser Denkansatz neue Einsichten in altbekannte Probleme. So stehen Asthma und Allergien – heutzutage in jedem Kindergarten die häufigsten Krankheiten – offensichtlich in einer positiven Korrelation zur Intensität von Körper- und Haushaltshygiene. Dagegen sinkt die Wahrscheinlichkeit, an Heuschnupfen oder Neurodermitis zu erkranken, je häufiger Kleinkinder mit Bakterien und Viren in Kontakt kommen, sei es

durch Geschwister, Haustiere oder Dreck. Der Befehl einer Mutter an ihr Kind »lass das liegen, wer weiß, wer das schon alles angefasst hat« begünstigt also die Entstehung von Allergien und richtet damit vermutlich mehr Schaden als Nutzen an. Wie Hygiene und Überempfindlichkeitsreaktionen auf zellulärer Ebene zusammenhängen, ist mittlerweile gut untersucht und wird von Zuk im Abschnitt »Die wohltemperierte T-Zelle« klar beschrieben.

Auch entzündliche Darmerkrankungen wie der Morbus Crohn sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass dem Immunsystem mangels Kontakt mit Umweltkeimen in der Kindheit die Balance abhanden gekommen ist. In logischer Konsequenz behandelt Joel Weinstock, Professor am renommierten Tufts New England Medical Center in Boston, Patienten mit Morbus Crohn mit lebenden Eiern des Peitschenwurms vom Schwein. Die sollen das Immunsystem des Patienten in die richtige Bahn lenken. Der Gastroenterologe hat Erfolg mit seiner unkonventionellen Methode: Bei fast drei Viertel seiner Patienten verschwinden die Symptome der Darmentzündung, wenn diese ihren Ekel überwinden und alle drei Wo-

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

chen eine Minidosis der ungefährlichen Parasiten-Eier schlucken.

Die in unzähligen Generationen von Parasiten und Wirten entstandenen biologischen Interpendenzen sind nicht nur für Infektionskrankheiten, sondern auch für eine Vielzahl unterschiedlicher Gesundheitsstörungen relevant. Das belegt die Autorin an zahlreichen wissenschaftlich gut dokumentierten Beispielen. Ob Stoffwechselförderung, Partnerfindungsprobleme oder Erkrankung des Zentralnervensystems, Ko-

evolution, so Zuk, scheint überall eine Rolle zu spielen.

Die Evolutionsbiologin hat nicht nur einen scharfen Verstand, sie kann auch gut schreiben. So wenig Fachtermini wie möglich, Verzicht auf technische Details und eine klare Sprache machen das Buch zu einer unterhaltsamen Abendlektüre. Wer die elf Themenkomplexe vertiefen will, findet zu jedem Kapitel 30 bis 50 Verweise auf entsprechende Fachliteratur. Chapeau, Madame Zuk!



EVOLUTIONS BIOLOGIE

Nachrichten vom betenden Tier

Rüdiger Vaas und Michael Blume erklären, warum Religionen so verbreitet sind.

Spätestens wenn zwei Trends sich kreuzen, schlägt die Stunde der Publizisten. Einerseits beflügelte Richard Dawkins mit seinem provokanten Buch »Der Gotteswahn« (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 118) die Debatte um Religion und Wissenschaft; insbesondere das junge Gebiet der Neurotheologie lieferte dem alten Reizthema neue Nahrung. Andererseits tobt nach wie vor, im Darwinjahr neu angeheizt, die Debatte um die Evolutionstheorie. Missverständnisse und Ideologien durchziehen das biologische Terrain fast wie einst vor 150 Jahren.

Da kommen der Religionswissenschaftler Michael Blume und der Wissenschaftsjournalist Rüdiger Vaas mit ihrem Buch über »Gott, Gene und Gehirn« gerade zur rechten Zeit. Sie resümieren nicht nur den Stand der bereits recht unübersichtlich gewordenen Forschung zum Thema »Evolution der Religiosität«. Sie gehen auch Fragen nach, die viele bewegen: Wieso sind Religionen so verbreitet? Warum prägen sie praktisch alle Kulturen seit Menschengedenken? Sind sie überhaupt reine Kulturprodukte? Hat Religiosität genetische Ursachen? Bietet sie in der Evolution einen Selektionsvorteil? Wohnt Gott im Hirn? Führt Religion zur Wahrheit?

Ihre These: »Es gibt einige neuro- und evolutionsbiologische Indizien für eine Natur und Naturgeschichte des Glaubens«, das heißt für »spezifische biologische Grundlagen der Religiosität«. Das möchte man gerne glauben, denn alles andere wäre wirklich erstaunlich. Aber im Detail erfordert die Klärung des Sachverhalts Jahrzehnte interdisziplinärer Forschung. Diese haben Vaas und Blume akribisch durchforstet, was al-

lein die 16-seitige Literaturliste belegt; zahllose Fußnoten und ein Register erleichtern zusätzlich den Zugriff.

Offenbar neigen Menschen vor allem in Notzeiten zu religiösem Glauben. Darüber hinaus gibt es vor allem zwei Thesen. Erstens: Religion sei eine stammesgeschichtliche Adaption. Menschen, die ihr anhängen, überleben besser und haben mehr Nachkommen, so dass sie ihre Gene verstärkt an die nächste Generation weitergeben können. Schon in der Vorzeit stärkte Religion den Zusammenhalt von Gruppen, die sich für Jagd und Nachwuchspflege zusammenschlossen und so anderen Gruppen überlegen zeigten. Allerdings wollen bestimmte Glaubensinhalte wie der vom Leben nach dem Tod nicht recht zur Adaptions-theorie passen. Sie kann auch nicht den Ursprung der Religion erklären, sondern höchstens ihre Verbreitung.

Sind religiöse Erlebnisse so etwas wie epileptische Anfälle?

Die zweite These: Religiosität sei einfach ein natürliches Beiprodukt des menschlichen Verstands. Sie stelle sich ein, ohne dass im menschlichen Kopf ein »Gottesmodul« eingebaut sein müsste. Religiöse Empfindungen und vor allem die Erleuchtungserlebnisse, von denen viele Religionsstifter berichten, ereigneten sich wie epileptische Anfälle und seien sogar möglicherweise solche; und Epilepsie existiere auch nicht deshalb, weil sie einen Selektionsvorteil böte.

Die Existenz Gottes ist davon natürlich unberührt: »Warum Menschen an Gott glauben oder überhaupt außergewöhnliche und als religiös interpretierte Erfahrungen haben, darf nicht mit der Frage verwechselt

Der Rezensent ist Arzt für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie sowie Professor am Institut für Mikrobiologie und Hygiene, Campus Benjamin Franklin, der Charité in Berlin.

Marlene Zuk

Was wäre das Leben ohne Parasiten? Warum wir Krankheiten brauchen

Aus dem Amerikanischen von Jorunn Wissmann. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2008. 330 Seiten, € 26,-

werden, ob Gott existiert.« Selbst wenn Religionen einen psychischen, sozialen oder evolutionären Nutzen hätten, so gelte doch: »Nützlichkeit ist nicht gleich Wahrheit«.

An dem Buch hat mir gefallen, wie un-dogmatisch und kundig die Autoren sich ihrem Thema von vielen Seiten annähern, ohne in allzu rasche (Kurz-)Schlüsse zu verfallen. So meinen sie auch, dass die Adaptionshypothese trotz einiger Schwierigkeiten »nicht als widerlegt gelten« kann. Auch wenn sie umgekehrt noch nicht erwiesen ist, so wirke sie bereits über die Biologie hinaus. Atheisten und Agnostiker können darin »eine Stütze für ihre Überzeugung erblicken, dass der Glaube eine Illusion ist – aber vielleicht eine nützliche und daher besonders hartnäckige«.

Das Forschungsgebiet der Evolutions- und Neurotheologie ist noch jung und entwickelt sich rapide. Dieses Buch liefert einen detaillierten Überblick in einer eher verwirrenden Gefechtslage. Die Selbstbe-scheidung von Blume und Vaas angesichts der Komplexität ihres Themas sehe ich daher als einen Vorzug: »Es ist besser, eine Frage zu diskutieren, ohne sie zu entscheiden«, so zitieren sie den Schriftsteller Joseph Joubert, »als eine Frage zu entscheiden, ohne sie zu diskutieren.«

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist habilitierter Physiker und Chefredakteur von »Spektrum der Wissenschaft«.

Rüdiger Vaas und Michael Blume

Gott, Gene und Gehirn

Warum Glaube nützt
Die Entwicklung der Religiosität

Hirzel, Stuttgart 2009. 254 Seiten, € 24,-



Universum vor dem Urknall

Die Loop-Quantengravitation behauptet: Unser Weltall hatte vermutlich einen Vorläufer

KENN BROWN, MONOLITHIC STUDIOS

WEITERE THEMEN IM MAI

Ernst Pernicka

Er ist einer der führenden Experten für Archäometrie in Deutschland, zudem Grabungsleiter in Troja – das Porträt eines Grenzgängers

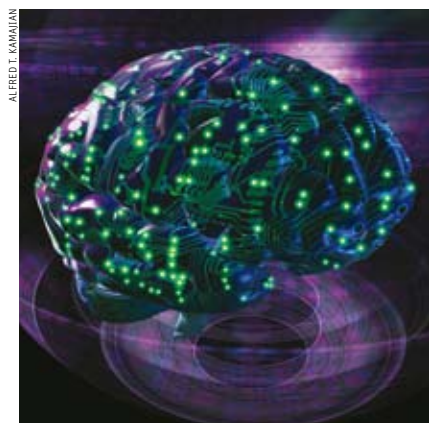
Alles im Netz

Das »Internet der Dinge« soll in wenigen Jahren jedwedem Produkt mit der Welt vernetzen. Voraussetzung: RFID genannte Funkchips

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter



ALFRED T. KAMAHIAN

Die Erleuchtung des Gehirns

Mit einer raffinierten Kombination von Optik und Gentechnik können Neurowissenschaftler Schaltkreise im Gehirn mit ungeahnter Präzision kartieren – und sogar kontrollieren

Stressproteine gegen Krebs

Eine altbekannte Gruppe von Molekülen ist vielseitiger als gedacht. Jetzt wollen Forscher mit »Hitzeschockproteinen« Krebs bekämpfen

JEFF JOHNSON, HYBRID MEDICAL ANIMATION

