

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

NOBEL-
PREISE
2011



DEZEMBER 2011

ZWEITES AUGE

Spezielle Sinneszellen regulieren unseren Tagesrhythmus

GRÜNER LASER

Deutsche Forscher erzielen den Durchbruch

ALTES ÄGYPTEN

Präzisere Chronologie dank C-14-Methode

NEUE SERIE

Die Zukunft der Energie

TEIL 1:

Strom aus der Sonne

Fotovoltaik und Solarthermie versprechen die Energiewende

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





Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Blicke in die Zukunft

Nachdem wir im August den Artikel »Fukushima auch in Deutschland?« veröffentlicht hatten, ertranken wir geradezu in einer Flut von Briefen und E-Mails. Nun ist die Kernkraft hier zu Lande schon seit Jahrzehnten ein höchst umstrittenes Thema, was die vielen, oft auch sehr emotionalen Zuschriften erklärt (siehe das Oktoberheft, S. 6). Darüber hinaus schwingt hier aber noch eine andere, viel grundlegendere Frage mit – jene nach der Zukunft der Menschheit. Und damit meine ich nicht die potenziell katastrophalen Folgen von Nuklearunfällen. Nein, es geht schlicht um die ausreichende Versorgung mit Energie. Sollte es hier einmal zu ausgeprägten Engpässen kommen, drohen Verteilungskonflikte bis hin zum Zusammenbruch der Weltwirtschaft, mit unabsehbaren Konsequenzen für den Fortbestand der Zivilisation.

Der deutsche Ausstieg aus der Kernenergie spielt in diesem Zusammenhang nur eine unbedeutende Statistenrolle. Langfristig gilt es die weltweite Energiewirtschaft grundsätzlich umzustellen: weg vom Verbrauch endlicher Ausgangsstoffe wie Kohle, Gas, Öl und Uran; weg von Techniken, die Energie nur unter Freisetzung schädlicher Substanzen produzieren können, seien es Schwefeloxide, Kohlendioxid oder radioaktive Abfälle. Nicht nur die Begrenztheit solcher natürlichen Ressourcen erzwingt diesen Wechsel, sondern auch die Sorge um den Erhalt unserer Umwelt und eines lebensfreundlichen Klimas.

Wohin des Wegs also? Nicht zuletzt durch den Reaktorunfall von Fukushima befinden sich alternative oder regenerative Energien aus Quellen, die sich nicht erschöpfen oder zumindest rasch selbst erneuern, stark im Aufwind. Genau der richtige Zeitpunkt somit für unsere Serie »Zukunft der Energie« ab S. 68. In sechs Teilen liefert sie das, was Sie als Leser von **Spektrum der Wissenschaft** erwarten und gewohnt sind: Die Artikel vermitteln einen fundierten Überblick über diese Pioniertechnologien und beleuchten ihre Stärken und Schwächen.

Den Stand der Technik darstellen – dieses Motto trifft auch auf den Artikel ab S. 78 zu. Hier beschreiben drei Forscher, wie sie in jahrelanger mühevoller Detailarbeit bei der Regensburger Firma Osram Opto Semiconductors den grünen Laser zur Serienreife entwickelten. Damit ist nun der Weg frei für handliche Minilaserprojektoren, die sich beispielsweise in Handys einbauen lassen und auf Knopfdruck riesige hoch aufgelöste Bilder an die Wand werfen können. Vielleicht schauen wir ja in ein paar Jahren mit dieser Technik daheim Fernsehsendungen und Filme, spielen Videogames und betrachten unsere Urlaubsfotos – und das alles so groß wie die ganze Wohnzimmerwand!

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Das Auge ist nicht nur zum Sehen da: Der Biologe **Ignacio Provencio** von der amerikanischen University of Virginia in Charlottesville war an der Entdeckung eines weiteren Sinns in der Netzhaut beteiligt, der unseren Tag-Nacht-Rhythmus steuert (ab S. 26).



Eva Maria Wild und **Walter Kutschera** von der Universität Wien setzen die C-14-Datierung ein, um die Chronologie des alten Ägyptens präziser zu bestimmen (ab S. 48).



Auf dem Weg zu leistungsfähigen Minilaserprojektoren fehlte bislang ein zentraler Baustein: ein echter grüner Laser. Jetzt haben **Désirée Queren**, **Adrian Avramescu** (oben) und **Stephan Lutgen** bei Osram Opto Semiconductors den Durchbruch geschafft. Die Forscher berichten ab S. 78, wie sie die technischen Hürden überwandern.



26 Das übersehene zweite Auge



32 Ein neuer Rover ist unterwegs zum Mars



48 Neues aus dem alten Ägypten



78 Grüner Laser

BIOLOGIE & MEDIZIN

► 26 Das zweite Auge

Ignacio Provencio

In unseren Augen steckt ein zweites Sinnesorgan zur Lichtwahrnehmung, das die Physiologen lange nicht erkannt haben. Ohne seine besonderen Zellen, die einem uralten Prinzip folgen, würde unser Tag-Nacht-Rhythmus nicht funktionieren

Titelmotiv:
 fotolia / Sandra Cunningham (Sonne);
 dreamstime / Eric Strand (Solarpanel);
 Spektrum der Wissenschaft (Composing)

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet

PHYSIK & ASTRONOMIE

32 Mars auf die Pelle gerückt

Peter H. Smith

In diesen Wochen will das Mars Science Laboratory an die Erfolge der Marssonde Phoenix anknüpfen. Der Phoenix-Chefwissenschaftler über die Herausforderung interplanetarer Missionen

SCHLICHTING!

40 Was das Feuer am Leben hält

H. Joachim Schlichting

In einer Kerze wirken viele Prozesse auf komplexe Weise zusammen

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

44 Die Unruh, das Pendel und der Schmetterlingseffekt

Norbert Treitz

Vom präzisen Gang der Wanduhr bis zum Chaos ist es nur ein kurzer Weg

MENSCH & KULTUR

► 48 ¹⁴C und die Chronologie Ägyptens

Eva Maria Wild

und *Walter Kutschera*

Bei der Entwicklung der Radiokohlenstoffdatierung dienten Funde aus der Pharaonenzeit als Referenz. Heute hilft die Methode, offene Fragen der ägyptischen Chronologie zu beantworten

56 Ein Puzzle besonderer Art

Thomas Schneider

Ägyptologen setzen die Chronologie des Nilstaats aus einer Vielzahl von historischen Informationen zusammen: von Tempelschriften bis hin zu Zeitangaben auf Weinkrügen

68

TITELTHEMA

Die Zukunft der Energie

ERDE & UMWELT

► **NEUE SERIE**

68 Energie der Zukunft Teil 1: Sonnige Zeiten

Bernd Müller

Die Fotovoltaik boomt, und solarthermische Kraftwerke stehen in den Startlöchern. Zu Beginn der neuen, sechsteiligen Serie geht es um Stand und Perspektiven der Solarenergie

INTERVIEW

72 Apostel der Solarwende

Der Fotovoltaikexperte Eicke Weber erläutert die künftige Bedeutung der Solarenergie

TECHNIK & COMPUTER

► **78 Grüne Welle für den Laser**

Désirée Queren, Adrian Avramescu und Stephan Lutgen

Mit der Entwicklung des grünen Lasers durch eine deutsche Forschergruppe werden demnächst Miniatur-Laserprojektionen möglich – etwa in Smartphones

SONDERTEIL NACH SEITE 84



Wohin mit der Datenflut?

Exponentiell anwachsende Datenmengen fordern die Informatik heraus

SPEKTROGRAMM

- 8** Reionisation des Weltalls verlief schneller als gedacht • Das Erbgut des Schwarzen Tods ist entziffert • Fledermäuse rufen mit superschnellen Muskeln • Arktisches Rekord-Ozonloch dank Klimawandel • Farbspiele vor 100 000 Jahren • Hefezellen als Golfbälle

BILD DES MONATS

11 Verwandter des *Tyrannosaurus*

► **FORSCHUNG AKTUELL**

12 Nobelpreis für Physik

Das Universum startet durch

15 Nobelpreis für Medizin

Wachposten des Immunsystems

18 Nobelpreis für Chemie

Kristalle mit unmöglicher Symmetrie

21 Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften

Ursache und Wirkung in der Makroökonomie

24 Springers Einwüfze

Ist der Embryo Natur oder Kultur?

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe/Impressum

85 Rezensionen

Philipp Blom: Böse Philosophen

Dmitry Fuchs, Serge Tabachnikov:

Ein Schaubild der Mathematik

Mark Alpert: Crash

Fondation Cartier: Mathématiques,

un dépaysement soudain

u. a.

92 Wissenschaft im Rückblick

Vom Aerophor zur Schneekanone

93 Exponat des Monats

Der klingende Christbaumständer
»Gloriosa«

94 Vorschau



Bei mehreren Gruppen der Panzerfische entwickelten sich die Jungen in der Mutter. Hier eine Rekonstruktion von *Materpiscis*

Embryo

Innere Befruchtung von Vorteil

Die vor 375 Millionen Jahren lebenden Panzerfische praktizierten als Erste die Kopulation, fand der australische Paläontologe John A. Long anhand von Fossilien heraus. (»Die Pioniere des Sex«, Oktober 2011, S. 30)

Siglinde Uhlmann, Nidda: Der Vorteil innerer Befruchtung für die größere Radiation (siehe S. 35 des Beitrags) könnte auch darin gelegen haben, dass bei äußerer Befruchtung eine Isolation der neu entstehenden Genpools schwer zu erreichen ist, wenn eine größere Population im Wasser gleichzeitig abläicht. Das kann die Entstehung neuer Arten erschweren.

Wie weit können Astronomen sehen?

Der Kosmologe George Ellis bezweifelte, dass Forscher die Existenz anderer Universen jemals nachweisen können. (»Multiversum in Beweisnot«, November 2011, S. 36)

Wolfgang Grimm, Darmstadt: Im Artikel heißt es, dass Astronomen rund 42 Milliarden Lichtjahre weit sehen können. Bisher dachte ich immer, der sichtbare Bereich habe einen Radius von etwa 13 Milliarden Lichtjahre, was durch das Alter des Universums von etwas über 13 Milliarden Jahre gegeben ist.

Antwort der Redaktion:

Der Radius des sichtbaren Universums (der Beobachtungshorizont) ist gegeben durch die größte Entfernung, aus der uns Licht gerade noch erreichen kann. Wäre mit dem Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren das Universum genau so, wie es heute ist, also ohne kosmische Expansion, auf einen Schlag entstanden, dann wäre unser Beobachtungshorizont tatsächlich gerade 13,7 Milliarden Lichtjahre groß. Doch in Wirklichkeit folgte auf den Urknall zuerst eine immens starke Expansion, kosmische Inflation genannt, und seither eine weiter andauernde gemächlichere, aber beschleunigte Ausdehnung des Weltalls.

Von dieser Expansion wurde das von den frühesten und fernsten Quellen ausgehende Licht quasi mitbefördert (etwa wie ein Fußgänger, der auf einem rasch gedehnten Gummilaufband dahinschreitet) und legte die viel größere Entfernung von rund 42 Milliarden Lichtjahren zurück. Dieser Wert ergibt sich aus dem kosmischen Standardmodell, wenn man bei der Berechnung des Beobachtungshorizonts die anfängliche kosmische Inflation und die seitherige Expansion berücksichtigt.

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke
 E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirken mit: Mike Beckers, Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2011 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



Heikle Endlagerfrage

Wegen des ungelösten Endlagerproblems befürwortete Michael Springer den Ausstieg aus der Kernenergie. (»Lehren aus Fukushima«, Oktober 2011, S. 20)

Peter Franke, Celle: Herzlichen Dank für Ihren Beitrag, der mir in oft wiederkehrenden Diskussionen »Atomkraft: Ja oder Nein« einen nachhaltigen Hilfen zu meiner 1985 getroffenen Ablehnung dieser Technologie an die Hand gegeben beziehungsweise in den Mund gelegt hat. Denn genau die Argumentation im letzten Absatz Ihres Beitrags, war für mich Anlass, jegliche Tätigkeit als Sachverständiger beim Bau von Kernkraftwerken weltweit oder aber für zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen während der ersten Revisionsprüfungen in Neckarwestheim zu beenden.

Axel Sigwart, per E-mail: Wenn Herr Springer meint, dass der Ausstieg aus der Atomenergie richtig sei wegen der ungelösten Endlagerfrage, so sollte er daran denken, dass die Behandlungsfrage des Abfalls unabhängig von der Nutzung betrachtet und beantwortet werden muss. Insofern können wir gar nicht aussteigen, da auch die Bundesrepublik Deutschland radioaktive Abfälle hat und damit umgehen muss.

Außerdem ist die Behauptung, es gäbe noch nirgends eine akzeptable Lösung für das Endlagerproblem, so nicht richtig. In Finnland, in der Schweiz und in Schweden werden gerade Lösungen umgesetzt. Der Schlusssatz mit seiner rhetorischen Frage ist doppelt naiv. Die chemische Industrie erzeugt abertausende Tonnen giftigen Abfalls, der tatsächlich über geologische Zeiträume hinweg gefährlich bleiben wird, wenn man ihn nicht behandelt. Radioaktiver Abfall zerfällt von allein und müsste lediglich auf das Niveau einer Uranerzmine gesenkt werden, was durchaus mit bestimmten Techniken möglich ist! So würde ein Abfall entstehen, der in wenigen hundert Jahren – also in überschaubarer Zeit – irdischen Verhältnissen gleichkommt.

Antwort des Autors:

Solange das Endlagerproblem für radioaktive Abfälle weltweit nicht befriedigend gelöst ist, landen sie in Zwischenlagern. Das ist der gegenwärtige Stand der Dinge. In einzelnen Ländern wie Schweden gibt es oberflächennahe Endlager, tiefere sind geplant. Doch in den meisten Staaten ist das Problem der Endlagerung offen. Bei weiterlaufendem Betrieb von Kernkraftwerken stößt die Zwischenlagerung naturgemäß an Grenzen. Dieses Problem wird durch den Hinweis auf bereits vorhandene radioaktive Abfälle nicht kleiner. Auch der Hinweis auf die Giftigkeit mancher chemischer Abfälle mindert das spezielle Problem mit der Strahlung und Wärmeentwicklung radioaktiver Substanzen nicht. Gewiss löst ein Ausstieg aus der Kernenergie für sich genommen das Endlagerproblem nicht; aber er verschärft es wenigstens nicht immer weiter. Vergleichsweise würde man wohl kaum das hohe Ausmaß einer bereits vorhandenen Verschuldung als Argument für weiteres Schuldenmachen heranziehen.

Göttinger Akademie maßgeblich beteiligt

Der Wissenschaftshistoriker Eberhard Knobloch beschrieb die Herkulesaufgabe, der Öffentlichkeit das umfassende Werk von Leibniz zugänglich zu machen. (»Die Kunst, Leibniz herauszugeben«, September 2011, S. 48)

Prof. Werner Lehfeldt, Akademie der Wissenschaften, Göttingen: Es freut mich, dass »Spektrum der Wissenschaft« seine Leser mit der Gesamtausgabe der Schriften und der Briefe Gottfried Wilhelm Leibniz' bekannt gemacht und dafür einen so hervorragenden Fachmann wie Professor Eberhard Knobloch gewonnen hat. Ich kann Ihnen aber nicht verhehlen, dass mich ein Umstand bei der Lektüre dieses Beitrags sehr betrübt hat. Es wird nämlich in dem Artikel mit keinem Wort erwähnt, dass die Akademie der Wissenschaften zu Göttingen sehr maßgeblich an der Leibniz-Edition beteiligt ist. Zwar wirkt sie mit ihren Ar-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

beitsstellen Hannover und Münster erst seit 1985 an diesem Unternehmen mit, aber immerhin sind von den 30 seit 1985 erschienenen Bänden 25 von der Göttinger Akademie erarbeitet worden. Angesichts dieses Umstands irritiert es mich einigermaßen, dass der Leser des Beitrags den Eindruck gewinnen muss, die Leibniz-Edition sei eine Angelegenheit ausschließlich der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Das ist mitnichten der Fall.

Erratum

»Schwarmintelligenz« macht Windränder effizienter«, Oktober 2011, S. 9

Die angegebene Referenz ist falsch; richtig ist J. Renewable Sustainable Energy 3, 043104, 2011

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

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

KOSMOLOGIE

Reionisation des Weltalls verlief schneller als gedacht

Die ersten Sterne und Galaxien im Universum waren von einem Nebel aus elektrisch neutralem Wasserstoff umgeben. Er schluckte das ultraviolette Licht der Himmelskörper, wurde dabei aber in Ionen zerlegt und infolgedessen allmählich durchsichtig für UV-Licht. Astronomen um Laura Pentericci vom italienischen INAF Osservatorio Astronomico di Roma haben nun den Zeitablauf dieser so genannten Reionisation rekonstruiert und dazu einige sehr früh entstandene

Galaxien unter die Lupe genommen. Ergebnis: Der Prozess vollzog sich deutlich schneller als bisher vermutet.

Die Forscher nutzten das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile, um fünf sehr weit entfernte Galaxien zu beobachten. Von der Erde aus betrachtet erscheinen diese Sterninseln heute so, wie sie 780 bis 1000 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesehen haben. In dem Strahlungsspektrum der Galaxien untersuchten die Forscher vor allem

die Lyman-alpha-Linie, ein Leuchten im UV-Bereich, das von Wasserstoff erzeugt wird. Je weiter die Linie zum roten Ende des Spektrums hin verschoben ist, desto entfernter sind die Galaxien und damit zeitlich umso näher am Urknall. Und je schwächer das Leuchten, umso mehr wurde es auf dem Weg zur Erde von Wolken aus neutralem Wasserstoff verschluckt. Aus diesen Zusammenhängen ergab sich, dass das Universum in einem Alter von 780 Millionen Jahren noch viel neutralen Wasserstoff enthielt: Er erfüllte damals zwischen 10 und 50 Prozent des intergalaktischen Raums. Schon 200 Millionen Jahre später war seine Menge etwa auf das heutige Niveau abgesunken. Laut den neuen Messungen stammte das UV-Licht, das die Reionisation verursachte, wenigstens zum Teil von massereichen Sternen der ersten Generation, deren Existenz bislang nur theoretisch belegt ist.

The Astrophysical Journal, im Druck



Künstlerische Darstellung von Galaxien während der Zeit der Reionisation. Damals, weniger als eine Milliarde Jahre nach dem Urknall, enthielt das Universum noch viel neutralen Wasserstoff, der das UV-Licht der Sterne schluckte.

GENETIK

Das Erbgut des Schwarzen Tods ist entziffert

Millionen Menschen starben im 14. Jahrhundert am »Schwarzen Tod«. Jetzt haben Forscher um Johannes Krause von der Universität Tübingen und Hendrik Poinar von der McMaster University in Hamilton (Kanada) das Erbgut des mittelalterlichen Pestbakteriums *Yersinia pestis* entschlüsselt. Das genetische Material stammte aus fünf Zähnen von Londoner Pestopfern aus den Jahren 1348 bis 1350 (Video: www.spektrum.de/schwarzertod). Beim Vergleich mit heutigen Typen des Bakteriums, die den Menschen infizieren, zeigte sich, dass sie wohl alle von einem Erreger abstammen, der während des Schwarzen Tods verbreitet wurde – jenes Massensterbens, das zwischen 1347 und 1351 wütete und 30 bis 50 Prozent der europäischen Bevölkerung dahinraffte.

Der Analyse zufolge unterscheiden sich die Gene, von denen die Virulenz des Bakteriums abhängt, kaum bei den heutigen und den mittelalterlichen Pesterregern. Dass der Schwarze Tod so verheerend zuschlug, sei deshalb nicht allein auf besondere genetische Eigenschaften des Erregers zurückzuführen, folgern die Forscher. Vielmehr hätten auch Klimaverhältnisse, Übertragungswege, die Krankheitsanfälligkeit der damaligen Bevölkerung, soziale Bedingungen und die Wechselwirkung mit anderen Krankheiten eine bedeutende Rolle gespielt.

Erst wenige Monate zuvor hatten die Wissenschaftler in Zähnen und Knochen der Londoner Pestopfer ein Plasmid nachgewiesen, das für *Yersinia pestis* charakteristisch ist. Damit belegten sie, dass der Schwarze Tod



Londoner Pestopfer auf dem Friedhof East Smithfield

tatsächlich von diesem Erreger hervorgerufen wurde und nicht, wie von manchen vermutet, von einem anderen.

Nature 478, S. 506–510, 2011

ECHOORTUNG

Fledermäuse rufen mit superschnellen Muskeln

Spezielle Muskeln im Kehlkopf ermöglichen es Fledermäusen, ihre Beute akustisch zu orten. Sie erlauben eine extrem rasche Folge von Peillaute – allerdings nur bis zu etwa 200 pro Sekunde.

Wenn eine Fledermaus ein fliegendes Insekt jagt, stößt sie fortwährend Ultraschallrufe aus, um es zu lokalisieren. Je näher sie ihrer Beute kommt, desto häufiger ruft sie, um die Ortsinformation immer rascher zu aktualisieren. Wasserfledermäuse (*Myotis daubentonii*) feuern in der abschließenden »Buzz«-Phase, kurz bevor sie das Insekt erreichen und fangen, bis zu 190 Peillaute pro Sekunde in Richtung Beute ab.

Coen Elemans von der Universität von Süddänemark in Odense und seine Kollegen haben nun herausgefunden, was die Ruhhäufigkeit nach oben begrenzt: spezielle Muskeln im Kehlkopf der Tiere, die höchstens 200-mal pro Sekunde kontrahieren können. Solche »superschnellen« Muskeln kennt man bisher nur von einigen Reptilien-, Vogel- und Fischarten; mit den Fledermäusen wurden sie nun erstmals bei einem Säugetier entdeckt.

Die Schallgeschwindigkeit ist dagegen nicht der limitierende Faktor. Denkbar wäre es zwar – träfe das Echo eines Rufs erst während der folgenden Rufe oder nach ihnen ein, könnte das Tier die verschiedenen Echos nicht mehr eindeutig zuordnen und die Peilung würde ungenau.

LASE JAKOBSEN UND COEN ELEMANS, SÜDDÄNSK UNIVERSITÄT



Wasserfledermaus im Anflug auf ein Beutetier, mehrfach belichtet. Kurz bevor sie das Opfer ergreift, ortet sie dieses mit einer extrem raschen Folge von Peillaute.

Deshalb stoßen Fledermäuse den nächsten Laut immer erst aus, wenn das Echo des vorigen eingetroffen ist. Doch unter diesem Aspekt wären sogar 400 Rufe pro Sekunde möglich, fanden die Forscher heraus. Auch die neuronale Verarbeitung der Echoinformation im Gehirn der Fledermäuse erlaubt eine höhere Lautfolge während der Buzz-Phase, als die superschnellen Muskeln erzeugen können.

Science 333, S. 1885–1888, 2011

ATMOSPÄRENCEMIE

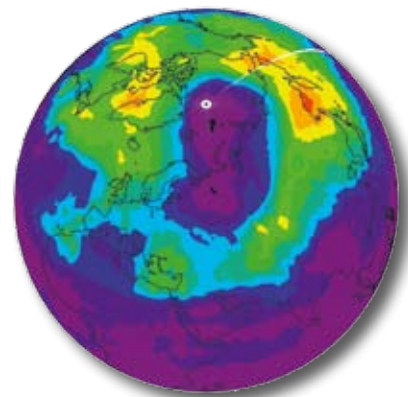
Arktisches Rekord-Ozonloch dank Klimawandel

Im Frühjahr 2011 erreichte das Ozonloch am Nordpol erstmals Ausmaße, wie sie Mitte der 1980er Jahre in der Antarktis gemessen wurden. Forscher um Markus Rex vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven haben jetzt die Gründe dafür analysiert.

Verantwortlich für den noch nie da gewesenen Ozonabbau war demnach ein ungewöhnlich lang anhaltender und stabiler Polarwirbel über der Arktis, der den Austausch mit wärmeren Luftmassen bis in den April hinein verhindert hatte. Hinzu kam, dass die Stratosphäre (die zweitunterste Atmosphärenschicht) über der Arktis im Winter 2010/2011 außerordentlich

stark abkühlte. Dadurch konnten sich mehr polare stratosphärische Wolken bilden, in denen mit dem Aufgehen der Sonne nach dem Polarwinter die Ozonzerstörung einsetzt.

Der Klimawandel hat zu diesen Phänomenen beigetragen. Denn die überdurchschnittliche Erwärmung der untersten Atmosphärenschicht (der Troposphäre) beruht darauf, dass hier Treibhausgase mehr Wärmestrahlung zurückhalten – wodurch weniger Wärme in die höheren Schichten gelangt. Zugleich strömt mehr Kohlendioxid in die Stratosphäre, wo es – anders als in der Troposphäre – nicht erwärmend, sondern abkühlend wirkt. Beides mindert die Temperaturen in



NMV / FMI, OZONE MONITORING INSTRUMENT (OMI)

Das Ozonloch über der Arktis (violetter Bereich, Mitte), gemessen im April 2011

den höheren Atmosphärenschichten, was wiederum die Entstehung eines Ozonlochs fördert.

Nature 478, S. 469–475, 2011

ARCHÄOLOGIE

Farbspiele vor 100 000 Jahren

Steinzeitmenschen waren offenbar schon vor 100 000 Jahren geübt darin, Ocker zu farbigen Pasten zu verarbeiten. Hierfür benutzten sie Werkzeuge aus Stein und Knochen sowie Muschelschalen, wie Wissenschaftler um Christopher Henshilwood von der University of the Witwatersrand (Jo-

hannesburg, Südafrika) nachgewiesen haben. Das Team legte eine prähistorische Malwerkstatt in der südafrikanischen Blombos-Höhle frei, die mehrere zehntausend Jahre älter ist als zuvor bekannte, vergleichbare Fundstätten.

Bei den Grabungen kamen zwei steinzeitliche Werkzeugsätze zu Tage, die dazu dienten, Ocker zu verarbeiten und aufzubewahren. Sie enthielten Schalen von Seeohrschnecken (*Haliotis midae*), Ocker, Knochenstäbchen, Kohle, Schleif- und Hammersteine. Beide Werkzeugsätze waren mit Sandabla-

Einer der beiden steinzeitlichen Werkzeugsätze aus der Blombos-Höhle. Ein runder Quarzitstein, wahrscheinlich zum Zertrümmern und Zermahlen von Ocker, ruht in einer Muschelschale, in der Ockerpaste aufbewahrt wurde. Wie kräftig die Farbe dieser Mixtur war, lassen die Ockerreste links unten im Bild erahnen.



CHRISTOPHER HENSHILWOOD / SCIENCE

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie auf spektrumdirekt.de

gerungen bedeckt, deren Alter die Forscher mit optisch stimulierter Lumineszenz (OSL) und anderen Methoden auf rund 100 000 Jahre bestimmten.

Vermutlich haben die Steinzeitmenschen das färbende Gestein auf Quarzitplatten zerrieben und mit Steinen zertrümmert, um feines rotes Pulver zu gewinnen. Anschließend vermischten sie die Substanz mit gemahlene Säugetierknochen, Kohle und Flüssigkeit und füllten sie zur Lagerung in die Muschelschalen. Ein Knochenstäbchen diente wohl dazu, die Mixtur umzurühren und aus der Muschel herauszubekommen. Wofür die Menschen damals die farbige Paste verwendeten, ist unbekannt. Möglicherweise, spekulieren die Forscher, bemalten sie damit Gegenstände oder sich selbst – sei es zu Schmuckzwecken, um ein Kunstwerk zu gestalten oder eine Schutzschicht aufzutragen.

Science 334, S. 219–222, 2011

ZELLBIOLOGIE

Hefezellen als Golfbälle

Japanische Wissenschaftler haben eine Art winzigen Golfschläger konstruiert, um damit Hefezellen von einer Oberfläche »abzuschlagen«. Die Technik erlaubt es festzustellen, ob einzelne Zellen tot oder lebendig sind.

Wie stark eine Zelle mittels Adhäsion auf dem Untergrund haftet, hängt von der Zahl chemischer Bindungsstellen auf ihrer Oberfläche ab – zumindest laut Theorie. Tote Zellen besitzen demnach weniger Bindungsstellen und haften schlechter. Die Forscher um Yajing Shen von der Nagoya University in Japan haben dies nun für Hefezellen bestätigt. Bei lebenden Zellen ermittelten sie eine Adhäsionskraft von rund 19 Mikronewton, während es bei toten etwa 6 Mikronewton waren. Auf verschiedenen Oberflächen – Wolfram, Gold und Indiumzinnoxid – variierte

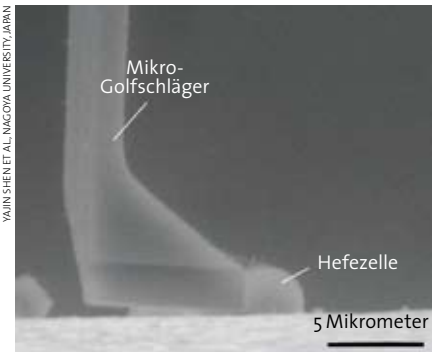
die Haftung nur um wenige Mikronewton und damit deutlich weniger als zwischen toten und lebenden Zellen.

Für ihre Experimente hatten die Wissenschaftler aus der Blattfeder (Cantilever) eines Rasterkraftmikroskops einen 240 Mikrometer langen biegsamen Hebel – den »Golfschläger« – hergestellt, an dessen Ende eine winzige Pyramide mit gekappter Spitze saß. Mit dieser als Schlägerkopf drückten sie seitlich gegen Zellen, die am Untergrund hafteten. Sie ermittelten, wie stark sich der Hebel verbog, und berechneten daraus die Kraft, die zum Ablösen jeder Zelle nötig war. Mit Hilfe des Farbstoffs Metylenblau unterschieden sie dabei zwischen lebenden und toten Hefezellen.

Der Vorteil ihrer Methode, schreiben die Forscher, liege darin, dass der

Zustand einer einzelnen Zelle rasch, quantitativ und ohne die sonst üblichen aufwändigen Färbemethoden gemessen werden könne.

Measurement Science and Technology 22, 115802, 2011



Ein winziger »Golfschläger« drückt seitlich gegen eine Hefezelle, um sie vom Untergrund abzulösen.

YAJING SHEN ET AL. NAGOYA UNIVERSITY, JAPAN

KLEINER VERWANDTER DES TYRANNOSAURUS



MIT FRDL. GEN. VON HELMUT TISCHLINGER

Ein solcher Glücksfund gelingt selten: Dieser 151 Millionen Jahre alte Raub-
saurier (Theropode) aus den Kalkschichten des Oberen Juras bei Kelheim ist
beinahe vollständig erhalten und damit auch weltweit gesehen eine Rarität.
Das 72 Zentimeter lange Skelett eines Jungtiers lässt sogar noch minera-
lisierte Reste von Haut und haarähnlichen Protodefem erkennen – Merkmale,
die vor allem von Dinosaurierfossilien aus China bekannt sind. Aus ande-
ren Fundstätten gibt es dafür bislang nur wenige Nachweise.

Das Universum startet durch

1998 entdeckten Kosmologen völlig unerwartet, dass sich die Ausdehnung des Kosmos nicht verlangsamt, sondern beschleunigt. Dafür erhielten sie nun den Nobelpreis für Physik.

VON THOMAS BÜHRKE



1988 begann **Saul Perlmutter** (links) vom kalifornischen Lawrence Berkeley National Laboratory, im Rahmen des Supernova Cosmology Project die Expansion des Universums zu vermessen. Dasselbe Ziel verfolgte **Brian P. Schmidt** (Mitte) von der Australian National University bei Canberra ab 1994. Seinem High-Redshift Supernova Search Team gehörte auch **Adam G. Riess** vom Space Telescope Science Institute in Baltimore an. Übereinstimmend kamen beide Gruppen 1998 zu dem überraschenden Ergebnis, dass das Universum beschleunigt expandiert.

rühmtesten Nobelpreisträger: Albert Einstein. Dieser hatte 1915 im Rahmen seiner allgemeinen Relativitätstheorie herausgefunden, dass der uns umgebende Raum nicht starr und unveränderlich ist, sondern sich durch die Anwesenheit von Materie verbiegen lässt. Als die beiden Mathematiker Georges Lemaitre in Belgien und Alexander Friedmann in Russland dann unabhängig voneinander Einsteins Formeln auf das Universum anwandten, stießen sie auf ein erstaunliches Ergebnis. Abhängig von der Materiedichte im Kosmos dehnt sich das Universum entweder immer weiter aus oder zieht sich eines Tages wieder zusammen.

Für Einstein war die Vorstellung eines sich verändernden Universums allerdings inakzeptabel, weshalb er in die Formeln seiner Theorie kurzerhand eine so genannte kosmologische Konstante einführte, die wie eine Antischwerkraft wirkt und für ein statisches Universum sorgt. Als in den 1930er Jahren immer klarer wurde, dass das Weltall eben doch expandiert, verwarf er sie zwar wieder. Doch seit einigen Jahren ist die kosmologische Konstante erneut in der Diskussion – und mit ihr die alten Fragen nach ihrer Ursache.

1988 hatte Saul Perlmutter vom Lawrence Berkeley National Laboratory und der University of California das Supernova Cosmology Project initiiert. Seine Idee: Er wollte die Expansion des Kosmos anhand bestimmter explodierender Sterne studieren. Solche Supernovae vom Typ Ia leuchten unvermittelt auf, ihre Helligkeit steigt innerhalb von Tagen an und fällt dann wieder ab.

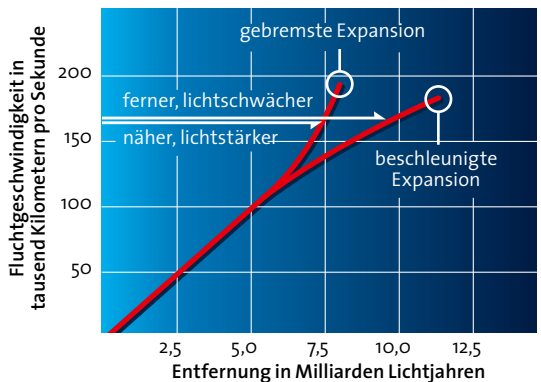
Die Astronomen gehen davon aus, dass diese Supernovae immer etwa dieselbe Leuchtkraft besitzen, so wie Glühbirnen mit derselben Leistung. Je licht-

Schon lange wissen Astronomen, dass das Universum expandiert. Doch sie glaubten, die Schwerkraft der Materie würde den Vorgang allmählich verlangsamen. Genau das wollten die internationalen Forscherteams um Saul Perlmutter einerseits sowie um Brian P. Schmidt andererseits in den 1990er Jahren durch Messungen belegen. In

Schmidts Team spielte dabei Adam G. Riess eine entscheidende Rolle (siehe »Das Tempo der Expansion« von Adam G. Riess und Michael S. Turner, Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 42; www.spektrum.de/artikel/839966).

Dann kam alles anders. Unabhängig voneinander reichten die beiden Arbeitsgruppen 1998 ihre Erkenntnisse bei zwei Fachzeitschriften ein. In einem Telefoninterview mit dem Nobelkomitee erinnert sich Schmidt: »Wir waren anfangs sehr erschrocken über dieses Ergebnis und fanden es zu verrückt, um wahr zu sein.« Denn die Expansion des Universums schien sich den Daten zufolge nicht zu verlangsamen, sondern vielmehr zu beschleunigen! Für dieses Ergebnis, das weit reichende Folgen für die Kosmologie hat, ging die eine Hälfte des Nobelpreises für Physik nun an den US-Amerikaner Perlmutter. Die andere Hälfte teilen sich der US-Australier Schmidt und der US-Amerikaner Riess.

Mit ihrer Entdeckung treten die drei Forscher in die Fußstapfen des wohl be-



In einem beschleunigt expandierenden Universum erscheinen weit entfernte Supernovae vom Typ Ia lichtschwächer als in einem abgebremsen Universum.

RÖNTGEN: NASA/CXC/RUTGERS, G. CASSAM-CHENAI, J. HUGHES ET AL.;
 RADIO: NRAO/AUI/NSF, GBT/P.VILA, A. SANDYER ET AL.; OPTISCH: MIDDLEBURY COLLEGE, FRANK WINKLER UND INDRADRAKSHN/NSF/CITIO&DSS



Im Jahr 1006 n. Chr. leuchtete ein neuer »Stern« am Erdhimmel auf: die Überreste der Supernova SN 1006 vom Typ Ia im Sternbild Wolf – die womöglich hellste Supernova, von der Menschen je Notiz nahmen. Die drei Laureaten nutzten in den 1990er Jahren besonders weit entfernte Supernovae, um die Expansion des Universums zu vermessen.

schwächer eine Supernova erscheint, desto weiter ist sie also entfernt. Supernovae vom Typ Ia zählen daher zu den »Standardkerzen«, mit denen sich das Universum vermessen lässt. Andere Standardkerzen – wie etwa die Delta-Cephei-Sterne, die Edwin Hubble nutzte, um die Fluchtgeschwindigkeit von Galaxien zu vermessen – sind nicht hell genug, als dass man sie noch in einer Entfernung von Milliarden von Lichtjahren beobachten könnte. Supernovae hingegen schon. Mit ihnen können die Forscher tief in den Raum und damit auch weit in die Zeit zurückblicken.

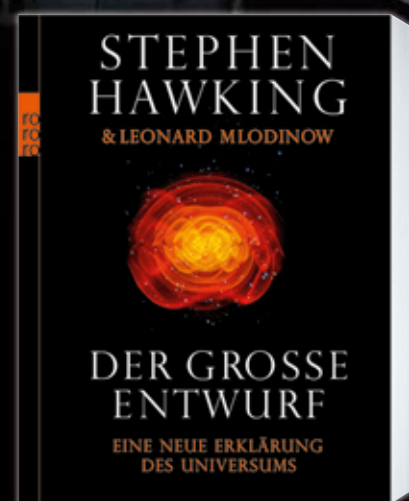
In der Praxis funktioniert das Verfahren so: Zunächst suchen die Forscher möglichst nahe gelegene Supernovae vom Typ Ia in Galaxien, deren Entfernung dank anderer Methoden gut bekannt ist. Aus dieser Entfernung

und der Helligkeit, mit der uns die Supernova am Himmel erscheint, lässt sich dann ihre absolute (intrinsische) Helligkeit ermitteln. Um im Bild zu bleiben: Kenne ich die Entfernung einer Glühbirne und messe ihre scheinbare Helligkeit, dann kann ich errechnen, ob es sich um eine 60- oder 100-Watt-Birne handelt. Solche Untersuchungen haben zwar gezeigt, dass Supernovae vom Typ Ia eben doch nicht intrinsisch gleich hell sind. Die Astronomen haben aber Kriterien gefunden, mit denen sich diese Unterschiede korrigieren lassen, und so ihr Verfahren geeicht. Zudem berücksichtigen sie weitere Effekte, etwa die Lichtabsorption durch Staubwolken zwischen der Erde und einer Supernova.

Um zu ermitteln, wie sich die Expansionsgeschwindigkeit des Universums

Stephen Hawking entschlüsselt das Universum

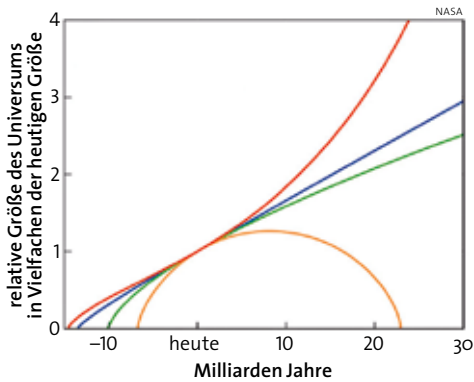
ro
ro
ro



Aus dem Englischen von Hainer Kober
 € 14,99 (D) / € 15,50 (A) / sFr. 21,90 (UVP)

Wann und wie ist das Universum entstanden? Warum gibt es uns? Warum gibt es überhaupt etwas und nicht einfach nichts? Stephen Hawking und Leonard Mlodinow präsentieren in ihrer klaren und bilderreichen Sprache die jüngsten Antworten der Wissenschaft auf die ersten und letzten Fragen unserer Existenz.

© Stewart Cohen Pictures



Einsteins Relativitätstheorie zufolge sind vier Weltmodelle möglich. Wie sich das Universum tatsächlich entwickelt, hängt von seiner Materiedichte sowie der Menge an Dunkler Energie ab. Beispielsweise könnte sich die Expansion eines Tages umkehren und das Universum auf einen Punkt zusammenschrumpfen (orange-farbene Kurve). Heute favorisieren Kosmologen die Hypothese, dass sich das Universum bis in alle Ewigkeit beschleunigt ausdehnt (rote Kurve).

seit dem Urknall entwickelt hat, müssen die Forscher möglichst viele Supernovae vom Typ Ia in unterschiedlichen Entfernungen finden und deren Helligkeiten bestimmen. Dann kommt ein zweites Phänomen ins Spiel. Wegen der Expansion des Raums dehnt sich die Wellenlänge des Lichts einer Supernova auf seiner Reise zur Erde. Diese so genannte Rotverschiebung nimmt mit der Distanz zu, denn je weiter eine Supernova entfernt ist, desto stärker hat sich das Universum zwischen dem Ausenden des Lichts und dessen Ankunft bei uns vergrößert.

Hätte sich das Universum seit dem Urknall mit konstanter Geschwindigkeit ausgedehnt, so würde die scheinbare Helligkeit der Supernovae Hand in Hand mit dem Wert der Rotverschiebung gehen. Tatsächlich aber erschienen die Sternexplosionen schwächer, als es die Rotverschiebung erwarten ließ, waren also weiter entfernt. Daraus wiederum folgerten die Kosmologen: Die Ausdehnung des Universums muss sich im Lauf der Zeit beschleunigen.

Perlmutter's Projekt war sehr aufwändig, denn Supernovae sind selten. Pro Jahrtausend treten in einer durchschnittlichen Galaxie nur wenige davon auf. Außerdem musste das Team die Explosion ab einem möglichst frühen Zeitpunkt vermessen. Es lichtete darum mit einem Teleskop jede Nacht ein großes Himmelsfeld ab, in dem sich mehrere tausend Galaxien befanden, und hoffte auf Zufallsfunde. Auf diese Weise entdeckten die Forscher bis 1994 sieben Supernovae. Obwohl sich in diesen wenigen Messdaten das unglaubliche Ergeb-

nis bereits abzeichnete, blieb Perlmutter mit seinen Schlussfolgerungen damals noch vorsichtig.

Sein Verfahren funktionierte aber so gut, dass Brian P. Schmidt von der Australian National University in Weston Creek und Adam G. Riess, der an der Johns Hopkins University und dem Space Telescope Science Institute in Baltimore forscht, 1994 ein ähnliches Projekt mit dem Namen High-Redshift Supernova Search starteten. Im Frühjahr 1998 reichte die Gruppe um Riess und Schmidt eine Veröffentlichung auf der Basis von 16 Supernovae ein, Perlmutter's Team folgte im September und präsentierte die Auswertung von 42 Supernovae. Beide Gruppen waren zum selben Ergebnis gekommen: Die Helligkeiten der Objekte lagen um bis zu 25 Prozent unter dem erwarteten Wert.

Wie Wasserdampf im Kessel

Nach heutigem Wissen bremste die Materie die Ausdehnung des Raums zunächst tatsächlich. Nach einigen Milliarden Jahren, etwa der Hälfte des heutigen Weltalters, setzte jedoch eine Beschleunigung ein, und seitdem expandiert das Universum mit wachsender Geschwindigkeit.

Statt von einer kosmologischen Konstanten sprechen Forscher heute allgemeiner von Dunkler Energie. Wie Wasserdampf in einem Kessel treibe sie das Universum auseinander. »Bis heute haben wir mehr als 1000 Supernovae vermessen, und alle bestätigen das ursprüngliche Ergebnis«, fasst der Astrophysiker Bruno Leibundgut von der

Europäischen Südsternwarte den derzeitigen Stand zusammen. Darüber hinaus führten weitere Beobachtungen zu demselben Resultat. Dazu zählen die Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem Weltraumteleskop WMAP und die Entwicklung von Galaxienhaufen. »Diese Ergebnisse haben unsere Schlussfolgerungen aus den Supernova-Beobachtungen entscheidend unterstützt«, so Leibundgut.

Manche Physiker führen die Dunkle Energie auf eine Eigenschaft des Vakuums zurück. Denn der Quantentheorie zufolge entstehen auch im leeren Raum unablässig so genannte virtuelle Teilchen und verschwinden nach Bruchteilen einer Sekunde wieder. Mit diesem Phänomen ist wiederum eine so genannte Vakuumenergie verbunden. Deren Abschätzung führt allerdings zu einem Wert, der um mehr als 100 Zehnerpotenzen über der tatsächlichen Größe der Dunklen Energie liegt – die wohl größte bekannte Unstimmigkeit in der gesamten Physik.

Manche Theoretiker machen auch Energiefelder verantwortlich, die Bruchteile von Sekunden nach dem Urknall entstanden sein könnten. Schon damals war es zu einer kurzen Phase extrem stark beschleunigter Expansion gekommen.

»Überzeugend sind diese Vorschläge aber alle nicht«, sagt Norbert Straumann, emeritierter Professor für theoretische Physik der Universität Zürich. »Die Dunkle Energie«, meint der profunde Kenner der Relativitätstheorie, »ist eines der grundlegenden Probleme der modernen Physik.« Auch dieser Umstand trug wohl zur Entscheidung des Nobelkomitees bei.

Wenige Stunden nach der Preisverkung empfahl das Wissenschaftskomitee der Europäischen Weltraumorganisation ESA übrigens den Bau eines neuen Weltraumteleskops: Euclid. 2019 soll es ins All starten und dann ausschließlich der Erforschung der Dunklen Energie dienen.

Thomas Bürhke ist promovierter Astrophysiker. Seit 1990 arbeitet er als freier Wissenschaftsjournalist und Buchautor.

Wachposten des Immunsystems

Der diesjährige Medizin-Nobelpreis geht an Bruce Beutler, Jules Hoffmann und Ralph Steinman.

Die drei Immunologen haben mit ihrer Arbeit entscheidend zum Verständnis der körpereigenen Abwehr beigetragen und damit den Weg für bessere Impfstoffe und Therapien geebnet.

VON STEFANIE REINBERGER



Bruce Beutler (links, Jahrgang 1957) und **Jules Hoffmann** (geboren 1941) entschlüsselten die zentrale Rolle der Toll-Rezeptoren und Toll-ähnlichen Rezeptoren bei der Abwehr von Infektionen im Rahmen der angeborenen Immunantwort. Der 1943 geborene **Ralph Steinman** (rechts) entdeckte mit den so genannten dendritischen Zellen wichtige Regulatoren des Immunsystems. Er starb am 30. September dieses Jahres.

Ein Nobelpreis für einen Toten – das dürfte es nach den Statuten eigentlich gar nicht geben, denn diese höchste wissenschaftliche Auszeichnung wird grundsätzlich nur Lebenden verliehen. Doch als das Komitee am 3. Oktober in Stockholm seine Entscheidung verkündete, wussten die Juroren noch nicht, dass der Kanadier Ralph Steinman nur wenige Tage zuvor, am 30. September, den Kampf gegen seine Krebserkrankung verloren hatte. In Stockholm steht man zur einmal vergebenen Auszeichnung: Die Regelung sei vor allem getroffen worden, um zu verhindern, dass der Preis bewusst an bereits Verstorbene verliehen wird.

Man könnte schon fast von einer Ironie des Schicksals sprechen, denn Steinmans wissenschaftliche Arbeit legte den Grundstein für die Entwicklung von Immuntherapien gegen Krebs und andere Krankheiten. Der Forscher von der Rockefeller University in New York entdeckte 1973 neue bedeutende Mitspieler der Immunabwehr. Auf Grund ihrer verästelten Fortsätze nannte er sie

dendritische Zellen, von *dendron*, dem griechischen Wort für Baum. Diese Zellen sind heute Hoffnungsträger für die Behandlung bestimmter Tumorerkrankungen (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2003, S. 38). Steinman selbst, so hieß es in einer Pressemitteilung der Rockefeller University, habe im Selbstversuch seinen Bauchspeicheldrüsenkrebs unter anderem mit Hilfe dieser dendritischen Zellen behandelt. Und tatsächlich lebte er deutlich länger, als es nach seiner Diagnose zu erwarten war. Ob der Forscher dies der speziellen Therapie verdankte, lässt sich freilich kaum beweisen, war er doch der einzige Proband bei diesem Experiment.

Als Steinman seine Entdeckung der dendritischen Zellen veröffentlichte, war er davon überzeugt, dass es sich um eine neue Untergruppe der weißen Blutkörperchen handelte. Sie seien ein Teil des Immunsystems, behauptete er – und wurde von den meisten Kollegen verlacht. »Dass er jahrzehntelang gegen diesen massiven Widerstand weiterge-

macht hat, gehört zu seinen ganz großen Leistungen«, sagt Gerold Schuler vom Universitätsklinikum Erlangen, der als junger Forscher im Labor des Nobelpreisträgers arbeitete.

Steinman sollte Recht behalten. Seine Zellen erwiesen sich in Experimenten als äußerst wirksame Stimulatoren der T-Lymphozyten, der Schlüsselzellen der erworbenen Immunität. Darin übertrafen sie sogar die Makrophagen, denen diese Aufgabe bis dahin zugesprochen wurde. Nach und nach sammelte Steinman Beweise dafür, dass dendritische Zellen ganze Mikroben, fremde Moleküle oder Bruchstücke von defektem Gewebe aufnehmen und in ihrem Inneren in kleine Schnipsel zerlegen. Diese bieten sie dann an ihrer Oberfläche auf speziellen molekularen Präsentiertellern den T-Zellen zur Begutachtung an. Nur so erkennen diese den Feind überhaupt und können bei Bedarf zum Angriff blasen.

Der Global Player der Immunantwort

Längst ist klar, dass dendritische Zellen nicht nur T-Zellen mobilisieren, sondern auch B-Zellen, die Antikörper als Waffen einsetzen, sowie natürliche Killerzellen, die Bedrohungen direkt attackieren. Außerdem schütten sie Botenstoffe aus, die die Abwehrreaktion steuern und ein immunologisches Gedächtnis entstehen lassen. Und sie sind unverzichtbar dafür, dass das Immunsystem zwischen fremd und eigen zu unterscheiden lernt – auch das hatte Steinman bereits früh beobachtet. Nur regen vollständig ausgereifte dendritische Zellen die Abwehr an; in früheren Entwicklungsstadien begünstigen sie immunologische Toleranz.

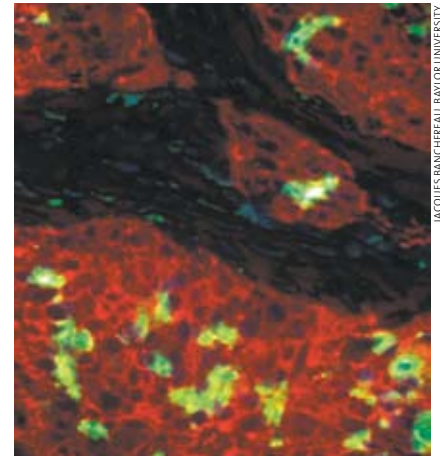
»Steinman hat mit den dendritischen Zellen den Global Player der Immunantwort entdeckt«, so Schuler. Damit gab er auch Ärzten ein mächtiges Werkzeug an die Hand, etwa für die Immuntherapie gegen bestimmte Krebsarten. Prinzipiell soll das so funktionieren: Vorläuferzellen aus dem Patienten reifen in Kulturschalen zu dendritischen Zellen, die daraufhin mit Tumorantigenen beladen werden – Molekülen, die typisch sind für bestimmte Krebszellen. Danach spritzt man die solchermaßen »scharfgemachten« Zellen wieder in den Patienten, damit sie die Abwehrtruppen gegen den Krebs mobilisieren.

Ein guter Plan – doch die Sache ist nicht ganz ohne: Nur vollständig ausgereifte und richtig aktivierte dendritische Zellen führen zum Ziel. Andernfalls besteht die Gefahr, dass sie immunologische Toleranz vermitteln und den Krebs damit sogar noch fördern. Außerdem gilt es – etwa durch Kombination mit anderen Therapien – dafür

Mittels Fluoreszenzfärbetechnik sichtbar gemachte dendritische Zellen (grün) in Brustkrebsgewebe

zu sorgen, dass der Tumor überhaupt empfänglich ist für die Behandlung und sich nicht hinter einer Art Schutzschild vor dem Immunsystem verschanzte. Und natürlich müssen Wissenschaftler die Antigene mit Bedacht wählen, damit sich die Abwehr nicht gegen gesundes eigenes Gewebe richtet.

Allen Stolpersteinen zum Trotz prüfen Wissenschaftler derzeit eine ganze Reihe viel versprechender Therapieansätze, etwa gegen Brustkrebs, Darmkrebs, schwarzen Hautkrebs und Hirntumoren. Die amerikanische Food and Drug Administration gab im vergangenen Jahr bereits grünes Licht für einen solchen Impfstoff gegen Prostatakrebs. Außerdem versuchen Forscher, die Dirigenten des Immunsystems für den Kampf gegen HIV zu gewinnen, aber auch zur Behandlung von Autoimmun-

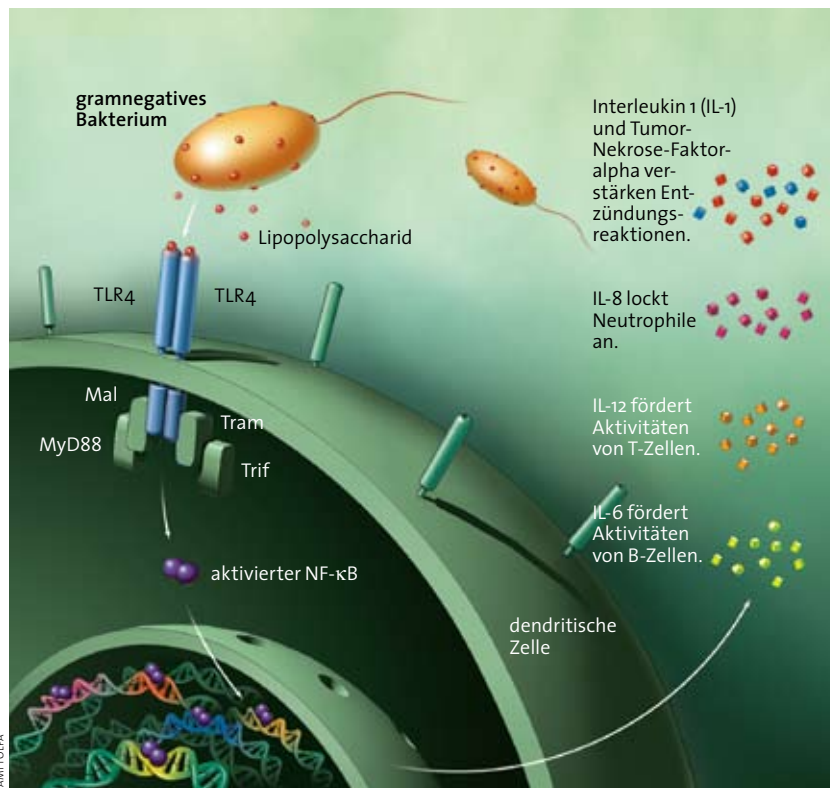


JACQUES BANCHEHEAU, BAYLOR UNIVERSITY

erkrankungen und Allergien. Andere, darunter Schuler, suchen nach neuen Wegen, die dendritischen Zellen gezielter scharfzumachen.

Ganz auf sich allein gestellt können aber auch die dendritischen Zellen nicht arbeiten. So empfangen sie beispielsweise Signale von den Zellen der angeborenen Immunantwort, der ersten Verteidigungsfront des Körpers. Das aktiviert sie im Fall einer Infektion.

Bakterienalarm in der Zelle



Viele Zellen der angeborenen Abwehr

tragen Toll-ähnliche Rezeptoren (TLRs), benannt nach dem Protein Toll. Diese Moleküle dirigieren die angeborene Immunantwort und spielen eine entscheidende Rolle bei den Reaktionen auf Infektionen. Beispielsweise löst TLR4 Abwehrmechanismen gegen so genannte gramnegative Bakterien aus. Der Rezeptor erkennt sie an Lipopolysacchariden, einem charakteristischen Zellwandbestandteil. Daraufhin signalisiert er – im Doppel mit einem gleichartigen Partner – vier anderen Molekülen, dass er Lipopolysaccharid gebunden hat. Diese Proteine – MyD88, Mal, Tram und Trif – lösen eine molekulare Kaskade aus, die einen Hauptregulator der Entzündungsreaktion aktiviert: den »nukleären Faktor Kappa B« (NF-κB). Er schaltet Gene für Zytokine und andere Immunaktivatoren an (rechts), die Entzündungen hervorrufen und zur Aktivierung von B- und T-Zellen beitragen.

Die angeborene Immunantwort – lange Zeit als primitiv und veraltet unterschätzt – ist demnach nicht nur sofort zur Stelle, wenn der Körper attackiert wird. Vielmehr ist sie es, die eine umfassende Abwehrreaktion der erworbenen Immunantwort erst ankurbelt. Und auch sie verfügt über ihre eigenen Späher, wie Bruce Beutler vom Scripps Research Institute im kalifornischen La Jolla und Jules Hoffmann vom Centre national de la recherche scientifique in Straßburg feststellten – die beiden anderen Preisträger.

Die erste entscheidende Entdeckung kam von Hoffmann. Der gebürtige Luxemburger experimentierte mit der Frucht- oder Taufliege *Drosophila melanogaster* und fand heraus: Fliegen mit Mutationen im so genannten Toll-Gen waren völlig hilflos gegenüber Infektionen. Frisch geschlüpfte Mutanten wurden oft schon nach kurzer Zeit regelrecht von Pilzen überwuchert, und auch Bakterien hatten sie nichts entgegenzusetzen.

Die Tübinger Nobelpreisträgerin und Entwicklungsbiologin Christiane Nüsslein-Volhard hatte das Toll-Gen einige Jahre zuvor identifiziert und ihm eine Rolle in der Embryonalentwicklung zugeschrieben. Hoffman erkannte nun, dass es auch für die Immunabwehr unabdingbar ist. Toll, so stellte der Wissenschaftler fest, zeichnet für die Synthese von Rezeptoren verantwortlich, die typische feindliche Strukturen binden und so die Abwehr aktivieren.

Von der Blutvergiftung zum septischen Schock

Beutler war es schließlich, der herausfand, dass bei Säugetieren ganz ähnliche Rezeptoren im Spiel sind (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2005, S. 68). Auf der Suche nach dem Schlüssel zum septischen Schock, der im Rahmen einer Blutvergiftung (Sepsis) auftreten kann, identifizierte er bei Mäusen den Toll-ähnlichen Rezeptor 4 (englisch: *Toll-like receptor 4*, TLR4). Das Molekül erkennt Lipopolysaccharide, das sind

charakteristische Bestandteile der Zellwand bestimmter – so genannter gramnegativer – Bakterien.

Schon länger war bekannt, dass Lipopolysaccharide eine Sepsis auslösen können. Nur wie? Beutlers Entdeckung zufolge aktivieren sie den Toll-ähnlichen Rezeptor, und der löst wiederum eine Entzündungsreaktion zur Abwehr der Infektion aus (siehe Grafik links unten). Befinden sich jedoch besonders viele Lipopolysaccharide im Blut – etwa nach verstärkter Zellteilung oder bei massiver Freisetzung auf Grund einer Antibiotikagabe –, kommt es zur Überreaktion und damit zum septischen Schock, der ohne Behandlung tödlich verläuft. Beutler stellte fest: Genetisch veränderte Mäuse ohne TLR4 sind davor geschützt. Dafür kann sich ihr Körper allerdings nicht gegen die Bakterien zur Wehr setzen.

Mittlerweile haben Wissenschaftler auch beim Menschen eine ganze Reihe solcher TLR-Moleküle identifiziert, die feindliche Strukturen erkennen. Hoff-

Damit aus Neugier Wissen wird.



Spektrum NEO 1/2011
»UNSER UNIVERSUM«

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt **Spektrum NEO**: in jeder Ausgabe ein großes Thema – beginnend mit Heft Nr. 1 »Unser Universum«.

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

www.spektrum-neo.de

 facebook



Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH · Slevogtstraße 3–5 · 69126 Heidelberg
leserservice@spektrum.com · Tel.: 06221 9126-743 · Fax: 06221 9126-751 · www.spektrum-neo.de

mann und Beutler haben damit nicht nur maßgeblich zu einem besseren Verständnis der angeborenen Immunantwort beigetragen. Ihre Entdeckung ebnet auch neue Wege zur Behandlung des septischen Schocks und anderer Krankheiten. So lässt sich mit Substanzen, die TLR-Moleküle aktivieren, die körpereigene Abwehr ankurbeln. Nach diesem Prinzip funktionieren etwa

Wirkverstärker von Impfstoffen. Umgekehrt ist es denkbar, durch geeignete Hemmstoffe die Immunreaktion zu dämpfen, etwa um einen septischen Schock zu verhindern – oder wenn sich das Verteidigungssystem im Fall einer Autoimmunerkrankung gegen körpereigene Zellen richtet.

Da überrascht es kaum, dass Tollähnliche Rezeptoren auch auf den den-

dritischen Zellen sitzen, die mit ihrer Hilfe feindliche Strukturen erkennen. »Das zeigt einmal mehr die zentrale Rolle dieser Zellen, die quasi an der Schnittstelle zwischen angeborener und erworbener Immunantwort sitzen«, betont Schuler.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Kristalle mit unmöglicher Symmetrie

Seit der bahnbrechenden Entdeckung des diesjährigen Chemie-Nobelpreisträgers sind Kristalle nicht mehr das, was sie einmal waren. Dan Shechtman vom Institut für Materialwissenschaften der Universität Haifa erkannte als Erster, dass es Festkörper gibt, deren Atome regelmäßig, aber nicht periodisch angeordnet sind.

VON GERHARD TRAGESER



TECHNION, HAIFA

Dan Shechtman entdeckte den ersten Quasikristall – einen Strukturtyp von Festkörpern, den es aus damaliger Sicht gar nicht geben durfte.

Was ist ein Kristall? Lange Zeit lautete die Antwort: eine Substanz, deren Bausteine in einem regelmäßigen, periodischen Gitter angeordnet sind. Doch vor 20 Jahren sah sich die International Union of Crystallography gezwungen, diese so offensichtlich scheinende Definition umzustoßen und durch eine völlig neue zu ersetzen. Grund waren Untersuchungen, die Dan Shechtman zehn Jahre zuvor am National Institute of Standards and Technology der USA in Gaithersburg (Maryland) durchgeführt hatte und die ihm heuer den Nobelpreis für Chemie ein-

trugen. Dem israelischen Physiker war 1982 der Nachweis gelungen, dass es Kristalle gibt, in denen die Atome nicht periodisch, aber trotzdem regelmäßig angeordnet sind und die deshalb »verbotene« Symmetrien aufweisen. Was das heißt, kann ein Exkurs ins heimische Badezimmer veranschaulichen.

Wer dessen Wand mit Fliesen in Form eines regelmäßigen Fünfecks kacheln möchte, wird schnell feststellen, dass das nicht geht. Wie schon die alten Griechen und Römer wussten, die Meister in der Herstellung von Mosaiken waren, eignen sich unter den regelmäßigen Polygonen nur Dreieck, Quadrat und Sechseck zum lückenlosen Überdecken einer Fläche. Demnach können Kachelmuster, die aus einer einzigen Fliesenart bestehen, auch keine anderen Symmetrien aufweisen als solche, über welche die drei genannten Polyeder selbst bereits verfügen.

Betrachten wir beispielsweise das regelmäßige Sechseck. Dreht man es um ein Sechstel des Kreiswinkels um seinen Mittelpunkt, sieht es danach wieder genauso aus wie vorher – als sei es gar nicht bewegt worden. Das lässt sich sechsmal wiederholen, bevor eine volle Drehung um 360 Grad erreicht ist. Des-

halb sagt man, das Hexagon weise eine sechszählige Drehsymmetrie auf. Die gleiche Symmetrie findet sich auch in einem daraus aufgebauten Fliesenmuster. Hingegen kann, da kein flächendeckendes Mosaik aus regelmäßigen Fünfecken möglich ist, dessen fünfzählige Drehsymmetrie auch nicht in einem Kachelmuster vorkommen, das nur aus einer einzigen Fliesenart besteht.

Analoge Überlegungen gelten für das lückenlose Auffüllen des Raums mit Polyedern. Von den fünf platonischen Körpern gelingt dies allein mit dem Würfel und dem Oktaeder. Deshalb können nur deren Symmetrien – die denen von Quadrat und Sechseck entsprechen – in einer raumfüllenden Anordnung mit einem einzigen Grundbaustein auftreten.

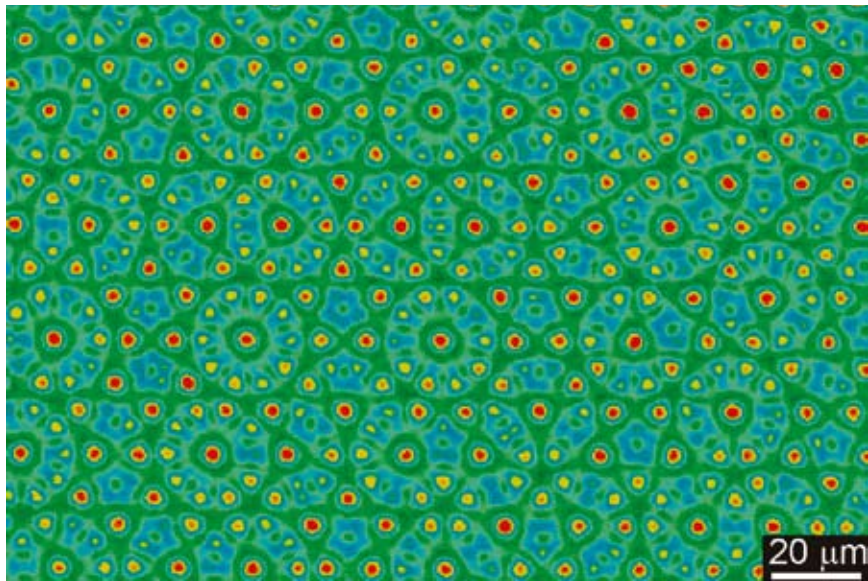
Damit aber sind wir bei Kristallen nach herkömmlichen Verständnis angelangt: Auch in ihnen ergibt ein Grundbaustein – hier Elementarzelle genannt –, vielfach aneinandergesetzt, ein raumfüllendes Gebilde. Demnach sollten Kristalle ebenfalls nur ganz bestimmte Symmetrien aufweisen können. Insbesondere ist eine fünf- oder zehnzählige Drehsymmetrie ausge-

schlossen. Das lernten Kristallografen einst gleich zu Anfang ihres Studiums als unumstößliches Dogma.

Deshalb reagierte Shechtman zunächst mit ungläubigem Staunen, als er im April 1982 das Elektronenbeugungsbild eines Kristalls in Händen hielt, den er durch sehr schnelles Abkühlen einer geschmolzenen Legierung aus Aluminium und Mangan erhalten hatte. Es zeigte gestochene scharfe Punkte, die in Form von regelmäßigen Zehneckern angeordnet waren – ein klarer Hinweis auf eine verbotene Symmetrie in der untersuchten Probe (Bild unten links). »So etwas gibt es doch nicht«, dachte er in diesem Moment nach eigener Aussage. Und in sein Laborjournal schrieb er »10-zählig???«.

Große anfängliche Skepsis

Tatsächlich zweifelte der Forscher anfangs an seinem Ergebnis und suchte nach einer anderen möglichen Erklärung. Doch er konnte partout nichts finden. Insbesondere ließ sich ausschließen, dass seine Probe ein »Zwilling« war, bei dem zwei Kristalle desselben Materials in unterschiedlicher Orientierung miteinander verwachsen sind. In einem solchen Fall können auf dem Beugungsbild unorthodoxe Punktmuster auftreten. Seine erfolglose Suche nach alternativen Erklärungen brachte Shechtman schließlich zu der Überzeugung, dass sein Kristall tatsäch-



Diese eingefärbte Aufnahme eines Schnitts durch einen Quasikristall aus einer Aluminium-Palladium-Mangan-Legierung zeigt die fünfzählige Symmetrie und die fehlende Periodizität solcher Festkörper.

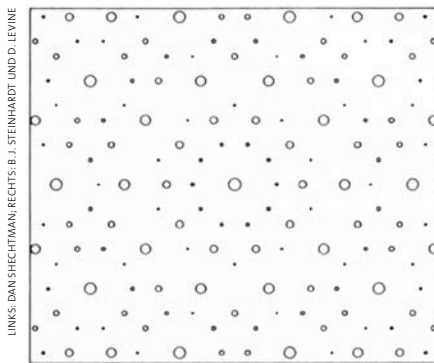
lich eine verbotene Symmetrie besaß – auch wenn er nicht wusste, wie das möglich war.

Bei seinen Kollegen stieß er jedoch auf völliges Unverständnis, einige belächelten ihn sogar. Sein Vorgesetzter legte ihm nahe, seine Arbeitsgruppe zu verlassen. Eine Fachzeitschrift lehnte die Publikation seiner Ergebnisse ab. Erst als Shechtman zwei andere Wissenschaftler, denen er seine Daten zur Prüfung vorgelegt hatte, als Koautoren gewann, erschien seine Veröffentlichung

eineinhalb Jahre später. Doch vorerst hagelte es weiterhin Kritik.

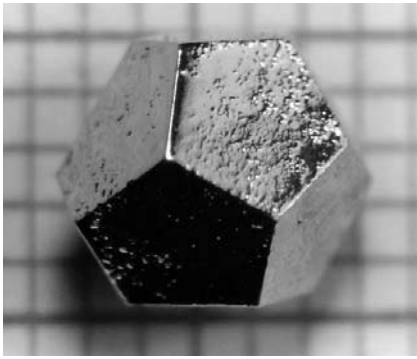
Allerdings war unter den Wissenschaftlern, die Shechtmans Manuskript vor der Veröffentlichung begutachten sollten, der junge theoretische Physiker Paul Steinhardt von der University of Pennsylvania in Philadelphia. Der wiederum kannte den Kristallografen Alan Lindsay Mackay vom Birkbeck College in London, der sich mit so genannten Penrose-Mustern beschäftigt hatte.

Wie so oft, waren auch in diesem Fall die Mathematiker ihren Kollegen aus anderen Fachgebieten voraus. Sie hatten sich schon in den 1960er Jahren gefragt, ob es möglich sei, mit einer begrenzten Zahl von Fliesentypen eine regelmäßige, nicht periodische Parkettierung der Ebene – wie ein flächendeckendes Kachelmuster in ihrem Fachjargon heißt – zu erzeugen. Die ultimative Antwort lieferte Mitte der 1970er Jahre Roger Penrose von der University of Oxford. Mit nur zwei Fliesentypen in Form unterschiedlich breiter Rauten schuf der berühmte Mathematiker das nach ihm benannte nicht periodische, aber regelmäßige Kachelmuster. Auffällig daran ist, dass es die normalerweise verbotene fünfzählige Drehsymmetrie aufweist.

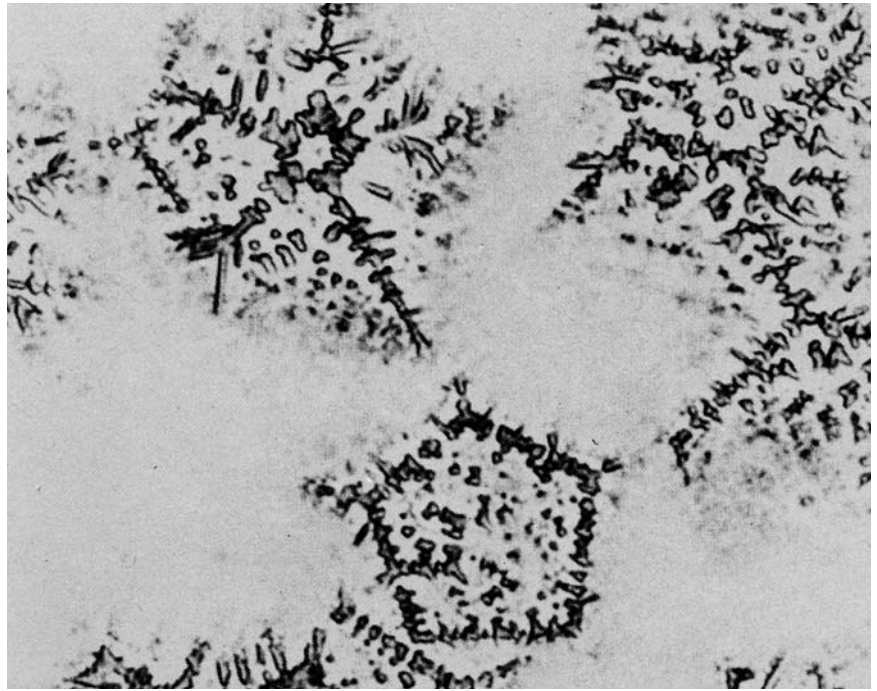


LINKS: DAN SHECHTMAN; RECHTS: B. J. STEINHARDT UND D. LEVINE

Mit seinen Punkten, die in Form eines regelmäßigen Zehnecks angeordnet sind, zeigte das von Dan Shechtman aufgenommene Elektronenbeugungsbild einer abgeschreckten Legierung aus Aluminium und Mangan eine verbotene Symmetrie (links). Es ähnelte jedoch dem errechneten Beugungsdiagramm für das dreidimensionale Gegenstück eines nicht periodischen Kachelmusters aus nur zwei Fliesentypen, das der Mathematiker Roger Penrose erdacht hatte (rechts).



LINKS: AMES LABORATORY; RECHTS: L.A. BENDERSKY UND R.J. SCHWEIFER



Die von Dan Shechtman erzeugte Aluminium-Mangan-Legierung bildet fünfzählige »Schneekristalle« (rechts). Bei herkömmlichen kristallinen Festkörpern ist eine solche Form ebenso ausgeschlossen wie ein reguläres Dodekaeder, in dem eine Legierung aus Holmium, Magnesium und Zink kristallisiert (oben).

Mackay fragte sich, ob es vielleicht auch entsprechende aperiodische Anordnungen von Atomen im Raum gibt. Er nahm ein Penrose-Mosaik, stanzte an den Ecken der Rauten kleine Löcher hinein und benutzte es als Beugungsgitter. Beim Bestrahlen mit Laserlicht erzeugte dieses Gitter ein Muster aus Lichtpunkten, die in Form regelmäßiger Zehnecke angeordnet waren.

Als Steinhardt das Manuskript von Shechtman las, erkannte er den Zusammenhang zwischen dessen Beugungsbild und dem von Mackay. Gemeinsam mit dem Festkörperphysiker Dov Levine, der damals an der University of Pennsylvania promovierte, entwickelte er ein dreidimensionales Gegenstück des Penrose-Mosaiks und berechnete dessen Beugungsmuster. Es hatte große Ähnlichkeit mit dem von Shechtman gefundenen – insbesondere zeigte es ebenfalls eine zehnzählige Drehsymmetrie. In ihrer Publikation prägten Steinhardt und Levine für die neue Stoffklasse die bis heute gängige Bezeichnung Quasikristall.

Diese Veröffentlichung erschien nur wenige Wochen nach der von Shechtman, und beide zusammen schlugen gewaltige Wellen (Spektrum der Wissenschaft 4/1985, S. 24). Obwohl die Skepsis weiterhin überwo – einer der

hartnäckigsten Kritiker war der berühmte Altvater der Quanten- und Strukturchemie sowie zweifache Nobelpreisträger Linus Pauling (1901–1994) –, nahm doch eine Reihe von Kristallografen die unerhörte Neuigkeit ernst. Einige erinnerten sich, selbst schon Beugungsbilder mit verbotenen Symmetrien erhalten und als vermeintlichen Hinweis auf Kristallzwillinge verworfen zu haben.

Andere Forscher machten sich gezielt auf die Suche nach weiteren Quasikristallen – und waren erfolgreich (Spektrum der Wissenschaft 10/1986, S. 74). Inzwischen sind mehrere hundert bekannt. Auch über die Grundprinzipien ihres inneren Aufbaus gab es bald ziemlich genaue Vorstellungen (Spektrum der Wissenschaft 6/1991, S. 48).

Besondere Materialeigenschaften

Waren es anfangs ausschließlich künstliche Materialien, welche die verbotenen Symmetrien zeigten, so berichteten Forscher 2009 erstmals über einen natürlich vorkommenden Quasikristall. Er stammte aus einem Flussbett in den Koryakbergen auf der Halbinsel Kamtschatka in Ostsibirien und bestand aus Aluminium, Kupfer und Eisen. Das neue Mineral erhielt den Namen Icosaedrit, weil es ikosaedrische

Anordnungen von Atomen enthält, die jeweils eine fünfzählige Drehsymmetrie aufweisen.

Quasikristalle sind aber nicht nur theoretisch faszinierende Exoten, welche die Grundfesten der Kristallografie erschütterten. Sie zeichnen sich auch durch besondere Materialeigenschaften aus, die sie für technische Anwendungen interessant machen. So sind sie ungewöhnlich hart, spröde und korrosionsbeständig. Der robuste, hochfeste Stahl eines schwedischen Unternehmens besteht, wie sich zeigte, aus harten Quasikristallen, die in einen weichen Eisentyp eingebettet sind. Er wird unter anderem für Rasierklingen verwendet. Quasikristalle leiten zudem Wärme und elektrischen Strom nur schlecht und haben nichthaftende Oberflächen. Auch das verleiht ihnen Potenzial für viele Anwendungen.

Nach neuesten Erkenntnissen können Quasikristalle ihre ungewöhnliche Struktur sogar anderen Materialien wie etwa Blei aufprägen, wenn diese auf ihrer Oberfläche abgeschieden werden. Davon erhoffen sich Wissenschaftler wie der Physiker Clemens Bechinger von der Universität Stuttgart ganz neuartige Varianten altbekannter Werkstoffe mit wertvollen Eigenschaften. Wie stark die atomare Struktur die Eigen-

schaften eines Festkörpers beeinflusst, zeigt das Beispiel des Kohlenstoffs. Je nach der Art, wie seine Atome geometrisch miteinander verknüpft sind, bildet er den extrem harten, durchsichtigen Diamant oder den weichen, schwarzen Graphit.

Die von Shechtman erzwungene neue Definition eines Kristalls seit 1992 lautet übrigens: ein Festkörper mit einem Beugungsdiagramm aus diskreten Punkten. Das trifft auf alle festen Stoffe zu, deren Struktur eine weiträumige Ordnung aufweist – im Unterschied zu

den Gläsern, in denen die Atome nur auf kurze Distanzen regelmäßig gruppiert sind, weshalb sie Beugungsmuster mit verschwommenen Flecken ergeben.

Gerhard Trageser ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN

Ursache und Wirkung in der Makroökonomie

Der Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften geht an Thomas J. Sargent und Christopher A. Sims für ihre methodischen Beiträge zur empirischen Makroökonomie. Die beiden Forscher haben neue Verfahren entwickelt, mit denen Ursache-Wirkungs-Beziehungen im Wirtschaftsgeschehen überprüft werden können.

VON TORSTEN SCHMIDT

Thomas J. Sargent (links) und **Christopher A. Sims** haben einen großen Teil ihrer Karriere gemeinsam an der University of Minnesota in Minneapolis zugebracht: Sargent, geboren am 19. Juli 1943 in Pasadena (Kalifornien), von 1971 bis 1987 und Sims, geboren am 21. Oktober 1942 in Washington, von 1974 bis 1990. Beide waren während dieser Zeit Berater der amerikanischen Notenbank, die dort eine Niederlassung hat. Sargent kam auf dem Weg über Chicago und Stanford 2002 an die New York University, Sims über Yale 1999 an die Princeton University. Beide Preisträger sind heute noch als Professoren aktiv.



Der diesjährige Wirtschaftsnobelpreis ehrt nicht nur zwei herausragende Ökonomen; er ist auch Balsam für die ganze Profession. Denn just das Fachgebiet der Preisträger, die empirische Makroökonomie, hatte wegen der jüngsten Finanz- und Wirtschaftskrise heftige Kritik einstecken müssen. Ihre Vertreter beschränken sich nicht darauf, die gesamtwirtschaftliche Entwicklung zu beschreiben und Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu quantifizieren; sie erstellen auch Prognosen und leiten daraus Empfehlungen für die Geld- und Fiskalpolitik ab. Da hätten sie doch die Immobilienpreisblase rechtzeitig erkennen und die Folgen ihres Platzens richtig einschätzen sollen, lauteten die Hauptvorwürfe.

In der Tat haben sich die Makroökonomien in den letzten Jahrzehnten

intensiv mit der Frage auseinandergesetzt, wie die Auswirkungen eines schockartigen Ereignisses – Beispiel: das Platzen einer Immobilienpreisblase – auf die Wirtschaftsaktivität untersucht werden können. Sargent und Sims haben auf diesem Gebiet wegweisende Arbeiten geleistet.

Beide Preisträger setzten den Ausgangspunkt ihrer Untersuchung in der Auseinandersetzung mit den makroökonomischen Modellen, die in den

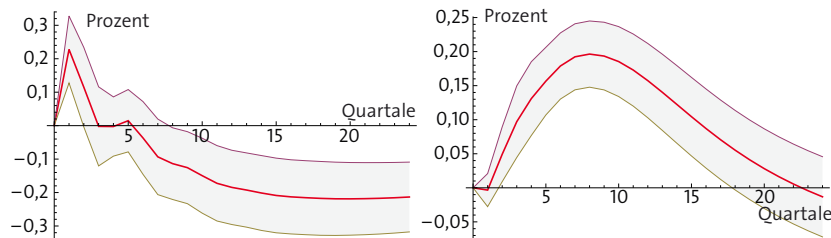
1970er Jahren vorherrschten und damals unter Beschuss von vielen Seiten gerieten, weil sie, so der Kern der zahlreichen Einwände, von falschen Voraussetzungen ausgingen. Erstens unterstellten sie Kausalbeziehungen, die nicht empirisch überprüft, sondern im Wesentlichen aus der ökonomischen Theorie übernommen worden waren; damit beschäftigte sich Christopher A. Sims. Zweitens vernachlässigten die Standardmodelle, wie die Wirtschafts-

Ein mathematisches Modell versucht, beobachtete Größen, die »Variablen«, zum Beispiel Lohnniveau oder Arbeitslosigkeit, durch mathematische Funktionen wiederzugeben. Diese Funktionen enthalten gewisse noch unbestimmte Zahlen, die »Parameter«. Diese sind so zu wählen, dass die vom Modell errechneten Werte der Variablen den tatsächlich beobachteten nahekommen. Gelingt dies, so sagt man, das Modell »erkläre« den realen Prozess.

Ein VAR-Modell im Einsatz

Wie wird sich eine überraschende Zinserhöhung durch die Notenbank in den USA auf die Gesamtwirtschaft auswirken?

James H. Stock von der Harvard University und Mark W. Watson von der Princeton University haben ein VAR-Modell mit den Variablen Inflationsrate, Arbeitslosenquote und Notenbankzins erstellt und dessen Parameter anhand echter Wirtschaftsdaten geschätzt (»Vector Autoregressions«, Journal of Economic Perspectives 15, S. 101–115, 2001). Dann setzten sie als Anfangswerte (für $t=0$) reale Daten für Inflationsrate und Arbeitslosigkeit und einen um einen Prozentpunkt erhöhten Wert für den Notenbankzins. Deren Werte für die folgenden Zeiten $t=1, 2, 3, \dots$ berechneten sie durch Anwendung der Modellgleichungen.



Ergebnis: Die Inflationsrate (links) steigt nach einer Zinsanhebung kurzfristig an, ist aber nach acht Quartalen deutlich niedriger als ohne Zinserhöhung. Die Arbeitslosenquote (rechts) reagiert auf die Zinserhöhung um drei Quartale verzögert mit einem Anstieg, der erst nach vier Jahren abklingt. Dargestellt ist jeweils der Unterschied zwischen den Werten mit und ohne Zinserhöhung (rote Kurve) sowie ein Konfidenzintervall von einer Standardabweichung nach oben wie nach unten (graues Feld). Unter realen Umständen wäre die Wahrscheinlichkeit, dass die tatsächlichen Werte in dieses Intervall fallen, 66 Prozent.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: JAMES H. STOCK UND MARK W. WATSON

akteure ihre Erwartungen bilden – ein zentraler Aspekt wirtschaftlichen Handelns; auf dieser Kritik bauen die Arbeiten von Thomas J. Sargent auf.

Dass Erwartungen bei ökonomischen Entscheidungen eine wichtige Rolle spielen, ist unumstritten. Unternehmen investieren in zusätzliche Produktionsanlagen, weil sie damit rechnen, in Zukunft mehr Produkte absetzen zu können. Haushalte sparen, weil sie glauben, dass ihnen das, was sie später vom Ersparten anschaffen können, mehr bringen wird als ein Konsum heute. Aber wie bilden Haushalte und Unternehmen ihre Erwartungen? Greifen sie nur auf Erfahrungen aus der Vergangenheit zurück, oder versuchen sie anhand aktueller Informationen eine bessere Prognose zu finden?

Die Theorie der rationalen Erwartungen, zu deren Vertretern Sargent und Sims gehören, unterstellt, dass

die Wirtschaftsakteure Informationen über die Zukunft sammeln, sie bei der Erwartungsbildung verarbeiten – und dabei keine systematischen Fehler machen. Das heißt zum Beispiel: Möglicherweise überschätzen einzelne Haushalte die wirtschaftliche Wachstumsrate und damit die (Real-)Zinssätze der Zukunft, sparen deswegen in der Gegenwart mehr und konsumieren weniger, als ihren Interessen entspricht; aber Fehler dieser Art sollen sich über die große Zahl der Haushalte herausmitteln.

Wie weise ist der Durchschnitt?

Damit ist der Ökonom zwar nicht zu der völlig unrealistischen Annahme genötigt, dass jeder einzelne Akteur über sehr gute Prognosefähigkeiten verfügt, aber er muss eine solche Fähigkeit – kaum weniger problematisch – dem durchschnittlichen Akteur zuschrei-

ben. Diese Annahme war auch weniger durch die Realität motiviert als dadurch, dass man mit ihr besser rechnen kann. Wer sie fallen lässt, muss nicht nur die tatsächliche, sondern auch die erwartete Wachstumsrate als Parameter ins Modell einführen – eine noch zu bestimmende Unbekannte mehr, mit allen dazugehörigen Unsicherheiten.

Mit oder ohne rationale Erwartungen: Die neue Klasse von Makromodellen überforderte die herkömmlichen statistischen Verfahren. Es war nicht möglich, deren Parameter durch Abgleich mit der Realität zu bestimmen und die Brauchbarkeit dieser Parameterschätzung zu quantifizieren. Neue Methoden, die das leisten, musste Sargent erst entwickeln.

Im Nachhinein konnte er damit auch die – von etlichen Fachkollegen heftig kritisierte – Annahme rationaler Erwartungen hinterfragen, mit dem Ergebnis, dass die Beobachtungen diese zumindest nicht eindeutig bestätigen. So ist zwar die Überlegung sehr plausibel, Haushalte würden in Erwartung einer zukünftigen Steuererhöhung bereits heute ihre Konsum- und Sparpläne anpassen. Wenn man aber der Theorie entsprechend unterstellt, dass sie dies ohne Zeitverzögerung und im richtigen Umfang tun, so ergeben sich für wichtige gesamtwirtschaftliche Größen wie den privaten Konsum Werte, die mit den Beobachtungen nicht übereinstimmen. Sargent und Sims haben deshalb die Theorie rationaler Erwartungen modifiziert, indem sie unterstellten, dass die Wirtschaftsakteure die verfügbare Information nur unvollständig und mit zeitlicher Verzögerung zur Kenntnis nehmen und verarbeiten.

Christopher Sims hat eine andere Schwäche aufgegriffen, unter der die Modelle der 1970er Jahre litten: die Vielzahl von Kausalbeziehungen, die aus theoretischen Überlegungen übernommen, empirisch aber nicht überprüft wurden. Seine Lösung ist einfach und so vielseitig anwendbar, dass sie die meisten Klassen makroökonomischer Modelle umfasst, jene mit rationalen Erwartungen eingeschlossen.

Der Erfolg des Verfahrens rührt von einer bemerkenswerten Selbstbeschränkung her: Man versucht gar nicht erst, Abhängigkeiten zwischen makroökonomischen Größen durch sinnvolle Gleichungen zu erfassen. Vielmehr geht man davon aus, dass jede Größe irgendwie von jeder anderen abhängig sein kann, und zwar nicht nur von deren heutigen Werten, sondern auch von den gestrigen. Man interessiert sich also für die ökonomischen Variablen nur zu gewissen Zeitpunkten in regelmäßigen Abständen, die einen Tag oder auch einen Monat oder ein Quartal (eine »Periode«) auseinanderliegen.

VAR: Modell ohne Begründung

Nehmen wir an, man möchte das makroökonomische Geschehen durch nur zwei Variable X (zum Beispiel Inflationsrate) und Y (Zinssatz) beschreiben. Dann hängen die gegenwärtigen Werte X_t und Y_t beider Variablen nur von deren jüngst vergangenen Werten X_{t-1}

und Y_{t-1} ab. In Ermangelung einer besseren Theorie nimmt man für diese Abhängigkeit die einfachste überhaupt mögliche, nämlich die lineare (wofür die Differenzialrechnung, zumindest für hinreichend kurze Zeitabstände, eine gewisse Rechtfertigung liefert). Damit besteht das Modell aus den beiden Gleichungen

$$\begin{aligned} X_t &= a_1 + a_2 X_{t-1} + a_3 Y_{t-1} + e_{X,t} \\ Y_t &= b_1 + b_2 X_{t-1} + b_3 Y_{t-1} + e_{Y,t} \end{aligned}$$

Dies nennt man ein vektorautoregressives Modell (VAR). Es lässt sich auf mehr Variable und die Einbeziehung von weiter zurückliegenden Perioden erweitern. Die Zahlen $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ sind die Parameter des Modells. Sie sind durch Vergleich mit den beobachteten Daten so zu bestimmen, dass die »Restgrößen« $e_{X,t}$ und $e_{Y,t}$ möglichst klein werden. In diesen wird alles zusammengefasst, was das Modell nicht erklärt: zufällige Schwankungen, Fehler

des Modells und unberücksichtigte Effekte aller Art.

Da die aktuellen Werte der Variablen nur mit Hilfe von Werten aus früheren Perioden erklärt werden, lässt sich das Modell gut für Prognosen einsetzen. Es eignet sich auch, um ökonomische Zusammenhänge zu untersuchen und um wirtschaftspolitische Maßnahmen durchzuspielen (Kasten links).

Auf diese und ähnliche Weise sind in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von ökonomischen Zusammenhängen untersucht worden, vor allem zur Wirkung der Geld- und der Finanzpolitik. Zusammen mit den Methoden von Sargent haben die VAR-Modelle das Verständnis der Funktionsweise moderner Volkswirtschaften und der Wirkung von wirtschaftspolitischen Maßnahmen deutlich verbessert.

Hätten die Entscheider über diese Kenntnisse nicht verfügt, so wäre die Rezession der Jahre 2008 und 2009 im Gefolge der Finanzkrise zweifellos noch

Wie viel Wissenschaft steckt in der Weihnachtszeit?



Eine ganze Menge. Vom 1. bis zum 24. Dezember finden Sie hinter jedem Türchen unseres Adventskalenders überraschende Blogbeiträge und Knocheleien, weihnachtliche Experimente und mehr. Amüsantes und Kurioses aus allen Wissenschaftsdisziplinen sorgen für einen unterhaltsamen Advent 2011.

Öffnen Sie Ihr Türchen – ab dem 1. Dezember auf

www.spektrum.de

Ist der Embryo Natur oder Kultur?

Zum Gerichtsurteil gegen Patente auf menschliche Stammzellen

Die Umweltschutzorganisation Greenpeace klagte 2004 gegen ein Patent, das dem Bonner Stammzellforscher Oliver Brüstle 1999 für ein Verfahren zur Umwandlung von menschlichen Stammzellen in Nervenzellen erteilt worden war. Kürzlich hat der Europäische Gerichtshof als letzte Instanz entschieden: Generell dürfen Verfahren, die von menschlichen embryonalen Stammzellen ausgehen, in Europa nicht patentiert werden.

Mit ihrem Spruch wollen die Richter »einer industriellen und kommerziellen Verwertung« menschlicher Embryonen einen Riegel vorschieben. Damit appellieren sie an das hohe Gut der Menschenwürde, wonach im Sinn des Philosophen Immanuel Kant der Mensch als Zweck an sich nie nur Mittel zum Zweck sein darf.

Der unterlegene Brüstle hat sich darüber empört, dass das Urteil einen ganzen Forschungszweig als unmoralisch stigmatisiert. Verletzt jemand, der ergründet, wie aus einer Embryonalzelle differenzierte Körperzellen entstehen, die Menschenwürde? Ist es ein Sakrileg, den bei künstlicher Befruchtung erzeugten überzähligen Embryonen Stammzellen für die Wissenschaft zu entnehmen? Die halbherzige Antwort des deutschen Gesetzgebers verbietet das im Inland, erlaubt aber den Import von Stammzelllinien, die anderswo vor einem Stichtag gewonnen wurden.

Das europäische Patenturteil zielt aber gar nicht direkt auf Untersuchungen an Stammzellen, sondern auf deren »industrielle und kommerzielle Verwertung«. Brüstle beklagt, dadurch würde die angewandte Forschung aus Europa vertrieben. Hans Schöler vom Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin in Münster meint gar, nun könnten Firmen in Amerika und Asien die patentrechtlich ungeschützten Resultate der vom deutschen Steuerzahler finanzierten Forschung nach Belieben nutzen.

Jenseits des Ärmelkanals sieht man die Lage offenbar entspannter. Der Medizinwissenschaftler Chris Mason vom University College London hält das Urteil sogar für eine Chance: Ohne Patente sei es viel leichter, Forschung zu treiben! Vor Nachahmern schütze die ungeheuer komplexen Stammzelltherapien allein schon ihre Schwierigkeit. Solange eine Firma ihre Tricks geheim halte, könne man ihr spezielles Verfahren kaum kopieren (*Nature* 478, S. 441, 2011).

Außerdem lassen sich in Europa gewiss auch künftig spezifische Hilfsmittel wie Wachstumsmedien, Apparate und Chemikalien patentieren, die man für die Stammzellforschung braucht. Schließlich geht es ja letztlich nicht um die Zelllinien selbst, sondern um die Methoden ihrer Bearbeitung und Verwendung. So entwickelt Peter Coffey am Institute of Ophthalmology in London zusammen mit dem Pharmakonzern Pfizer eine Therapie für die Makuladegeneration: eine Augenkrankheit, die zur Erblindung führt. Das Patent bezieht sich auf das Einpflanzen von Netzhautzellen ins Auge, nicht auf deren Herstellung aus embryonalen Stammzellen.

Am Ende wird sich das Urteil des Europäischen Gerichtshofs als Episode im Katz- und-Maus-Spiel zwischen Stammzellforschung und ethischen Bedenken erweisen. Noch ist der Gedanke ungewohnt, dass der Mensch vom Zeitpunkt der Zeugung an ein kompliziertes Produkt von Natur und Kultur ist. Von der In-vitro-Befruchtung über die medizinisch überwachte Schwangerschaft, die gezielte Einleitung der Wehen oder den Kaiserschnitt bis zur Pflege von Frühgeburten im Brutkasten ist die Menschwerdung heute oft ein sehr künstlicher Vorgang. Je mehr die wunderbare Ausdifferenzierung der befruchteten Eizelle zum menschlichen Organismus ihr Geheimnis verliert, desto selbstverständlicher wird der Mensch diesen Prozess auch medizinisch nutzen.



Michael Springer

schlimmer ausgefallen. Es traf sich günstig, dass der amerikanische Notenbankchef Ben Bernanke sich in seinem wissenschaftlichen Leben intensiv mit VAR-Modellen auseinandergesetzt hatte (ein Rechenverfahren für diese Modelle heißt Sims-Bernanke-Zerlegung). Sonst hätte er sich kaum dazu durchgerungen, auf dem Höhepunkt der Krise in großem Umfang Staatsanleihen aufzukaufen – ein Mittel aus dem Giftschrank der Geldpolitik, das dem Geld drücken gleichkommt – und damit Schlimmeres zu verhindern. Die Makroökonomien haben die Krise also nicht verschuldet, sondern höchstwahrscheinlich sogar abgemildert.

Allem Anschein nach wiederholt sich diese Geschichte – mit anderen Details – in der gegenwärtigen Eurokrise.

Aber wohlgemerkt: Die VAR-Modelle sind genau deswegen so erfolgreich, weil sie jede voreilige Antwort auf die Frage nach Ursache und Wirkung konsequent vermeiden und am Ende eben nicht immer eine finden. Das Verständnis makroökonomischer Phänomene bleibt also unvollständig.

Dies gilt umso mehr, als sich der Untersuchungsgegenstand selbst verändert. Die Entwicklung neuer Finanzmarktprodukte, welche die Ausweitung der Immobilienmarktkrise in den USA zu einer weltweiten Finanzkrise begünstigt haben, ist ein Beispiel. Es bleibt also der Vorwurf, dass die Ökonomen die kritische Rolle dieser neuen Produkte entweder nicht erkannt oder auf die Risiken nicht deutlich genug hingewiesen haben.

Anwendungsorientierte Makroökonomien sind stets mit einer großen Herausforderung konfrontiert: Sie müssen zur richtigen Zeit die richtigen Fragen mit den geeigneten Methoden untersuchen. Dank Thomas J. Sargent und Christopher A. Sims hat die empirische Makroökonomie zwei leistungsfähige Methoden mehr.

Torsten Schmidt ist promovierter Wirtschaftswissenschaftler und stellvertretender Leiter des Kompetenzbereichs Wachstum und Konjunktur beim Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) in Essen.

Das zweite Auge

Besondere Nervenzellen in der Netzhaut vermitteln dem Hirn Lichteindrücke jenseits des Sehens. Die Entdeckung dieses weiteren Sinnesorgans könnte für manche Krankheiten wichtig sein, die auf Rhythmusstörungen oder Lichtmangel zurückgehen.

Von Ignacio Provencio

Als Doktorand an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) züchtete der angehende Genetiker Clyde E. Keeler (1900–1994) in seiner Studentenbude Mitte der 1920er Jahre Mäuse. Merkwürdigerweise war sämtlicher Nachwuchs völlig blind. Doch noch mehr wunderte Keeler, dass sich die Pupillen dieser Tiere trotzdem zusammenzogen, wenn er das Licht anmachte. Der Pupillenreflex war nur langsamer als bei den Eltern.

Erst Jahrzehnte später kamen andere Forscher der Sache auf die Spur. Sie beobachteten, dass Mäuse ihre innere Uhr, den zirkadianen Rhythmus, auch dann an vorgegebene Licht-Dunkel-Verhältnisse angleichen, wenn ihre Netzhaut (Retina) auf Grund genetischer Eingriffe keine Stäbchen und Zapfen aufwies. Obwohl ihnen also die Sinneszellen – Lichtrezeptoren – zum Sehen von Bildern fehlten, folgten Aktivitäts- und Schlafmuster, Körpertemperatur und Hormonausschüttung dem normalen Tag-Nacht-Rhythmus. Dies ging erst verloren, wenn man den Tieren die Augen herausoperierte.

Ähnlich scheint es sich bei vielen Säugern und offensichtlich auch bei manchen blinden Menschen zu verhalten. Nach neueren Untersuchungen können einige Blinde ihre innere Uhr an den Tag-Nacht-Wechsel anpassen, und ihre Pupillen reagieren auf Licht.

Wie das zu erklären sei, war Sinnesphysiologen allerdings lange unklar. Konnten im Auge denn außer Stäbchen und Zapfen überhaupt noch andere Sinneszellen existieren, die alle Forscher bisher übersehen hatten? Kaum ein anderes Gewebe des Körpers ist schließlich so eingehend und detailliert untersucht wie die Netzhaut.

Doch laut Studien der letzten Jahre gibt es im Säugerauge – auch bei Menschen – zusätzlich spezialisierte Lichtrezeptoren, die am Sehen von Bildern nicht beteiligt sind. Diese Sinneszellen verwenden zur Lichtperzeption sogar andere Moleküle als die Stäbchen und Zapfen. Zudem stehen sie mit anderen Hirngebieten in Verbindung als die klassischen Fotorezeptoren. In gewisser Weise vereint das Auge zwei Sinnesorgane in einem, so wie auch das Innenohr einerseits das Hörorgan, andererseits das Gleichgewichtsorgan enthält.

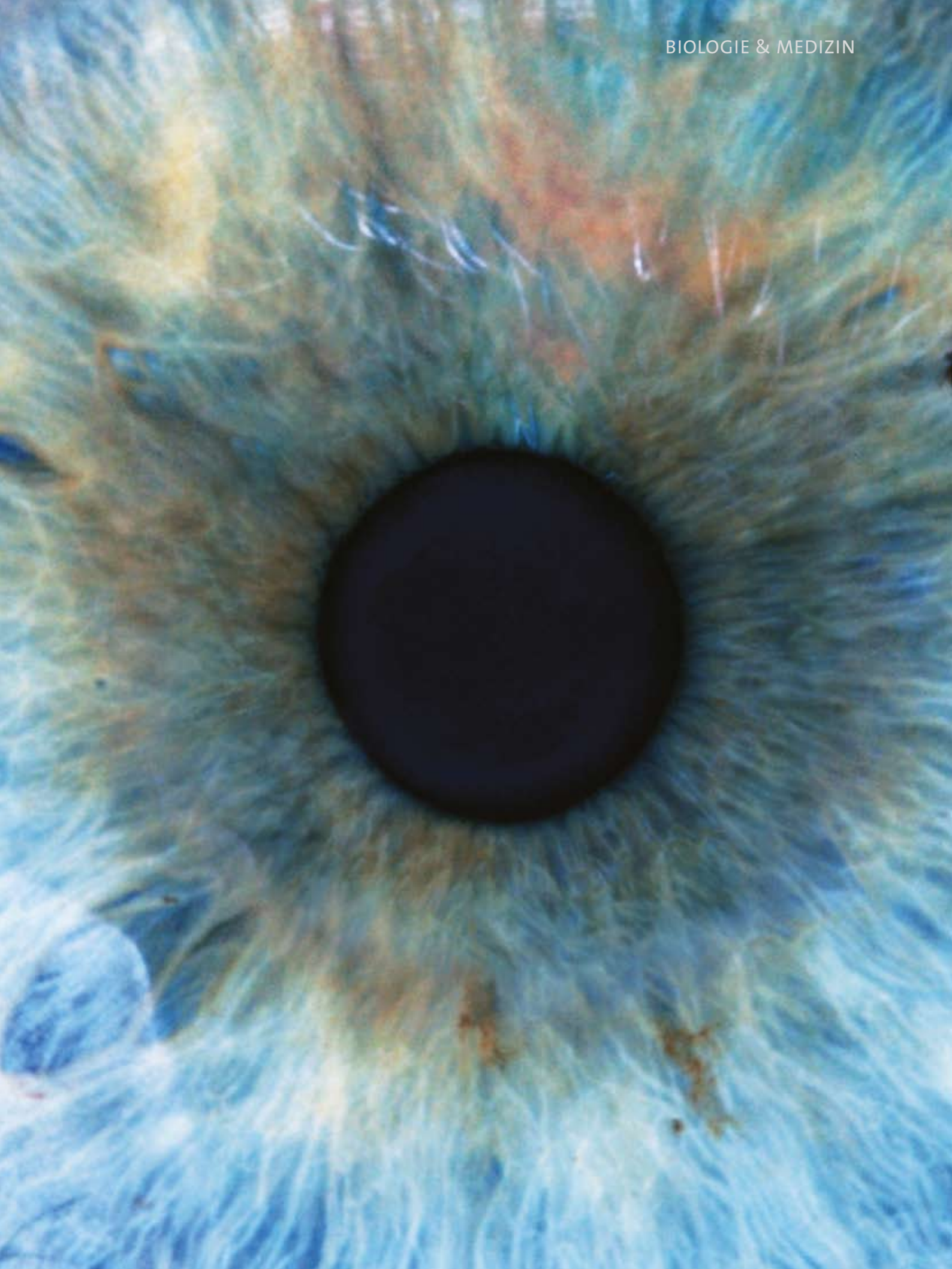
Diese Entdeckung könnte Menschen mit Störungen der inneren Uhr helfen. Solche Beeinträchtigungen wirken sich oft auf die Psyche, die Konzentrationsfähigkeit und die Gesundheit aus, wie sich an Leuten zeigt, die nachts arbeiten müssen. Mediziner nehmen an, dass Nachtarbeit auf Dauer Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Magen-Darm-Probleme hervorrufen kann sowie das Risiko für Krebs beziehungsweise das metabolische Syndrom erhöht, das die Gefahr für Altersdiabetes, Herzinfarkt oder Schlaganfall steigert.

Nächtliche Katastrophen

Wie stark wir vom Tagesrhythmus und vor allem vom Licht abhängen, zeigen die vielen Bewohner des hohen Nordens, die im Winter teils schwerste Depressionen bekommen. Auch geschahen einige besonders spektakuläre Unfälle der Industriegeschichte nachts, so 1989 die Havarie des Öltankers Exxon Valdez, durch die weite Küstenabschnitte Alaskas verseucht wurden, oder 1984 die Chemiekatastrophe von Bhopal in Indien, die tausende Menschenleben und bis zu einer halben Million auf Dauer schwer Geschädigter forderte.

Lichtempfindliche Organe, die keine Bilder vermitteln, sondern nur Hell und Dunkel, kennen Biologen schon länger von verschiedenen Organismen. Manch ein Tier spürt damit, dass ihm plötzlich die Deckung fehlt. Schnellstens sucht es sich wieder in Sicherheit zu bringen, sei es vor einem Raubfeind oder vor schädlicher UV-Strahlung. Diverse Arten können sich mit Hilfe solcher Wahrnehmung auch tarnen, indem sie ihr Aussehen der Umgebung angleichen. Sehen im landläufigen Sinn müssen die Tiere dafür nicht können. Schon der österreichische Zoologe und spätere Nobelpreisträger Karl von Frisch (1886–1982) bemerkte 1911, dass augenlose Elritzen auf helles Licht mit Dunkelwerden reagierten. Beschädigte man ihr Stammhirn, konnten sie das nicht mehr. Von Frisch vermutete deshalb, sie besäßen dort spezielle – nichtvisuelle – Lichtrezeptoren.

Solche Zellen nur zur reinen Lichtwahrnehmung haben offenbar viele Tiere. Wie etwa Michael Menaker, damals an der University of Texas in Austin, Anfang der 1970er Jahre



nachwies, stellen Sperlinge ihre innere Uhr auch dann noch korrekt nach dem Hell-Dunkel-Wechsel ein, wenn sie keine Augen mehr haben. Dies ermöglichen, wie sich später ergab, lichtempfindliche Zellen im Gehirn. Dorthin gelangt durch Federn, Haut und Schädel erstaunlich viel Licht.

Keelers Beobachtungen an seinen Mäusen ließen die Biologen rätseln, ob es wohl auch bei Säugern irgendwelche besonderen Lichtsensoren gibt. Nur konnten sie sich nicht vorstellen, dass solche Zellen im Auge sitzen. Dazu war die Netzhaut anatomisch bereits viel zu gründlich erforscht. Erst in den frühen 1980er Jahren brachten Arbeiten von Randy J. Nelson und Irving Zucker von der University of California in Berkeley diese Überzeugung ins Wanken. Die Forscher wiesen nach, dass augenlose Mäuse ihre innere Uhr nicht mehr an die äußeren Tag-Nacht-Verhältnisse angleichen können. Enthielten die Augen der Nager etwa doch besondere Lichtsensoren?

Menaker, inzwischen an der University of Oregon in Eugene, ging dieser Frage zusammen mit Joseph Takahashi und David Hudson nach. Sie testeten Mäuse, die auf Grund einer Mutation keine funktionsfähigen Stäbchen und Zapfen ausgebildet oder allenfalls nur ganz wenige, kaum aktive Zapfen. Die Forscher wollten prüfen, ob ein Auge, das keine Bilder erfassen kann, dennoch Lichteindrücke vermittelt. Zu ihrer Überraschung war das tatsächlich der Fall: Diese blinden Mäuse waren wie ihre sehenden Artgenossen nachtaktiv und schliefen tagsüber meist, nahmen also offenbar Licht wahr.

Immerhin erschien es zunächst möglich, dass die paar mickrigen restlichen Zapfen diese Synchronisation noch leisteten. Solchen Spekulationen machte jedoch Russell Foster 1999 ein Ende, der damals am Imperial College London arbeitete. Selbst an Mäusen, denen Zapfen und Stäbchen gänzlich fehlten, wies der Neurowissenschaftler immer noch die Angleichung an die äußeren Hell-Dunkel-Phasen nach. Es ging also wirklich ohne die bekannten Sehzellen.

Das bedeutete, im Auge mussten noch andere Fotorezeptoren vorhanden sein – eines bisher unbekanntens Typs. Doch für viele Forscher grenzte diese Folgerung geradezu an Häre-

sie. Kannten Anatomen und Physiologen die Sehzellen der Netzhaut nicht seit Mitte der 1850er Jahre? Es erschien darum undenkbar, dass sämtliche Experten irgendwelche anderen lichtempfindlichen Zellen 150 Jahren lang übersehen haben sollten.

Doch am Ende behielt Foster recht. Zu der Einsicht trugen Forschungen bei, die Mark D. Rollag und ich seit Mitte der 1990er Jahre an der Uniformed Services University of the Health Sciences in Bethesda, Maryland, durchführten. Rollag interessierte sich damals für einen speziellen Tarnmechanismus von Amphibien. Pigmentzellen im Schwanz von Kaulquappen, Melanozyten oder Melanophoren genannt, werden bei Licht schnell dunkler – eine Schutzreaktion der Tiere, die nicht über die Sehzellen im Auge läuft, sondern über die Melanophoren in der Haut selbst. Das geschieht sogar dann noch, wenn man diese Zellen in eine Kulturschale bringt. In den kultivierten Pigmentzellen entdeckten wir ein bisher unbekanntes Protein. Weil es verblüffend den Opsinen gleicht, jenen Proteinen, die Stäbchen und Zapfen als Fotopigmente verwenden, nannten wir es Melanopsin.

Überraschung in den retinalen Ganglienzellen

Wegen seiner Ähnlichkeit mit den bekannten Opsinen vermuteten wir, das neue Protein könnte die Hautdunkelung mit einer molekularen Reaktion auf Licht einleiten. Neugierig geworden forschten wir weiter, ob Melanopsin vielleicht auch in anderen lichtsensitiven Zellen vorkommt. Zunächst prüften wir verschiedene Gewebe von Fröschen, die bekanntermaßen direkt auf Licht reagieren, darunter bestimmte Hirngebiete, sowie Iris und Netzhaut. Weder Stäbchen noch Zapfen enthielten unseren Tests zufolge Melanopsin. Dennoch wiesen wir das Protein in der Retina nach – und zwar, zu unserem eigenen Erstaunen, in so genannten retinalen Ganglienzellen. Niemand hatte je vermutet, dass diese Nervenzellen, die die Signale der Sehzellen nach einigen Verarbeitungsschritten durch andere Neurone dem Sehnerv zuführen, selbst lichtempfindlich sein könnten.

Die Netzhaut von Wirbeltieren besteht grob gesehen aus drei Schichten von Sinnes- und Nervenzellen. Die äußerste, im Auge hinterste Schicht enthält die Stäbchen und Zapfen, die zwischen die noch weiter außen liegenden Pigmentzellen ragen. Die beiden Typen von Fotorezeptoren fangen das Licht auf, das zuvor die anderen Schichten passiert hat, und liefern daraufhin den Zellen der mittleren Schicht Signale. Deren verschiedene Zelltypen verarbeiten die Information weiter und übermitteln das Ergebnis den retinalen Ganglienzellen, aus denen die dritte, innerste Zellschicht hauptsächlich besteht. Deren Axone – lange weiterleitende Fortsätze – bilden den Sehnerv, der ins Gehirn führt.

Anscheinend ist nur ein ganz kleiner Anteil der retinalen Ganglienzellen direkt lichtempfindlich. Die ersten Hinweise darauf fanden meine Kollegen und ich im Jahr 2000. Bei Mäusen sind es, wie wir später feststellten, etwa zwei Prozent dieser Zellen – und beim Menschen anscheinend ähnlich wenige. 2002 bestätigten David M. Berson und seine Kollegen von

AUF EINEN BLICK

UNSER URALTES LICHTSYSTEM

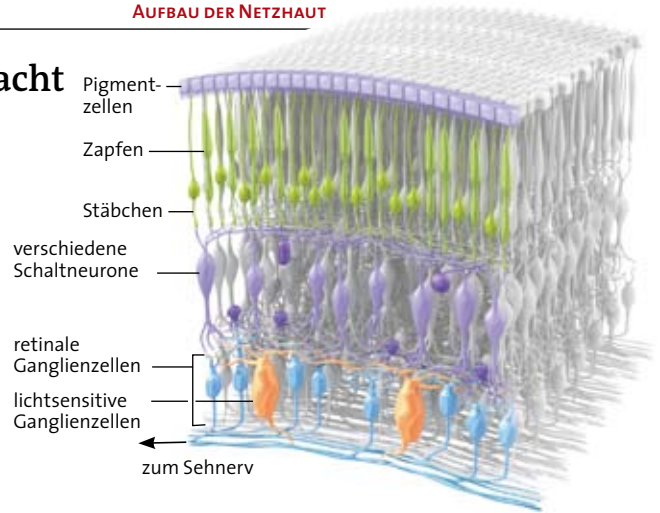
1 Obwohl Menschen Licht ausschließlich über die Augen wahrnehmen, können manche **Blinde** ihre **innere Uhr** dem äußeren **Tag-Nacht-Rhythmus** angleichen.

2 Die **Netzhaut** enthält neben den bekannten Sehzellen – den **Stäbchen** und **Zapfen** – in einer anderen Schicht weitere, nicht-visuelle Lichtsinneszellen. Diese **spezialisierten Neurone** übermitteln autonom Lichtreize für die innere Uhr ans Gehirn, sind aber auch Durchgangsstation für nichtvisuelle Signale aus den Sehzellen.

3 Die **neu entdeckten Sinneszellen** reagieren auf blaues Licht. Sie scheinen zu einem **alten Wahrnehmungssystem** zu gehören, das noch von wirbellosen Tieren stammt. Mit dem neuen Wissen wollen Forscher neue Therapien etwa gegen die **Winterdepression**, manche **Schlafstörungen** und andere psychische oder physische Leiden entwickeln.

Ein eigenes Empfangsorgan für Tag und Nacht

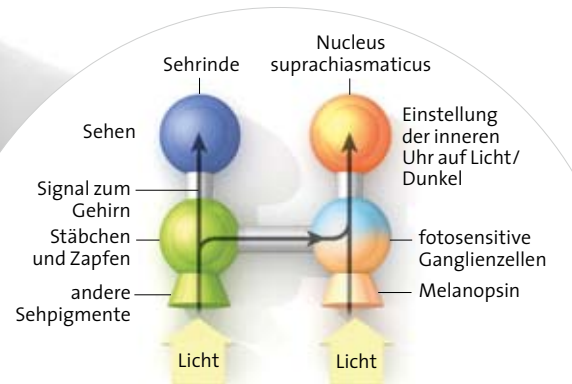
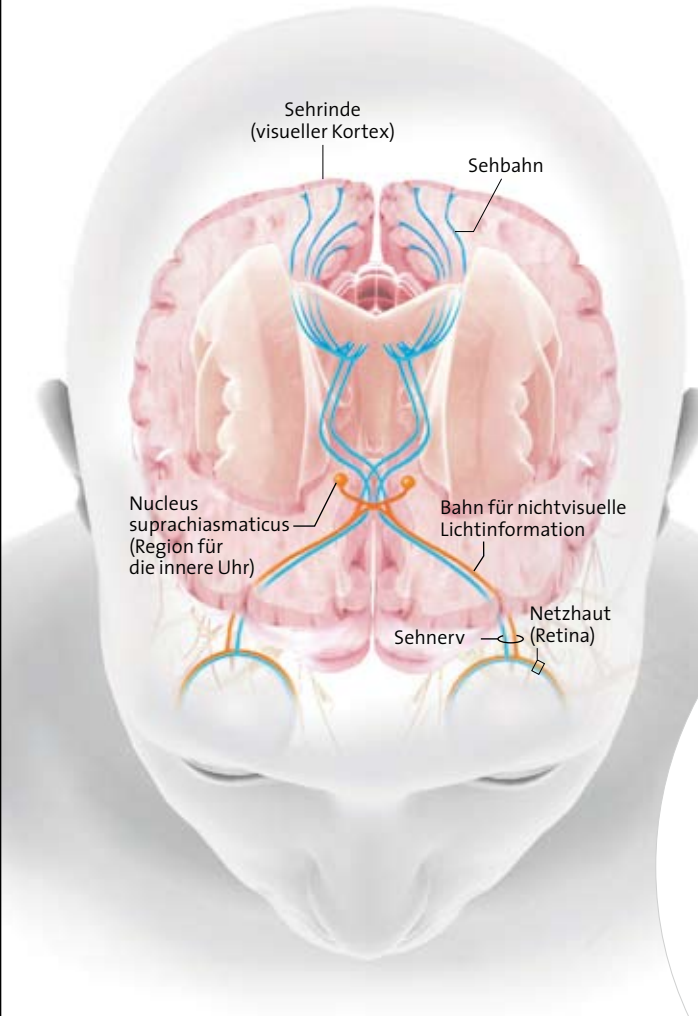
Normalerweise passen sich die Biorhythmen des Körpers an den Tag-Nacht-Wechsel an – sogar bei manchen Blinden. Jetzt entdeckten Forscher, dass dies spezielle lichtempfindliche Neurone (orange) in der Netzhaut vermitteln. Im Grunde sitzen im Auge zwei Lichtsinnesorgane: eines zum Sehen und eines für nichtvisuelle Reaktionen auf Licht.



DAS NEU ENTDECKTE LICHTORGAN IN DER NETZHAUT

Zum Sehen fangen die Stäbchen und Zapfen der Netzhaut (grün) mit Fotopigmenten Lichtreize auf und geben Signale an andere Zellen (lila) weiter. Diese liefern die Information nach einigen Verarbeitungsschritten an die retinalen Ganglienzellen, deren lange Fortsätze den Sehnerv bilden. Über die Sehbahn (im Bild links: blau) gelangen die visuellen Signale zur Sehrinde des Gehirns.

Ein paar wenige Ganglienzellen (orange) bilden ihrerseits ein besonderes Fotopigment – Melanopsin – und sprechen selbst auf Licht an. Sie schicken ihre Signale zum Hirnkern für die innere Uhr (im Bild links: orange) sowie zu anderen, hier nicht gezeigten Gebieten.



SPEISUNG AUS ZWEI QUELLEN

Um die Uhr der inneren Rhythmik zu füttern, sind die lichtempfindlichen Ganglienzellen nicht auf sich allein angewiesen. Auch Lichtinformation von den Sehzellen läuft über sie zu nichtvisuellen Hirngebieten.

der Brown University in Providence (Rhode Island) unseren Befund experimentell. Diese Forscher hatten die Zapfen und Stäbchen im Auge von Mäusen ausgeschaltet und die melanopsinhaltigen Ganglienzellen mit einem Farbstoff markiert. Dann präparierten sie die Netzhaut heraus und setzten sie Licht aus. Tatsächlich »feuerten« die markierten Ganglienzellen daraufhin Signale. Da die Stäbchen und Zapfen auf die Lichtreize nicht reagieren konnten, mussten die Ganglienzellen selbst auf das Licht angesprochen haben.

Ergebnisse anderer Forscher stützten unsere These. So wiesen Samer Hattar von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) und seine Kollegen bei Mäusen nach, dass einige der Axone des Sehnervs in den Nucleus suprachiasmaticus gelangen – jenes Hirngebiet, das die innere Uhr kontrolliert. Andere Axone gehen wiederum in Hirngebiete,

welche die Pupillenweite steuern. In beiden Fällen waren die zugehörigen retinalen Ganglienzellen genau jene, die Melanopsin enthalten. Sämtliche Befunde besagten unseres Erachtens letztlich dasselbe: In der Netzhaut existieren tatsächlich fotosensitive Ganglienzellen, und diese ermöglichen es Mäusen ohne funktionsfähige Stäbchen und Zapfen, ihre Pupillen bei Licht zu verengen und ihre innere Uhr dem äußeren Tag-Nacht-Rhythmus anzupassen. Nur wenn Mäuse gar keine Augen haben, beziehungsweise gar keine Netzhaut und damit auch keine retinalen Ganglienzellen, können sie beides nicht mehr – das war die Hypothese.

Es bedurfte nur noch eines letzten Experiments, um den postulierten Zusammenhang zu besiegeln – so dachten wir: Man müsste Mäuse züchten, die zwar kein Melanopsin bilden, weil das Gen dafür fehlt oder ausgeschaltet ist, sonst aber

ganz normale Augen haben, das heißt gesunde, funktionale Stäbchen und Zapfen. Solche Tiere sollten unseres Erachtens unfähig sein, ihre innere Uhr auf einen Licht-Dunkel-Wechsel einzustellen. Aber »Wissenschaft ist eine grausame Geliebte«, wie auch wir in unserem Labor manchmal sagen. Denn die Mäuse dachten gar nicht daran, uns den erwarteten Gefallen zu tun. Trotz fehlenden Melanopsins kamen sie mit dem vorgegebenen Tag-Nacht-Rhythmus einigermaßen zurecht.

Was war der Grund? Zuerst überlegten wir, ob sich vielleicht sogar noch ein anderer bisher unentdeckter Lichtrezeptor irgendwo in der Netzhaut versteckte. Diese These verworfen wir aber bald. Als stärkstes Gegenargument zählte,

dass das Mäusegenom – dessen Sequenzierung gerade damals fertig wurde – nirgendwo weitere Gene für Fotopigmente aufzuweisen scheint als die bereits bekannten.

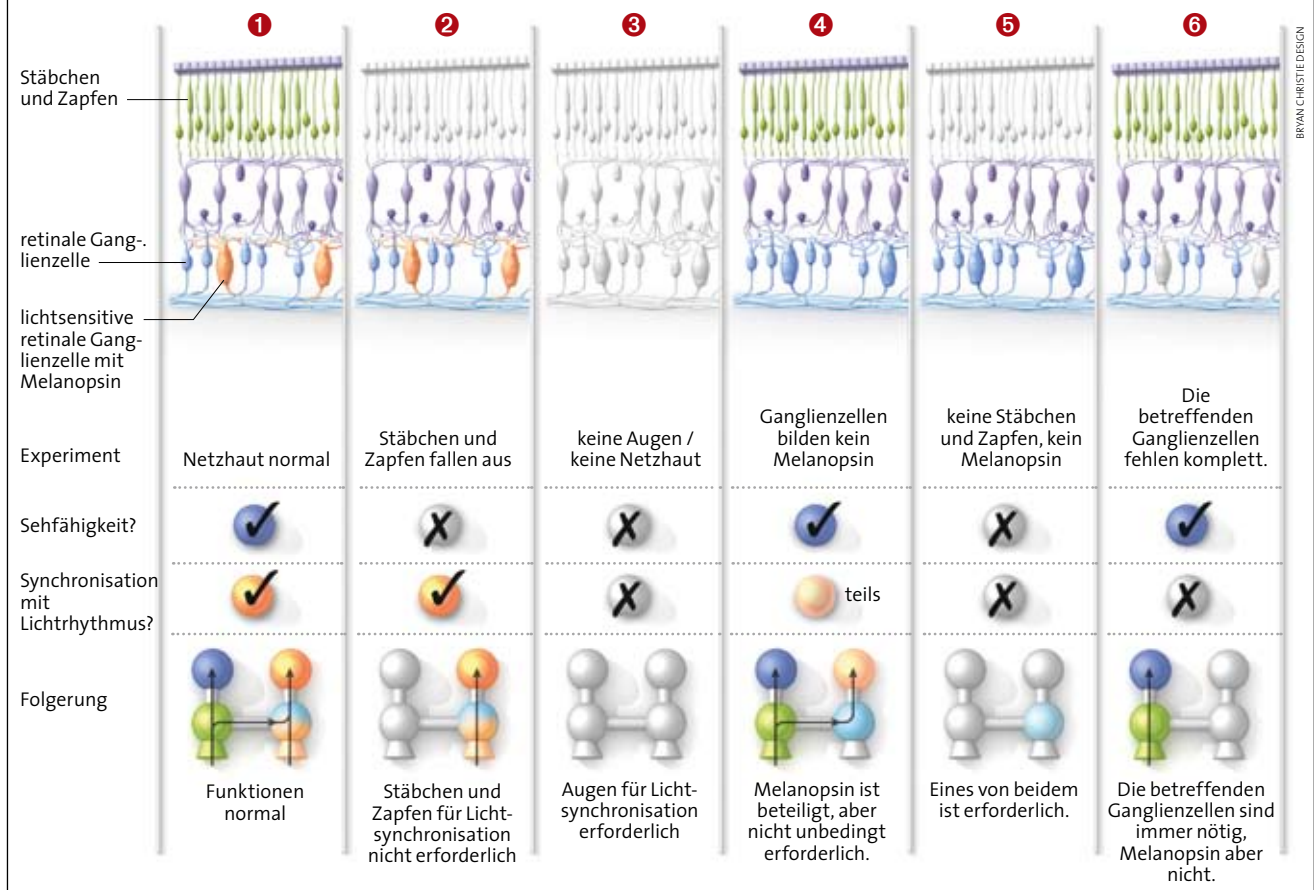
So rangen wir uns schließlich zu der Hypothese durch, dass die drei Sinneszellsorten zusammenarbeiten: dass Stäbchen, Zapfen und melanopsinbewehrte Ganglienzellen gemeinsam die Lichtreaktionen zu Wege bringen. Nun züchteten wir Mäuse ohne Stäbchen und Zapfen, die auch kein Melanopsin bildeten. Diese Tiere bemerkten offenbar keinerlei Lichtreize mehr, und auch ihre innere Uhr stellte sich nicht auf Hell-Dunkel-Rhythmen ein. Sie waren anscheinend komplett blind, als ob sie gar keine Augen besäßen.

Die Entdeckung des zweiten Augensinns

Mit Hilfe eines lange rätselhaften Sinns, der im Auge lokalisiert ist, synchronisieren Säugetiere ihre innere Uhr mit dem Tag-Nacht-Zyklus. Auf die Schliche kamen Neurophysiologen ihm schließlich mit immer wieder neuen Experimenten an Mäusen, bei denen sie gezielt einzelne Komponenten der Netzhaut ausschalteten (1: normale Situation).

Die Synchronisation der inneren Uhr gelingt weiterhin, wenn Stäbchen und Zapfen (grün) nicht funktionieren (2). Sie erlischt, wenn Augen oder zumindest die Netzhaut fehlen (3). Des Rätsels Lösung gefunden zu haben, glaubten Forscher, als sie in einem Teil der retinalen Ganglienzellen (orange) das Licht-

pigment Melanopsin entdeckten. Denn Tiere mit diesen Zellen, aber ohne Stäbchen und Zapfen, können ihre innere Uhr anpassen (4). Doch die Verhältnisse sind komplizierter: Tiere, denen das Melanopsin fehlt, die aber gesunde Stäbchen und Zapfen ausbilden, synchronisieren ihre innere Uhr auch (4). Dies gelingt jedoch nicht mehr, wenn zusätzlich die Stäbchen und Zapfen ausfallen (5). Sind dagegen die beiden klassischen Sinneszelltypen gesund, aber die besonderen Ganglienzellen fehlen vollständig, fällt auch die Synchronisation aus (6). Somit steckt in dem System eine gewisse Redundanz – aber ganz ohne die betreffenden Ganglienzellen funktioniert es nicht.



Licht spüren, ohne zu sehen

Die meisten Organismen richten ihre Biorhythmen nach Tag und Nacht aus. Manche Tiere nutzen dazu eigene nichtvisuelle, licht-sensitive Organe. Mitunter dienen diese auch noch anderen Zwecken, etwa dem Rückzug aus dem Licht oder der Tarnung mit einer anderen Färbung. Diese Organe müssen nicht – wie bei den Säugetieren – im Auge sitzen.



Kaulquappen nehmen Licht über Pigmentzellen der Haut wahr. Viele Amphibien gleichen ihre Färbung damit der Umgebung an.



Augenlose Sperlinge passen sich dem Tag-Nacht-Rhythmus an. Zellen in ihrem Gehirn spüren Licht durch Federn, Haut und Knochen hindurch.



Zuerst erkannten Forscher an blinden Mäusen, die sich auf Tag und Nacht einstellten, dass Säugetiere dafür nicht sehen können müssen.

KAUQUAPPE: GETTY IMAGES / KIM TAYLOR UND JANE BURTON; SPERLING: GETTY IMAGES / CYRIL LAUBSCHER; MAUS: GETTY IMAGES / DORLING KINDERSLEY

In den nächsten Jahren wurde allmählich klarer, wie das alles zusammenhängt. Anscheinend stellen die lichtsensitiven Ganglienzellen auch die Durchgangsstation für nichtvisuelle Lichtinformationen dar, die von den regulären Sehzellen kommen (siehe Schema rechts unten im Kasten S. 29).

Wann die innere Uhr verloren geht – und wann nicht

Drei Forscherteams, darunter meinem, gelang es 2008, bei Mäusen ganz gezielt allein die lichtempfindlichen Ganglienzellen abzutöten, also nicht nur die Produktion von Melanopsin zu verhindern. Sehen konnten diese Nager gut, aber ihre Pupillen reagierten schlecht auf Lichteinfall, und sie brachten oft Tag und Nacht durcheinander (letzte Spalte im Kasten links). Das bedeutet: Für die nichtvisuellen Lichtreaktionen sind diese Ganglienzellen unbedingt erforderlich, auch wenn sie selbst wegen eines Gendefekts nicht als Detektoren funktionieren. Somit ist das System redundant aufgebaut: Die melanopsinhaltigen Zellen können einerseits selbst das Licht erfassen oder andererseits solche Informationen der Zapfen und Stäbchen weitergeben – oder beides zusammen.

Nach dem gleichen Prinzip könnte das System auch beim Menschen funktionieren, worauf einige Befunde hindeuten. 2007 veröffentlichten Foster und seine Kollegen eine Studie über zwei Blinde, die keine funktionsfähigen Stäbchen und Zapfen besaßen. Deren innere Uhr stellte sich auf einen mit blauem Licht vorgegebenen Rhythmus ein. Das funktionierte am besten, wenn dieses Licht genau den Wellenlängenbereich aufwies, auf den Melanopsin anspricht, was wir zusammen mit Bersons Arbeitsgruppe herausgefunden hatten.

Für noch interessanter halten wir folgende Entdeckung unseres Teams: Wenn man das Melanopsin in einer Zelle mit Licht stimuliert, stößt dies in der Zelle eine bestimmte Signalkaskade an. Und diese biochemische Reaktionsfolge ähnelt mehr den Vorgängen in Fotorezeptorzellen von Fliegen und Tintenfischen als den Signalkaskaden in Zapfen und Stäbchen eines Säugerauges.

Allzu sehr überraschte uns das nicht. Denn wir wussten seit Jahren, dass die genetische Sequenz für Melanopsin stärker an die von Fotopigmenten wirbelloser Tiere erinnert als an die Sequenzen bei Wirbeltieren. Es sieht so aus, als ob hier ein altes, urtümliches lichtempfindliches System vorliegt,

das nicht dem Bildsehen dient, sondern rein der Helligkeitswahrnehmung. Die Netzhaut beherbergt folglich den einfacheren alten Sinnesapparat neben der modernen Version für strukturiertes Sehen der Umgebung.

Die Entdeckung dieses bisher unbekanntes Sinnessystems könnte auch von medizinischem Nutzen sein, weist es doch auf bisher unbekanntes Zusammenhänge gesunder Augen mit der psychischen Verfassung hin. Da es von blauem Licht angeregt wird, lassen sich damit möglicherweise Menschen behandeln, die unter Jetlag, Winterdepression oder Schlafstörungen leiden. Vermutlich helfen die heute in solchen Fällen bereits gern angewendeten Lichttherapien eben deswegen, weil die lichtsensitiven retinalen Ganglienzellen dabei aktiv werden. Blinde Kinder, bei denen diese Neurone etwa wegen eines Glaukoms defekt sind, scheinen eher unter Schlafstörungen zu leiden als Kinder, die aus anderen Gründen nicht sehen können. Mit den neu entdeckten lichtsensitiven Zellen der Netzhaut im Blick ließen sich für eine Reihe von Gesundheitsbeschwerden, aber auch Augendefekten ganz neue Therapien entwickeln. ~

DER AUTOR



Ignacio Provencio hat an der University of Virginia in Charlottesville eine Biologieprofessur. Für die Neurowissenschaften begann er sich als Student von Jon Copeland am Swarthmore College (Philadelphia) zu interessieren, wo er an Glühwürmchen, Kakerlaken und Krebsen forschte.

QUELLEN

Berson, D.M. et al.: Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock. In: *Science* 295, S. 1070–1073, 2002

Do, M.T.H., Yau, K.-W.: Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells. In: *Physiological Reviews* 90, S. 1547–1581, 2010

Provencio, I. et al.: Melanopsin: An Opsin in Melanophores, Brain and Eye. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 95, S. 340–345, 1998

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1125585

Dem Mars auf die Pelle gerückt

In diesen Wochen will das Mars Science Laboratory an die Erfolge der Marssonde Phoenix anknüpfen. 2008 hatte sie Hinweise darauf gefunden, dass der Rote Planet vielleicht doch nicht so lebensfeindlich ist wie lange gedacht. Der Phoenix-Chefwissenschaftler berichtet über Herausforderungen und Überraschungen bei interplanetaren Missionen.

Von Peter H. Smith

Am 25. November öffnet sich drei Wochen lang ein Startfenster für das Mars Science Laboratory. Die Sonde führt den leistungsfähigsten Rover aller Zeiten mit sich: »Curiosity« (englisch für Neugier). Mit dem ferngesteuerten Erkundungsfahrzeug (siehe Kasten auf S. 35) will die US-Weltraumbehörde NASA den Marskrater Gale untersuchen. Dieser ist eine der reichsten Lagerstätten des Roten Planeten für Tonerde und Sulfatverbindungen – Überbleibsel einer Epoche, in der auf dem Mars noch Wasser floss und im Lauf der Zeit tiefe Täler in den Boden grub.

Ein Marsjahr lang, das sind 687 Tage, wird der autogroße Rover seine Umgebung erkunden. Seine Fahrt beginnt auf dem Grund des Kraters und führt dort über uraltes Gestein. Falls die NASA die Mission über das erste Jahr hinaus verlängert, wird Curiosity beginnen, den fünf Kilometer hohen Zentralberg zu erklimmen und dabei allmählich auf immer jüngere Ablagerungen stoßen. Mit einem Roboterarm nimmt der Rover Proben davon auf und befördert sie in sein Bordlabor, das sie analysiert und vor allem auch organische Bestandteile aufspüren kann.

Dass wir überhaupt wieder nach Leben auf dem Mars suchen, haben wir vor allem der Mission Phoenix zu verdanken. Für viele Wissenschaftler hatte die Suche schon lange zuvor, nämlich mit den beiden Viking-Missionen, geendet. 1976 wiesen die Daten der beiden Landefahrer auf eine äußerst lebensfeindliche Umgebung hin, in der sich weder Was-

ser noch organische Moleküle und schon gar keine Mikroben entdecken ließen. Starke Oxidationsmittel wie Wasserstoffperoxid und die intensive ultraviolette Strahlung aus dem Weltraum hatten die Oberfläche sterilisiert.

Doch der Phoenix hat unsere Hoffnungen wiederaufleben lassen. Möglicherweise, so lassen sich seine Daten aus dem Jahr 2008 interpretieren, fand Viking nur deshalb keine organischen Moleküle, weil die Sonde selbst die Proben unbrauchbar machte. Phoenix bestätigte außerdem, dass dicht unter der Marsoberfläche Wassereis existiert. Unser Nachbarplanet ist also keineswegs staubtrocken. Vielleicht ist er sogar noch immer lebensfreundlich.

Das Mars Science Laboratory führt konsequent die Missionen der vergangenen 15 Jahre fort, bei denen Sonden auf der Marsoberfläche landeten. Gemeinsam mit einer Reihe von Satelliten, die in einen Orbit um den Planeten geschickt wurden, haben sie eine Welt bemerkenswerter Komplexität enthüllt. Auf dem Mars breiteten sich einst Seen aus, und es hingegen Regenwolken über seinen Landschaften (siehe »Wasser auf dem frühen Mars«, SdW 2/2007, S. 22). Über der Region Nili Fossae haben die Forscher sogar Hinweise auf Methan gas gefunden, und Planetologen sind dessen geologischem oder vielleicht sogar biologischem Ursprung auf der Spur (»Das Rätsel des Methans auf Mars und Titan«, SdW 7/2007, S. 32). 2011 sandte der Mars Reconnaissance Orbiter weitere faszinierende Aufnahmen aus der Umlaufbahn. Auf der

In diesen Wochen startet das Mars Science Laboratory zum Roten Planeten (Fotomontage). Nach der Vorgängermission Phoenix, bei der eine stationäre Sonde abgesetzt wurde, wird nun bald wieder ein Rover – »Curiosity« – auf dem Mars landen.

ILLUSTRATION: NASA, JPL / CALTECH

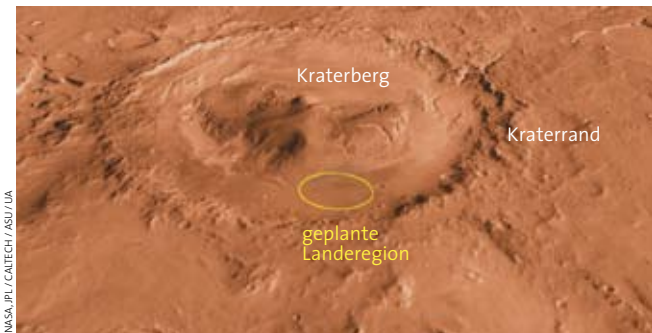
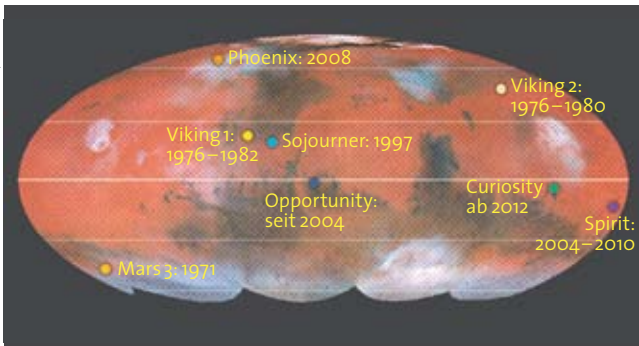
Oberfläche des Planeten hatte er feine Strukturen entdeckt, die sich am einfachsten durch salzhaltiges Wasser erklären lassen, das dort jeweils in der warmen Jahreszeit fließt.

Jetzt ist also die nächste Raumsonde bereit für den Start und verspricht neue Erkenntnisse. Wie es ihr ergehen wird, erfahren wir vielleicht am besten, wenn wir einen Rückblick auf die technische und emotionale Achterbahnfahrt werfen, die eine interplanetare Mission für alle Beteiligten bedeutet – und darauf, wie der Phoenix das Fliegen beinahe doch nicht lernte.

Raumsonden sind millionenteure Spezialinstrumente. Es ist daher keineswegs alltäglich, dass man ans Telefon geht und gefragt wird, ob man eine haben möchte. Genau das geschah mir im Jahr 2002. Am anderen Ende der Leitung waren Wissenschaftler des Ames Research Center der NASA und erinnerten mich an eine drei Meter große Kiste, die in einem Reinraum des Technologiekonzerns Lockheed Martin in Denver lagerte. Eingemottet war darin: der Mars Surveyor 2001 Lander. Er hätte eigentlich 2001 starten sollen, aber angesichts zweier kurz zuvor gescheiterter Missionen kam es nie dazu. Im Dezember 1999 war seine Schwestersonde, der Mars Polar Lander, beim Landeanflug zerschellt, und schon einige Wochen zuvor war auch der Mars Climate Orbiter beim Eintritt in die Atmosphäre verloren gegangen. Das Marsprogramm der NASA hatte einen schweren Schlag erhalten. Auch ich hatte ihn gespürt: Die Kamera des Mars Polar Lander war von meinem eigenen Team entwickelt und gebaut worden.

Nun aber plante das AMES-Forschungszentrum eine Generalüberholung der Sonde, und ich sollte die Rolle des leitenden Wissenschaftlers übernehmen. Doch ich zögerte. Mehr als ein Dutzend Jahre lang war ich schon an Planetenmissionen beteiligt. Die vielen Reisen, endlosen Meetings und pausenlosen Telefonate reizten mich nicht mehr. Sie hielten mich überdies von der wissenschaftlichen Arbeit ab, für die ich einst ausgebildet wurde. Davon abgesehen existierte für das neue Projekt keinerlei Finanzierung, niemand kümmerte sich um die nötigen Forschungsanträge, keine große wissenschaftliche Einrichtung hatte ihre Unterstützung zugesagt, und die Antragsfrist würde schon bald enden. Aber natürlich faszinierte mich die Vorstellung, eine Marsmission zu leiten. Ich selbst hatte den Ergebnissen der Viking-Sonden niemals Glauben schenken wollen. Wie war es möglich, dass sie kein organisches Material gefunden hatten? Müsste nicht eine besser konzipierte Mission mehr Erfolg haben?

Zwei Wochen lang quälte ich mich. Die Surveyor-Raumsonde war ursprünglich dafür ausgerichtet, nahe dem Äquator zu landen, Bodenproben mit einem Roboterarm zu entnehmen und einen kleinen Rover abzusetzen, der Gestein in der Umgebung untersucht. Einige der Instrumente sollten zudem helfen, eine mögliche bemannte Mission vorzubereiten. An einen Rover war angesichts unseres Budgets aber nicht zu denken, und Pläne für bemannte Missionen waren damals nicht aktuell. Einiges Gepäck konnte daher entfallen.



Insgesamt sieben Fähren landeten bislang auf dem Mars (oben). Phoenix war jenseits des Nordpolarkreises aktiv; mit Curiosity wird wieder ein Rover die tropischen Regionen erkunden. Sein geplanter Landeplatz (Bild unten, gelber Kreis) liegt im 154 Kilometer großen Gale-Krater, in dessen Mitte sich ein mächtiger Zentralberg von fünf Kilometer Höhe erhebt.

Doch welche Instrumente sollten wir stattdessen mitnehmen? Unsere konkreten Missionsziele lagen zu diesem Zeitpunkt noch vollkommen im Dunklen.

Das änderte sich durch einen wunderbaren Zufall, als ein Kollege aus Arizona, William Boynton, verkündete, in der Nähe des Mars-Südpols Wassereis dicht unter der Oberfläche entdeckt zu haben (»Gefrorener Ozean unter dem Marsboden«, SdW 9/2002, S. 12). Auch in den nördlichen Ebenen des Mars hatte sein Team Hinweise auf Wasser entdeckt, darunter ein Band aus Wassereis am Rand der Decke aus gefrorenem Kohlendioxid, welche die Pole im Winter überzieht. Ich war begeistert, markierte den Ort auf meiner Karte und fing sofort an, die passenden Instrumente auszusuchen, um dieser Entdeckung noch weiter auf den Grund zu gehen.

Im irdischen Permafrost, dem arktischen Tiefkühlschrank unseres Planeten, erhalten sich Spuren von Lebensformen, die dort gelebt haben oder mit dem Wind dorthin getragen wurden. Eske Willerslev von der Universität Kopenhagen hatte gerade auf einer Mars-Konferenz berichtet, dass er in DNA-Material aus grönländischen Gletschern und sibirischem Permafrost auf die Überreste zahlreicher Pflanzen und Tiere gestoßen war. Wäre Ähnliches auch auf dem Mars möglich, in Eis, das möglicherweise Millionen Jahre alt ist?

Schließlich gelang es mir, eine Partnerschaft zwischen der University of Arizona, dem NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) und Lockheed Martin zu knüpfen. Unser gemeinsames

Ziel: Der Surveyor sollte sich gewissermaßen wieder aus seiner eigenen Asche erheben und als »Phoenix« auf die große Reise gehen. Die Feuerprobe bestand der Vogel 18 Monate später. Nachdem er sich gegen 20 konkurrierende Missionskonzepte durchgesetzt hatte, erteilte uns die NASA im August 2003 den Zuschlag. Wir konnten die Sonde auspacken.

Kämpfen mit einem hartnäckigen Problem

Bis zum Start, der im August 2007 erfolgen sollte, hatten wir noch vier Jahre Zeit. Wir verbrachten sie vor allem damit, die Konzeptionsfehler zu finden, die wohl seinem Schwesterschiff zum Verhängnis geworden waren. Die Ingenieure entdeckten schließlich rund 25 größerer Mängel, und es schien zwar aufwändig, aber dennoch einfacher und billiger, sie zu beheben, als einen Neubau in Angriff zu nehmen. Die meisten Eingriffe waren unkompliziert. Sie betrafen die Heizelemente, die zu reduzierende Größe des Fallschirms, die Verstärkung von Strukturen und Veränderungen der Software. Einer der Fehler widersetzte sich allerdings hartnäckig all unseren Bemühungen.

Das Landeradar stammte aus einem F-16-Kampfflugzeug der späten 1990er Jahre, und wir testeten es in der kalifornischen Mojave-Wüste. Dazu hängten wir das Instrument an ein Seil unter einen Helikopter und simulierten seinen freien Fall in Richtung der Marsoberfläche, indem wir es schnell absenkten. Signalausfälle und fehlerhafte Höhenmessungen machten uns aber so sehr zu schaffen, dass wir Kontakt zum Honeywell-Konzern aufnahmen, der das Radar entwickelt hatte. Dort wollte man uns zwar gerne helfen, aber das Modell war veraltet, die federführenden Ingenieure waren aus dem Unternehmen ausgeschieden, und die Unterlagen erwiesen sich als lückenhaft.

Also stellten wir notgedrungen eine eigene Einsatzgruppe zusammen. Mühsam beseitigte das Team aus Ingenieuren von Lockheed Martin, dem Jet Propulsion Laboratory, Honeywell und dem Langley Space Center der NASA mit Hilfe von Computersimulationen und Tests die Fehler, und im Oktober 2006 schien endlich alles zu funktionieren. Dann folgte die nächste Enttäuschung. Das Instrument, so fanden

AUF EINEN BLICK

VON PHOENIX ZU CURIOSITY

1 2008 endete die **Phoenix-Mission**, bei der eine stationäre Sonde auf dem Roten Planeten abgesetzt wurde.

2 In diesen Wochen hebt ihr Nachfolger vom Erdboden ab: das **Mars Science Laboratory**. Ab August 2012 soll dessen Rover **Curiosity** den Gale-Krater und seinen kilometerhohen Zentralberg erkunden.

3 Die Ergebnisse der Phoenix-Mission haben die Hoffnungen wiederaufleben lassen, dass auf dem Mars **Leben** existieren oder zumindest existiert haben könnte. Das Mars Science Laboratory mit seinen neuartigen Analysetechniken wird hierzu neue Erkenntnisse liefern.

Wie ein großes Auge blickt ein Laser vom Mast des Rovers Curiosity. Wenn seine Lichtpulse Gestein verdampfen, analysiert ein Spektrometer das Leuchten der entstehenden Gase.



ILLUSTRATION: NASA, JPL, CAITECH

»Curiosity«: Neugieriger Rover auf sechs Rädern

Am 25. November, spätestens aber Mitte Dezember schickt die NASA mit der 2,5 Milliarden Dollar teuren Mission Mars Science Laboratory (MSL) den größten Rover aller Zeiten zum Mars: Curiosity. Er soll die alte Frage beantworten helfen, ob der Rote Planet jemals günstige Bedingungen für Leben bot. Dafür ist er weitaus besser ausgestattet als alle seine Vorgänger. Während die Marsmission Phoenix von 2008 eine stationäre Landesonde war, kann der sechsrädrige Curiosity eine Vielzahl von Zielen ansteuern. Und während seine Vorgänger – die 2004 auf dem Planeten gelandeten Rover Spirit und Opportunity – nur leichtes wissenschaftliches Gerät mitführten, hat Curiosity bei einem Gesamtgewicht von 900 Kilogramm 80 Kilogramm wissenschaftliche Nutzlast mit an Bord.

Nach neun Monaten Reisezeit, im August 2012, wird die Raumkapsel des MSL in die Marsatmosphäre eindringen. Kurz vor der Oberfläche lässt dann die abgebremste Abstiegsstufe den Rover, der so groß ist wie ein Mini Cooper, an acht Meter langen Seilen auf den Boden herab – das vermeidet Erschütterungen und erspart entsprechende technische Vorkehrungen. Als Landeplatz hat die NASA den äquatornahen Krater Gale auserkoren. Hier, mehr als vier Kilometer unter dem durchschnittlichen Oberflächenniveau, wird der Rover auf uralte Sedimente stoßen. In der Kratermitte erhebt sich zudem ein fünf Kilometer hoher Berg. Einst war der Krater mit Wasser geflutet, vermuten Forscher. Der Berg, eher ein geschichteter Schutthaufen, wäre der dann Überrest einstiger Sedimentationsprozesse.

Curiosity kann täglich mehrere hundert Meter zurücklegen und bewältigt Steigungen von bis zu 45 Grad. Während der mindestens ein Marsjahr (etwa zwei Erdjahre) dauernden Primärmission soll er zwischen 5 und 20 Kilometer schaffen. Falls die Mission anschließend fortgesetzt wird, kann er beim Erklimmen des Bergs immer jüngere Schichten untersuchen. Mit an Bord ist eine plutoniumhaltige Batterie, in der durch radioakti-

ven Zerfall Wärme entsteht. Aus ihr gewinnt Curiosity etwa 120 Watt elektrische Leistung und ist darum anders als Phoenix nicht auf Solarmodule angewiesen. Selbst in zehn Jahren könnte die Batterie noch etwa 100 Watt liefern. Für energieintensive Manöver und Analysen stehen zudem aufladbare Lithiumionen-Akkus bereit.

Wie schon Phoenix besitzt der Rover einen Roboterarm mit einer Schaufel zur Probenentnahme und einer Kamera für hochauflösende Nahaufnahmen. Zusätzlich kann ein Bohrkopf in Gestein eindringen und es zu feinkörnigen Proben zermahlen. Besonders futuristisch mutet der hoch entwickelte Laser der ChemCam auf dem Mast des Fahrzeugs an (siehe Illustration oben). Er schießt intensive Lichtpulse über eine Entfernung von bis zu sieben Metern auf Gestein, so dass das Gesteinsmaterial auf einem Punkt von der Größe eines halben Millimeters schlagartig verdampft. Durch Analyse der charakteristischen Lichtemissionen des Plasmas kann ein Spektrometer nun auf dessen Zusammensetzung schließen.

Das wichtigste Einzelinstrument ist das fast 40 Kilogramm schwere, mobile Labor SAM (*Sample Analysis at Mars*). Es analysiert Bodenproben sowie Gas aus der Atmosphäre. Phoenix hatte noch alle Proben erhitzen müssen, was möglicherweise organische Moleküle zerstörte. SAM kann sie ebenfalls erhitzen, alternativ aber auch in ein Lösungsmittel geben, in dem chemische Prozesse die Moleküle schon bei niedrigen Temperaturen verdampfen lassen. Analysiert werden die Gase dann durch ein Massenspektrometer, einen Gaschromatografen und ein Laserspektrometer.

Aktuelle Informationen zur Mission: www.spektrumdirekt.de/mars

Der Autor **Mike Beckers** ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

wir heraus, könnte Reflexionen vom abgeworfenen Hitzeschild falsch interpretieren und so einen Abbruch der Landung auslösen. Auch Schaltungen und Antennen erwiesen sich als fehleranfällig.

Die Probleme schienen nicht aufzuhören. Im Februar 2007, nur fünf Monate bevor wir die Raumsonde auf die Trägerrakete montieren sollten, hatten wir noch mit 65 Unregelmäßigkeiten zu kämpfen. Ohne zuverlässiges Radar stand aber der Start selbst in Frage. Besorgt verfolgte die NASA, wie wir stets neue Fehler entdeckten. Deren Schwere nahm allerdings ab, und im Juni konnten wir die Behörde davon überzeugen, dass die verbliebenen Probleme vernachlässigbar wären. Dennoch blieb es ein Glücksspiel. Würden wir bis kurz vor Schluss immer wieder fündig, wie können wir dann sicher sein, dass nicht weitere Fehler im System lauerten?

Im August 2007 schlossen wir im Kennedy Space Center, dem US-Weltraumbahnhof in Florida, die letzten Tests ab, und es ging an die Montage der Sonde auf der Trägerrakete. Doch während ein Kran das Instrument zur Spitze der 40 Meter hohen Delta-II-Rakete beförderte, brach ein Gewitter aus und zwang die Techniker, den Montageturm zu evakuieren. Unsere Raumsonde, die empfindlichen elektronischen Bauteile nur notdürftig abgedeckt, hing in einer Höhe von 20 Metern inmitten eines fürchterlichen Sommergewitters. Nervös brachten wir sie danach zurück in die Montagehalle, doch zum Glück schien sie intakt geblieben.

Früh am Morgen des 4. August begann der Countdown. Ich verließ die heiligen Hallen des Kontrollraums, um den Start direkt zu beobachten. Es war 5 Uhr 15, noch standen Sterne am Himmel, und im Osten zeigte sich der Mars. Plötzlich waren die Gebäude in der Umgebung der Abschussrampe erleuchtet, als würde die Sonne aufgehen. Still erhob sich die Rakete in den Himmel. Eine halbe Minute später erreichte mich der Schall, die Druckwellen pressten meinen

Brustkorb zusammen. Sechs Feststoffraketen fielen in den Atlantik, während drei weitere zündeten. Der Phoenix war unterwegs.

Zehn Monate später hatte er 600 Millionen Kilometer zurückgelegt und begann, die Anziehungskraft des Mars zu spüren. Das Landemanöver war sekundengenau geplant und perfekt vorbereitet. Die Umlaufbahnen der beiden Marssatelliten Odyssey und Mars Reconnaissance Orbiter waren bereits so angepasst, dass sie die Signale des Phoenix im Augenblick von seinem Eintritt in die Atmosphäre an die Erde weiterleiten konnten, wo wir sie 15 Minuten später im Kontrollzentrum empfangen würden.

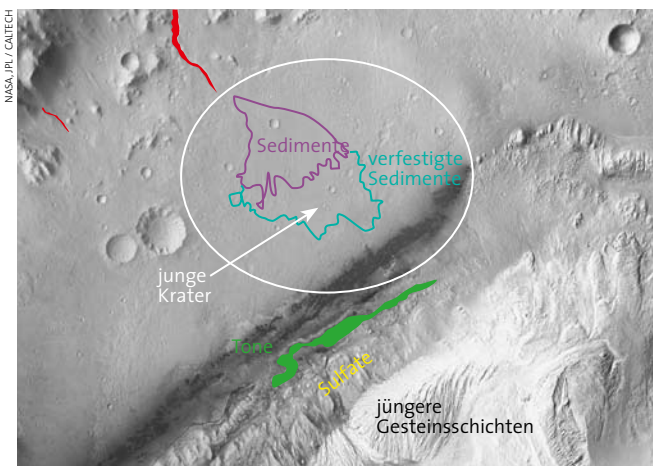
»Die Sonde ist zu schnell!«

Ich war trotzdem fast krank vor Sorge. Eine Landung auf dem Mars ist wesentlich komplizierter als eine auf der Erde oder dem Mond. Die Raumsonde beginnt als interplanetare Reisefähre, muss aber dann ihre Gestalt fünfmal verändern. Erst stößt sie ihr so genanntes Marsflugmodul ab und verwandelt sich in eine stromlinienförmige Abstiegsstufe, die mit fast 20 000 Kilometer pro Stunde durch die Atmosphäre fällt und der Reibungshitze widerstehen muss. Ist die Kapsel auf 1500 Kilometer pro Stunde abgebremst, entfaltet sich ihr Fallschirm. Doch in der dünnen Atmosphäre kann dieser die Geschwindigkeit nur auf 150 Kilometer pro Stunde reduzieren. Einen Kilometer über der Oberfläche trennt sich die Landefähre von Kapsel und Fallschirm und geht in den freien Fall über. Der nach unten gerichtete Schub von zwölf Düsen reduziert die Geschwindigkeit der Sonde weiter, bis sie nur noch einige Kilometer pro Stunde schnell ist und endlich waagrecht aufsetzt. Auch die speziell konstruierten Beine der Sonde dämpfen den Aufprall. In einem letzten Schritt müssen sich die Solarmodule der Sonde entfalten. All das passiert in sieben Minuten – wenn es denn klappt.

1000 Meter über der Oberfläche, 800 Meter, 600 Meter. Einer unserer Ingenieure verlas die Telemetriedaten, die uns das Radar schickte. Die Sonde ist zu schnell, überlegte ich unruhig, bei diesem Tempo können wir nicht sicher landen. Als Phoenix die Marke von 100 Metern erreichte, wurde es auf einen Schlag besser. 90 Meter, 80 Meter, 75 Meter. Der Vogel hatte Aufsetzgeschwindigkeit erreicht! Bald erreichte uns das erste Signal von der Oberfläche, und der ganze Raum brach in Jubel aus.

Kurz darauf ging es erneut um alles: Würde der Phoenix seine Solarmodule entfalten? Die nächsten zwei Stunden erschienen uns endlos. Die Odyssey musste einmal den ganzen Mars umkreisen, bevor sie wieder Kontakt aufnehmen konnte. Dann wussten wir endgültig: Die Module hatten wie geplant funktioniert, und die Sonde schoss bereits Bilder. Ein magischer Blick auf die Arktis des Mars wurde uns zuteil.

Nach sechs Jahren Vorbereitung konnten wir nun den wissenschaftlichen Teil der Mission in Angriff nehmen. 35 Wissenschaftler, 50 Ingenieure und 20 Studenten begannen, Tag und Nacht zu arbeiten. Aus Gründen der Effizienz passeten wir uns dem Marstag an, der 24 Stunden und 40 Minu-



Entlang der rot markierten Täler trug einst fließendes Wasser Sedimente aus dem nördlichen Kraterland (oben) in das geplante Landegebiet. Sie lagerten sich fächerförmig ab und verfestigten sich teilweise. Von hier aus wird der Rover südwärts in höhere Regionen fahren und auf ton- und sulfathaltige Böden stoßen.

Winzige Astronauten beim Härtetest

Brachten einst Meteoriten das Leben auf die Erde? Das ist zumindest möglich, denn jedes Jahr erreicht unter anderem etwa eine Tonne Marsgestein unseren Planeten. Mit ihm könnten auch extraterrestrische Mikroorganismen eingetroffen sein. Zwar setzen Einschläge von Himmelskörpern auf dem Mars, bei denen Felsbrocken in Richtung Erde geschleudert werden, extrem viel Energie frei. Experimente zeigen aber, dass die Vertreter einiger Spezies dies überleben würden. Auch den Eintritt des Meteoriten in die Erdatmosphäre könnten die reisenden Kleinstlebewesen überstehen. Dabei erhitzen sich oft nur die äußeren Millimeter des Körpers; das Gesteinsinnere böte also ausreichend Schutz. Doch eine Frage bleibt: Würden die Organismen auch den Flug durch das All überstehen? Schließlich sind Marsmeteoriten meist Tausende bis Millionen Jahre unterwegs, bis sie die Erde erreichen. Es gibt allerdings Ausnahmen: Für etwa einen von zehn Millionen dauert die Reise nur rund ein Jahr.

Wenn die russische Raumfahrtbehörde im November ihre Sonde Fobos-Grunt auf den Marsmond Phobos schickt, wird darum ein kleiner Container voller irdischer Lebewesen an Bord sein. Im Rahmen des Living Interplanetary Flight Experiment (LIFE) haben wir eine Bodenprobe aus der israelischen Wüste Negev hineingepackt, die verschiedene Organismen beherbergt. Außerdem gehen 30 Behälter mit Vertretern von zehn Spezies aus den drei biologischen Domänen Bakterien, Archaeen und Eukaryoten auf die Reise. Ausgewählt haben wir besonders widerstandsfähige Organismen sowie solche, die potenziellen Marsorganismen ähneln. Fünf dieser Spezies haben die Generalprobe schon überstanden – sie waren beim letzten Flug des Space shuttles Endeavour im Mai mit dabei.

Bakterien: Das Bakterium *Deinococcus radiodurans* überlebt extrem hohe Strahlendosen, ohne dass sich seine Zellstruktur verändert. Meine Untersuchungen an den *D.-radiodurans*-Proben von der Endeavour lassen mich vermuten, dass die Bakterien auch die Reise mit der Fobos-Grunt überstehen. So könnten wir Aufschluss über die Ursachen ihrer Widerstandsfähigkeit gewinnen. *Bacillus subtilis* (von dem wir zwei Varianten mitschicken) und *Bacillus safensis* überdauern hingegen in Form von Endosporen, verhärteten Strukturen, die Strahlung und Hitze abblocken. Meine LIFE-Kollegin Gerda Horneck vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, die *B. subtilis* erstmals in den 1960er Jahren ins All schickte, konnte zeigen, dass die Organismen dort bis zu sechs Jahre überleben. *B. safensis* schließlich war vor zehn Jahren in einem NASA-Reinraum zur Montage von Raumsonden (Spacecraft Assembly Facility, SAF) gefunden worden – es hatte überraschend das sorgfältige Sterilisierungsverfahren überstanden.

Archaeen: Auch die Methan produzierende Spezies *Methanothermobacter wolfeii* geht im Rahmen von LIFE mit an Bord.



PHOTORESEARCHERS / EYE OF SCIENCE

Die millimetergroßen, wirbellosen Bärtierchen (*Tardigrada*) sind resistent gegenüber Strahlung, Temperaturextremen und dem Vakuum im Weltraum.

Denn die Spuren von Methan gas in der Marsatmosphäre, so vermuten manche Forscher, könnten von ähnlichen Organismen stammen. Eine weitere Archaeae ist *Haloarcula marismortui*. Sie kommt problemlos mit hohen Salzkonzentrationen klar. Diese Eigenschaft wäre auch für Marsorganismen von Vorteil, denn Wasser auf dem Mars muss stark salzhaltig gewesen sein, damit es nicht gefror. Auf dem Marsmeteoriten Nakhla hat man sogar bereits Salzkrusten entdeckt. Die Mikrobe *Pyrococcus furiosus* schließlich lebt in vulkanisch-heißem Ozean-sediment. So eignet sie sich hervorragend als Kontrollspezies für unser Experiment: Wenn nur sie den Wiedereintritt in die Erdatmosphäre überleben sollte, können wir daraus schließen, dass die weiteren Arten wohl durch die Hitze und nicht durch die Bedingungen im Weltraum abgetötet wurden.

Eukaryoten: Lebewesen mit Zellkern stehen nicht in Verdacht, einst vom Mars zur Erde gelangt zu sein. Dennoch nehmen wir drei Vertreter mit: neben der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* auch Bärtierchen (Foto) sowie Pflanzensamen von *Arabidopsis thaliana*, wie sie schon in Apollokapseln durch das All reisten.

2014 soll Fobos-Grunt zur Erde zurückkehren. Die Proben werden dann an Forschungsgruppen aus Russland, Deutschland und den USA verteilt. Spätestens nach deren Untersuchung wissen wir, ob Lebewesen eine jahrelange Reise von Planet zu Planet zumindest im Prinzip überleben können.

Der Mediziner **David Warmflash** arbeitet als Astrobiologe an der Portland State University in Oregon. Er ist wissenschaftlicher Leiter des Living Interplanetary Flight Experiment (LIFE)-Experiments der Planetary Society und twittert auf <http://twitter.com/#!/CosmicEvolution>.

ten dauert, und leisteten jeweils zwei Schichten. So litten wir permanent unter einer Art Jetlag.

Was der Phoenix dann im Lauf der Zeit entdeckte, darüber wurde vielfach berichtet (siehe auch »Phoenix auf dem Mars«, SdW 4/2010, S. 24). Gleich zu Anfang legte der Roboterarm eine helle Bodenschicht frei, die wir im Verlauf von drei bis vier Marstagen verschwinden sahen. Der Thermal Evolved Gas Analyzer (TEGA) – das Instrument kombiniert acht Schmelzöfen mit einem Massenspektrometer, das die austretenden Gase einer erhitzten Probe analysiert – belegte schließlich, dass es sich tatsächlich um Wassereis handelte. Die Landschaft war nicht die trockene, wüste Ebene, als die sie erschien, sondern ein Eisfeld unbekannter Tiefe.

Als endlich alles klappte, war das Wasser verdampft

Im Prinzip spielten wir wie ein Kind im Sandkasten. Der Roboterarm mit seiner Schaufel entnahm Proben und ließ sie in einen Schacht fallen, über den sie zu den Instrumenten gelangten. Allerdings mussten unsere Steuerkommandos 300 Millionen Kilometer überbrücken. In einem Testlabor in Tucson, Arizona, hatten wir darum eine genaue Kopie von Roboterarm, Kameras und Materialschleusen aufgebaut, um unsere Kommandos erst zu testen, bevor wir sie zum Mars schickten.

Aber anders als die lockere Erde aus Arizona, mit der wir geübt hatten, erwies sich der Marsboden als klumpig. Ein Drahtsieb vor der Probenschleuse, das eigentlich nur Steinchen herausfiltern sollte, hielt darum auch die Erde zurück. Von der ersten Schaufel gelangte kein einziges Körnchen in den TEGA-Ofen an. Ein spezieller Mechanismus erlaubte uns zwar, das Gitter vibrieren zu lassen; trotzdem dauerte es vier Marstage, bis genug Material im Ofen landete; in der Zwischenzeit sublimierte natürlich jegliches locker gebundene gefrorene Wasser. Viele Proben verfehlten schlicht auch die Schleusen. Die Erde, die doch senkrecht herunter in die Instrumente rieseln sollte, wurde von starken Winden zur Seite geblasen.

Zu den größten Überraschungen zählte die Entdeckung zweier unerwarteter Verbindungen im Boden: Kalziumkarbonat und Perchlorat. Mikroorganismen in irdischen Wüsten können Perchlorate und Nitrate als Energiequellen nutzen; in konzentrierter Form kann Perchlorat außerdem den Gefrierpunkt von Wasser auf minus 70 Grad Celsius senken, so dass Mikroben in Kälteperioden eine Nische finden könnten. Kalziumkarbonat wiederum entsteht, wenn sich atmosphärisches Kohlendioxid in flüssigem Wasser löst – ein weiterer Beleg dafür, dass die Region um den Phoenix einst feucht war. Die Substanz erklärt auch die verklumpten Erdproben, denn sie wirkt wie Zement.

Und wie steht es mit dem Rätsel um das Chlormethan, das bei den Viking-Missionen aus den erhitzten Bodenproben entwich? Die Wissenschaftler vermuteten damals eine Kontamination mit einem irdischen Reinigungsmittel. Die Perchloratfunde lassen eine alternative Deutung zu. Forscher der Universidad Nacional Autónoma de México reproduzier-

ten die einstigen Experimente mit Proben aus der chilenischen Atacama-Wüste. Setzten sie der Probe Perchlorat zu, gab dieses Sauerstoff ab und oxidierte die organischen Verbindungen in der Probe. Dabei entstand auch Chlormethan. Selbst eine beträchtliche Konzentration von organischen Bestandteilen, mehr als ein Teilchen pro Million, hätte der Viking-Sonde auf diese Weise entgehen können. TEGA erhärtete diese Interpretation, denn bei Ofentemperaturen von über 300 Grad Celsius entdeckte das Instrument Kohlendioxid – also genau, was man erwarten würde, wenn organische Komponenten im Boden von Perchlorat oxidiert werden.

Doch alles zusammengenommen lieferte Phoenix nur Indizien für mögliches Leben auf dem Mars. Nun hat es den Stab an das Mars Science Laboratory übergeben. Das MSL braucht Bodenproben nicht mehr zu erhitzen. Vielmehr wird der Marsboden einer besonderen chemische Suppe zugegeben, aus der organische Bestandteile verdampfen und von einem Massenspektrometer entdeckt werden können.

Die spektakuläre Phoenixmission währte fünf Monate, dann schlug der polare Marswinter mit Dunkelheit und Kälte zu. Im November 2008 verloren wir das Signal. Bis zum Frühjahrsanbruch auf dem Mars hofften ich und meine Kollegen – Optimismus gehört zum Berufsbild des Wissenschaftlers –, dass der Phoenix sich erneut aus dem Eis der Polarnacht erheben würde. Ein letztes Satellitenbild zeigt ihn aber am Rand einer flussähnlichen Struktur, mit gebrochenen Solarmodulen, begraben unter der Last von Kohlendioxideis. Aus einem Vorposten der Wissenschaft ist ein Teil der Landschaft geworden. ~

DER AUTOR



Peter H. Smith von der University of Arizona war an einigen der bekanntesten Missionen der Raumfahrt beteiligt, etwa Pioneer 11 und den Marsrovern Sojourner, Spirit und Opportunity. Außerdem war er Chefwissenschaftler der Phoenix-Mission.

LITERATURTIPP

Kessler, A.: *Martian Summer: Robot Arms, Cowboy Spacemen, and My 90 Days with the Phoenix Mars Mission.* Pegasus, New York 2011
Als Beobachter im Kontrollraum erlebte der Autor die Mission mit.

WEBLINKS

www.spektrumdirekt.de/mars

Aktuelle Nachrichten vom Mars Science Laboratory

<http://mars.jpl.nasa.gov/msl/mission/whereistheovernow/msl20110915/>

100-minütiger öffentlicher Vortrag des Curiosity-Projektmanagers Richard Cook

www.youtube.com/watch?v=P4boyXQuUlw

Elfminütige Animation zur Mission Mars Science Laboratory

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1127413

Was das Feuer am Leben hält

Damit eine Kerzenflamme ruhig brennen kann, müssen zahlreiche komplexe Vorgänge perfekt aufeinander abgestimmt sein.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

In der Flamme sind alle Naturkräfte tätig.

Novalis (1772–1801)

Die gute alte Kerze hat alle Neuerungen der Beleuchtungstechnik überstanden. Gerade auch in der Advents- und Weihnachtszeit, wenn die Tage kürzer werden, setzt sie Zeichen der Hoffnung, der Freude und des Lebens. Was aber denkt sich der Physiker bei ihrem Anblick? Ihn beeindruckt über all das hinaus der Kontrast zwischen der Einfachheit der ruhig vor sich hin brennenden Flamme und dem, was unsichtbar bleibt: dem komplexen Zusammenspiel physikalischer, chemischer und technologischer Vorgänge, die das Phänomen erst möglich machen.

Die Kerzenflamme, so beständig sie erscheint, ist Ergebnis eines äußerst bewegten Mikrogesehens: In jedem Moment verlassen Teilchen verglühend den klar umgrenzten Bereich der Flamme und werden durch neu erglühende Teilchen ersetzt. Rein energetisch betrachtet ist die Flamme der sichtbare Teil einer »dissipativen Struktur« (Ilya Prigogine), eines von Energie und Mate-

rie durchströmten Systems fernab vom thermodynamischen Gleichgewicht. Aufrechterhalten wird die Flamme durch die Dissipation von Energie: Sie nimmt hochwertige chemische Energie und Materie in Form von Kerzenwachs und Sauerstoff auf und gibt im Gegenzug Wärme und Gase an die Umgebung ab. Energie- und Materieströme bleiben dabei im zeitlichen Mittel konstant. Warum klappt das so gut? Oder etwas technischer gefragt: Wie kommt es zu dieser eindrucksvollen Selbstorganisation gut aufeinander abgestimmter Vorgänge?

In der Regel wird eine Kerze mit Hilfe einer anderen Flamme entzündet. Das im Docht enthaltene erstarrte Wachs beginnt dabei zu schmelzen und zu verdampfen. Schließlich erreicht es eine so hohe Temperatur, dass es mit dem Sauerstoff der Luft reagiert und verbrennt, wobei Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid entstehen. Außerdem wird Energie frei, die als Bewegung, Wärme und Licht der Flamme in Erscheinung tritt.

Danach geht alles wie von selbst. Dank der von der Flamme ausgehenden Wärmestrahlung sorgt »das System« eigenständig für Nachschub an Brennstoff. Von der Hitze flüssig gehalten steigt das Wachs durch die Kapillaren des Dochts nach oben. Gleichzeitig schmilzt die Flamme einen schüsselförmigen Brennstofftank in das obere Ende der festen Kerzensubstanz und füllt ihn mit Vorrat. Auch der Tank erneuert sich ständig, wenngleich man ihm das nicht ansieht: Das feste Wachs, aus dem seine Wand besteht, schmilzt in genau dem Maß, in dem der Docht flüssiges Wachs ins Reaktionszentrum der Flamme



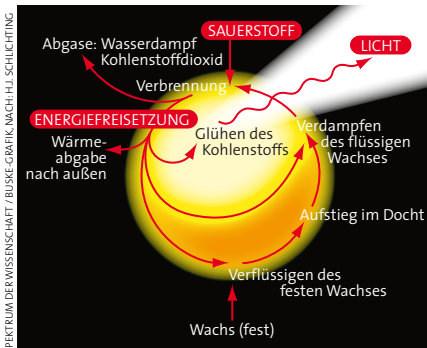
BEIDE FOTOS: H.-J. SCHLICHTING

Der direkte Blick auf eine Kerze (links) und auf ihren Schatten (rechts) verrät einiges darüber, wie sie funktioniert: Glühende Rußteilchen sorgen für Helligkeit (weißer Flammenbereich links) ...

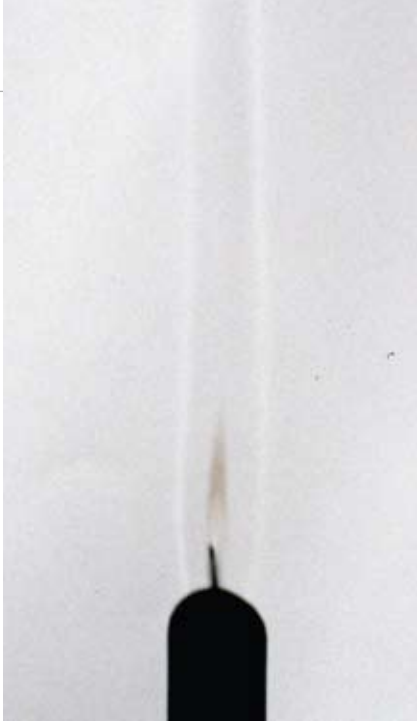
transportiert. Erst dort, am oberen Ende des Dochts, verdampft und verbrennt das Wachs schließlich. Denn das flüssige Wachs im Docht liefert die zur Verdampfung nötige Wärme, wodurch seine eigene Temperatur unterhalb des Siedepunkts gehalten wird.

Der Docht neigt sich zur größten Hitze

Probleme gäbe es erst, wenn der Docht zu lang würde. Dann wäre das Gleichgewicht zwischen Brennstoff- und Sauerstoffzufuhr gestört, und die Kerze begäbe zu rußen. Doch auch in dieser Hinsicht organisiert sich die Flamme selbst. Weil die brennende Kerze kürzer wird und der heiße Saum der Flamme sich mit ihr nach unten bewegt, schiebt sich der Docht kontinuierlich in die Hitzeregion hinein. Dort verkohlt und verdampft seine Spitze, was seine Länge konstant hält. Zudem kippt der biegsame Docht, je länger er wird, zur Seite weg und damit genau in den bestens mit Sauerstoff versorgten Bereich der Flammenoberfläche. Hier ist die Flamme rund 1400 Grad Celsius heiß, und hier beginnt der Docht auch zu glühen (siehe Foto oben).



Bei einer Kerze setzt verbrennender Wachsdampf Licht, Wärme und Abgabe frei. Ihre Helligkeit verdankt sie vor allem glühenden Kohlenstoffteilchen, die nicht vollständig verbrannt sind.



... und einen Flammenschatten (rechts). Der Docht kürzt sich glühend selbst, da er zur heißen Flammenoberfläche hin »fällt« (links). Die heißen Verbrennungsgase steigen in einem Schlauch auf (rechts).

Selbst die elegante, stromlinienförmig nach oben gezogene Gestalt der Flamme ist keine bloße Laune der Natur. In ihr wird ein Konvektionsvorgang sichtbar, der für die Funktion des Systems wesentlich ist. Die Temperatur der heißen Flamme sorgt für eine im Vergleich zur Umgebungsluft geringe Dichte der Verbrennungsgase. Der entstehende Auftrieb lässt diese zügig aufsteigen, was Platz schafft für die von unten nachströmende sauerstoffreiche Frischluft. Dieser Vorgang ist für den Fortgang der Verbrennung ebenso wichtig wie der Wachsampf selbst.

Die heißen Gase steigen in einem schmalen Schlauch auf. Das spürt man schon mit bloßen Fingern, es geht aber auch gefahrloser. Stellt man die brennende Kerze ins helle Sonnenlicht, bildet dieses den Schlauch an der dahinterliegenden Wand ab (oben). Denn beim Übergang zwischen kalter Umgebungsluft und heißen Verbrennungsgasen ändert sich schlagartig der Brechungsindex. Ein Teil des Lichts, welches durch das Innere des Schlauchs fällt, wird nach außen abgelenkt und überlagert sich mit dem nicht abgelenkten Licht zu einem schmalen, hellen Band.

Da die Konvektion in der Schwerelosigkeit nicht funktioniert, kämen Raumfahrer nie in den Genuss einer normalen Kerzenflamme. Was aber sähen sie stattdessen? Fixieren Sie einfach eine brennende Kerze in einem durchsichtigen Gefäß und werfen Sie dieses einem (guten) Fänger zu. Während des Flugs sehen Sie, wie die Flamme zu einer winzigen, blau leuchtenden Lichtkugel zusammenschrumpft. Weil unter diesen Bedingungen die Konvektion wegfällt, wird die Flamme nämlich nur über die vergleichsweise langsam ablaufende Diffusion mit Sauerstoff versorgt.

Die Hartnäckigkeit, mit der eine Kerzenflamme allen Störungen zum Trotz stets wieder dieselbe Größe einnimmt, beruht auf nichtlinearen Rückkopplungsvorgängen. Wächst die Flamme, muss ein entsprechend größeres Volumen mit Sauerstoff und Wachs versorgt werden. Da das Volumen mit der dritten Potenz der Flammengröße zunimmt, gilt dies auch für das Volumen der zu- und abgeführten Gase. Der Nachschub an Gasen erfolgt aber zwangsläufig durch die äußere Grenzschicht der Flamme, die ihrerseits nur mit dem Quadrat der Flammengröße variiert. Berücksichtigen wir nun noch, dass die Geschwindigkeit, mit der die Gase nachströmen, nicht beliebig groß werden kann, ist dem Flammenwachstum zwangsläufig eine Grenze gesetzt.

Dies gilt auch umgekehrt. Verkleinert eine vorübergehende Störung die Flamme, sind auf einmal mehr Verbrennungsgase vorhanden, als benötigt werden. So kann das Gebilde wieder wachsen, bis erneut ein stationäres Gleichgewicht erreicht ist.

Doch warum leuchtet die Flamme überhaupt? Bei der Reaktion von Wachsampf und Sauerstoff wird auf kleinstem Raum so viel Energie frei, dass die meisten Gasatome in Elektronen und Atomrümpfe – kurz: in ein Plasma – zerlegt werden. Die Natur strebt aber nach Zuständen minimaler Energie. Die Teilchen versuchen also, wieder Gasatome zu bilden, und entledigen sich ihrer überschüssigen Energie durch Aussenden von Lichtteilchen.

Weit wichtiger für die Kerze als Lichtquelle ist aber ein anderer Effekt. Im Inneren der Flamme klappt es mit dem Sauerstoffnachschub nicht mehr so gut. Wie die Farben zeigen (Foto linke Seite), nimmt die Temperatur darum allmählich ab, bis sie in unmittelbarer Dichtnähe noch lediglich 600 bis 800 Grad Celsius beträgt. Das verdampfende Wachs verbrennt dort nur unvollständig. Der nicht verbrannte Kohlenstoff lagert sich zu Rußteilchen zusammen, die mit den Abgasen nach oben steigen und in dem weiß erscheinenden Bereich der Flamme bei etwa 1200 Grad Celsius zu glühen beginnen. Vor allem diesem Glühen ist es zu verdanken, dass die Kerze so hell leuchtet! Eine chemische Unvollkommenheit – schlechte Verbrennung – trägt also wesentlich zu ihrer technologischen Vollkommenheit bei. Es sind übrigens auch genau diese Rußteilchen, die Licht absorbieren und daher der Flamme selbst zu einem Schatten verhelfen (rechtes Foto).

Ist Ihnen aufgefallen, dass die Stoffwechselforgänge der Kerze denen von Pflanzen und Tieren überraschend ähneln? In beiden Fällen sind es die Aufnahme von Sauerstoff und Nährstoffen sowie die Abgabe von Wasser, Kohlenstoffdioxid und anderen Substanzen, welche für den Fortbestand der Systeme sorgen. Das haben schon die Dichter erkannt: »Der Baum ist nichts anderes als eine blühende Flamme«, formulierte etwa Novalis. Manchem diene die Metapher sogar als Bild für das Leben schlechthin: »Das, was sich in der Schöpfung Leben nennt«, schrieb Johann Gottfried Herder, »ist in allen Formen und allen Wesen ein und derselbe Geist, eine einzige Flamme.«

DER AUTOR



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

Die Unruh, das Pendel und der Schmetterlingseffekt

Das biedere Pendel gibt nicht nur der Wanduhr – und in der Spiralfedervariante der mechanischen Armbanduhr – ihren genauen Gang. Wenn es einen Überschlag machen darf, kann es sogar Chaos produzieren.

VON NORBERT TREITZ

Wir haben uns im letzten Monat mit einem Pendel besonderer Art befasst: der fallenden Latte. Ihr höchst spezielles Verhalten – ihr Ende »fällt schneller, als das Gravitationsgesetz erlaubt« – ist darauf zurückzuführen, dass ihre Masse sich über die gesamte Länge verteilt. Aber selbst wenn man der Standardunterstellung der

Theoretiker folgt, dass nämlich die Masse des (gewöhnlichen) Pendels in einem Punkt konzentriert sei, will sich seine Bewegung nicht durch einfache Formeln darstellen lassen.

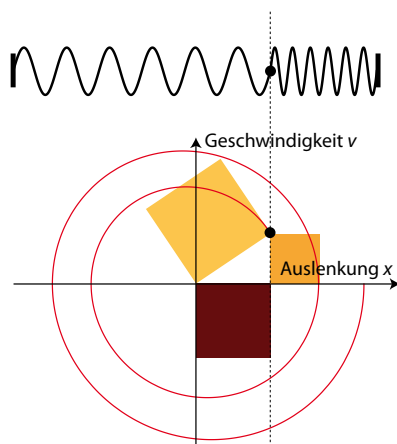
Da hängt der Theoretiker, damit er die Schwerkraft nicht berücksichtigen muss, den Massenpunkt lieber zwischen zwei Schraubenfedern und lässt

ihn horizontal hin- und herschwingen. Die rücktreibende Kraft der Feder soll der Auslenkung proportional sein. Das ist der harmonische Oszillator, ein Lieblingskind der theoretischen Physiker, denn es gibt für seine Bewegung eine geschlossene Darstellung: die Sinusfunktion. Wenn man die einfachste Form der Reibung mitberücksichtigt –

Der harmonische Oszillator

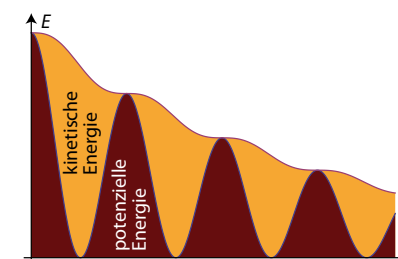
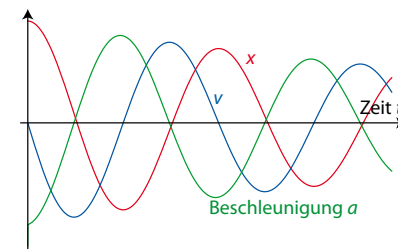
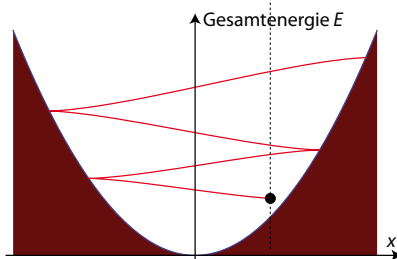
Die Bewegung eines Massenpunkts in einem harmonischen Potenzialfeld ist hier – wie auch im Kurzfilm – auf vierfache Weise dargestellt:

als gewöhnliches Raum-Zeit-Diagramm mit Geschwindigkeit und Beschleunigung (rechts oben);



als Phasendiagramm (links oben): Die Geschwindigkeit v ist gegen die Position x aufgetragen. Ohne Reibung ergibt sich eine Ellipse, die bei passender Wahl des Verhältnisses der beiden Skalenfaktoren zu einem Kreis wird. Dann läuft der Phasenraumpunkt mit konstanter Winkelgeschwindigkeit um den Nullpunkt des Diagramms; mit Reibung spiralt er einwärts;

als Potenzialtopfbild (links unten): waagrecht der Ort wie im Phasenraum, senk-



recht eine Energieskala, auf der die beiden Anteile (potenziell und kinetisch) von unten nach oben aneinandergelagert sind. Der Boden des Topfs ist die Parabel, welche die Abhängigkeit der Federenergie von der Auslenkung anzeigt, die Summe liegt ohne Reibung auf einer Waagerechten, mit einer solchen fällt sie im Zickzack ab;

als Diagramm Energie gegen Zeit (rechts unten). Die »gesamte« Energie ist ohne Reibung konstant, mit einer solchen fällt sie nur sehr ungefähr exponentiell ab, denn Energie wird ja nur in den Bewegungszeiten, aber kaum nahe den Umkehrpunkten von der Reibung »abgeführt«.

Aus dem gleichen Grund schneidet die einwärts laufende spiralähnliche Kurve im Phasenraum bei vorhandener Reibung nur die waagerechten Arme des Achsenkreuzes rechtwinklig. Für den harmonischen Oszillator bei der genannten passenden Skalenwahl (die reibungsfreie Bahn ist kreisförmig) kann man sogar die Energiebilanz als Bild zum Satz des Pythagoras ablesen: Die potenzielle Energie ist proportional zu x^2 , die kinetische zu v^2 .

Ein Schwebpendel mit Reibung macht zunächst mehrere volle Überschläge und geht dann in die gedämpfte Pendelbewegung über.

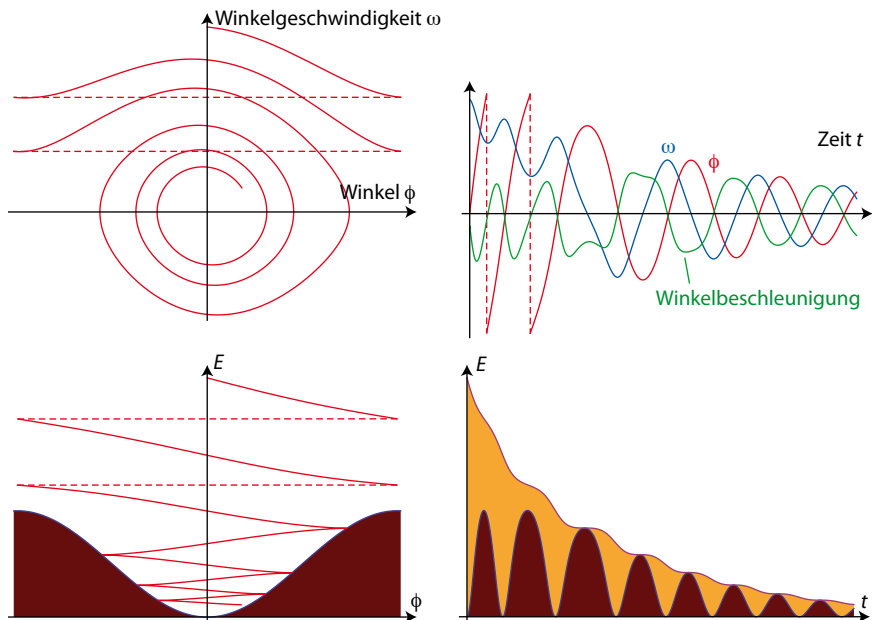
Reibungskraft proportional zur Geschwindigkeit –, kommt noch ein exponentiell abfallender Faktor hinzu.

Der Experimentalphysiker kann sich für diese Form des harmonischen Oszillators nur mäßig begeistern, denn es kostet beträchtliche Mühe, den Massenpunkt hinreichend reibungsarm über eine horizontale Oberfläche gleiten zu lassen. Da ersetzt er lieber die Punktmasse durch einen starren Körper, der um eine ortsfeste Achse drehbar ist, und die Schraubenfeder durch eine Spiralfeder um diese Achse herum oder auch eine Wendelfeder; diese ist wie die Schraubenfeder zylindrisch gewickelt, wird aber auf Verbiegung des Federdrahts beansprucht. Wenn die Achse auch noch senkrecht orientiert ist, spielt die Schwerkraft selbst dann nicht mit, wenn der Schwerpunkt nicht genau in der Achse sitzt.

Größere Präzision durch den »Wirbelwind«

Das schätzen auch die Uhrmacher, denn Spiralfedern lassen sich so fertigen, dass ihr rücktreibendes Drehmoment sehr genau proportional der Winkelauslenkung ist, selbst wenn diese mehrere Umdrehungen beträgt. Damit sind die Voraussetzungen für einen harmonischen Oszillator – mit Winkel statt Längengrößen – wieder erfüllt. Nur kann man es bei einer mechanischen Taschen- oder Armbanduhr nicht so einrichten, dass die Achse ständig senkrecht orientiert ist. Man muss daher die rotierende Masse (die »Unruh«) sorgfältig auswuchten oder die Unruh in einen speziellen Käfig packen, der sich im Lauf von Stunden gegenüber dem Uhrengehäuse dreht, um Störungen durch eine Unwucht wegzumitteln: das Tourbillon (»Wirbelwind«).

Sowie die Masse statt an einer Feder an einer Schnur im Schwerfeld hängt, ist es vorbei mit der schönen geschlossenen Formel. Aber eine iterative Lö-



Pendelbewegung, programmiert

Harmonischer Oszillator

Die folgende Programmschleife ist immer wieder (mehrere tausend Mal) zu durchlaufen:

```

1 KinEn:=m*v*v/2;
2 PotEn:=D*x*x/2;
3 GesEn:=KinEn+PotEn;
4 F:=-x*D-v*r;
5 v:=v+F/m*dt;
6 x:=x+v*dt;

```

Darin sind x die Ortskoordinate, gemessen vom kräftefreien Punkt aus (ihn Ruhepunkt zu nennen, wäre irreführend), v die Geschwindigkeit, F die Kraft und dt der Zeitschritt zwischen den Rechenzeitpunkten. m , D und r sind Konstanten des Geräts: Masse, Federkonstante und Reibungskonstante. Vor der Schleife müssen diese sowie Startwerte von x und v gegeben werden.

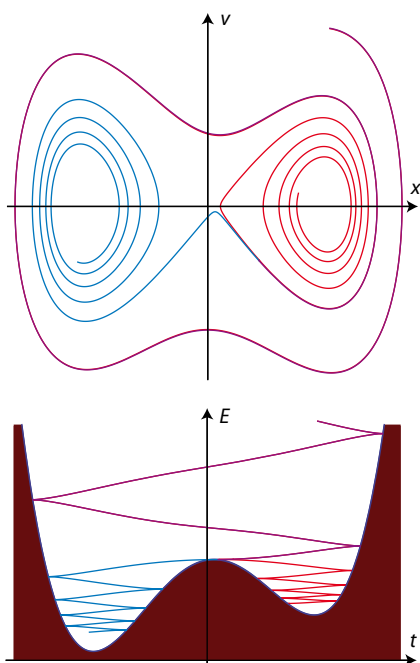
Schwebpendel

```

PotEn(w):=(1-cos(w))*Konst;
1 KinEn:=TraeghMom*WinkelGesch*WinkelGesch/2;
2 GesEn:=PotEn(w)+KinEn;
3 DrehMom:=(PotEn(w+1e-6)-PotEn(w-1e-6))/2e-6;
4 WinkelBeschl:=DrehMom/TraeghMom-WinkelGesch*ReibKoeff;
5 WinkelGesch:=WinkelGesch+WinkelBeschl*dt;
6 w:=w+WinkelGesch*dt;
7 if w>pi then w:=w-2*pi;
8 if w<-pi then w:=w+2*pi;

```

Die Bestimmung des Drehmoments erfolgt analog zu einer grafischen Ableitung: die potenzielle Energie an zwei Stellen vor und hinter dem gesuchten Winkel ($1e-6$ bedeutet 10^{-6}) wird abgefragt, die Differenz geteilt durch die Winkeldifferenz ist dann das Drehmoment. Falls der Winkel w mehr als eine halbe Drehung überschreitet, wird er durch Addition beziehungsweise Subtraktion eines Vollwinkels auf seinen Hauptwert umgerechnet, damit er nicht aus dem Potenzialtopfbild herausläuft.



Hat das Potenzial zwei Minima, so kann die zugehörige Bewegung den Schmetterlingseffekt demonstrieren. Ein beliebig kleiner Unterschied in der Anfangsenergie lässt die Kugel in dem einen statt dem anderen Minimum zur Ruhe kommen.

kraft, sondern das Ziehen am Aufhängepunkt samt Achse entscheidend: Wenn man eine Schwerependeluhr frei fallen lässt, pendelt sie durchaus nicht, anders als eine Drehfederpendeluhr (mechanische Taschen- oder Armband-uhr). Wenn wir ein mechanisches Metronom an einem langen Gummiband auf- und abschwingen lassen, schlägt es umso schneller, je größer die Quadratwurzel aus der augenblicklichen Spannung des Gummifadens ist.

Für die iterative Lösung dieses Problems müssen wir nur die Definition der potenziellen Energie ändern. Sie ist jetzt nicht mehr dem Quadrat des Auslenkungswinkels ϕ proportional, sondern der Funktion $1 - \cos \phi$.

Auf dem Weg zum Chaos

Ein Lauf, der vieles Interessante zeigt, hat eine nicht zu starke Reibung und beginnt mit mehreren vollen Überschlägen (Bild S. 45 oben). Das ist zunächst noch gar keine Schwingung, sondern eine Rotation, die im unteren Scheitel etwas schneller ist als im oberen, bis der obere nicht mehr überschritten wird. Es kann theoretisch passieren, dass das Pendel im oberen Scheitel stehen bleibt und dann die Frequenz null und die Periode unendlich erreicht. Bei sehr schwacher Reibung und knappem Überschlag gibt es im Phasenraum im Grenzfall eine halbe Sinuskurve und ihr Spiegelbild, etwas später eine geschlossene Kurve, die zu einer immer kleineren Ellipse (bei geschickter Skalierung einem Kreis) spiralt. Der cosinusförmige Potentialtopf wird nahe seinem unteren Scheitel durch eine Parabel angenähert; das ist der harmonische Grenzfall.

Ein kombiniertes Feder- und Schwerependel kann man bauen, wenn man ein Schwerependel mit einer Drehfeder ausstattet oder – eher unfreiwillig – ein

Federpendel nicht richtig auswuchtet, wenn also sein Schwerpunkt nicht genau in der Achse liegt. Man kann aber auch eine Fahrstange zu einer Kurve mit mehreren Minima formen und einen Waggon darauf laufen lassen (Bild links). Im Programm geben wir einfach eine weit gehend beliebige Kurve als Abhängigkeit des Potentials von der Auslenkung vor. Wenn Reibung im Spiel ist, hängt von deren Stärke und den Startwerten von Winkel und Winkelgeschwindigkeit ab, bei welchem Minimum das Pendel zur Ruhe kommt.

Das widerlegt die alte Behauptung »Kleine Abweichungen in den Startwerten führen auch zu kleinen Abweichungen im Endzustand« (das »starke Gesetz der Kausalität«). Die wissenschaftliche Folklore kennt diese empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsdaten als Schmetterlingseffekt – eines der Eingangstore zur Chaostheorie.

Damit die Bewegung vollständig determiniert ist, müssten die Anfangsdaten auf unendlich viele Stellen hinter dem Komma bekannt sein, was nie wirklich erreichbar ist. Ohnehin kann die Experimentalphysik mit dem Unterschied zwischen rationalen und irrationalen Zahlen, der in der Chaostheorie entscheidend ist, nichts anfangen. Dass es überhaupt feste Strukturen wie definierte chemische Elemente gibt, denen das allgegenwärtige Chaos nichts ausmacht, verdanken wir der Quantenmechanik mit ihren diskreten Werten, die von ganzen Zahlen abhängen. ∞

sung mit kleinen diskreten Zeitschritten gibt es immer noch. Kurzfilme, die mit einem entsprechenden TurboPascal-Programm gerechnet wurden, sind auf der Website www.spektrum.de/artikel/1125586 dieses Artikels zu finden. In dem ganzen Programm (Kasten S. 45 unten) kommen nirgends Winkelfunktionen oder eine Berechnung einer Periode vor (außer einmal zur Festlegung der Skalenfaktoren).

Für das harmonische Federdrehpendel brauchen wir am rechnerischen Teil des Programms nichts zu ändern, nur an der zeichnerischen Wiedergabe. Die mathematischen Zusammenhänge sind dieselben. Wir können die Größen, die beim geradlinig laufenden Federpendel auftreten, durch die entsprechenden des Drehpendels ersetzen: Winkel statt Ortsauslenkung, Winkelgeschwindigkeit statt Geschwindigkeit, ebenso für die Winkelbeschleunigung, Drehmoment statt Kraft, Trägheitsmoment statt Masse. Die zur Federkonstante analoge Drehfederkonstante wird auch als Direktionsmoment bezeichnet. Zeit und Energie bleiben sie selbst, die Energieanteile müssen aber nun aus den Rotationsgrößen berechnet werden.

Beim Schwerependel ist, wie ich in dem Artikel über »Dammi« (Spektrum der Wissenschaft 7/2005, S. 106) dargelegt habe, eigentlich nicht die Schwer-

DER AUTOR



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

QUELLE

Treitz, N.: Physik in bewegten Bildern (CD). In: Brücke zur Physik. Harri Deutsch, Frankfurt am Main 2003

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1125586

¹⁴C und die Chronologie Ägyptens

Bei der Entwicklung der Radiokohlenstoffmethode vor mehr als 60 Jahren dienten Funde aus dem Reich der Pharaonen als Referenz. Heute versuchen umgekehrt Naturwissenschaftler ihren Teil dazu beizutragen, offene Fragen der ägyptischen Chronologie zu beantworten.

Von Eva Maria Wild und Walter Kutschera

»**S**eid Euch bewusst, dass von diesen Pyramiden 40 Jahrhunderte auf euch herabblicken«, ermahnte Napoleon Bonaparte seine Soldaten im Juli 1798 in Giseh. Nach heutigem Wissen irrte sich der Feldherr bezüglich der Cheopspyramide um etwa 400 Jahre; sie entstand im 26. Jahrhundert v. Chr. Seine Fehleinschätzung verwundert nicht, denn die wissenschaftliche Erforschung Altägyptens begann mit ebendiesem Feldzug: Im Tross der Invasionsarmee reisten Naturforscher und Ingenieure, die alles, was sie im Land der Pharaonen sahen, vermaßen und dokumentierten (SdW 12/1994, S. 72).

Nach gut 200 Jahren Forschung gilt heute die Chronologie des antiken Nilstaats, festgemacht an der Abfolge seiner Herrscher und Herrscherinnen, eigentlich als gut bekannt. Im Detail aber verbleiben Unsicherheiten, die immer wieder Anlass zur Diskussion geben (siehe den Beitrag S. 56). Als Folge davon verwenden Ägyptologen nicht eine einzige, sondern mehrere so genannte hohe und niedrige Chronologien, die ein höheres beziehungsweise niedrigeres Alter für Thronbesteigungen angeben. Sie differieren für das Neue Reich nur um etwa zehn Jahre, bei der Datierung des Alten Reichs hingegen beträgt der Unterschied gut 100 Jahre.

AUF EINEN BLICK

EINE UHR AUS KOHLENSTOFF

1 In der Lufthülle entsteht unablässig **radioaktives ¹⁴C**, das auch von Lebewesen aufgenommen wird. In der Atmosphäre wie in der Biomasse stellt sich annähernd dieselbe Konzentration davon ein. Sobald ein Lebewesen stirbt, zerfällt das aufgenommene ¹⁴C. Anhand der verbleibenden Konzentration sollte sich feststellen lassen, wie alt organisches Material aus einer archäologischen Fundstätte ist.

2 Tatsächlich können diverse Effekte die **¹⁴C-Datierung** verfälschen. Inzwischen kennen die Experten aber Methoden, sie zu korrigieren, Messungen und Berechnungen präziser zu machen. Ziel ist dabei auch, Kulturen, die keine oder wenige Schriftquellen hinterlassen haben, in ihrer zeitlichen Entwicklung zu erfassen.

3 Den bisherigen Höhepunkt stellt eine umfangreiche **Neudatierung altägyptischer Proben** dar. Sie stützt vor allem die von dem Ägyptologen Ian Shaw erstellte Chronologie, zeigt aber auch zu anderen Chronologien Ägyptens nur geringe Abweichungen.

Das Problem der korrekten Datierung teilt die Ägyptologie freilich mit anderen Altertumswissenschaften. Insbesondere die zeitliche Entwicklung prähistorischer Kulturen ließ sich mangels schriftlicher Quellen lange nur anhand ihrer Artefakte rekonstruieren. Vor allem Gebrauchskeramiken dienten dabei als »Leitfossilien«, da sie sich auf Grund technischer oder kultureller Entwicklungen in den verschiedenen Kulturphasen immer wieder in charakteristischer Weise verändert haben.

Eine absolute, nicht auf solchen Vergleichen oder Schriften beruhende Datierung ermöglichte erstmals die Radiokarbonmethode des US-amerikanischen Chemikers und Physikers Willard Frank Libby (1908–1980); 1960 wurde er dafür mit dem Nobelpreis für Chemie geehrt. Die aus dem Weltraum einfallende kosmische Strahlung, so Libbys Überlegung, zertrümmert in den höheren Schichten der Atmosphäre Atomkerne und setzt dabei Neutronen frei. Diese verschmelzen mit den Atomkernen von ¹⁴N, dem häufigsten



ISTOCKPHOTO / LUNE DANIEK

Stickstoffisotop; aus diesen entstehen – unter Freisetzung von Protonen – Atome des radioaktiven Kohlenstoffisotops ^{14}C . Da sie sich chemisch nicht anders verhalten als die der häufigeren stabilen Isotope ^{12}C und ^{13}C , reagieren sie mit dem Sauerstoff der Luft zu $^{14}\text{CO}_2$. Dieses Kohlendioxid nehmen Pflanzen ebenso wie das normale CO_2 auf und bauen es in ihre Biomasse ein. Über die Nahrungskette gelangt es dann in Tier und Mensch; über die Atmung und die Zersetzung von organischem Material wird es wieder an die Atmosphäre abgegeben. Des Weiteren findet ein Austausch von Radiokohlenstoff zwischen der Luft und dem Oberflächenwasser der Ozeane statt. Libby war davon überzeugt, dass Transportprozesse sowie das Gleichgewicht zwischen dem radioaktiven Zerfall des Isotops und seiner Neuproduktion dafür sorgen, dass dieselbe konstante Konzentration von ^{14}C in der Luft wie in der Biomasse vorliegt.

Die ^{14}C -Uhr beginnt zu ticken

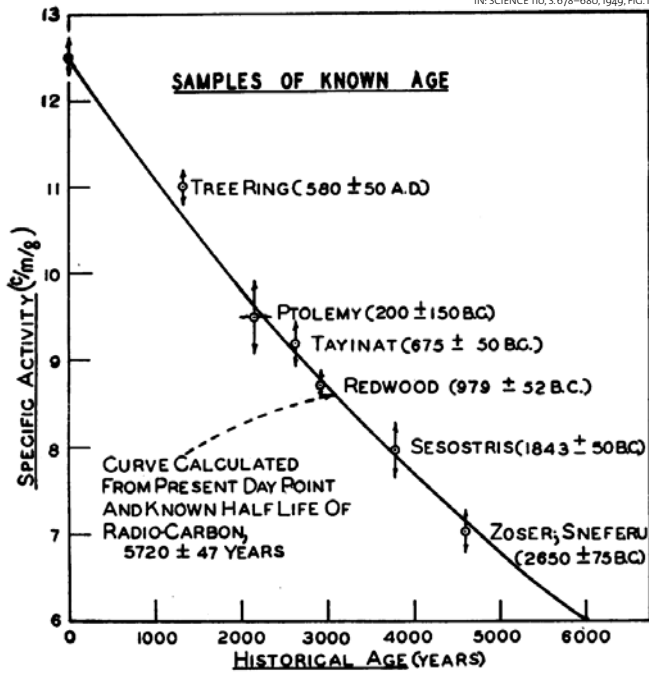
Entscheidend ist nun dies: Mit dem Tod endet aller Austausch, und die radioaktive Uhr startet. ^{14}C zerfällt zu ^{14}N , doch weil kein Nachschub kommt, nimmt sein Anteil am Gesamtkohlenstoff des Körpers exponentiell ab. Libby ging davon aus, dass der ^{14}C -Gehalt der Atmosphäre stets dem heutigen entsprochen habe. Das Alter einer Probe organischen Materials ließe sich daher durch einen Vergleich der enthaltenen ^{14}C -Konzentration mit der anfänglichen berechnen. Schon bei der Entwicklung der Radiokohlenstoffmethode spielte die Ägyptologie eine wichtige Rolle: Libby und sein Team nutzten Fundmaterial aus altägyptischen Stätten,

Traubenkerne aus dem Tempel der Königin Hatschepsut (Bild) gehörten zu den Proben, die jetzt mit ^{14}C -Technik datiert wurden.

das bereits mit historischen Verfahren datiert worden war. Zum einen wollten die Forscher damit die Konstanz der kosmischen Strahlungsintensität nachweisen. Zum anderen ging es ihnen auch um den Beleg, dass es überhaupt organisches Material gibt, dessen ^{14}C -Konzentration ausschließlich durch den radioaktiven Zerfall verändert wurde, nicht aber durch die Lagerungsbedingungen.

Für diese Untersuchung verwendeten sie zum Beispiel eine Holzprobe vom Totenschiff des Pharaos Sesostri III. Diese Grabausstattung hatten Ägyptologen damals auf 1843 plus/minus 50 v. Chr. datiert, zum Zeitpunkt der Untersuchung im Jahr 1949 wäre sie also 3792 plus/minus 50 Jahre alt gewesen. Die Radiokohlenstoffdatierung ergab ein Alter von 3700 plus/minus 400 Jahren. 1949 galt dies noch als Punktlandung. Heute wissen wir, dass die große Fehlerbreite Störeffekte verschleiert hatte.

Insbesondere stimmt Libbys Annahme über den ^{14}C -Anteil im Kohlenstoff der Atmosphäre in der Vergangenheit nur bedingt. Später von verschiedenen Forschern durchgeführte Altersbestimmungen an Proben aus dem Alten Reich wichen deshalb um einige hundert Jahre von den Datierungen der Historiker ab. Denn eine lang anhaltende Schwächung des Erdmagnetfelds hatte in jener Epoche mehr kosmische Strahlung in die Lufthülle der Erde eintreten lassen, was die Anfangskonzentration des Radiokohlenstoffs erhöh-



Anhand einiger ägyptischer Proben bereits bekannten Alters bewiesen Willard Frank Libby und sein Assistent James Arnold 1949 die Machbarkeit der ¹⁴C-Datierung. Die dabei angenommene Halbwertszeit verkürzten sie später auf 5568 Jahre.

5568 Jahren als Basis. Anschließend wird der ermittelte Wert über eine Kalibrierkurve in ein Kalenderalter umgerechnet. In dieser Kurve nun stecken die Informationen aus der Dendrochronologie: Das ¹⁴C-Alter von Baumringen ist hier gegen das dendrochronologisch bestimmte aufgetragen. Dieser Schritt korrigiert Schwankungen des ¹⁴C-Anfangsgehalts. Ein Vorteil: Auf diese Weise spielt der exakte Wert der Halbwertszeit keine Rolle mehr – nach heutigem Kenntnisstand beträgt er 5700 plus/minus 30 Jahre.

Benachteiligung bei der Fotosynthese

Prinzipiell kann die ¹⁴C-Messung etwa 50 000 Jahre zurückschauen, die Dendrochronologie jedoch nur etwa 12 500 Jahre. Die seit 2009 gültige Kalibrierkurve (IntCal09) geht dennoch darüber hinaus. Sie beruht auf marinen ¹⁴C-Archiven wie etwa Korallen und Karbonaten in Sedimentablagerungen, die sich mit anderen Methoden absolut datieren lassen.

Nicht nur die Stärke des Erdmagnetfelds beeinflusst den Gehalt an Radiokohlenstoff in der Atmosphäre und folglich auch im organischen Gewebe. Einige physikalische und chemische Prozesse behandeln die verschiedenen schweren Kohlenstoffisotope unterschiedlich. So wird bei der Fotosynthese – abhängig vom Stoffwechsel der Pflanze – mehr oder weniger bevorzugt das leichtere ¹²C in die Biomasse eingebaut. Daher ist das Verhältnis von ¹⁴C zu ¹²C in der Biosphäre variabel, woraus sich ¹⁴C-Altersunterschiede von einigen hundert Jahren bei zeitgleichen Proben ergeben würden. Zum Glück gibt es eine verlässliche Lösung: die Messung der stabilen Isotope ¹³C und ¹²C. Ersteres wird bei der Fotosynthese ähnlich »benachteiligt« wie ¹⁴C, daher bietet die Bestimmung des

te und im Labor dann ein geringeres Alter vortäuschte. Libbys Verfahren geriet beinahe in Misskredit, während er selbst die Ergebnisse der Historiker bezweifelte. Anfang der 1960er Jahre aber wurde offenbar, dass die fraglichen Abweichungen auch bei Hölzern auftraten, deren Alter mittels Dendrochronologie ermittelt worden waren (siehe Kasten S. 52).

Dieses Verfahren dient deshalb seit den 1980er Jahren dazu, Radiokohlenstoffdatierungen zu korrigieren. Im Prinzip bestimmt man dazu den ¹⁴C-Anteil im Kohlenstoff des jeweiligen Materials und sucht eine Holzprobe mit demselben Gehalt, deren Alter bereits anhand ihrer Baumringe eindeutig bestimmt wurde. In der Praxis vergleicht man nicht die Konzentrationen selbst, sondern bestimmt aus jener der unbekannt Probe ein so genanntes unkalibriertes ¹⁴C-Alter; per Konvention dient dabei die »Libby-Halbwertszeit« von

Abweichung von der Theorie

Bei stets konstanter ¹⁴C-Konzentration in der Atmosphäre sollte das mit der Radiokohlenstoffmethode ermittelte Alter dem wahren entsprechen (rote Linie). Schwächelte das Erdmagnetfeld, entstand aber mehr ¹⁴C. Anhand dendrochronologisch datierter Holzproben (hier eine Eichenholzprobe aus römischer Zeit) erstellten Forscher die IntCal09-Kalibrierkurve (blau) zur Korrektur. Die Angabe BP (*Before Present*) bezieht sich auf das Jahr 1950, die Einheit calBP bedeutet kalibrierte Jahre vor 1950. Feinere Variationen der Kurve, so genannte *wiggles*, haben ihren Grund in kurzzeitigen Schwankungen der Sonnenaktivität.

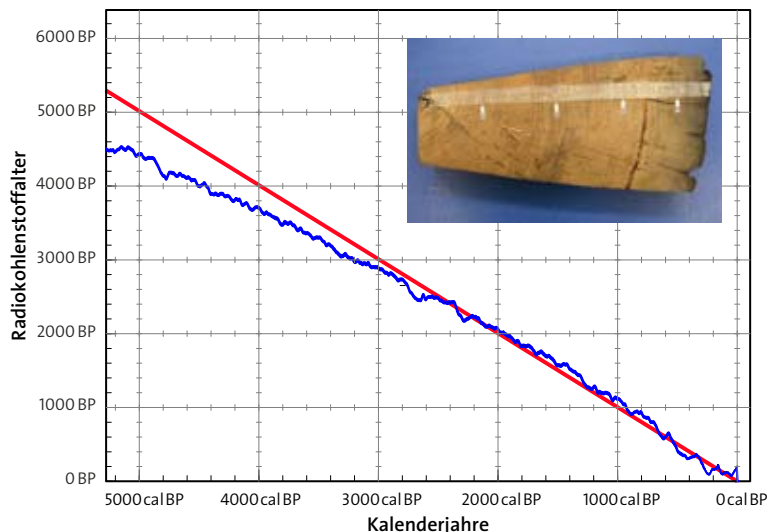


FOTO: MICHAEL FRIEDRICH-HOHNHEIM; DATEN NACH: REIMER, P. ET AL. (2009); OXCAL V3.0; BRONKHANSEY, C. (2005); CALIB 5.5.12; PROLUSCHRON

$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses, das im Lauf der Jahrhunderte unverändert blieb und keinem radioaktiven Zerfall unterlag, eine Korrekturmöglichkeit.

Damit sind allerdings noch nicht alle störenden Effekte berücksichtigt. So weist der Kohlenstoff im Oberflächenwasser der Ozeane eine geringere ^{14}C -Konzentration auf als der Kohlenstoff der Luft. Der Grund für diesen Reservoireffekt ist die relativ langsame Durchmischung der Ozeane: Aufsteigende Meeresströmungen bringen »altes Wasser« aus den Tiefen an die Oberfläche, das dort den Radiokohlenstoff verdünnt. Lebewesen, die sich aus dem Meer ernähren, erscheinen daher generell um etwa 400 Jahre zu alt, was auch bei der Verwendung mariner Proben zur Erweiterung der Kalibrierkurve berücksichtigt wird.

Dieser Effekt kann sich sogar auf Landlebewesen auswirken. Proben, die von der südlichen Halbkugel unserer Erde stammen, erscheinen auch nach der Kalibrierung etwa 40 Jahre zu alt. Der mittlere Gehalt an Radiokohlenstoff in der Atmosphäre ist dort nämlich etwas geringer, weil jener Teil der Erde zum größeren Teil von Meer bedeckt ist, so dass mehr ^{14}C -armes CO_2 in die Luft gelangt.

Unterstützung durch die Bayes-Statistik

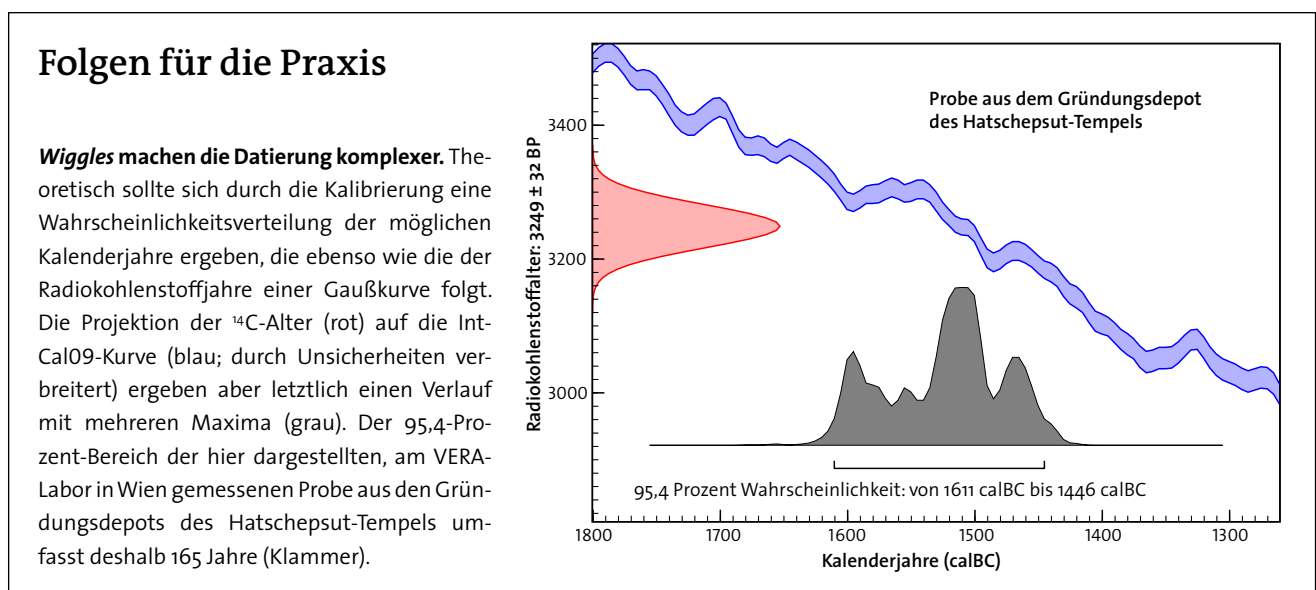
Betrachtet man die Kalibrierkurve, fallen neben Langzeitrends auch kurzfristige Schwankungen auf, so genannte *wiggles*. Die Ursachen dafür sind vielfältig und werden größtenteils auf Änderungen der Sonnenaktivität zurückgeführt, sind aber im Detail noch nicht verstanden. Mit den heutigen Messmethoden lässt sich zwar das unkalibrierte ^{14}C -Alter in der Regel auf wenige Jahrzehnte genau ermitteln, aber durch die *wiggles* kann der Kalenderzeitbereich, in den das wahre Alter der Probe fällt, oft nur auf einige hundert Jahre genau bestimmt werden.

Physikalische Messungen liefern auf Grund von statistischen Unsicherheiten nie 100-prozentig genaue Resultate. Meist erhält man eine glockenförmige Wahrscheinlichkeits-

verteilung von Werten. Eine Altersangabe X plus/minus 30 Jahre bedeutet dann: Der Maximalwert der Verteilung liegt bei X ; verfolgt man die Kurvenflanken bis zu ihren Wendepunkten, haben diese zum Maximum einen Abstand von 30 Jahren. Dieser als Standardabweichung bezeichnete Bereich umfasst 68,2 Prozent aller Messwerte, bei Verdopplung der Unsicherheit (plus/minus 60 Jahre) werden 95,4 Prozent erfasst. Die Prozentzahlen geben also die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Wert im jeweiligen Intervall liegt. Wäre der Zusammenhang zwischen der unkalibrierten Radiokohlenstoffdatierung und dem wahren kalendarischen Alter linear, so würde sich nach der Kalibrierung wieder eine solche Gaußkurve ergeben. Die *wiggles* aber sorgen für einen komplexeren Verlauf.

Dazu ein Beispiel aus unserem eigenen Labor: Wir untersuchten Traubenkerne aus einem der Gründungsdepots des Hatschepsut-Tempels (siehe Bild S. 49), der laut den historischen Chronologien um 1470 v. Chr. errichtet wurde. Die Altersbestimmung ergab zunächst ein nichtkalibriertes ^{14}C -Alter von 3249 plus/minus 32 Jahren BP (einer Konvention entsprechend wird das unkalibrierte ^{14}C -Alter in Jahren vor heute, englisch *Before Present*, BP, angegeben, wobei als Bezugspunkt das Jahr 1950 dient). Nach der Kalibrierung erhielten wir aber eine Kurve mit mehreren Maxima. Der Zeitbereich, in den das wahre Alter der Probe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95,4 Prozent fiel, umfasste deshalb 165 Jahre, nämlich von 1611 bis 1446 v. Chr. (siehe Grafik unten). Eine einzige ^{14}C -Datierung ermöglicht daher oft keine Entscheidung zu Gunsten einer der historischen Chronologien.

Größere Präzision erreicht man durch mehrere Proben, sofern deren zeitliche Abfolge bekannt ist. Der englische Mathematiker Thomas Bayes (etwa 1701–1761) formulierte die Grundlagen dieser nach ihm benannten statistischen Methode. Bei einer ungestörten Abfolge a, b, c von Siedlungsschichten etwa muss eine Probe aus der untersten Schicht a älter sein als eine aus der darüberliegenden Schicht b, diese wie-



derum älter als eine aus c. Die Kombination des gemessenen ^{14}C -Gehalts von Proben mit solchen Vorinformationen liefert wesentlich präzisere Datierungen. Dieses Verfahren lässt sich auch bei Proben anwenden, die zwar nicht aus einer einzigen Ausgrabungsstätte stammen, bei denen jedoch die zeitliche Abfolge durch andere Informationen genau bekannt ist.

Entsprechende Fundobjekte sind in Museen vorhanden, doch darf davon allenfalls eine geringe Menge entnommen werden. Zur Zeit Libbys stellte deshalb das Nachweisverfahren des Radiokohlenstoffs die Forscher vor große Prob-

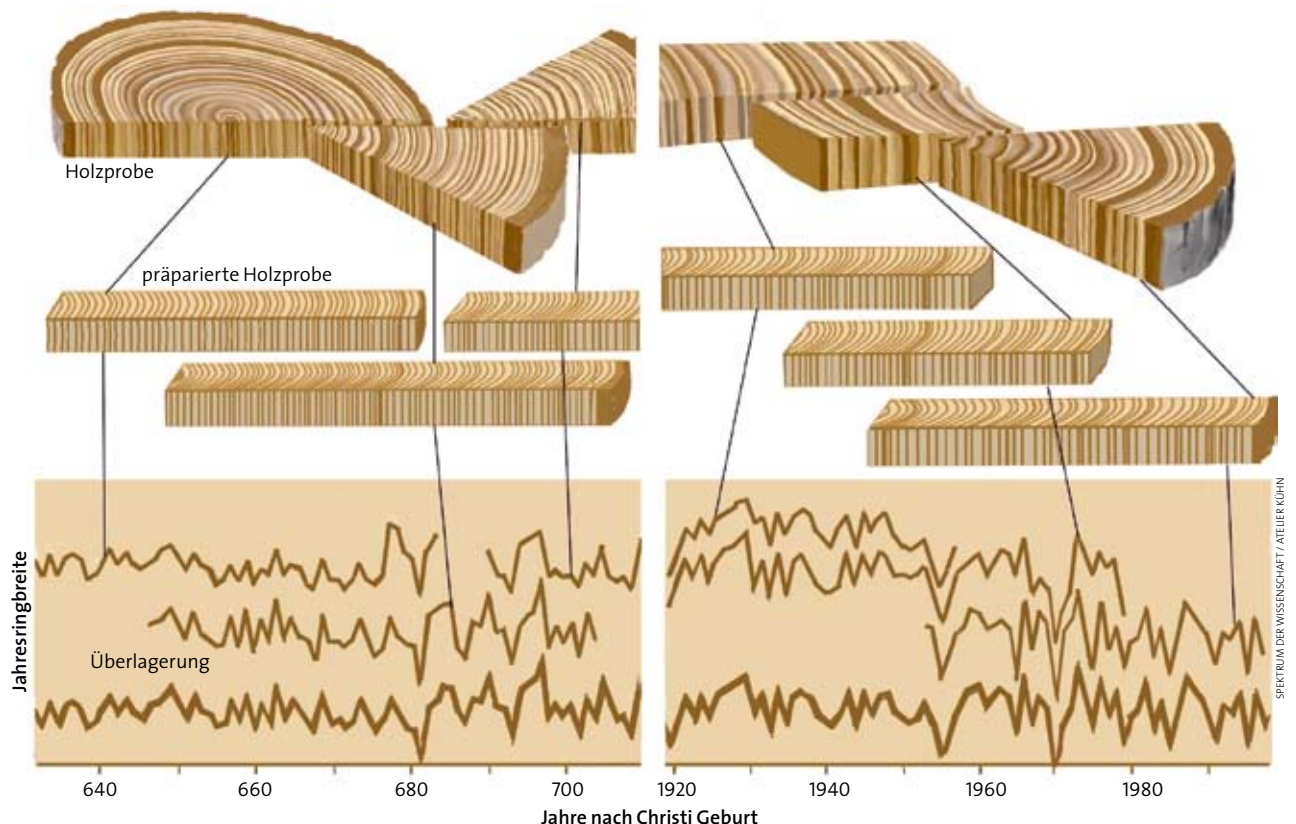
leme, denn sie hatten nur die radiometrische Methode zur Verfügung: Der Zerfall des ^{14}C -Isotops setzt Elektronen frei, die ein Detektor registriert. Zwar befinden sich derzeit in lebender Materie gut 60 Milliarden ^{14}C -Atome je Gramm Kohlenstoff, doch bei einer Halbwertszeit von 5730 Jahren zerfällt davon jede Minute weniger als ein Milliardstel. Genauer gesagt werden dabei im Mittel nur 13,6 Elektronen ausgesandt. Eine Präzision von 0,3 Prozent beziehungsweise 25 Jahren erfordert aber 100 000 Zerfallsereignisse. Das lässt sich in einer vernünftigen Messzeit nur erreichen, wenn

Stichwort Dendrochronologie

Bäume der gemäßigten Breiten bauen neues Holz nur während der Vegetationsperiode vom Frühjahr bis zum Herbst auf, im Spätherbst stellen sie das Wachstum ein. Das Resultat sind die Jahresringmuster, an denen sich das Lebensalter eines Baums abzählen lässt (der innerste Ring ist der älteste). Die Dicke der Baumringe hängt von den am Standort herrschenden Wachstumsbedingungen ab. In warmen, feuchten Jahren baut die Pflanze mehr Masse auf, in kälteren und/oder trockenen Zeiten fallen die Baumringe schmäler aus. Dadurch entsteht eine charakteristische Abfolge, die als Grundlage einer Jahresringchronologie herangezogen werden kann. Bäume einer Region zeigen typische Dickenabfolgen, die durch das regionale Klima verursacht werden. Lokal bedingte Schwankungen lassen sich dabei durch Mittelung von Dickenabfolgen mehrerer Bäume derselben Region herausrechnen.

Dendrochronologen verlängern solche Jahresringkurven immer weiter in die Vergangenheit. Wird eine geeignete ältere Probe vermessen, suchen sie dazu nach Überlappungen der Ringdickenmuster. Die mitteleuropäischen Jahresringchronologien von Eichen und Kiefern reichen derzeit bis zum Ende der Eiszeit vor etwa 12 500 Jahren zurück. Unbekannte Holzproben aus diesem Zeitbereich können durch Vergleich der Ringdickenmuster in günstigen Fällen bis auf ein Jahr genau datiert werden; damit ist die Dendrochronologie eine der genauesten Datierungsmethoden überhaupt.

Aus den Jahresringen von Holzproben, alten Bauhölzern und gefällten Stämmen werden Kurven der Ringbreiten gewonnen und zu einer Chronologie überlagert.



mehrere Gramm Kohlenstoff zur Verfügung stehen – was selten der Fall ist.

Den entscheidenden Fortschritt brachte eine Technik, mit der man die in der Probe vorhandenen ^{14}C -Atome direkt nachweisen kann: Die Beschleunigermassenspektrometrie (*Accelerator Mass Spectrometry*, AMS; siehe Kasten unten) reduziert die Probenmenge um etwa drei Größenordnungen in den Bereich »Milligramm«, was sogar für kostbare Fundstücke akzeptabel ist; sie verkürzt obendrein die Messzeiten. Drei Jahre lang hat ein Wissenschaftlerteam aus Großbritan-

nien, Österreich, Israel und Frankreich unter der Leitung von Christopher Bronk Ramsey von der University of Oxford daran gearbeitet, die ägyptische Chronologie mit den beschriebenen Verfahren auf eine neue naturwissenschaftliche Grundlage zu stellen. Dabei konnte auch unser Labor seine Erfahrungen einbringen.

Europäische und nordamerikanische Museen wurden nach geeigneten Materialien durchforstet. Diese sollten nur von Landpflanzen stammen, um den marinen Reservoir-effekt zu vermeiden. Ausgeschlossen wurde hingegen orga-

Auf der Jagd nach ^{14}C

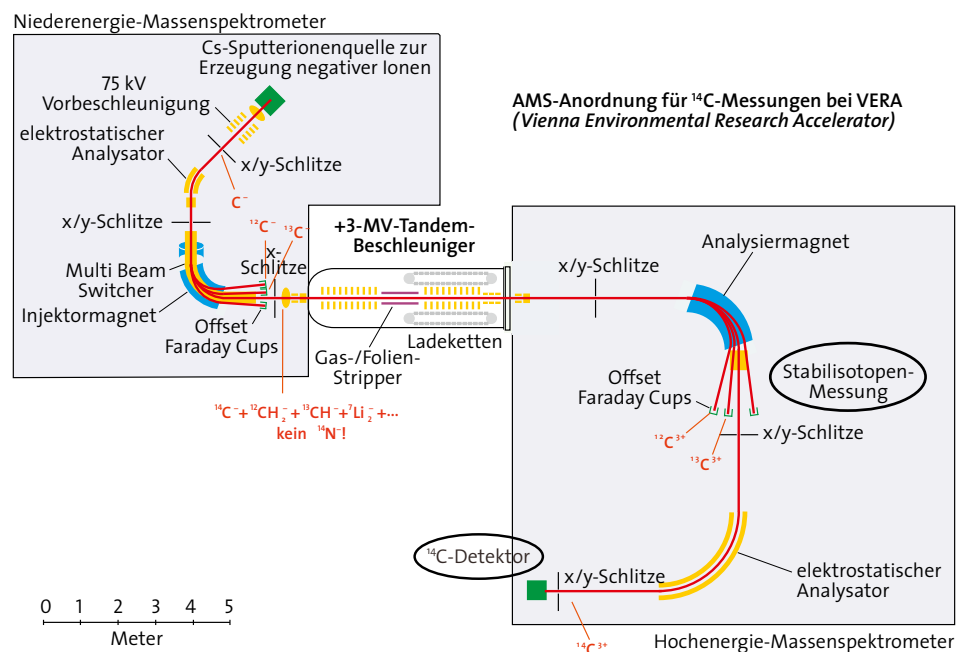
Ob Dopingkontrolle oder chemische Analyse – Massenspektrometer sind oft die erste Wahl, wenn es darum geht, bestimmte Stoffe in einem Gemisch zu identifizieren. Dazu wird die zu untersuchende Probe meist in die Gasphase überführt und ionisiert, dann ein beschleunigendes elektrisches Feld angelegt und ein gerichteter Strahl von Ionen erzeugt. Mit magnetischen Feldern lassen sich diese nun sortieren: Je geringer die Masse und je höher die Ladung, desto stärker werden die Teilchen abgelenkt. Sie gelangen so zu Detektoren, die sie zählen.

Die winzigen Mengen an ^{14}C in einer archäologischen Probe anhand ihrer Masse nachzuweisen, erfordert allerdings einigen Einfallsreichtum. Konventionelle Massenspektrometer sind dafür ungeeignet. Denn die Atommasse des Radiokohlenstoffs unterscheidet sich kaum von der des Stickstoffisotops ^{14}N , das den größten Teil der Luft ausmacht und das Messsignal völlig verdecken würde. Zum Glück bildet Stickstoff keine negativen Ionen. Bei der Beschleunigermassenspektrometrie (siehe Bild) werden Proben deshalb mit einem Zäsiumstrahl zerstäubt – dadurch entstehen negativ geladene Kohlenstoffionen.

Leider bilden sich dabei auch die Kohlenwasserstoffe $^{12}\text{CH}_2^-$ und $^{13}\text{CH}^-$. Beide weisen fast dieselbe Masse wie ^{14}C auf, wieder gibt es davon um viele Größenordnungen mehr. An dieser Stelle kommt nun der namensgebende Beschleuniger ins Spiel: Von einer positiven Drei-Megavolt-Hochspannung angezogen, durchqueren die Molekül- und Atomionen eine kurze Gasstrecke (Stripper) und verlieren dort Elektronen, wodurch die Moleküle aufbrechen und mehrfach positiv geladene ^{12}C -, ^{13}C - und ^{14}C -Ionen resultieren. Nunmehr von der gleichen Hochspannung abgestoßen und weiter beschleunigt, kann ein zweites Massenspektrometer sie unterscheiden. Den Detektor erreichen nur noch ^{14}C -Ionen.

Sowohl die ^{12}C - als auch die ^{13}C -Ionen werden nicht als Einzelereignisse, sondern als Ionenströme gemessen. Daraus lassen sich die benötigten Konzentrationsangaben ermitteln. Das Verhältnis $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ (10^{-12} bis 10^{-15}) dient der Datierung, der Wert $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ (10^{-2}) der Korrektur einer im Artikel beschriebenen Fehlerquelle. Derzeit wird der ^{14}C -Nachweis mit hoher Präzision an Kohlenstoffmengen im Milligrammbereich durchgeführt.

Vereinfachtes Schema der Beschleunigeranlage VERA (Vienna Environmental Research Accelerator) und der dreistufigen Massenspektrometrie. Dabei sind nur die für eine ^{14}C -Messung wichtigen Komponenten dargestellt.



nisches Material aus Süßwasserseen und Flüssen, weil ¹⁴C-arme gelöste Karbonate eine ähnliche Wirkung haben (Hard-Water-Effekt). Auch Holz- und Holzkohleproben schieden aus: Sie hätten aus dem Inneren eines Baumstamms kommen können, während das zu datierende archäologische Ereignis eher dem Zeitpunkt des Fällens, also dem Alter der äußeren Baumringe, entsprechen würde (Altholzeffekt). Des Weiteren kamen Knochen nicht in Frage, da es nicht auszuschließen war, dass die betreffenden Lebewesen einst Fische und Mollusken verzehrt hatten – was den marinen Reservoir- oder den Hard-Water-Effekt durch die Hintertür hereingebracht hätte.

Trotzdem fanden sich ausreichend viele Proben aus dem Alten, Mittleren und Neuen Reich: Früchte, Samenkörner, Überreste kurzlebiger Pflanzen, Papyri, Textilien und anderes mehr. Sie ließen sich jeweils eindeutig einer Regierungsperiode zuordnen. Die Proben wurden in Oxford und ein Teil zur

Kontrolle noch einmal am AMS-Labor im französischen Saclay oder in unserer Einrichtung in Wien datiert. Manche hat man mehrfach untersucht, nachdem sie mit unterschiedlich starken chemischen Vorbehandlungsmethoden gereinigt worden waren. Auf diese Weise ließ sich ausschließen, dass Kontaminationen das Ergebnis verfälschen – in dem Fall hätten sich unterschiedliche Alter ergeben. Von den insgesamt 211 Datierungen mussten 23 auf Grund grober Inkonsistenz mit den erwarteten Werten unberücksichtigt bleiben, so dass letztlich 188 Ergebnisse verwendet werden konnten.

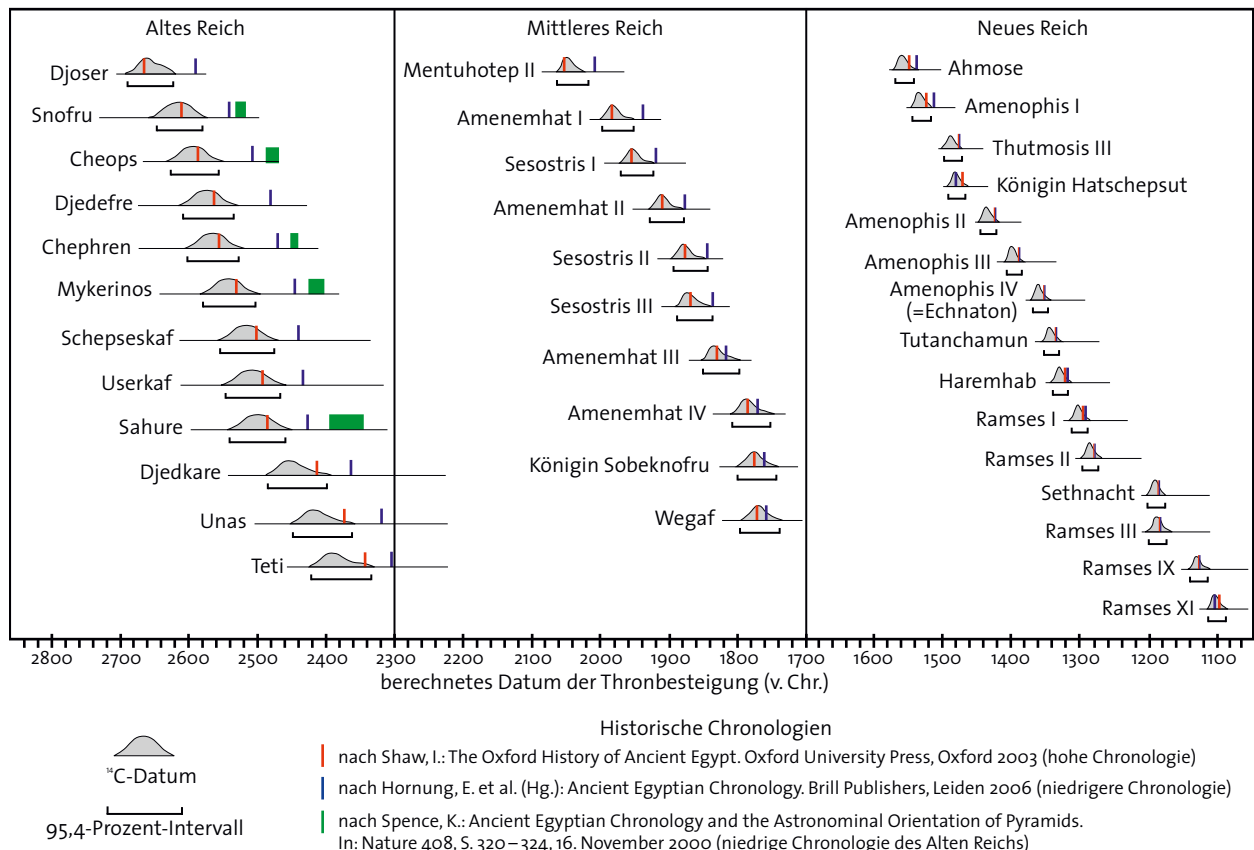
¹⁴C-Unterschiede von Sommer und Winter

Die Einbeziehung von zusätzlicher Information wie der Zuordnung zu Regierungsperioden und deren Dauer ermöglichte eine auf der beschriebenen bayesschen Sequenzierung beruhende Modellrechnung. Dabei wurde auch ein erst kurz zuvor von der Oxfordder Datierungsgruppe erkannter Effekt

Der Lohn der Mühen

Im Rahmen eines internationalen Forschungsprojekts wurden Radiokohlenstoffdaten für eine Reihe ausgewählter Proben bestimmt. Dabei berücksichtigten die Forscher alle bekannten Fehlerquellen. Beispielsweise wurden die Überreste mariner Lebewesen von der Untersuchung ausgeschlossen, um den Reservoir-Effekt der Gewässer zu umgehen. Überdies nutzten die

Wissenschaftler die bayessche Statistik, um die Datierungen zu präzisieren. Kalenderzeitbereiche, die einer 95,4-Prozent-Wahrscheinlichkeit entsprachen, wurden mit Thronbesteigungsangaben historischer Chronologien verglichen. Zumeist stützt die Radiokohlenstoffdatierung die zu den hohen Chronologien gehörende Einteilung des britischen Ägyptologen Ian Shaw.





berücksichtigt: An botanischen Proben bekannten Alters aus dem 18. und 19. Jahrhundert n. Chr. stellte sich heraus, dass solche aus Ägypten laut der Radiokohlenstoffmethode ein um 19 plus/minus 5 ^{14}C -Jahre höheres Alter aufwiesen als zeitgleiche Proben aus mittleren geografischen Breiten. Das lässt sich relativ leicht erklären: Der ^{14}C -Gehalt der untersten Luftschicht (Troposphäre) unterliegt natürlichen Schwankungen von etwa vier Promille, da im Sommer mehr und im Winter weniger Radiokohlenstoff von der Stratosphäre in die Troposphäre gelangt. Pflanzen aus den gemäßigten Breiten, die vor allem im späten Frühjahr und im Sommer wachsen, bauen somit auch geringfügig mehr ^{14}C ein als solche aus Ägypten, deren Wachstumsperiode in die Wintermonate fällt. Letztere erscheinen dann etwas älter. Die Korrektur geht davon aus, dass die klimatischen Verhältnisse vor dem Bau des ersten Assuanstaudamms (1902) über lange Zeiträume konstant waren.

Die Modellrechnung ergab schließlich eine sehr präzise absolute Chronologie des pharaonischen Ägyptens (siehe Grafik links). Sie wurde 2010 im Fachmagazin »Science« publiziert und sorgt seitdem für Diskussion. Dank der großen Zahl an Proben aus dem Neuen Reich konnten die jeweiligen Thronbesteigungen mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von 24 Jahren fixiert werden. Die hohe historische Chronologie stimmt mit den ^{14}C -Daten am besten überein; diese Epoche könnte aber ebendiesen Daten nach sogar etwa eine Dekade früher begonnen haben als allgemein angenommen. Für das Alte und das Mittlere Reich standen leider weniger Proben zur Verfügung. Dennoch sind die Resultate ausreichend genau, um für ersteres die hohe historische Chronologie zu stützen. Für das Mittlere Reich lässt sich zwar keine eindeutige Aussage treffen, auch hier scheint die hohe Chronologie dennoch die stimmigere.

Bemerkenswerterweise ergaben die ^{14}C -Resultate jeweils nur geringfügige Abweichungen und nie größere Widersprüche zu den historisch bestimmten Daten. Das war nicht un-

bedingt zu erwarten, denn in den vergangenen Jahren wurde immer wieder Material aus der pharaonischen Zeit Ägyptens mit der ^{14}C -Methode datiert, und vielfach wichen die Resultate drastisch von der Einschätzung der Ägyptologen ab. Manche Unterschiede beruhen möglicherweise auf einer etwas zu unkritischen Auswahl, die nicht korrigierbare Fehler einbrachte. So mag der Altholzeffekt bei Holzkohleproben die Datierung verfälscht haben. Auch die Wiederverwendung von Holz wäre zu bedenken – der Zeitpunkt der letzten Verwendung könnte erheblich vom Fälldatum abweichen. Mitunter ist die Zuordnung eines historischen Datums unsicherer als von den Ägyptologen angenommen.

Es gibt jedoch durchaus Untersuchungen, bei denen trotz Ausschluss aller Störfaktoren Differenzen von 100 bis 150 Jahren auftraten, wobei die ^{14}C -Methode stets das höhere Alter ergab. Das betrifft etwa Funde aus Tell el-Dab'a im Nildelta, das vom Mittleren Reich bis zum Beginn des Neuen Reichs besiedelt war. Physiker wie Ägyptologen sind sich jeweils weit gehend sicher, dass ihre Datierung stimmt. Eine plausible Erklärung steht noch aus. Es ist zu hoffen, dass eine Lösung dank der in den vergangenen Jahren gewachsenen Zusammenarbeit zwischen Naturwissenschaften und Geisteswissenschaften bald gefunden wird. ~

DIE AUTOREN



Eva Maria Wild und **Walter Kutschera** sind Professoren an der Fakultät für Physik der Universität Wien und arbeiten auf dem Gebiet der Isotopenforschung an der AMS-Anlage VERA. Eva Maria Wild leitet das ^{14}C -Programm der Beschleunigeranlage VERA und war an der in »Science« veröffentlichten Arbeit über die ^{14}C -Datierung des pharaonischen Ägyptens beteiligt. Walter Kutschera hat das VERA-Laboratorium begründet und war zweiter Sprecher des FWF-Spezialforschungsbereichs SCIM2000 (The Synchronization of Civilizations in the Eastern Mediterranean in the 2nd Millennium BC).

QUELLEN

- Arnold, J.R., Libby, W.F.:** Age Determinations by Radiocarbon Content: Checks with Samples of Known Age. In: *Science* 110, S. 678–680, 1949
- Bowman, S.:** Radiocarbon Dating (Interpreting the Past). British Museums Publications, London 1990
- Bronk Ramsey, C. et al.:** Radiocarbon-Based Chronology for Dynastic Egypt. In: *Science* 328, S. 1554–1557, 2010
- Dee, M.W. et al.:** Investigating the Likelihood of a Reservoir Offset in the Radiocarbon Record for Ancient Egypt. In: *Journal of Archaeological Science* 37, S. 687–693, 2010
- Shaw, I.:** *The Oxford History of Ancient Egypt*. Oxford University Press, Oxford 2003
- Taylor, R.E.:** *Radiocarbon Dating – An Archaeological Perspective*, Academic Press, Orlando 1987

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124695

Ein Puzzle der besonderen Art

Ägyptologen setzen die Chronologie des Nilstaats aus einer Vielzahl von historischen Informationen zusammen: von Tempelinschriften bis hin zu Zeitangaben auf Weinkrügen.

Von Thomas Schneider

Kalender sind Menschenwerk und somit gesellschaftlichen Veränderungen unterworfen. Wenn beispielsweise das Erscheinungsjahr dieser Ausgabe von »Spektrum der Wissenschaft« 2011 lautet, beziffert diese Zahl die seit Christi Geburt vergangenen Jahre gemäß den Berechnungen des Mönchs Dionysius Exiguus im Jahr 525. Dem muslimischen Kalender zufolge, der mit dem Auszug des Propheten Mohammed von Mekka nach Medina beginnt, würde ab dem 26. November 2011 das Jahr 1433 den Einband zieren, im jüdischen Kalender wäre es sogar das Jahr 5772 nach Erschaffung der Welt.

AUF EINEN BLICK

CHRONOLOGIE DER HERRSCHER

1 Eine **grobe Chronologie des alten Ägypten** (3.–1. Jahrtausend v. Chr.) ergibt sich durch die Einteilung in Königsdynastien und die Unterscheidung von Phasen politischer Stabilität und so genannten Zwischenreichen, Perioden des Umbruchs.

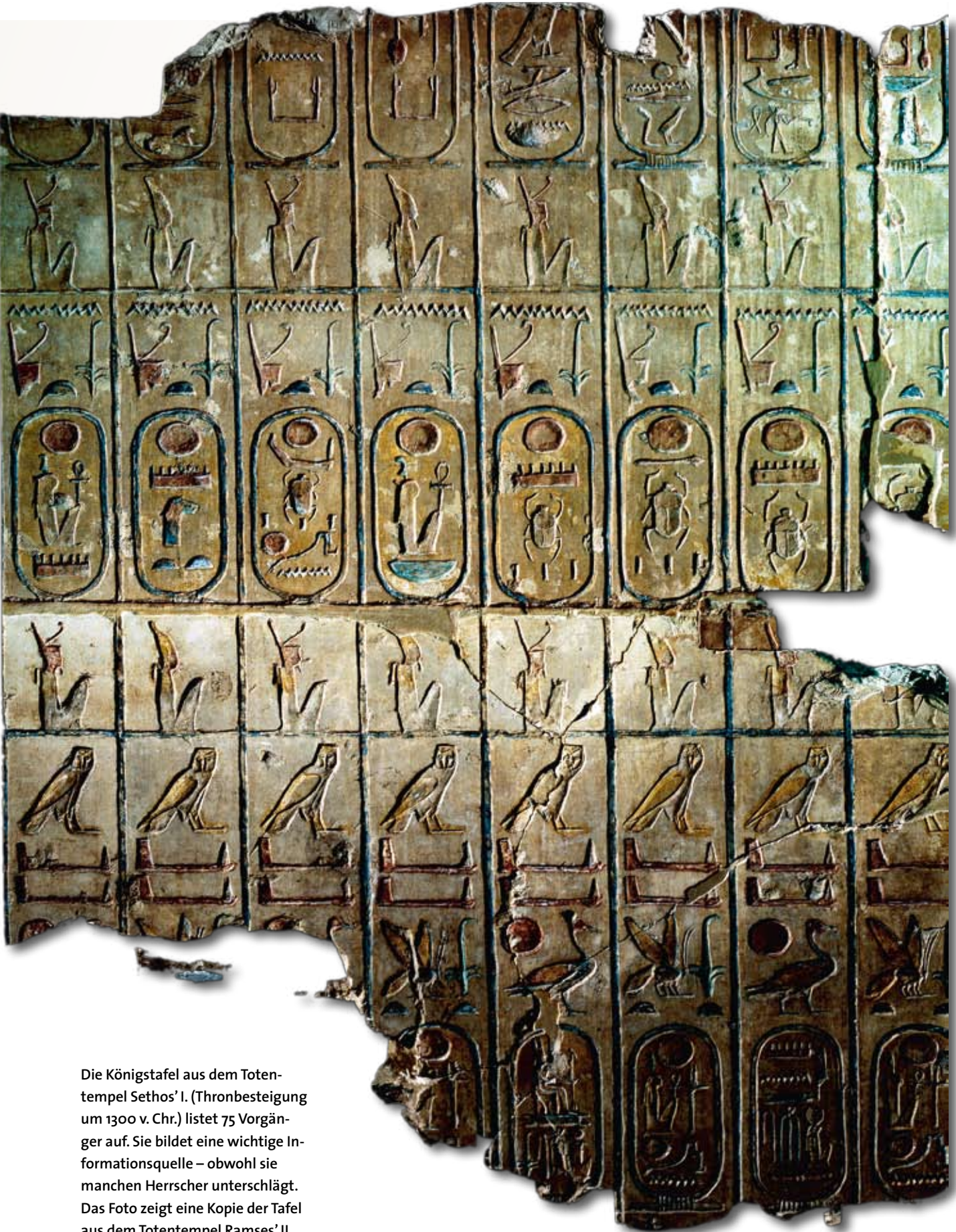
2 Da die Ägypter eine Datierung von einem kalendarischen Nullpunkt her nicht kannten, müssen beispielsweise die **Regierungsdauern der amtierenden Könige** aus Tausenden von Einzeldaten rekonstruiert werden. Dazu geht man von einem Fixpunkt im 1. Jahrtausend v. Chr. aus und arbeitet sich schrittweise zurück.

3 Das größte Problem stellt die Überbrückung der **schlecht dokumentierten Zwischenzeiten** dar. Eine mögliche Lösung bieten genealogische Berechnungen. Insbesondere die Chronologie des 3. Jahrtausends ist sehr unsicher; hier können naturwissenschaftliche Datierungsmethoden (¹⁴C) weiterhelfen.

Die altägyptische Kultur kannte dagegen keine fortlaufende Datierung von einem Anfangspunkt her. Dennoch treffen wir Aussagen darüber, wann beispielsweise die Cheopspyramide gebaut wurde beziehungsweise ihr Auftraggeber König Cheops regierte. Dazu dienen zwei recht verschiedene Methoden: zum einen die naturwissenschaftliche Altersbestimmung von Objekten, durch die dann auch die historischen Kontexte, aus denen sie stammen, zeitlich festgelegt sind. So erlauben ¹⁴C-Datierungen, die Regierungszeit des besagten Pharaos mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent in die Zeit von 2640 bis 2560 v. Chr. zu verorten (siehe den Beitrag S. 48). Dasselbe gelingt freilich ebenfalls mit der »historischen Chronologie«, der auf schriftlichen Informationen beruhenden Ordnung und Datierung von Ereignissen – dank der Arbeit von Generationen von Forschern.

Zeitangaben – beispielsweise die Daten von Ereignissen oder die Dauer von Regierungen – haben uns die Ägypter des Altertums in großer Zahl überliefert. Sie helfen heute, die korrekte Abfolge der ägyptischen Herrscher und die jeweiligen Regierungszeiten festzustellen. Ägyptologen haben Tausende solcher Daten ausgewertet, etwa aus königlichen Bauinschriften und Feldzugsinschriften. Aber auch Weinamphoren, die anlässlich der Beisetzungen von Pharaonen in das Tal der Könige gebracht wurden, liefern verlässliche Angaben. Erst vor Kurzem ließ sich dadurch feststellen, dass die Amtsdauer des Königs Haremhab, die zuvor umstritten gewesen war, 14 Jahren betrug.

Auch Erwähnungen astronomischer Phänomene – etwa zur ersten Sichtung des Sirius oder des Neumonds – können



Die Königstafel aus dem Totentempel Sethos' I. (Thronbesteigung um 1300 v. Chr.) listet 75 Vorgänger auf. Sie bildet eine wichtige Informationsquelle – obwohl sie manchen Herrscher unterschlägt. Das Foto zeigt eine Kopie der Tafel aus dem Totentempel Ramses' II.

hilfreich sein. Die moderne Astronomie vermag sie unter günstigen Umständen in absolute Daten umzurechnen, mit denen sich ganze Epochen in unserer Kalenderrechnung verankern lassen (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 78). Hilfreich sind auch so genannte Synchronismen, beispielsweise Ereignisse, die sowohl in ägyptischen Texten wie in Schriftquellen aus dem Vorderen Orient vorkommen; diese Gleichzeitigkeiten ermöglichen es, die Annalen des Nilstaats mit denen der mesopotamischen Reiche abzugleichen.

Insbesondere für jene Epochen, in denen Ägypten unter einer Zentralregierung vereint war – im Alten, Mittleren und Neuen Reich sowie in der Spätzeit –, gibt es über die Abfolge der Könige und ihre Zeit auf dem Thron heute kaum noch Unklarheiten. Anders verhält es sich mit den so genannten Zwischenzeiten: Phasen des Umbruchs, in denen regionale Königtümer miteinander konkurrierten. Von ihnen kennen wir deutlich weniger schriftliche Dokumente. Königslisten der ägyptischen Verwaltung bilden hier die wichtigste Informationsquelle. Ähnliche Listen hielten fest, welche Herrscher der Vergangenheit in einem bestimmten Tempel kultisch verehrt wurden.

Der griechische »Vater der Geschichtsschreibung« Herodot, der um 450 v. Chr. im zweiten Buch seiner »Historien« von einem vermutlich fiktiven Besuch Ägyptens berichtete, lieferte den Griechen darin einen Beweis für das in ihren Augen unglaubliche Alter der ägyptischen Zivilisation: »Nach diesem (gemeint war der erste König Ägyptens) zählten die Priester aus einem Buch die Namen von 330 anderen Königen auf«, und da, wie die Priester ihm gezeigt hätten, in jedem Menschenalter ein König regiert habe und drei Men-

schentaler 100 Jahren entsprächen, entspreche dies einem Alter der ägyptischen Zivilisation von mehr als 10 000 Jahren. Natürlich ist das in dieser Vereinfachung falsch – die Mehrzahl der ägyptischen Könige regierte jeweils nur wenige Jahre –, doch beweist der Bericht, dass es tatsächlich bis in die griechisch-römische Zeit hinein Königslisten gab.

Der Priester Manetho nutzte sie, als er in der Mitte des 3. Jahrhunderts v. Chr. eine erste Geschichte Ägyptens verfasste, die »Aigyptiaka«, um die neue, in der griechischen Kultur verwurzelte Elite des Landes mit dessen Vergangenheit vertraut zu machen. Er verfolgte dabei einen pragmatischen Ansatz, der auch heute noch Gültigkeit hat: Manetho fasste Könige zu »Dynastien« zusammen, die aus derselben Familie stammten oder in derselben Residenzstadt regierten. Von der mythischen Herrschaft der Götter bis zu den letzten Pharaonen vor der Eroberung Ägyptens durch Alexander den Großen umfasste sein Werk laut antiken Berichten 31 Dynastien und 473 Herrscher. Leider sind die »Aigyptiaka« selbst nicht erhalten, sondern nur Auszüge daraus in den Werken jüdischer und christlicher Autoren, insbesondere in der »Chronik des Africanus« aus dem 3. und der »Weltchronik des Eusebius von Caesarea« aus dem 4. Jahrhundert.

Die einzige auf uns gekommene Königsliste aus altägyptischer Zeit findet sich auf den Fragmenten des »Turiner Königspapyrus«; sie bricht aber schon vor dem Neuen Reich ab, um 1530 v. Chr. Zahlreicher sind die im Tempelkult verwendeten »Königstafeln«, etwa jene im Totentempel Sethos' I. in Abydos (um 1300 v. Chr.; siehe Bild S. 57); diese Quellen sind leider ungenau und verzeichnen keine Regie-



Der Apisstier verkörperte den altägyptischen Gott Ptah; das Tier galt als Fruchtbarkeitssymbol (hier eine Kultdarstellung aus der Nekropole von Sakkara). Angaben zu den Lebensdaten der heiligen Tiere bilden heute eine wichtige Quelle für die Chronologie Ägyptens.

runglängen. Zudem existieren in Stein gehauene Annalen, die herausragende Ereignisse wie die Errichtung von Monumenten oder erfolgreiche Militärexpeditionen von Herrschern auflisteten und wohl als eine Art religiöser Rechenschaftsbericht in verschiedenen Tempeln Ägyptens aufgestellt wurden; zu nennen sind hier vor allem der »Palermostein« aus dem Alten Reich und die erst seit 30 Jahren bekannten Annalen Amenemhets II. aus dem Mittleren Reich. Auch diese Texte sind lückenhaft, von politischen Erwägungen beeinflusst und zudem oft nur unvollständig erhalten. Erst in der Gesamtschau mit anderen Quellen tragen sie zu einem verlässlichen Bild bei.

Heiliger Stier ermöglicht Brückenschlag über zwei Jahrhunderte

Wie kommt nun eine historische Chronologie zu Stande? Wenn wir in der Zeit vom 1. zum 3. Jahrtausend rückwärtschreiten, ist ihr Ausgangspunkt der Regierungsbeginn des Königs Taharqa im Jahr 690 v. Chr. – das letzte völlig sichere Datum der ägyptischen Geschichte. Auch der Amtsantritt von Schabaka 721 v. Chr. gilt bei zumindest den meisten Experten als unstrittig. Beide Könige gehörten der kuschitischen, also einer aus Nubien stammenden 25. Dynastie an, die das in rivalisierende Fürstentümer zersplitterte Ägypten der vorhergehenden Dritten Zwischenzeit wieder vereinte und damit Ägyptens Spätzeit einläutete. Die schon zur Dritten Zwischenzeit gerechnete 21. Dynastie und das davorliegende Neue Reich der 18. bis 20. Dynastie – zu dem beispielsweise Tutanchamun (18. Dynastie) und Ramses II. (19. Dynastie) gehörten – bereiten ebenfalls kaum Datierungsprobleme. Die Zeit zwischen 956 und 721 v. Chr. ist hingegen unsicheres Terrain. Somit benötigen wir eine chronologische Brücke über gut zwei Jahrhunderte, für die Abfolge, Dynastiezugehörigkeit und Regierungsdauer vieler Herrscher nicht bekannt ist.

Diese Verbindung herzustellen, gelingt vor allem dank der Lebensdaten eines heiligen Apisstiers, die auf Stelen aus dem Serapeum in Sakkara verzeichnet sind (siehe Bild links). Das Tier war nämlich von Schoschenq V., einem König der späten 22. Dynastie, »in sein Amt eingesetzt«, aber unter König Schabaka in der frühen 25. Dynastie bestattet worden. Damit gelingt es, jene kuschitische Herrscherlinie, die durch das erwähnte Datum von 690 v. Chr. fest verankert werden kann, mit einer 22. Dynastie, die sich an die vorangehenden anhängen lässt, zu verknüpfen. So ergibt sich eine Gesamtlänge vom Beginn der 22. Dynastie bis zur Wiedervereinigung Ägyptens durch die 25. Dynastie unter Pianchi von etwa 220 Jahren – Pianchis Nachfolger Schabaka ließ den Apisstier bestatten.

Die acht Könige der 21. Dynastie sind besser dokumentiert und regierten insgesamt 124 Jahre. Somit folgt, von Taharqas Inthronisierung 690 v. Chr. aus rückwärtsgerechnet, das Ende des Neuen Reichs um 1080 v. Chr. Für dessen sehr gut belegte 18 bis 20. Dynastie lassen sich Längen von 246, 102 beziehungsweise 112 Jahren bestimmen, mithin eine Gesamt-

Chronologische Übersicht Altägyptens (alle Angaben v. Chr.)

1. Dynastie	etwa 3000–2840
2. Dynastie	etwa 2840–2730
Altes Reich	etwa 2730–2230
3. Dynastie	etwa 2730–2660
4. Dynastie	etwa 2660–2530
5. Dynastie	etwa 2530–2380
6. Dynastie	etwa 2380–2230
Erste Zwischenzeit	etwa 2230–2030
Mittleres Reich und Zweite Zwischenzeit	etwa 2030–1540
12. Dynastie	1983–1801
Sesostris III.	1873–1854
sein 7. Jahr (Illahun-Datum)	1866
15. Dynastie	1648–1540
Neues Reich	1540–1080
18. Dynastie	1540–1294
19. Dynastie	1294–1192
20. Dynastie	1192–1180
Dritte Zwischenzeit	etwa 1080–664
21. Dynastie	1080–956
22. Dynastie	956–736
Schoschenq V.	774–736
23. Dynastie Oberägyptens	etwa 830–730
24. Dynastie von Sais im Westdelta	727–715
25. Dynastie (Kuschiten)	733–664
Pianchi (seit der Eroberung Ägyptens)	733–721
Schabaka	721–706
Schebitku	706–690
Taharqa	690–664
Assyrische Zeit	671–664
Spätzeit	664–323
26. Dynastie (Saitenzeit)	664–525
27. Dynastie (1. Perserherrschaft)	525–404
28. Dynastie	404–399
29. Dynastie	399–380
30. Dynastie	380–343
2. Perserherrschaft (»31. Dynastie«)	343–332
Alexander der Große	332–323

dauer dieser Ära von 460 Jahren. Demnach begann das Neue Reich etwa 1540 v. Chr. Insbesondere auf Grund der Unsicherheiten in der Dritten Zwischenzeit verbleibt aber ein Spielraum von etwa 20 bis 30 Jahren.

Der könnte mit Hilfe von Neumonddaten aus den Regierungen Thutmosis' III. und Ramses' II. eingegrenzt werden. Ersterer erwähnt beispielsweise in seinen Annalen, dass die Schlacht bei Megiddo, die am 20. Tag des ersten Sommermonats in seinem 23. Regierungsjahr stattfand, auf einen Neumond fiel. Welches absolute Datum in unserer Zeitrechnung dem entspricht, lässt sich astronomisch berechnen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das ägyptische Son-



Sesostris III. (links) war ein König des Mittleren Reichs, Ahmoses I. (rechts) der erste Pharao des Neuen Reichs. Die Dauer der zwischen den beiden Epochen liegenden Zweiten Zwischenzeit berechnen Ägyptologen neuerdings anhand von Inschriften aus den Gräbern hoher Beamter.

nen- und Mondjahr unterschiedlich lang waren und sich damit gegeneinander verschoben. Erst nach 25 Jahren fiel der Neumond im ägyptischen Sonnenjahr wieder auf genau denselben Kalendertag, da 309 Mondmonate (9124,5 Tage) gleich lang waren wie 300 Sonnenmonate (9125 Tage). Schon früher ergaben sich allerdings Übereinstimmungen, die lediglich um einen Kalendertag voneinander abwichen, nämlich nach 11 und 14 Jahren. Dieser eine Tag entspricht der Fehlerbreite der Beobachtung der Gestirne mit bloßem Auge. Für den Amtsantritt Ramses' II. wurden daher mehrere geschichtlich plausible Alternativen vorgeschlagen, die um 11, 14 und 25 Jahre auseinanderliegen: 1304, 1290 oder 1279 v. Chr. Daher sprechen Ägyptologen von längeren oder kürzeren beziehungsweise höheren oder niedrigeren Chronologien des Neuen Reiches (siehe den Beitrag S. 48). In jüngster Zeit haben Untersuchungen leider gezeigt, dass Himmelsbeobachtungen vor der Erfindung des Teleskops mit noch weit größeren Unsicherheiten behaftet waren,



weshalb die Verwendbarkeit ägyptischer Neumonddaten überhaupt zweifelhaft ist.

Astronomische Datierungen gelten auch als mögliche Lösung, um die Zweite Zwischenzeit zu überbrücken, die dem Neuen Reich voranging, also um 1540 v. Chr. endete. Diese Epoche umfasst folgende Phasen: das Ende der 13. Dynastie, die Mitte des 17. Jahrhunderts ihre Kontrolle über Ägypten verlor; lokale Herrscher, die als 14. und 16. Dynastie gelistet werden; die Zeit der vom östlichen Nildelta über weite Teile Ägyptens herrschenden, aus Palästina stammenden Hyksos (15. Dynastie) sowie die 17. Dynastie im oberägyptischen Theben, die das Niltal schließlich wieder vereinen und das Neue Reich begründen sollte. Viele Herrscher dieser Übergangsphase sind schlecht belegt, und es ist auch schwierig, Synchronismen und Überlappungen festzustellen.

Die Sterne lügen doch

Zum Überbrücken und Verankern des Mittleren Reichs wurde daher oft ein »Sothisdatum« aus dem siebten Regierungsjahr Sesostris' III., des fünften Herrschers der zwölften Dynastie, benutzt. Dabei handelt es sich um die Angabe eines Frühaufgangs des Sirius (ägyptisch Sothis) in den Verwaltungsdokumenten der Tempelstadt Illahun südlich von Memphis. Die zuverlässigsten modernen Berechnungen ergeben dafür das Jahr 1866 und damit 1873 für den Regie-

rungsbeginn Sesostris' III.; allerdings bestehen auch hier Zweifel an der Verlässlichkeit der Daten zur Himmelsbeobachtung.

Deshalb gibt es neuerdings Versuche, die Zweite Zwischenzeit allein mit den Mitteln der historischen Chronologie anzugehen. Zunächst zeigt eine Addition der längsten überlieferten Regierungsdauern aus dieser Phase, dass zwischen dem siebten Jahr Sesostris' III. (dem möglichen Ankerpunkt des Sothisdatums) und dem ersten Jahr Ahmoses', des Begründers des Neuen Reichs, mindestens 282 Jahre vergangen sein müssen. Weitere Informationen liefern nicht die Könige dieser Umbruchphase, sondern die Beamten.

Ungeachtet aller politischen Verwerfungen besorgten fernab der jeweiligen Hauptstadt die Provinzverwaltungen ihr Geschäft. Macht und Ansehen der hohen Beamten wuchsen, was sich in ihrem Grabkult niederschlug. So priesen Inschriften das Leben und Wirken der Provinzgouverneure von Elkab in Oberägypten – und ermöglichen es, eine Genealogie zu rekonstruieren, deren 13 Generationen sich vom Beginn der Zweiten Zwischenzeit bis zum Anfang des Neuen Reichs erstreckten. Eine Auswertung zeigt, dass zwischen dem siebten Jahr Sesostris' III. und dem ersten Jahr Ahmoses' nicht 282, sondern 315 beziehungsweise 355 Jahre liegen, je nachdem, ob man mit einer durchschnittlichen Generationenlänge von 25 oder 30 Jahren rechnet.

Ich selbst habe vor Kurzem versucht, aus den von christlichen Chronografen überlieferten widersprüchlichen Summenangaben für die Dynastien der »Aigyptiaka« Manethos die ursprünglichen Zahlen zu rekonstruieren. Wenn meine Berechnungen zutreffen, ergäben sich daraus für das besagte Zeitintervall 327 bis 352 Jahre, bei einer Überschneidung der 13. und 17. Dynastie von 25 bis 50 Jahren, was zu den Biografien der Statthalter von Elkab passen würde und sich sogar mit dem Sothisdatum 1866 v. Chr. vereinbaren ließe (der Abstand zum Beginn des Neuen Reichs beträgt 326 Jahre). Ohnehin bleiben alle diese Zahlen trotz aller Sorgfalt mit Unsicherheiten behaftet – niemand kann mit Gewissheit sagen, dass das Neue Reich 1540 v. Chr. begann oder vielleicht doch schon fünf Jahre zuvor.

Mit der zwölften Dynastie, der Sesostris III. angehörte, stehen wir übrigens wieder auf sicherem Boden; sie dauerte wohl 182 Jahre. Je nach Beurteilung der Dauer der Zweiten Zwischenzeit dürfte sie also zwischen 2000 und 1975 v. Chr. begonnen haben.

Auch dem Mittleren Reich ging eine Phase der Kleinstaatenvoraus – die Erste Zwischenzeit. Hier könnten die von Manetho genannten 185 Jahre für die Könige von Herakleopolis (dem wichtigsten Königtum dieser Umbruchzeit) bis zur Reichseinigung in der späten elften Dynastie (2040–2020 v. Chr.) durchaus der historischen Wahrheit entsprechen. Personenbezogene Daten von lokalen Beamten sowie die archäologischen Befunde zu den Nekropolen der Ersten Zwischenzeit sprechen ebenfalls für eine Dauer von rund 200 Jahren.

Das Alte Reich endete demnach etwa 2230 v. Chr. Damit sind wir in der Ära der bekannten Pyramidenbauer angekom-

men. Das größte Problem, das sich hier in Sachen Chronologie stellt, ist das damals verwendete Datierungssystem. Denn erst seit der elften Dynastie war die Datierung von Ereignissen nach den Regierungsjahren der amtierenden Könige üblich; zuvor gab man »Viehzahlungen« an – mithin die Jahre der Steuererhebungen. Lange gingen Experten von einem zweijährlichen Zensus aus, da neben der Formel »Jahr der Zählung« gelegentlich auch eine Angabe »Jahr nach der Zählung« belegt ist. Inzwischen ist aber deutlich geworden, dass es entweder keinen strikten Modus gab oder wir ihn noch nicht verstehen. Rückwirkend erstellte Königslisten aus späteren Epochen helfen nicht, da ihre Autoren offenbar selbst diese Angaben im Sinn von Regierungsjahren missverstanden. Dass beispielsweise die Erbauer der großen Pyramiden der vierten Dynastie, die Könige Snofru, Cheops und Chephren, deutlich länger an der Macht gewesen sein mussten, als es diese altägyptischen Chronisten errechnet haben, machen auch neuere Abschätzungen des Bauaufwands plausibel.

Eine Rückrechnung von der Ersten Zwischenzeit zum Alten Reich, die sich auf Zensusdaten und andere Indizien stützt, ist daher mit großen Unsicherheiten behaftet. Sie führt für den Bau der Cheopspyramide zurück in das 26. Jahrhundert v. Chr. Unterstützt wird diese Berechnung durch die Naturwissenschaften: Von einem internationalen Forschungsteam ermittelte Radiokohlenstoffdaten stimmen mit der hier durchgeführten historisch-chronologischen Rekonstruktion recht präzise überein (siehe Grafik S. 54). Sie stellen vor allem die ältesten Perioden der ägyptischen Geschichte, für die astronomische Datierungsmethoden umstritten sind, auf eine solide Basis und ergänzen damit die historischen Verfahren ideal. ~

DER AUTOR



Der deutsche Ägyptologe **Thomas Schneider** lehrt und forscht an der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada).

QUELLEN

Hornung, E. et al. (Hg.): Ancient Egyptian Chronology, Handbook of Oriental Studies 1, 83. Brill Academic Publishers, Leiden, Boston 2006

Schneider, T.: Das Ende der kurzen Chronologie: Eine kritische Bilanz der Debatte zur absoluten Datierung des Mittleren Reiches und der Zweiten Zwischenzeit. In: Ägypten & Levante / Egypt & the Levant 18, S. 275–313, 2008

Schneider, T.: Contributions to the Chronology of the New Kingdom and the Third Intermediate Period. In: Ägypten & Levante / Egypt & the Levant 20, S. 373–403, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124695



NEUE SECHSTEILIGE SERIE

Mit Power in die Zukunft

Der weltweite Bedarf an nutzbarer Energie ist im Lauf der Menschheitsgeschichte stetig gestiegen und wird laut sämtlichen Prognosen weiter zunehmen. Denn jeder will ständig irgendetwas machen: zur Arbeit fahren, im Internet surfen, die Wohnung beleuchten, das Haus heizen, fernsehen, emailen, Pflanzen anbauen, in Urlaub fliegen, eine Fabrik betreiben. Und dafür benötigt man das, was heute die abstrakte Bezeichnung »Energie« trägt.

Laut den Gesetzen der Physik lässt sich Energie weder vermindern noch vermehren – sie bleibt einfach erhalten. Aber wandeln und umverteilen lässt sie sich schon, beispielsweise zu den genannten Zwecken. Bleibt die Frage, woher man sie bekommt. Hier ist inzwischen klar: Um eine ebenso langfristige wie nachhaltige Perspektive aufzubauen, gilt es eine Welt zu betrachten, die jenseits von Kohle und Gas die Zivilisation aufrechterhalten muss.

Schier unerschöpflich viel Energie liefert die Sonne. Sie sendet 15 000-mal mehr Energie, als die Menschheit verbraucht. Doch die Solarenergie trifft die Erdoberfläche gleichmäßig, also diffus. Die Nutzungen sind aber lokal – und hier fangen die Probleme schon an.

»Spektrum der Wissenschaft« hat nun Experten und Wissenschaftsjournalisten eingeladen, die wichtigsten Optionen zu durchleuchten, die sich nach heutigem Stand von Wissen und Technologie anbieten. Das Resultat ist eine sechsteilige Serie über zukunftsweisende Energien, die in dieser Ausgabe startet, und zwar mit dem Thema »Sonne«. Warum gerade jetzt? Anlass waren die Katastrophe von Fukushima (Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 76) sowie die Kehrtwende der Bundesregierung bei der Atomenergiepolitik. Die hatte nach dem Unfall ein Ausstiegsprogramm beschlossen, nachdem noch ein halbes Jahr zuvor die Laufzeiten für AKWs verlängert wurden.

Damit ist klar, dass die »Alternativen« deutlich früher zum Energiemix unserer Industrienation werden beitragen müssen als ursprünglich geplant. Wie stehen die Aussichten auf eine Welt, die hauptsächlich erneuerbare Energien nutzt? Die Antworten sind niemals einfach – *there is no free lunch!* Umwälzungen im großen Stil werden unvermeidlich sein. Die Menschheit wird nicht so weiterleben können wie bisher. *Reinhard Breuer*

SERIE ENERGIE | TEIL 1



Parabolrinnenspiegel erzeugen in der Anlage Andasol 1 bei Granada elektrischen Strom.

ÜBERBLICK

DIE ZUKUNFT DER ENERGIE



Teil 1	Strom aus der Sonne Interview mit Eicke Weber	Dezember 2011
Teil 2	Windräder	Januar 2012
Teil 3	Wasserkraft	Februar 2012
Teil 4	Biotreibstoffe	März 2012
Teil 5	Energiespeicher I: Batterien	April 2012
Teil 6	Energiespeicher II: Wasserstoff	Mai 2012

Sonnige Zeiten

Die Fotovoltaik boomt, und solarthermische Kraftwerke stehen in den Startlöchern: Strom aus Sonnenlicht stellt eine wichtige Säule für die zukünftige Energieversorgung dar. Dennoch bleiben noch viele Hausaufgaben zu erledigen, bis die Sonne fossile Energiequellen vollständig ablösen kann.

Von Bernd Müller



Die Energiewende in Deutschland ist beschlossene Sache. Im Frühjahr hat die Bundesregierung den Ausstieg aus der Kernenergie verkündet und will nun verstärkt auf andere Energieformen setzen. Aber auf welche? Kohlekraftwerke heizen den Treibhauseffekt an, werden jedoch wohl oder übel noch Jahrzehnte zur Deckung des Grundlastbedarfs im Stromnetz vonnöten sein. Wesentlich sauberer arbeiten zwar Windräder, zur Zierde von Küstengewässern oder Berggipfeln erreichen sie aber nicht. Und das Potenzial der Wasserkraft gilt hier zu Lande bereits als nahezu ausgeschöpft.

Wie gut, dass es die Sonne gibt. Ihre Energie ist praktisch unerschöpflich. Unser Zentralgestirn wärmt und erhellt un-

seren Planeten jährlich mit einer Energiemenge von etwa einer Trillion Kilowattstunden ($1,5 \times 10^{18}$ kWh); dies entspricht in etwa dem 15000-Fachen des gesamten Primärenergieverbrauchs der Menschheit im Jahr 2006 ($1,0 \times 10^{14}$ kWh). Zudem ist die Solarenergie bei der deutschen Bevölkerung so beliebt wie keine andere Form der Stromerzeugung. Laut einer Umfrage von TNS Emnid etwa liegt der Vertrauensindex für Solarenergie bei 99 Prozent und nimmt damit die Spitzenposition vor allen anderen Energieträgern ein.

Der Weg ins Solarzeitalter scheint damit vorgezeichnet. Doch wie immer im Leben gibt es nichts umsonst – im Fall der Nutzung der Sonnenenergie zahlt man sogar wortwört-

lich einen hohen Preis. Denn die Fotovoltaik, bei der Sonnenlicht mit Solarzellen aus Halbleitern direkt in Strom umgewandelt wird, ist momentan die teuerste regenerative Energiequelle, weit teurer noch als Wind- oder Wasserkraft. In letzter Zeit häufen sich daher die Forderungen, die Solarenergie langsamer auszubauen und mehr in andere regenerative Energiequellen zu investieren. Doch die mächtige Solarlobby in Deutschland weiß, dass die Politik gar nicht anders kann, als ihre Branche zu fördern, gerade auch angesichts des überaus positiven Images in der Bevölkerung. Die Hersteller verweisen auf das enorme Wachstumspotenzial insbesondere bei der Fotovoltaik, die neben den noch seltenen solarthermischen Großkraftwerken das wichtigste Standbein der Sonnenenergienutzung darstellt. Die dritte Form der Nutzung ist die solare Erwärmung von Wasser zum Heizen oder Duschen, die seit vielen Jahren bewährt und wirtschaftlich ist. Das gilt vor allem für südliche Länder wie Israel, wo Sonnenkollektoren bei Neubauten längst Pflicht sind. Im Folgenden soll es aber nur um die Stromerzeugung mittels Solarkraft gehen.

Vorreiter bei der Fotovoltaik ist derzeit Deutschland. Allein 2010 wurden hier zu Lande Module mit insgesamt rund 7,4 Gigawatt Leistung aufgebaut, fast so viel wie in den 20 Jahren davor. So summiert sich die heute installierte Leistung auf über 17 Gigawatt. Auch wenn manches dafür spricht, dass sich das exponentielle Wachstum der letzten Jahre auf einen linearen Anstieg abschwächen und in andere Regionen der Welt verlagern wird, dürfte Deutschland weiterhin eine Triebfeder hinter dieser Technologie bleiben.

Warum gerade Deutschland? Zwei Gründe haben zum Fotovoltaikboom bei uns geführt. Zum einen das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das dem Besitzer einer entsprechenden Anlage 20 Jahre lang eine fixe Einspeisevergütung garantiert, womit er eine Rendite von fünf bis acht Prozent erwirtschaftet. Wer sich in den letzten Jahren eine Fotovoltaikanlage aufs Dach montierte, hat sein Geld definitiv besser angelegt als die Aktienspekulanten. Zum anderen stammen

große Teile der Technologieentwicklung aus Deutschland, etwa von Forschungsinstituten wie dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg, von Lieferanten für Produktionsstraßen wie der Solarfirma Manz AG in Reutlingen sowie von Modulherstellern wie Solarworld oder Q-Cells. Made in Germany, used in Germany – etwas Besseres kann einer Branche kaum passieren.

Doch dieses Idyll ist in Gefahr. Im August dieses Jahres schockierten gleich mehrere Hersteller von Fotovoltaikmodulen die Öffentlichkeit mit Gewinneinbrüchen. Auch ließ eine Deckelung des EEG deutsche Investoren zurückhaltend werden. Zudem haben asiatische Hersteller mittlerweile enorme Produktionskapazitäten aufgebaut und drängen nun mit Macht auf den deutschen Markt. Damit geraten die Preise unter Druck – und das ist gut so, denn die Fotovoltaik ist noch nicht konkurrenzfähig im Vergleich etwa zu Kohlestrom. Mit der so genannten Grid-Parity – einem Preisgleichstand von Solarstrom und konventionellem Strom aus dem Netz – rechnen Experten frühestens für 2012 oder 2013. Selbst dann wird Solarstrom weiterhin hoch subventioniert sein.

Manuel Frondel vom Rheinisch-Westfälischen Institut für Wirtschaftsforschung in Aachen sieht das dicke Ende erst noch kommen. Über 80 Milliarden Euro an Subventionen schieben deutsche Verbraucher mit der EEG-Umlage vor sich her, die bis 2030 abbezahlt werden müssen. Von den 3,5 Cent, die jeder von uns pro Kilowattstunde Ökostrom als Umlage bezahlt, fließen etwa 40 Prozent in die Fotovoltaik, obwohl diese Technologie nur 12 Prozent der erneuerbaren Energien ausmacht. Denn auch wenn die gut 17 Gigawatt Solarleistung auf dem Papier nach viel klingen und durchaus einen beträchtlichen Anteil der in Deutschland je nach Jahres- und Tageszeit erforderlichen bis zu 73 Gigawatt decken könnten: Nachts scheint die Sonne nun mal nicht – und bei Bewölkung ist die Ausbeute ebenfalls erheblich geringer, als die Wattzahl des Moduls suggeriert.

Der tatsächliche Beitrag von Solarstrom zu einer nachhaltigen Energieversorgung ist also nach wie vor bescheiden. Ob sich das bessern wird, hängt von vielen Faktoren ab. Eine Roadmap der Unternehmensberatung Roland Berger für den Bundesverband Solarwirtschaft geht davon aus, dass bis 2020 Fotovoltaikmodule mit einer Nennleistung von 52 bis 70 Gigawatt in Deutschland installiert sein werden. Das scheint angesichts fallender Preise asiatischer Massenmodule durchaus realistisch. Die Rechnung geht aber nur auf, wenn die Solarstromerzeugung mit dem Verbrauch in Einklang gebracht werden kann: durch den Ausbau von Stromspeichern aus Wasserstoff, Druckluft oder großen Akkumulatoren sowie durch ein intelligentes Verteilernetz (*Smart Grid*), das elektrische Verbraucher wie Waschmaschinen erst startet, wenn die Sonne scheint. Beides hinkt dem Fotovoltaikausbau noch hinterher und muss forciert werden, soll der Solarboom energiewirtschaftlich sinnvoll werden.

»Waschmaschinen, die erst bei Sonnenlicht starten«

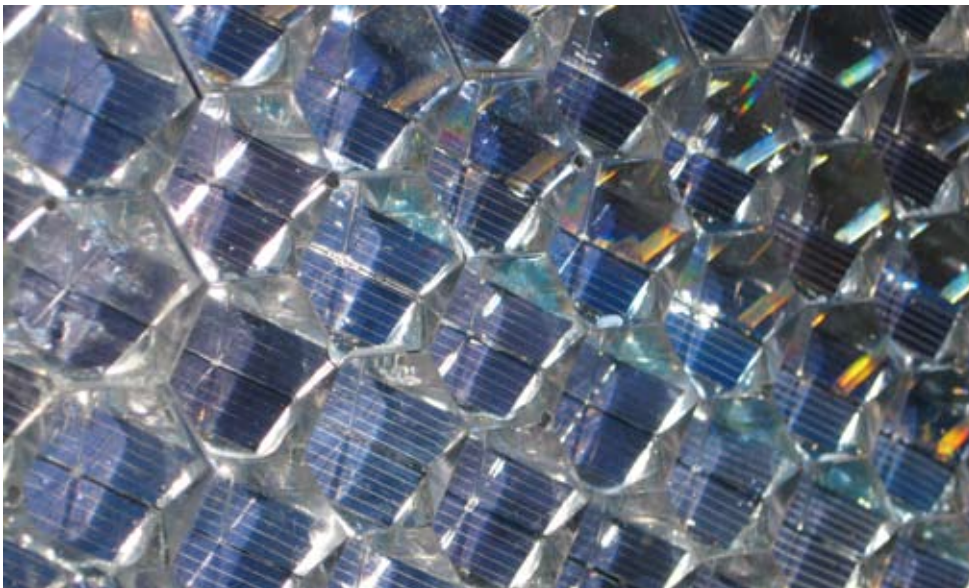
AUF EINEN BLICK

MIT TANDEM- UND KONZENTRATORZELLEN

1 Die Solarenergie wird eine wichtige Rolle bei der Energieversorgung der Zukunft spielen. Deutschland ist beim Ausbau der **Fotovoltaik** derzeit führend; Länder wie USA und China werden aber in den nächsten Jahren vorbeiziehen, wobei China als Produzent von Solarmodulen den Markt dominieren wird.

2 Solarzellen bieten noch großes Verbesserungspotenzial. Vor allem so genannte **Tandem- und Konzentratorzellen** treiben den **Wirkungsgrad** nach oben, auch an die Nanotechnologie knüpfen sich Hoffnungen.

3 Neben der Fotovoltaik werden sich **solarthermische Großkraftwerke** etablieren, weil diese Wärme speichern und damit nachts Strom liefern können. Ob das ambitionierte Desertec-Projekt Realität wird, ist freilich noch eine offene Frage.



Fotovoltaik nach dem Bienenwabenprinzip: Diese neuartigen Solarzellen namens »BeeHive PV« der jungen israelischen Firma SolarOr sollen einmal Glasfassaden von Gebäuden bedecken. Jede der doppelt acrylverglasten sechseckigen Zellen enthält eine Siliziumzelle, auf die Sonnenlicht 2,5-fach verstärkt gelenkt wird. Ein Quadratmeter dieser Panels produziert mit einem Wirkungsgrad von 14 Prozent etwa 140 Watt.

Deutschland allein wird das Weltklima aber nicht retten. Es kommt vielmehr darauf an, welche Entwicklung die Branche auf anderen Kontinenten nimmt. Und da sind die Aussichten tatsächlich sonnig. Vor allem die beiden größten Luftverpester USA und China haben den Zubau von Solarkraftwerken inzwischen massiv hochgefahren. 2010 lag die neu installierte Leistung in diesen Ländern jeweils bei etwas über einem Gigawatt. Voraussichtlich in drei Jahren werden beide Staaten Deutschland beim Bau neuer Anlagen überholen.

Laser steigern den Wirkungsgrad

Eicke Weber vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (siehe Interview S. 72), glühender Befürworter der Fotovoltaik, war selbst überrascht von einer Prognose von Fotovoltaikmodulherstellern anlässlich der Messe Intersolar 2011 in San Francisco. Demnach rechnet die Branche jährlich mit bis zu 200 Gigawatt an neuen Modulen um 2020. Damit würde die Menschheit geradezu mit Riesenschritten ins Solarzeitalter marschieren. Kombiniert man diese Anlagen etwa mit Pumpspeicherkraftwerken – und gerade China dürfte wenig Skrupel haben, auch weiterhin Dörfer umzusiedeln und ganze Landstriche unter Wasser zu setzen –, könnte das in der Tat die lang ersehnte Energiewende bedeuten.

Ob das auch eine Wende fürs Weltklima wäre, bleibt umstritten. So verweist Manuel Frondel darauf, dass bisher keine deutsche Fotovoltaikanlage Kohlendioxid eingespart hat. Zum einen entstehen mit jeder Kilowattstunde erzeugten Solarstroms über 100 Gramm des Treibhausgases, weil die Herstellung der Module sehr energieaufwändig ist und dieser Aufwand erst nach Jahren sauberer Stromlieferung abgegolten ist. Zum anderen führt die massive Einspeisung von Solarstrom zu fallenden Preisen für Treibhausgas-Verschmutzungsrechte. Für Betreiber von Kohlekraftwerken, vor allem in Osteuropa, ist es jedoch billiger, solche Verschmutzungsrechte zu kaufen, als ihre Kraftwerke zu moder-

nisieren. Nur eine Verknappung von Verschmutzungsrechten parallel zum Ausbau erneuerbarer Energien brächte also die gewünschte Entlastung fürs Klima.

Dennoch: Die politischen Scharmützel um Einspeiseboni und der wirtschaftliche Druck durch asiatische Billigware verdecken mitunter die Tatsache, dass die Fotovoltaik noch erhebliches technologisches Entwicklungspotenzial hat. Während die Kunst der Kohleverbrennung in Dampfmaschinen nach 300 Jahren nun weit gehend ausgereizt ist, hat die Perfektionierung der Fotovoltaik mit Hilfe ernsthafter Grundlagenforschung erst in den letzten Jahrzehnten richtig begonnen.

Manche spektakulären Konzepte wie die Erzeugung von Biosprit direkt aus Sonnenlicht (siehe Kasten S. 76) sind zwar noch mindestens ein Jahrzehnt vom kommerziellen Einsatz entfernt. Doch werden viele kleine Verbesserungen vor allem in der Produktionstechnik in den kommenden Jahren den Wirkungsgrad der Solarzellen in kleinen Schritten hochtreiben. Weil die Kosten der Module weiter sinken, steigt damit die Wirtschaftlichkeit für die Investoren, während gleichzeitig die EEG-Vergütung abnehmen kann.

Allen Konzepten gemeinsam ist, dass bei der Produktion Laser zum Einsatz kommen. So wird das intensive Laserlicht zum wichtigsten Werkzeug für die Fotovoltaikforscher – etwa bei folgenden Verfahren:

➤ **Selektive Emittoren:** Der Emittor, also die sonnenzugewandte Halbleiterschicht einer Solarzelle, sammelt die vom Sonnenlicht erzeugten Elektronen über dünne Leiterbahnen ein. Damit er möglichst gut leitet, wird er mit Phosphoratomen gezielt verunreinigt – der Fachmann spricht von Dotierung. Allerdings sollte die Konzentration der Fremdatome unter den Leiterbahnen höher sein als in der Fläche, die dem Sonnenlicht ausgesetzt ist, weil dort sonst zu viele Ladungsträger verloren gehen. Zu diesem Zweck treibt ein Laser die Phosphoratomene in den Silizium-Halbleiter hinein und reichert den Kristall in einem schmalen Bereich damit an. Der

Apostel der Solarwende

Eicke Weber ist Physiker und Experte für Halbleiterforschung. Seit 2006 leitet er das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg, das größte europäische Forschungsinstitut für Solarenergie. Daneben hat er einen Lehrstuhl für Solare Energiesysteme an der Universität Freiburg inne. Im Interview erläutert Weber, warum er die Solarwende für unausweichlich hält.

Herr Professor Weber, in Deutschland kommt der Atomausstieg jetzt schneller als gedacht. Kann die Solar-technologie die damit entstehende Lücke in der Energieversorgung schließen?

WEBER: Davon bin ich überzeugt. Die Solarenergie kommt aber in erster Linie deshalb, weil wir sowieso eine Energie-wende brauchen. Das hat mit der Kernenergie nur wenig zu tun, sondern hat vor allem zwei Gründe: Zum einen gibt es momentan zwar noch genug Erdöl, doch die Schere zwischen Bedarf und Förderung geht immer weiter auseinander; fossile Energiequellen können den Bedarf nicht mehr decken. Außerdem wird das Klima durch die CO₂-Freisetzung instabil, wir leben sozusagen in einem permanenten künstlichen Vulkanausbruch. Eine Umstellung auf nachhaltige Energiesysteme ist also unabwendbar, und zwar weltweit. Damit schlagen wir beide Fliegen mit einer Klappe.

Sie sind gewissermaßen von Amts wegen ein Verfechter der Sonnenenergie, insbesondere der Fotovoltaik, die an Ihrem Institut maßgeblich entwickelt wurde. Kritiker bemängeln aber, dass gerade die Fotovoltaik die teuerste Form der nachhaltigen Stromerzeugung ist.

WEBER: Es stimmt natürlich, dass viele Fördermittel insbesondere aus dem Erneuerbare-Energien-Gesetz in die Fotovoltaik geflossen sind. Allerdings ist das auch die Technologie mit dem meisten Potenzial. Das gilt für die Verfügbarkeit von geeigneten Flächen ebenso wie für die technologischen Fortschritte, die gerade in den Labors heranreifen und noch große Verbesserungen beim Wirkungsgrad versprechen. Die beeindruckende bisherige Lernkurve bezeugt das.

Was meinen Sie damit?

WEBER: Üblicherweise zeigen Grafiken den Preisverlauf pro Watt Spitzenleistung über die Jahre. Die Preise der Module fallen ständig – sie sind umso stärker gesunken, je mehr neue Anlagen gebaut wurden. Wenn die Prognosen stim-

men, die ich kürzlich von einigen Herstellern auf der Inter-solar-Messe in San Francisco gehört habe, steht uns der richtige Boom erst noch bevor. 100 Gigawatt werden allein bis zum Jahr 2020 neu hinzukommen, manche reden sogar von 200 Gigawatt. Insgesamt wären dann weltweit rund 600 Gigawatt Leistung installiert. Das führt zu so niedrigen Preisen, dass Sie Module als Massenware quasi im Supermarkt kaufen können.

Welchen Anteil hätte die Fotovoltaik dann 2020 an der gesamten Energieversorgung?

WEBER: Derzeit beträgt der globale elektrische Leistungsbedarf rund 16 Terawatt (16 000 Gigawatt). Bis 2050 wird er auf 30 Terawatt steigen, weil die Schwellenländer deutlich zulegen werden. Pessimistisch kalkuliert wird die Fotovoltaik dazu zehn Prozent beisteuern, das wären also drei Terawatt. Dafür müssen wir Solarmodule mit zwölf Terawatt installieren, denn seine Spitzenleistung erzeugt ein Modul nur unter optimaler Sonneneinstrahlung, und es kann auch sein, dass überschüssiger Strom gerade nicht gebraucht wird. 12 000 Gigawatt bis 2050 schaffen wir locker, wenn es bis 2020 schon 600 Gigawatt sind und die Produktionskapazitäten weiter exponentiell wachsen. Ich glaube sogar an einen Fotovoltaikstromanteil von 30 bis 40 Prozent bis 2050. In Deutschland könnte das zusammen mit den anderen regenerativen Energiequellen zu einer 100-prozentig nachhaltigen Stromerzeugung reichen.

Dann wird Deutschland aber nicht mehr der größte Markt für Fotovoltaik sein.

WEBER: Da haben Sie Recht. Noch baut Deutschland mehr Solaranlagen als jedes andere Land. 2010 kamen 7,4 Gigawatt neu hinzu, insgesamt waren es in Deutschland Ende 2010 rund 18 Gigawatt, weltweit 40 Gigawatt. Das ändert sich zurzeit. Während die Zunahme in Deutschland in etwa gleich bleiben wird, explodiert sie in anderen Ländern geradezu. Die USA und China werden noch in diesem Jahr die Schwelle von einem Gigawatt überschreiten, in drei Jahren



FRAUNHOFER ISE

Professor Eicke Weber studierte Physik an der Universität Köln, wo er auch promovierte und habilitierte. Forschungsaufenthalte führten ihn in die USA sowie nach Schweden. Danach forschte er 23 Jahre in den USA, zuletzt als Professor an der University of California in Berkeley, wo er Materialwissenschaften lehrte.

werden sie uns überholen. Gerade das chinesische Engagement ist erfreulich. Die Regierung fördert dort den Ausbau mit erheblichen Subventionen und setzt damit ein Zeichen für eine echte Energiewende.

Deutsche Hersteller von Fotovoltaikmodulen fallen immer weiter zurück: Unter den Top 20 ist nur noch eine deutsche Firma, aber sieben chinesische. Macht Ihnen die Schwemme billiger Fotovoltaikmodule aus China Sorgen?

WEBER: Nein. 2010 wurden in Deutschland Fotovoltaikmodule mit sieben Gigawatt Leistung installiert, nur 2,5 Gigawatt kamen aus Deutschland. Man muss das so sehen: Ohne die billigen Module aus China gäbe es gar keinen Boom, weder in Deutschland noch weltweit. Außerdem sind deutsche Firmen nach wie vor gut im Geschäft, insbesondere die Hersteller von Produktionsstraßen. Chinesische Fotovoltaikmodule werden vorwiegend mit deutschen Maschinen gefertigt, weil diese bessere Haltbarkeit und höhere Energieausbeute ermöglichen. Wir müssen in Deutschland allerdings darauf achten, dass wir weiterhin die Technologieführerschaft behalten. Und das geht nur mit konstant kräftigen Investitionen in Forschung und Entwicklung.

Invented in Germany, made in China – ist das also die Zukunft der Solarbranche?

WEBER: So einfach ist das nicht. Das beste Beispiel ist Concentrix, eine Ausgründung aus dem Fraunhofer ISE. Das Unternehmen baut Solarzellen mit vielen gestapelten Halbleiterschichten, die ein breiteres Spektrum von Lichtwellenlängen in Strom umwandeln können. 2009 hatte mein Institut damit einen Weltrekordwirkungsgrad von über 40 Prozent aufgestellt, inzwischen allerdings haben amerikanische Kollegen die Nase vorn. In Freiburg gibt es eine Produktionsanlage für 30 Megawatt pro Jahr. Concentrix wurde mittlerweile von der französischen Soitec gekauft, die mit unserer Technologie in San Diego, USA, das mit 150 Megawatt weltgrößte Fotovoltaikkraftwerk bauen

wird. Deutsche Technologie setzt also weltweit Standards, und davon profitieren auch viele Arbeitsplätze hier zu Lande.

Einen Nachteil haben aber auch die Concentrix-Module: Sie produzieren nachts keinen Strom.

WEBER: Zunächst einmal: Ich garantiere Ihnen, dass morgen früh die Sonne aufgeht – wie an jedem Tag. Ob morgen früh der Wind weht, kann Ihnen dagegen niemand sicher sagen. Damit ist Solarenergie planungssicherer als Windenergie. Außerdem wird der meiste Strom tagsüber verbraucht. Die Lücke zwischen Angebot von Solarstrom und Nachfrage aus dem Netz ist also nicht so groß, wie immer behauptet wird. In der Tat müssen wir aber über Speichermöglichkeiten nachdenken. Ich denke etwa an die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyseuren, an der mein Institut arbeitet, oder an die Redoxflow-Batterie, die am Fraunhofer Institut für Chemische Technologie in Pfinztal entwickelt wird.

Und welche Rolle spielen solarthermische Großkraftwerke?

WEBER: Für solarthermische Kraftwerke ist die Lernkurve nicht so günstig. Die Technologie ist weitgehend ausgereift und wird nicht mehr deutlich unter einen Preis von vier Euro pro Watt installierter Leistung kommen. Damit ist sie deutlich teurer als Fotovoltaik, die schon unter einen Euro pro Watt gefallen ist. Andererseits sind solarthermische Kraftwerke mit Salzspeicher, die ja auch nachts Strom liefern können, preiswerter als elektrische Speicher. Deshalb halte ich Pläne zum Bau von solarthermischen Kraftwerken in Südspanien oder Nordafrika, wie es das Desertec-Konzept vorsieht, für eine gute Ergänzung. Fotovoltaik am Tag, Solarthermie in der Nacht – das wäre ein interessantes Geschäftsmodell. ~

Die Fragen stellte **Bernd Müller**, freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Bonn.

selektive Emittter steigert den Wirkungsgrad einer kristallinen Solarzelle um bis zu 0,5 Prozentpunkte, bei heute üblichen Zellen also auf rund 16,5 Prozent. Derartige Solarzellen sind bereits am Markt.

► Ein anderes Konzept verfolgen das Institut für Solarenergieforschung in Hameln und das Fraunhofer ISE. Sie verlegen die Emittterkontakte auf die Rückseite, weil sich dadurch die Fläche zum Energieeinfang vergrößert. Wer eine Solarzelle näher betrachtet, sieht die feinen Bahnen, die die elektrischen Ladungsträger ableiten. Doch wird davon ein Teil der Halbleiterschicht verdeckt, der damit keinen Beitrag zur Stromerzeugung leistet. Daher sollen nun winzige leitende Löcher im Siliziumsubstrat dafür sorgen, dass die Ladungsträger von der Vorderseitenachhinterfließen, wosieeingesammelt werden. Um die Wege möglichst kurz zu halten, bedarf es vieler Löcher, mindestens eines pro Quadratmillimeter. Bei Zellen mit etwa 15 Zentimeter Kantenlänge sind das über 20 000 Löcher, die ein gepulster Infrarotlaser in Sekundenschnelle bohrt. Der Lohn: Der Flächenverlust durch die Löcher beträgt weniger als ein Prozent.

Allerdings verbessern solche Maßnahmen den Wirkungsgrad teilweise nur um einige Zehntelprozentpunkte. Damit dieser einen richtigen Sprung macht, müssen andere Konzepte her. Eine naheliegende Methode sind so genannte Konzentratorsolarzellen, bei denen Linsen das Sonnenlicht auf den Halbleiter bündeln. Das spart Material und Kosten. Im Jahr 2015 sollen weltweit solche Anlagen mit einer Leistung von einem Gigawatt ans Netz gehen – noch vergleichsweise wenig. Dennoch ist das langfristige Potenzial dieses Zellen-

»Zellen mit Schichten aus Nanokristallen wären billiger «

typs hoch, vor allem in sonnenreichen Gegenden, weil konzentrierende Solarzellen bei starker Einstrahlung besonders wirtschaftlich sind.

Ihr ganzes Potenzial schöpfen konzentrierende Solarzellen aber erst als Tandemsolarzellen aus. Herkömmliche Module haben die schlechte Eigenschaft, nur einen Ausschnitt aus dem Wellenlängenspektrum des Sonnenlichts – nämlich den langwelligen Anteil – in Strom umwandeln zu können: Die beste Ausbeute lässt sich bei Wellenlängen um 1000 Nanometer erzielen, also mit infrarotem Licht. Die Energie, die im kurzwelligen Teil des Spektrums steckt, verpufft demnach ungenutzt. Nun kann eine einzelne Solarzelle niemals das gesamte Lichtspektrum abdecken. Stapelt man jedoch mehrere Zellen zu einem Sandwich und optimiert jede Schicht auf eine bestimmte Wellenlänge, steigt die Ausbeute rapide an.

Die übliche Bezeichnung »Tandemsolarzelle« untertreibt sogar, denn in der Regel liegen gleich drei Zellen übereinander. Auf diese Weise lässt sich mehr Energie des Sonnenlichts nutzen. Eine Tandemzelle mit einem 400-fachen Konzentrator des US-Herstellers Solar Junction erzielte kürzlich einen Weltrekordwirkungsgrad von 43,5 Prozent. Die Zelle ist nur 5,5 mal 5,5 Millimeter groß, sammelt aber mit einer Linse das Licht einer 400-mal größeren Fläche ein. 2011 sollen die ersten, noch teuren Zellen ausgeliefert werden. Billiger könnten die Zellen werden, wenn man statt herkömmlicher dünner Schichten nun Ebenen aus Nanokristallen übereinanderstapelt. Über die Größe der Kristalle ließe sich die Empfindlichkeit für verschiedene Wellenlängen des Lichts

Sauber, aber nicht rein

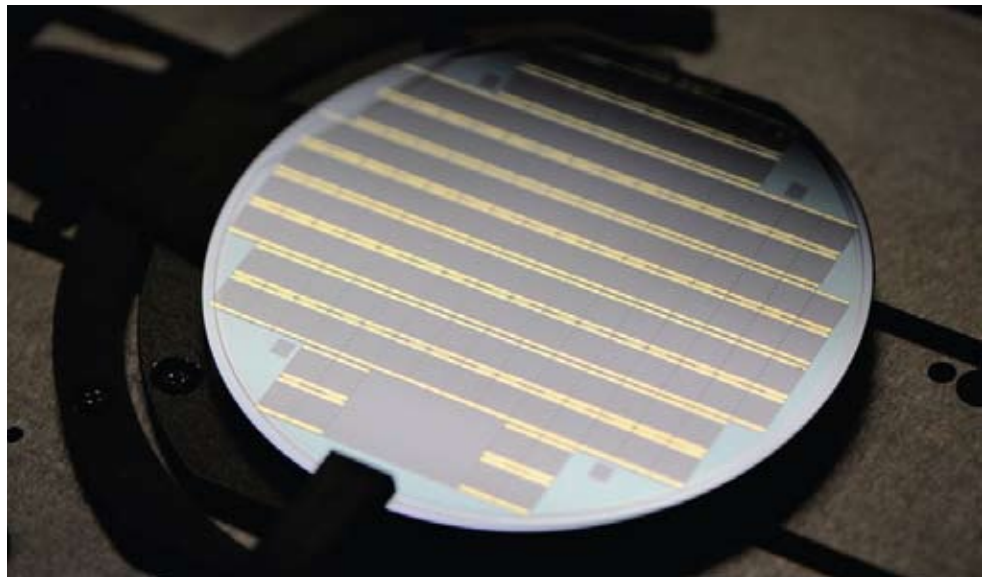
Die Solarenergie gilt als besonders umweltfreundliche Technologie. »Solarzellen haben keinen Schornstein«, lautet ein Werbespruch der Branche. Leider gibt es aber doch einen unsichtbaren Schornstein, aus dem einiges an Kohlendioxid kommt. Die Herstellung der Zellen ist nämlich sehr energieintensiv, und den Strom dafür beziehen die Fabriken meist aus dem öffentlichen Netz. Damit schleppt die Produktion auch alle Emissionen mit sich, die bei der Erzeugung der entsprechenden Elektrizitätsmenge anfallen. Und da der deutsche Strommix immer noch hauptsächlich aus Kohle und Gas stammt, schlägt das erheblich zu Buche.

Fairerweise muss man sagen, dass sich die energetische Amortisationszeit – die Zeit, in der die Solarzelle die bei der Produktion aufgewandte Energie wieder erzeugt hat – in den letzten fünf Jahren halbiert hat. Sie beträgt nun 6 bis 36 Monate, je nach Bauart und Standort. Entsprechend hat sich auch der CO₂-Ausstoß halbiert. Entscheidender Hebel ist der Materialeinsatz, denn die Halbleiter benötigen viel Energie bei der Herstellung. Dünnschichttechnologien, die mit weniger Halblei-

termaterial auskommen, haben aber auch hier Fortschritte gebracht.

Weitere Diskussionen gibt es immer wieder über die Gefahr durch Giftstoffe in Solarzellen. Module aus Silizium enthalten keine Schwermetalle, mittlerweile sind selbst die Lötstellen überwiegend bleifrei. Anders bei den immer beliebteren, weil billigen Kadmiumtellurid-Zellen. Sie enthalten das giftige Kadmium, allerdings in gebundener und laut Marktführer First Solar damit unschädlicher Form. Der Siliziumkonkurrenz ist es allerdings ein Dorn im Auge, dass die eigentlich strenge RoHS-Verordnung (*Restriction of hazardous substances*), in der die Europäische Union Schwermetalle in elektronischen Geräten verbietet, ausgerechnet bei Solarzellen eine Ausnahme macht. Damit werde eine ganze Branche in Misskredit gebracht. First Solar kontert mit einer Recyclinganlage in Frankfurt an der Oder. Weil Solarmodule mindestens 20 Jahre halten, wird erst im kommenden Jahrzehnt mit einer Zunahme der Recyclingmenge gerechnet. Doch ob dann noch alle Besitzer wissen, was sie vor 20 Jahren aufs Dach geschraubt haben und wie man das entsorgt?

Weltrekord bei der Stromerzeugung: 43,5 Prozent Spitzenwirkungsgrad erzielte die kalifornische Firma Solar Junction mit marktfähiger lichtkonzentrierter Fotovoltaik (*concentrated photovoltaics*, CPV). Jede Zelle misst rund 30 Quadratmillimeter und fokussiert das Sonnenlicht um das 400-Fache.



SOLAR JUNCTION

einstellen. Der Herstellungsprozess wäre dann einfacher und billiger.

In den Labors von David Norris, Professor vom Department für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der ETH Zürich, schaffen solche einzelnen Nanosolarzellen heute Wirkungsgrade von drei Prozent – noch viel zu wenig für eine kommerzielle Anwendung. Doch Norris ist davon überzeugt, dass zehn Prozent bald erreichbar werden, in Kombination mit herkömmlichen Tandemzellen auch mehr. Größtes Problem: Alle bislang verwendeten Materialien sind selten und giftig. Deshalb will der Chemiker jetzt Nanokristalle aus harmlosen Kolloiden züchten.

Die Nanotechnologie gilt ohnehin als ein Schlüssel für die Solarzellen der Zukunft. Mit winzigen Strukturen, deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichts, soll sich die Umwandlung gezielt beeinflussen lassen – auf ganz unterschiedlichen Wegen.

Bevor David Norris im März 2010 an die ETH kam, arbeitete er an der University of Minnesota. Mit seinem Team veröffentlichte der Chemiker dort eine viel beachtete Arbeit im Wissenschaftsmagazin »Science«, die einen weiteren Weg zu effizienteren Solarzellen weist. Darin beschäftigt er sich mit so genannten heißen Elektronen. Wie erwähnt funktioniert die Solarstromgewinnung nur mit Licht passender (langer) Wellenlänge effektiv. Ist die Wellenlänge kürzer, entstehen zwar auch Elektronen, aber die haben eine Extraportion Energie, sind also »heiß«, wie die Physiker sagen. Diese Ladungsträger kühlen sich innerhalb von wenigen billionstel Sekunden ab und heizen damit das Solarmodul auf. Das drückt den Wirkungsgrad merklich.

In dem »Science«-Artikel beschreibt Norris eine Methode, die Elektronen so lange heiß zu halten, bis sie den Halbleiter verlassen haben. Dazu nutzte das Team Nanostrukturen aus Bleiselenid in Kombination mit einer Schicht aus Titandioxid. Dieser Trick vergrößert die so genannte Bandlücke, das heißt den energetischen Abstand, den ein La-

dungsträger im Halbleitermaterial überwinden muss. Die höhere Hürde spornt die Elektronen quasi dazu an, ihre Energie zu behalten, um die Barriere zu überwinden. Die so genannte Hot Silicon Cell wäre die ultimative Solarzelle. David Norris: »Für diesen Zelltyp liegt die theoretische Grenze des Wirkungsgrads bei 66 Prozent.«

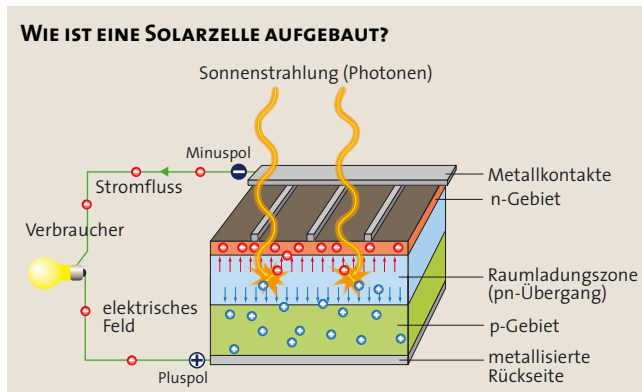
Die Vereinigung von Solarthermie und Fotovoltaik

Ein auf den ersten Blick etwas umständliches Konzept, das ebenfalls ein breites Spektrum des Sonnenlichts nutzen kann, ist die thermische Fotovoltaik. Sie vereint gewissermaßen Solarthermie mit Fotovoltaik. Konzentriertes Sonnenlicht trifft auf eine Wolframoberfläche und erhitzt sie, bis sie glüht. Eine Solarzelle fängt das Glühlicht auf und erzeugt daraus Strom. Durch Strukturieren der Oberfläche kann man die Wellenlänge des ausgesandten Lichts so einstellen, dass sie möglichst gut mit dem empfindlichen Bereich der Solarzelle übereinstimmt. Das Konzept ist seit den 1960er Jahren bekannt; solche Module kann man bereits kaufen, doch die Wirkungsgrade sind schlechter als bei herkömmlichen Solarzellen. Das klingt zunächst logisch, weil dieses Konzept den Umweg über das Erhitzen des Wolframs nehmen muss. Der Eindruck täuscht jedoch, denn theoretisch sind fast 85 Prozent Wirkungsgrad möglich, weil die Wellenlänge vieler Photonen des Sonnenlichts, die sonst verloren gingen, in das passende Wellenlängenfenster transformiert werden. Nanomaterialien sollen jetzt wiederum helfen, die Wellenlänge des Glühlichts noch besser zu justieren. Thermische Fotovoltaik hätte dort Vorteile, wo Abwärme zum Vorheizen zur Verfügung steht, etwa in fossilen Kraftwerken oder Industrieanlagen, und zur dezentralen Stromerzeugung auf engstem Raum.

Viel niedriger, nämlich bei 1,3 Prozent, liegt der Wirkungsgrad der Papiersolarzellen, die Forscher der Universität Chemnitz hergestellt haben. Spezielle Druckerfarben wandeln das Sonnenlicht in Strom um, für Druck und Papier

nutzt das Team herkömmliche Techniken und Materialien. Weitere Forschungsarbeiten sollen den Wirkungsgrad auf fünf Prozent steigern. Dank der billigen Produktion wäre dann sogar eine Lebensdauer von unter einem Jahr wirtschaftlich – Solarzellen würden zur Wegwerfware.

Mutter Natur hat dieses Prinzip längst perfektioniert. Blätter sind im Prinzip Solarzellen, die einen Sommer lang Biomasse erzeugen und dann im Herbst entsorgt werden. Den Pendants aus Menschenhand, selbst den Papersolarzellen aus Chemnitz, sind sie allerdings weit unterlegen. Rund elf Prozent beträgt der Wirkungsgrad einer Siliziumsolarzelle,



wenn man – analog zur Fotosynthese – noch eine chemische Speicherung mittels Elektrolyse und anschließender Verbrennung des Wasserstoffs hinzurechnet. Pflanzen schaffen übers Jahr gerechnet weniger als ein Prozent.

Sowohl für Blätter als auch für Solarzellen gilt: Wenn die Sonne nicht scheint, entsteht weder Biomasse noch Strom. Deshalb wird intensiv an Speichern für elektrische Energie geforscht, die einen Überschuss vom Tag für die Nacht vorhalten. Doch die Speicher sind entweder noch nicht ausgereift wie die Redoxflow-Batterie des Fraunhofer ICT in Pfalzthal oder Druckluftspeicher in unterirdischen Höhlen, oder sie sind ökologisch umstritten wie Pumpspeicherkraftwerke in den Bergen. Viel einfacher ist die Speicherung in solarthermischen Kraftwerken, auf denen große Hoffnungen ruhen. Fußballfeldergroße Spiegel konzentrieren das Sonnenlicht und erhitzen eine Flüssigkeit, die eine Dampfturbine antreibt. Zwei Bauweisen gibt es: Entweder konzentrieren Parabolspiegel das Sonnenlicht auf eine Röhre vor dem Spiegel, durch die Öl fließt, oder flache Spiegel erhitzen flüssiges Salz in der Spitze eines Turms.

Strom aus Licht: Treffen Photonen auf Schichten von Silizium, gelangen elektrische Ladungen in einen Stromleiter.

Sonne im Tank

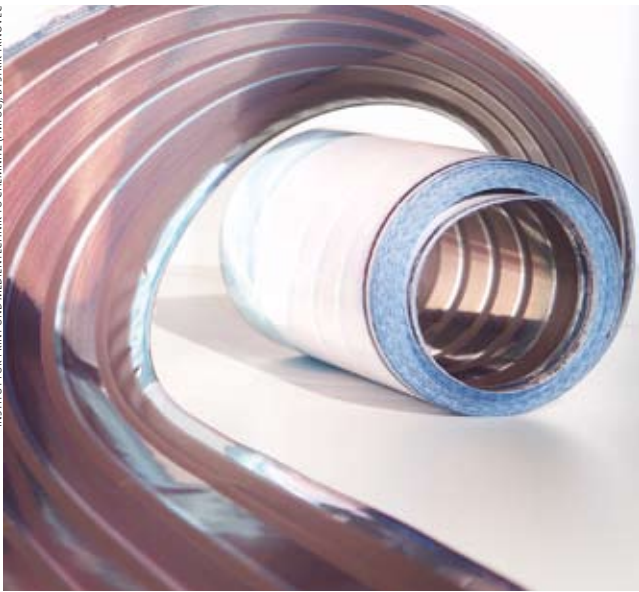
Wärme oder Strom – aus Sonnenlicht lässt sich mittels Solarkollektoren beziehungsweise Fotovoltaikzellen beides erzeugen. Doch es gibt noch eine dritte Möglichkeit, an der intensiv geforscht wird: die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in Biomasse. Das klingt nach Alchemie und ist im Grunde doch nichts anderes als das, was Pflanzen in ihren Blättern machen. Die künstliche Fotosynthese ist eines der faszinierendsten Projekte in der Solarforschung, weil man damit Biotreibstoff herstellen könnte – ohne den Umweg über Pflanzen, die wertvolle Ackerflächen blockieren und einen immensen Aufwand an Bewässerung und Düngung erfordern.

Ein interessantes Konzept verfolgt Aldo Steinfeld, Professor für erneuerbare Energieträger an der ETH Zürich und Leiter des Labors für Solartechnik am Paul Scherrer Institut (PSI). Er hat einen Solarreaktor gebaut, der Wasser und Kohlendioxid in ein Synthesegas aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid umwandelt, das als Vorstufe zur Synthese von Benzin, Kerosin und anderen flüssigen Treibstoffen dienen kann. Weil das Kohlendioxid der Luft entzogen wird, ist die CO₂-Bilanz bei der Herstellung und Verbrennung neutral. Die flüssigen Treibstoffe lassen sich speichern und verschiffen, etwa aus sonnenreichen Regionen, wo heute Erdöl gewonnen wird.

Der Züricher Solarreaktor hat eine Leistung von 2000 Watt. Er konzentriert das Sonnenlicht 1500-fach und heizt das Reaktionsgefäß auf 1500 Grad Celsius. Das Gefäß enthält Ceriumoxid,

das bei dieser enormen Hitze Sauerstoffatome abgibt. In einem zweiten Schritt bei 900 Grad reagieren CO₂ und Wasserdampf mit dem reduzierten Ceriumoxid. Dieses kehrt durch den frei werdenden Sauerstoff wieder in seinen Ausgangszustand zurück, der Kreisprozess beginnt von Neuem. Aus einer Öffnung im Boden des Reaktors fließen das Synthesegas sowie reiner Sauerstoff. »Dank der hohen Temperaturen kann man mit hohen Reaktionsgeschwindigkeiten solare Treibstoffe herstellen«, so Steinfeld. Doch vom Labor zur industriellen Großanlage ist es wie immer ein weiter Weg. Erst 2020 werde man einen Megawattsolarreaktor in einem Solarturmkraftwerk bauen können.

Anderes Konzept, anderer Sprit, selbe Hochschule: Professor Hyung Gyu Park interessiert sich für Wasserstoff, der einmal Brennstoffzellenautos antreiben soll. Die übliche Elektrolyse, bei der Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt wird, ist nur mit Solarstrom umweltfreundlich und obendrein verlustreich, weil schon die meiste Sonnenenergie in der Solarzelle verloren geht – der anschließende elektrochemische Prozess kostet ebenfalls Wirkungsgrad. Deshalb will Park mit Sonnenlicht direkt Wasserstoff produzieren. Der Forscher untersucht dazu Nanomaterialien, zum Beispiel Kohlenstoffnanoröhrchen, die er mit Sonnenlicht bestrahlt. Damit könnten sich die Bindungen im Wassermolekül knacken lassen, so die Hoffnung. Eine großtechnische Umsetzung liegt allerdings noch in weiter Ferne.



Bunte Solarzellen auf Papier: Um Strom zu erzeugen, drucken Forscher der Technischen Universität Chemnitz Farben mit elektrischen Eigenschaften auf Standardpapier.

Beide Typen können auch bei Dunkelheit Strom liefern – wenn sie mit einem Salzspeicher ausgerüstet sind. Das erste solarthermische Kraftwerk mit einem Wärmespeicher ist Andasol 1, das 2008 in Südspanien in Betrieb ging. Es misst 1300 mal 1500 Meter und arbeitet nach dem Parabolrinnenprinzip. Vor den stark gekrümmten Spiegeln führen lange Rohre vorbei, durch die Öl zirkuliert. Das auf 400 Grad Celsius erhitzte Öl kann durch einen Salzspeicher geleitet werden, der Wärme für über sieben Stunden Vollastbetrieb aufnehmen kann. Damit eignen sich solarthermische Kraftwerke wie Andasol 1 zur Deckung der Grundlast wie Kern- oder Kohlekraftwerke und wären ein wichtiger Baustein in der Strategie zum Ausbau erneuerbarer Energien. In Europa ist Spanien Vorreiter für diese Technologie, allerdings mit kräftiger Unterstützung durch die in Deutschland entwickelte Technik. Ebenfalls auf Solarkraftwerke setzen die USA. Jedoch ist für das mit 1000-Megawatt größte Solarkraftwerk, dessen Bau gerade im kalifornischen Blythe begonnen hat, kein Salzspeicher vorgesehen. Es liefert also nur tagsüber Strom.

Auch die Bundesregierung bekennt sich zum Bau solarthermischer Großkraftwerke, aber nicht im dicht besiedelten Deutschland, denn dafür ist hier kein Platz. Das Riesenkraftwerk in Blythe beansprucht eine Fläche von 27,5 Quadratkilometern – ein derartiger Flächenverbrauch wäre hier zu Lande nicht durchsetzbar. Er wäre auch sinnlos, weil ein solches Kraftwerk im mitteleuropäischen Schmuddelwetter nie die gleiche Leistung brächte wie in Kalifornien oder Spanien.

Angesichts dieser Anforderungen ist es kein Wunder, dass vielen Experten sofort Afrika in den Sinn kommt. Wolkenloser Himmel und unbewohnte Wüsten im Überfluss – Nordafrika wäre als Standort für Solarkraftwerke ideal. In Ägypten strahlt die Sonne dreimal so lange und intensiver als in Deutschland, das mit 1550 Stunden pro Jahr nicht gerade verwöhnt ist. Die Entfernungen wären zudem relativ kurz und ließen sich mittels Hochspannungsgleichstromübertragung über große Strecken verlustarm überbrücken. Oder man er-

zeugt mit dem Strom in so genannten Elektrolyseuren Wasserstoff und verschifft diesen in Tankern nach Europa.

Diese Vision beflügelt das Desertec-Projekt, das in den letzten Jahre Aufsehen erregt hat. Die Desertec Industrial Initiative GmbH stützt sich auf Szenarien des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, die bis 2050 einen Anteil des Wüstenstroms in Europa von 15 Prozent des Gesamtstrombedarfs für möglich halten. Neben Begeisterung hagelte es Kritik: Von einer Monopolstellung weniger großer Energieversorger auf Kosten armer Länder Nordafrikas war die Rede, ebenso vom hohen Wasserverbrauch zur Kühlung der Anlagen. Und dann wären da noch die Kosten von schätzungsweise 400 Milliarden Euro bis zur Mitte des Jahrhunderts.

Mittlerweile ist es um das Desertec-Projekt ruhiger geworden. Vor allem deshalb, weil sich der Hauptkritikpunkt der Gegner – die Gefahr unsicherer politischer Zustände in den Ländern Nordafrikas – mit den Bürgerbewegungen etwa in Tunesien und dem Krieg in Libyen schneller bewahrheitete als gedacht. Im Moment wird wohl kein Investor Geld in den nordafrikanischen Wüstensand setzen wollen. Schon gibt es Pläne, Teile von Desertec nach Griechenland zu verlegen und damit Wirtschaftshilfe zu leisten. Andererseits böte Desertec eine ideale Möglichkeit, den Neuaufbau in Nordafrika zu unterstützen und dort wichtige Infrastrukturprojekte zu verwirklichen, etwa die Meerwasserentsalzung. Und Deutschland käme damit seinem Ziel, bis 2050 fast vollständig auf regenerative Energien umzusatteln, zumindest einen großen Schritt näher. ~

DER AUTOR



Bernd Müller hat Physik und Journalistik studiert. Er lebt in Bonn und berichtet seit mehr als 20 Jahren in verschiedenen Medien über Themen aus Wissenschaft und Innovation.

QUELLEN

Hengstenberg, C. (Hg.): Strom aus der Wüste: Welche Chancen bietet das Desertec-Projekt? FastBookPublishing, 2009
Jehle, C.: Photovoltaik – Strom aus der Sonne: Technologie, Wirtschaftlichkeit und Marktentwicklung. C. F. Müller, Heidelberg, 5. Auflage 2009

WEBLINKS

www.solarserver.de und www.solarwirtschaft.de
 Die Portale bieten viele interessante Artikel zur Solarenergie.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124697

Grüne Welle für den Laser

Mobile elektronische Geräte werden immer kleiner. Dennoch sollen sie großformatige Bilder erzeugen. Dafür sollen zukünftig Miniatur-Laserprojektoren sorgen. Bislang fehlte dazu jedoch eine entscheidende Voraussetzung: ein echter grüner Laser. Jetzt haben deutsche Forscher den Durchbruch geschafft – exklusiv in »Spektrum« berichten sie, wie es ihnen gelang.

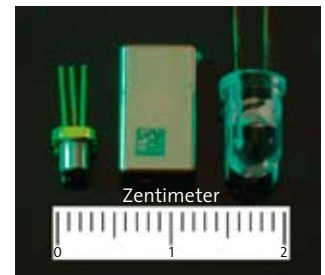
Von Désirée Queren, Adrian Avramescu und Stephan Lutgen

Nach einem Jahrhundert hat die klassische Glühbirne als Leuchtmittel mittlerweile ausgedient und wird derzeit europaweit durch kompakte Leuchtstofflampen ersetzt. Doch diese Energiesparlampen sind wegen ihres Gehalts an umweltschädlichem Quecksilber und des unausgewogenen Lichtspektrums umstritten. Es zeichnet sich bereits ab, dass die noch viel effizientere Lichtproduktion aus Halbleiterkristallen sie schon bald vom Markt verdrängen wird. Heute sind Licht emittierende Dioden, kurz LEDs, aus vielen Anwendungen im Alltag nicht mehr wegzudenken. Jetzt beginnen Leuchtdioden die Lichtindustrie auf Grund ihres geringeren Stromverbrauchs und der langen Lebensdauer zu revolutionieren.

LEDs beruhen auf Halbleiterkristallen, die beispielsweise aus Verbindungen von Aluminium, Gallium und Indium mit Stickstoff oder von Aluminium, Gallium und Arsen mit Phosphor bestehen. Sie senden je nach Materialzusammensetzung Licht unterschiedlicher Wellenlängen aus, vom infraroten über den sichtbaren bis in den ultravioletten Spektralbereich. Anorganische Leuchtdioden treten heute als farbige Lichtquellen in vielen Anwendungen auf, beispielsweise als Scheinwerfer, Rücklicht und Tagfahrlicht im Auto, für die Armaturanzeigen im Auto, in Mobiltelefonen oder Displays.

Doch nicht nur für Beleuchtungszwecke sind Energie sparende Halbleiterlichtquellen das Mittel der Wahl. Ein wichti-

Eine direkt grün emittierende Laserdiode (links) ist effizienter sowie kleiner als ein frequenzverdoppelter Infrarotlaser (Mitte) und eine radial emittierende Leuchtdiode (rechts).



ger gesellschaftlicher Trend strebt nach immer mehr Mobilität bei gleichzeitiger optimierter Bildqualität; damit steigt die Nachfrage nach miniaturisierten Endgeräten wie Smartphones und Tablets, die dennoch große, detailreiche Bilder bieten sollen. Aber wie soll das funktionieren? Die zunehmende Leistungsfähigkeit mobiler Elektronik erlaubt zwar das Aufnehmen und Übertragen von hochauflösenden Digitalfotos und Videos, aber der Zuwachs an Mobilität geht automatisch mit schrumpfenden Displays einher, wenn die Bildgröße und Auflösung von den Maßen des Mobiltelefons bestimmt wird. Für dieses Dilemma zeichnet sich nun eine Lösung in Gestalt hochintegrierter Halbleiterprojektoren ab, die künftig große, fein aufgelöste Bilder liefern werden.

Solche so genannten Pikoprojektoren sind so winzig, dass sie sich ohne Weiteres in Smartphones, Laptops und Digitalkameras einbauen lassen. Zwar könnten theoretisch dabei LEDs als Lichtquellen dienen – doch sie stoßen an Grenzen, wenn es um möglichst geringe Projektorgröße, hohe Auflösung und Effizienz geht. In dieser Hinsicht punkten Halbleiterlaser gegenüber LEDs mit höherer Strahlqualität und Leistungsdichte; außerdem ermöglichen Laser mit ihrem schmalen Emissionsspektrum eine naturgetreuere Wiedergabe von Farben. Wenn man die Strahlen dreier Laser in den Farben Rot, Grün und Blau kombiniert, lässt sich fast der ganze für das menschliche Auge wahrnehmbare Farbraum darstellen.

Wie erzeugt ein Pikoprojektor seine Bilder? Ein winziger, in zwei zueinander senkrechten Achsen beweglicher Mikrospiegel schreibt mit dem Laserstrahl zeilenweise das Bild auf die Projektionsfläche. Wegen der einzigartigen Strahleigenschaften von Lasern ist eine Projektion auf beliebig

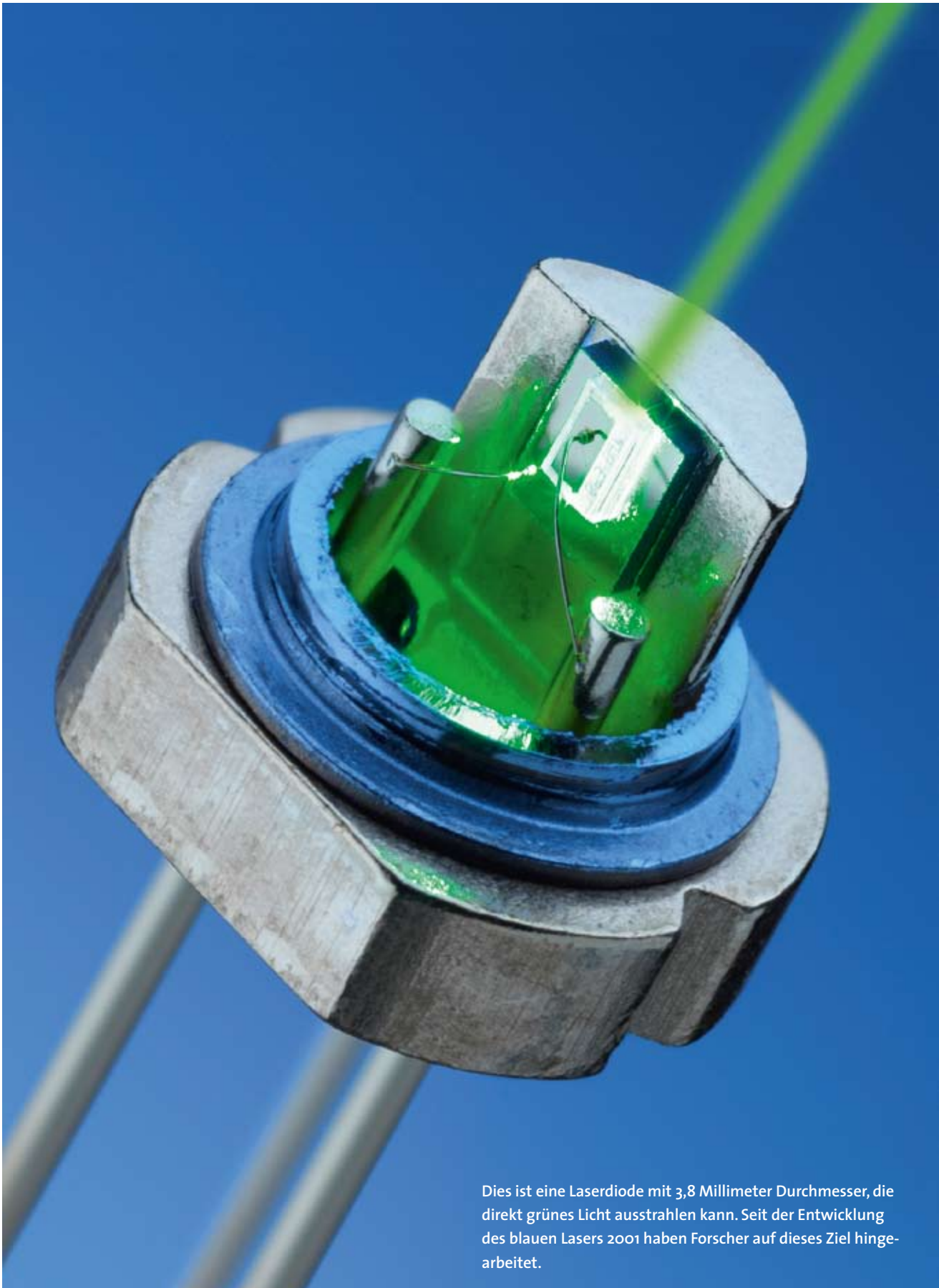
AUF EINEN BLICK

JAGD NACH GRÜNEM LASERLICHT

1 **Pikoprojektoren** sollen demnächst das Betrachten großer Bilder mit kleinen Geräten – beispielsweise Smartphones – ermöglichen. Dafür sind Halbleiterlaser in den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau nötig.

2 Erst seit Neuestem gelingt es mit **aufwändig kontrollierten Epitaxieverfahren**, auch grün emittierende Laserstrukturen zu erzeugen.

3 Mit diesen winzigen Farbprojektoren lassen sich demnächst **lebensgroße Bilder und Filme** an Wohnzimmerwände werfen.



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS

Dies ist eine Laserdiode mit 3,8 Millimeter Durchmesser, die direkt grünes Licht ausstrahlen kann. Seit der Entwicklung des blauen Lasers 2001 haben Forscher auf dieses Ziel hingearbeitet.

gekrümmte Flächen mit großer Tiefenschärfe möglich – ohne dass wie bei konventionellen Projektoren eine spezielle Optik zur Fokussierung nötig wäre.

Satte und scharfe Farbbilder erfordern drei Laser in Rot, Blau und Grün. Das Problem dabei: Bisher sind erst rote und blaue Laser routinemäßig herstellbar. Erste kommerziell verfügbare, nur wenige Kubikzentimeter große Laserprojektoren kombinieren die Strahlen von roten und blauen Laserdioden mit Infrarotlasern, die durch Frequenzverdopplung grünes Licht liefern. Doch frequenzverdoppelte Laser haben im Vergleich zu direkt grün emittierenden Laserdioden entscheidende Nachteile: Sie sind teurer, liefern schlechtere Bildqualität und sind vor allem deutlich größer als direkte grüne Laserdioden aus Indiumgalliumnitrid (InGaN).

Problematische Kristallqualität

Nur ist es leider nicht einfach, InGaN-Laserdioden herzustellen, die grünes Licht emittieren; das gelang erst 2009. Seitdem liefern sich mehrere Forschungs- und Universitätseinrichtungen ein rasantes Kopf-an-Kopf-Rennen mit dem Ziel, die Performance und Prozessstabilität des grünen Lasers großserientauglich zu machen. Sie müssen dabei mehrere Hürden überwinden.

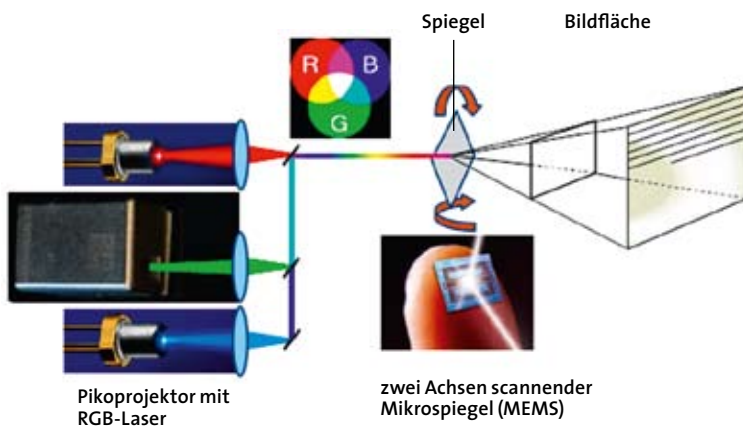
Blaue und grüne LEDs sowie blaue Laserdioden werden durch die so genannte Epitaxie, eine besondere Form der schichtweisen Kristallabscheidung, hergestellt. Das geschieht in speziellen Reaktoren durch Gasphasenabscheidung von vielen perfekt einkristallinen Halbleiterschichten aus Alu-

minium- oder Indiumgalliumnitrid (siehe Kasten rechts unten).

Um mit diesen Materialien einen grünen Laser zu konstruieren, muss der Indiumgehalt in den Licht aussendenden InGaN-Schichten im Vergleich zum blauen Laser erhöht werden. Doch die veränderte Materialzusammensetzung beeinflusst leider nicht nur die emittierte Wellenlänge, also die Farbe des Lichts, sondern gleichzeitig auch drastisch die Gitteranordnung der Atome im Kristall. Die Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Eigenschaften von Indium- und Galliumatomen.

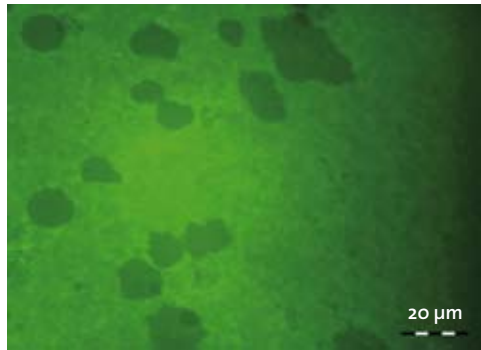
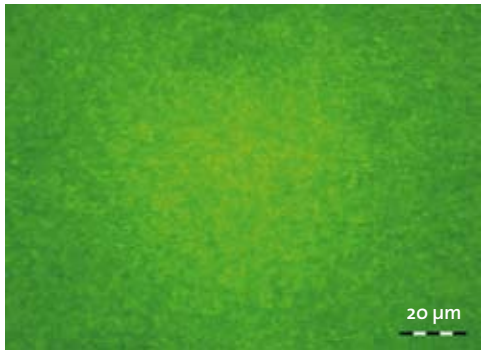
Beim Erhöhen des Indiumanteils im Kristall werden Galliumatome durch Indiumatome auf gleichwertigen Gitterplätzen ersetzt. Indium liegt aber in einer anderen Stelle im Periodensystem der Elemente als Gallium; seine Atome sind daher größer und weisen andere Bindungsverhältnisse auf. Das erschwert den Einbau zusätzlichen Indiums, denn die indiumhaltigen Schichten auf den GaN-Substraten stehen unter Spannung. Wird diese allzu groß, setzen so genannte Relaxationsprozesse die gespeicherte Energie im Kristall frei, was zu Versetzungen – eindimensionalen Kristalldefekten – führt.

Um dennoch einen möglichst regelmäßigen Indiumeinbau in das GaN-Kristallgitter zu erreichen, muss die Abscheidung unter speziellen Wachstumsbedingungen ablaufen – die aber wiederum ihrerseits die Kristallqualität verschlechtern. Beispielsweise muss man die Abscheidetemperatur der Substratoberfläche deutlich reduzieren, da sonst das zu-



Ein heutiger Pikoprojektor kombiniert drei Laserstrahlen in den Farben Rot, Grün und Blau. Ein winziger um zwei Achsen drehbarer Spiegel erzeugt daraus zeilenweise farbige Bilder. Die Schemaskizze (links) zeigt zwischen der roten und blauen Laserdiode ein signifikant größeres Gehäuse für den grünen Strahl. Darin verbirgt sich ein Infrarotlaser, dessen Strahlung nach bisheriger Technik erst durch Frequenzverdopplung in grünes Licht verwandelt wird. Ein echter grüner Laser erlaubt, deutlich kleinere Projektoren herzustellen. Laserprojektoren erreichen ohne zusätzliche Optik sehr gute Tiefenschärfe – selbst auf gekrümmten Projektionsflächen (rechts).





In der Fotolumineszenzaufnahme tauchen in der grün emittierenden Halbleiterschicht (links) nach thermischer Behandlung defekte Bereiche im Material auf (rechts).

nächst an der Oberfläche angelagerte Indium wieder freiwürde. Doch die niedrigere Temperatur hemmt die Beweglichkeit der angelagerten Atome auf der Oberfläche; das begünstigt Punktdefekte und ungleichmäßiges Wachstum. Auf diese Weise werden viele unterschiedliche Defekte in den Kristall eingebaut.

Als unser Team bei der Firma Osram Opto Semiconductors daranging, grüne Laserdioden zu entwickeln, war dies eines der ersten Probleme, die es zu lösen galt. In Fotolumineszenzaufnahmen erscheinen defektreiche, rund 20 Mikrometer (tausendstel Millimeter) große Regionen als dunkle Flecken (siehe Bild oben rechts). Die Defektbereiche produzieren bei optischer Anregung kein Licht und erscheinen daher dunkel gegenüber den Bereichen mit guter Kristallqualität, die grünes Licht emittieren. Da die fehlerhaften Gebiete nicht nur kein Licht aussenden, sondern es sogar absorbie-

ren, verhindern solche Strukturen die Funktion von Laserdioden. Nachdem wir diese Defekte durch eine geeignete Schichtstruktur und optimierte Wachstumsbedingungen vermeiden konnten, stellten wir fest, dass auch auf kleinerer Skala, in der Größenordnung von 500 Nanometern (millionstel Millimetern), so genannte Indium-Gallium-Fluktuationen auftreten.

Hilfreiche piezoelektrische Effekte

Mit dem so genannten Transmissionselektronenmikroskop fanden wir sogar noch winzigere Defekte (um zehn Nanometer, siehe Abbildung S. 82 oben). Nur mit derart aufwändigen Nachweismethoden lassen sich feinste Defekte aufspüren, um anschließend die Kristallwachstumsbedingungen optimieren und eine annähernd perfekte Kristallanordnung erreichen zu können.

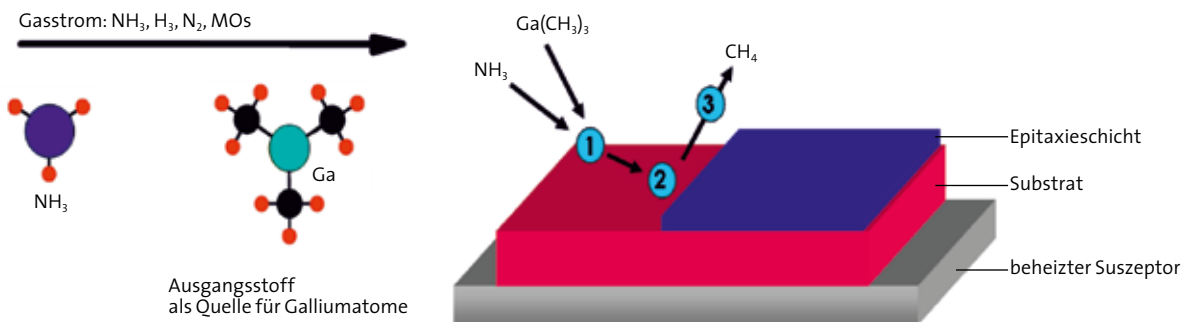
Die raffinierte Züchtung von Kristallschichten

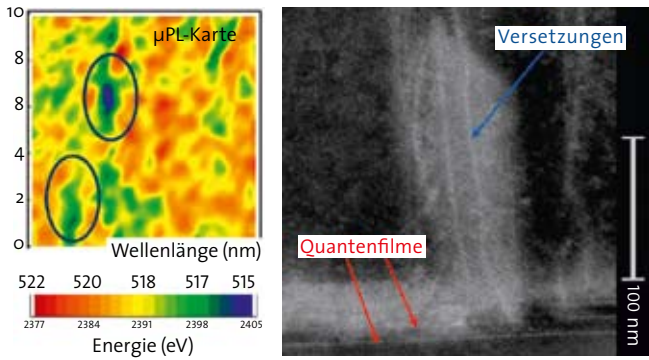
Der geordnete Abscheidungsprozess auf einem vorgegebenen Substrat wird Epitaxie genannt (von griechisch *epi* für »auf« und *taxis* für »Richtung«). Das Substrat prägt dabei seine Kristallstruktur der Atomanordnung in den abgeschiedenen Schichten auf.

Will man beispielsweise dünne Schichten von Galliumnitrid (GaN) erzeugen, so dienen als Ausgangsstoffe eine metallorganische Galliumverbindung, etwa Trimethylgallium, sowie Ammoniak (NH₃) als Quelle für Stickstoff. Beide Substanzen werden getrennt voneinander mit Hilfe von Trägergasen auf das

beheizte Substrat gebracht. An der Grenzfläche zum GaN-Substrat läuft bei geeigneten Temperaturen und Reaktordruck die chemische Reaktion zur Bildung von GaN ab:

Die Trägergase lassen die Ausgangsstoffe erst auf dem Substrat miteinander reagieren, so dass sie sich nur dort abscheiden. Auf diese Weise bildet sich unter geeigneten Bedingungen eine kontinuierliche Schicht.





Die Kristallqualität ist nicht die einzige Herausforderung, die es bei der Entwicklung von grünen Laserdioden zu lösen gilt. Halbleiterverbindungen der Elemente Gallium, Indium und Stickstoff kristallisieren in Form der »Wurtzit-Struktur«, deren Elementarzelle eine hexagonale Basis besitzt. Werden nun auf Grund von Spannungen in der Kristallstruktur – die bei dünnen, Licht emittierenden InGaN-Schichten leicht entstehen – Atome in der Elementarzelle ein wenig verschoben, so ändern sich die physikalischen Eigenschaften deutlich.

Tiefe Einblicke in eine grün emittierende Kristallschicht: Die Fotolumineszenz- und Transmissionselektronenmikroskopie enthüllt noch die feinsten Defekte (links: Ovale; rechts: blaue Pfeile). Sie müssen vermieden werden, wenn der grüne Laser seine volle Leistung erbringen soll.

Die Ladungen in der Elementarzelle geraten aus dem Gleichgewicht, und an dem Kristall entstehen auf Grund des piezoelektrischen Effekts elektrische Felder (Kasten unten).

Der Effekt ist an sich für grüne Laserdioden und Leuchtdioden erwünscht. Das elektrische Feld verändert die quantenmechanischen Energiezustände an den Grenzflächen der einzelnen Schichten – und somit die Wellenlänge des emittierten Lichts. Leuchtdioden, die bei niedrigen Stromdichten betrieben werden, gelangen dank dieses Effekts zu langwelligerem grünem Licht. Doch Laserdioden erfordern viel höhere Stromdichten, um die stimulierte Emission zu erreichen. Hohe Stromdichte bedeutet zugleich hohe Ladungsträgerdichte – und die schirmt das durch den piezoelektrischen Effekt erzeugte elektrische Feld teilweise ab. Das verschiebt die

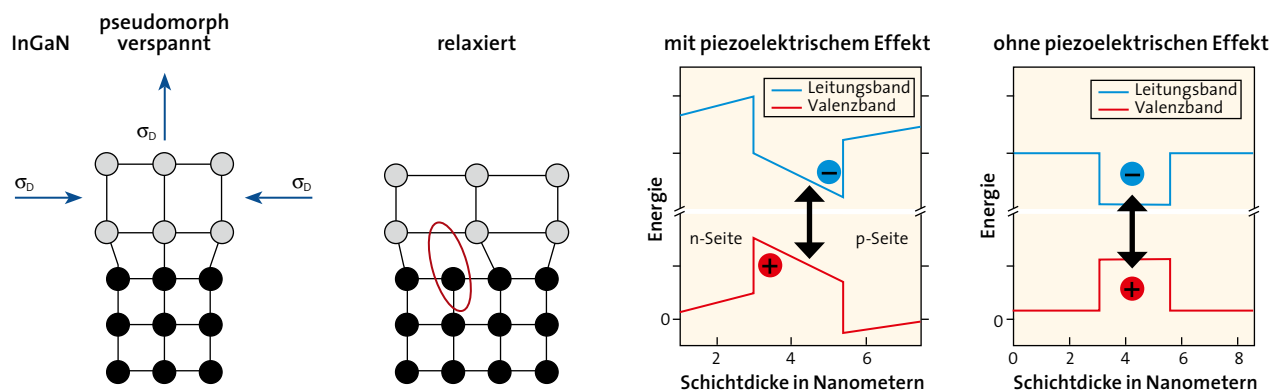
Indiumgalliumnitrid-Schichten unter Spannung

Die Licht emittierenden Schichten in Leucht- und Laserdioden sind extrem dünn – nur wenige Nanometer – und bestehen aus Indiumgalliumnitrid (InGaN). Sie werden per Epitaxie (siehe Kasten S. 81) auf Substraten aus Galliumnitrid (GaN) abgeschieden. Um InGaN-Schichten zu erzeugen, müssen im GaN Galliumatome durch Indiumatome ersetzt werden.

Da die Indiumatome andere Eigenschaften aufweisen als die Galliumatome, verändert ihr Einbau die Kristallstruktur. Insbesondere hat InGaN eine größere Gitterkonstante als GaN – es beansprucht sozusagen mehr Platz. Aus diesem Grund stehen die auf GaN-Substrate aufgebrachtene InGaN-Schichten unter mechanischer Spannung. Solange die Schichtdicke der InGaN-Schicht klein bleibt, übernimmt sie die Kristallstruktur des Substrats, wenn auch leicht deformiert: Die Schicht ist

»pseudomorph verspannt« (Grafik ganz links). Doch wenn die Schichtdicke zu groß wird, entlädt sich die gespeicherte Verspannungsenergie durch Relaxationsprozesse, und es bilden sich störende Versetzungen im Kristall (Grafik rechts daneben).

Eine pseudomorphe Verspannung verändert die Eigenschaften der Licht emittierenden Schicht. Im InGaN-Materialsystem treten piezoelektrische Effekte auf, das heißt, die mechanische Verspannung erzeugt ein elektrisches Feld. Es verbiegt quasi die Energiebänder der Elektronen im Kristall und verändert damit die Übergangsenergie – und somit auch die Emissionswellenlänge (rechte Grafiken). Diese Effekte sind erwünscht, um das erzeugte Licht zum Langwelligeren zu verschieben und so aus einem blauen Laser einen grünen zu machen, ohne dass der Indiumanteil im gleichen Verhältnis erhöht werden muss.



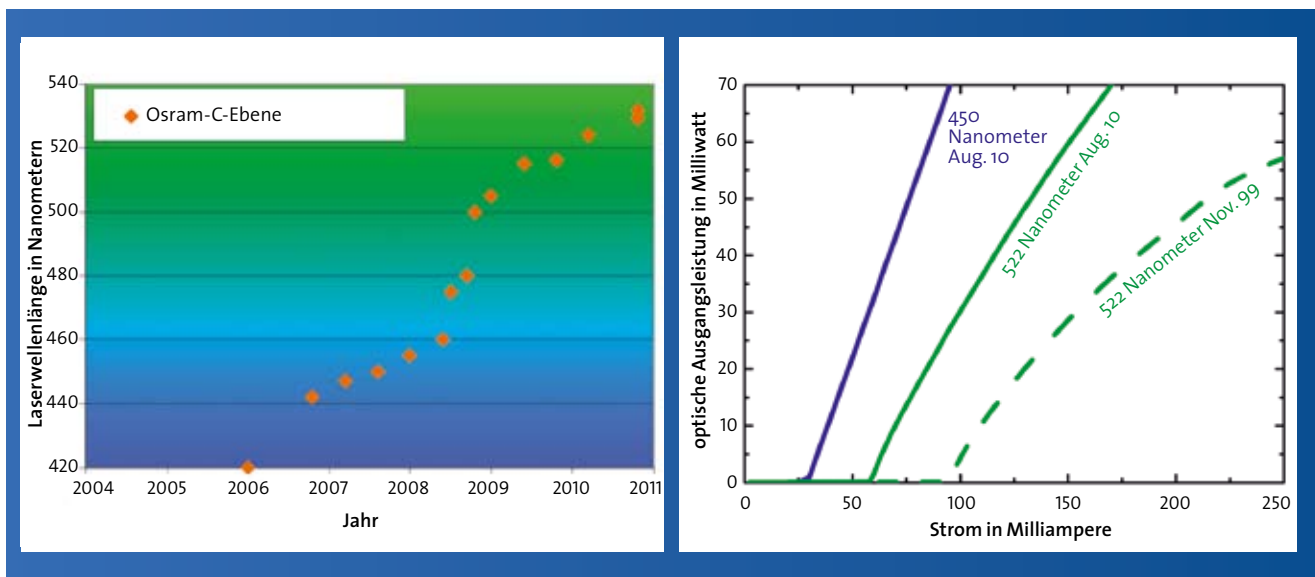
An Problemen interessiert uns vor allem eines: ihre Lösung.

Wer ein Problem nicht versteht, kann es auch nicht lösen. Deshalb bietet FOCUS gründliche Analysen, geht Ursachen auf den Grund und bewertet Konsequenzen. Aber dabei verlieren wir nie das eigentliche Ziel aus den Augen. Schließlich interessiert Sie doch in erster Linie, wer das Problem wie aus der Welt schaffen könnte. Welche Alternativen es gibt. Und was das für Sie bedeutet.

Entscheiden Sie sich für Klarheit: Lesen Sie den neuen FOCUS.



FOCUS



Im letzten Jahrzehnt haben sich die grünen Laserdioden bei Osram Opto Semiconductors rasant entwickelt (links). Jüngst hat sich eine wichtige charakteristische Größe, der so genannte Schwellstrom, immer besser an den erstrebten Vergleichswert für blaue Laser angenähert (rechts).

Emissionswellenlänge deutlich weniger stark ins Langwellige, weshalb eine Laserdiode im Vergleich zu LEDs wesentlich mehr Indium im Kristall benötigt, um eine grüne Emission zu erreichen. Aus diesem Grund sind grüne LEDs bereits seit Langem verfügbar, aber keine grünen Laserdioden.

Grünes Licht am Ende des Tunnels

Durch weiteres Optimieren der Wachstumsbedingungen und des Strukturaufbaus ist es den Forschern bei Osram Opto Semiconductors dennoch gelungen, die Kristallqualität zu verbessern und die Emissionswellenlänge der Laserdioden schrittweise in den langwelligeren Bereich zu verschieben (siehe Grafik oben links). Die ersten grünen Laserdioden taugten allerdings noch nicht zur Pikoprojektion. Dafür war eine signifikante Verbesserung der elektrooptischen Leistung nötig. Mit ersten grünen Laserdioden konnten erfolgreich Prototypen von mobilen Laserprojektoren demonstriert werden. Für ein marktfähiges Produkt ist eine Verbesserung der elektrooptischen Kenngrößen nötig. Messbar ist diese Verbesserung an der Kenngröße von Laserdioden, dem so genannten Schwellstrom. Er bezeichnet den Strom, bei dem der Laserbetrieb einsetzt und alle Verlustmechanismen unterdrückt sind.

Derzeit nähern sich die Schwellströme der grünen Laser denen der blau emittierenden Laserdioden immer mehr an (Grafik oben rechts). Außerdem ist für die Pikoprojektion eine ausreichend hohe optische Ausgangsleistung nötig – doch auch diese Bedingung wird von den neuesten grünen Laserdioden bereits erfüllt. Damit ist nun endlich der Weg frei für winzige, leistungsstarke Farbprojektoren, mit denen künftig ein Smartphone lebensgroße Bilder und Filme an jede Wohnzimmerwand zu werfen vermag. ~

DIE AUTOREN



Désirée Queren (Mitte) studierte Werkstoffwissenschaften an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und schrieb ihre Doktorarbeit im Bereich der

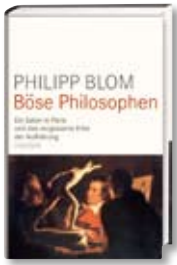
Epitaxie von grünen Laserdioden bei Osram Opto Semiconductors. Heute ist sie weiterhin im Bereich von InGaN-LEDs dort tätig. **Adrian Avramescu** (rechts) arbeitet seit vielen Jahren in dieser Firma auf dem gleichen Gebiet und ist heute Epitaxie-Experte für die InGaN-Laser. Nach seinem Physikstudium an der Universität Bukarest in Rumänien sowie der Promotion an der Universität Hokkaido war er Gastwissenschaftler unter anderem am Riken-Institut in Wakoshi, Japan. **Stephan Lutgen** (links) war nach seinem Physikstudium an der Philipps-Universität in Marburg und der Promotion an der Humboldt-Universität zu Berlin in verschiedenen Funktionen bei Osram Opto Semiconductors tätig und leitete dort zuletzt die InGaN-Laserentwicklung. Für seine Arbeiten erhielt das Team 2010 den Karl-Heinz-Beckurts-Preis.

QUELLEN

- Lutgen, S. et al.:** Grüne Laser erobern die Laserprojektion. In: Photonik 43, S. 56, 2011
- Lutgen, S. et al.:** Recent Results of Blue and Green InGaN Laser Diodes for Laser Projection. In: Proceedings of SPIE 7953, S. 79530G1–12, 2011
- Schwarz, U.T., Scholz, F.:** Rosige Aussichten für grünes Licht. In: Physik Journal 10, S. 21, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1124687



Philipp Blom
Böse Philosophen
Ein Salon in Paris
und das vergessene Erbe der Aufklärung
Hanser, München 2011. 400 S., € 24,90

AUFKLÄRUNG

Treffpunkt der Freigeister

Die radikalsten Denker der französischen Aufklärung sind heute fast vergessen – sehr zu Unrecht, meint Philipp Blom.

Der Wiener Historiker Philipp Blom entführt uns ins Paris des 18. Jahrhunderts, kurz bevor die Französische Revolution König, Adel und Kirche entmachten wird. Der Salon des Baron d'Holbach (1723–1789) ist nicht nur für seinen exzellenten Weinkeller und die raffinierten Menüs berühmt; hier treffen sich Umstürzler, denen nichts heilig ist. Alles Hergebrachte wird in Frage gestellt, nur was dem Säurebad der Kritik standhält, soll in Zukunft gelten.

Solche Vergnügungen sind riskant. Die radikalen Ideen der atheistischen Materialisten Holbach, Julien Offray de la Mettrie (1709–1751) und Claude Adrien Helvétius (1715–1771) rütteln an den Grundfesten von Staat und Kirche. Ihre »bösen« Gedanken sind intellektueller Sprengstoff, kursieren in einer schmalen Teilöffentlichkeit in Form handschriftlich kopierter Manuskripte. Nur wer durch Bekanntheit und gute Beziehungen geschützt ist, entgeht ab-

schreckenden Strafen. Wie groß die Gefahr ist, illustriert der Fall des 19-jährigen Jean-François Chevalier de la Barre (1745–1766), der als gottlos denunziert und wegen Blasphemie angeklagt wird. Der aufmüpfige Teenager entblößt vor Gericht respektlos seinen Hintern. Zur Strafe wird er nach Durchbohren der Zunge enthauptet und auf dem Scheiterhaufen verbrannt, nachdem ihm zuvor noch grässlichere Folterungen angedroht worden waren.

Vor diesem Schicksal bewahrt den glänzenden Denker und Literaten Denis Diderot (1713–1784) seine Berühmtheit. Zusammen mit dem Mathematiker Jean-Baptiste d'Alembert (1717–1783) gibt er die monumentale »Encyclopédie« heraus, in deren unzähligen Sachartikeln zu Wissenschaft, Technik und Handwerk aufklärerische Essays über Gott und die Welt versteckt sind.

In Bloms Darstellung ist Jean-Jacques Rousseau (1712–1778) der finstere

Antipode der Lichtgestalt Diderot. Tatsächlich mutet heute das meiste von Rousseau eher skurril und verschroben an, während Diderots Texte, obwohl weniger bekannt, uns Heutigen noch immer großes intellektuelles Vergnügen bereiten können. Doch Blom überzieht maßlos; statt sich mit Kritik an Rousseaus Denken zu begnügen, argumentiert er ad personam und stellt Rousseau platterdings als Paranoiker und Lügner hin.

Dafür fehlt in Bloms Bericht der wahrlich böseste aller Philosophen ganz: der Marquis de Sade (1740–1814). Dieser besessene Pornograf entblößt in seinen skandalösen Schriften ein Dilemma, das Max Horkheimer und Theodor W. Adorno, die Begründer der Frankfurter Schule, erst 1944 – angesichts der faschistischen Vernichtungslager – in ihrer »Dialektik der Aufklärung« analysieren konnten. Die Aufklärung ist eben nicht nur ein Prozess der Emanzipation im strahlenden Licht der Vernunft gewesen; in de Sades »sadistischen« Szenarien kommt die Möglichkeit zum Vorschein, dass eine von jeder moralischen Hemmung befreite Herrschaft über Mensch und Natur ins Unmenschliche abstürzt.

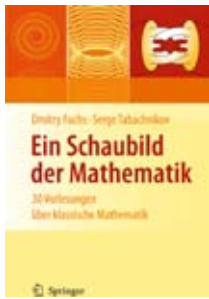
Von solchen dunklen Stellen abgesehen ist Bloms Buch ein helles Vergnügen. Es enthüllt die Konturen des fast vergessenen historischen Moments, mit dem unser modernes wissenschaftliches Denken seinen Anfang nahm.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Gastgeber und Gäste des Salons: Baron Paul Thiry d'Holbach, Denis Diderot, Jean-Baptiste le Rond d'Alembert und Jean-Jacques Rousseau (von links nach rechts)



Dmitry Fuchs, Serge Tabachnikov

Ein Schaubild der Mathematik

30 Vorlesungen über klassische Mathematik

Aus dem Amerikanischen von Micaela Krieger-Hauwede mit Unterstützung von Ines Laue.

Springer, Berlin 2011. 554 S., € 34,95

MATHEMATIK

Das Buch für die verlängerte Kaffeepause

Wer diese »Vorlesungen« als Pausenfüller konsumieren will, muss schon ziemlich genial sein – und wird die Pause trotzdem überziehen.

Das Büchlein »Von Zahlen und Figuren: Proben mathematischen Denkens für Liebhaber der Mathematik« von Hans Rademacher und Otto Toeplitz, 1930 erstmals bei Springer erschienen, ist ein echter Klassiker: unübertroffen in seiner Verknüpfung von alten Fragen und (damals) modernen Antworten und noch heute als Lektüre unbedingt zu empfehlen.

Nun kommt 80 Jahre später, wieder bei Springer, ein geistiges Kind des genialen Wurfs zur Welt. Die russischen Mathematiker Dmitry Fuchs und Serge Tabachnikov hatten sich »Von Zahlen und Figuren« zum Vorbild für die Arbeiten genommen, die sie zwischen 1970 bis 1990 in der populären sowjetischen Zeitschrift »Kvant« veröffentlichten. Nach dem Ende der Sowjetunion übersiedelten beide in die USA; ihre Neigung zu populärer Darstellung von Mathematik haben sie beibehalten. So ist Tabachnikov einer der Herausgeber der Zeitschrift »The American Mathematical Monthly«. Artikel aus »Kvant« erschienen in der englischsprachigen Zeitschrift »Quantum«, der nur ein elfjäh-

riges Leben (von 1990 bis 2001) beschiedenen war. 30 dieser Abhandlungen wurden 2007 zu einem Buch mit dem merkwürdigen Titel »Mathematical Omnibus« zusammengefasst; dessen deutsche Übersetzung – mit ebenso seltsamem Titel – ist das vorliegende Buch.

Das Werk ist in der Tat bereits jetzt schon als Klassiker zu bezeichnen; so mustergültig haben die Autoren jahrhundertalte Problemstellungen mit neuen Methoden verknüpft. Groß und schwer geworden ist das Kind: mehr als dreimal so dick wie das Vorbild und weitaus anspruchsvoller.

Bei der Auswahl der Themen haben sich die Autoren von der Schönheit der Probleme leiten lassen. Nun ja – auch in der Mathematik liegt Schönheit im Auge des Betrachters, aber spannend sind die 30 »Vorlesungen« allemal. Erfreulich groß ist die Anzahl der Abbildungen – schließlich stammen sechs der acht Großkapitel aus den Bereichen Geometrie und Topologie. Am Anfang jeder Vorlesung steht eine frei-assoziative, häufig hintersinnige künstlerische Illustration von Sergey Ivanov, der bereits für »Kvant« und »Quantum« gearbeitet hat (Bilder rechts oben). Zu jedem der ungefähr 100 im Buch erwähnten Mathematiker ist ein Porträtfoto abgedruckt, darunter zahlreiche aus dem Archiv des Mathematischen Forschungsinstituts Oberwolfach.

Man kann die einzelnen Lektionen mit wenigen Ausnahmen in beliebiger Reihenfolge angehen. Wer nach dem Durcharbeiten nicht genug vom Thema hat, findet in den Übungsaufgaben weitere Herausforderungen; erfreulicherweise bietet der Anhang zu vielen Aufgaben auch ausführliche Lösungen und nicht nur Lösungshinweise.

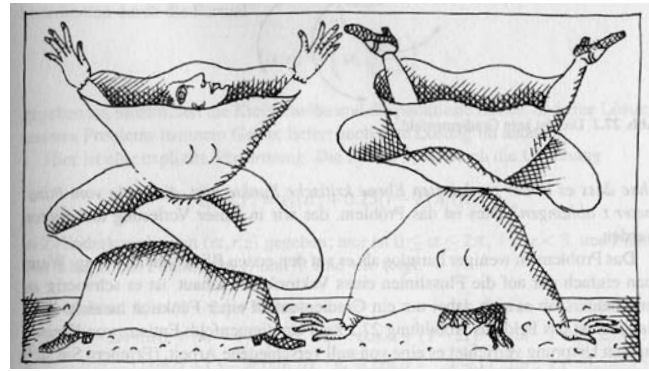
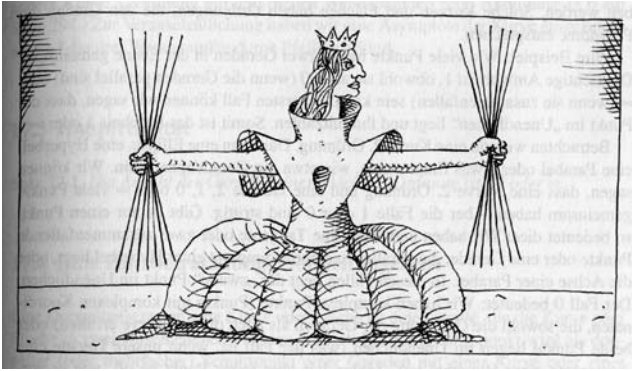
Für wen ist das Buch gedacht? Fuchs und Tabachnikov geben hier an erster Stelle Studienanfänger, aber auch Teilnehmer von Fachseminaren an und erweitern dann den Verwendungsbereich großzügig auf Matheklubs an Gymnasien und Kaffeepausen. Das ist vielleicht gut gemeint, aber unrealistisch. Schüler oder Schülerinnen müssten schon extrem begabt und hartnäckig zugleich sein, um ohne Unterstützung mit diesem Stoff zu Rande zu kommen. Wer dagegen eine Vorlesung von Fuchs und Tabachnikov als Zeitvertreib in der Kaffeepause konsumieren will, muss sich schon sehr gut in der Mathematik auskennen – und wird dann die Pause gewaltig überziehen, weil ihn das Problem nicht mehr loslässt.

Die erste Lektion trägt den Titel »Kann eine Zahl ungefähr rational sein?«. Eine geschickte Wahl, denn erstens gibt die Lektion selbst, von ihrer großen Länge abgesehen, ein sehr charakteristisches Bild des ganzen Buchs ab, und zweitens ist die Formulierung auf den ersten Blick so abstrus, dass sie Interesse weckt. Beliebig dicht an jeder rationalen Zahl liegen irrationale Zahlen und umgekehrt – da ist »ungefähr rational« ein offensichtlich sinnloser Begriff.

Die Autoren lösen den Widerspruch auf, indem sie »rational« zu »rational mit kleinem Nenner« verschärfen. Nennen wir eine Zahl »ungefähr rational«, wenn es in ihrer Nähe eine rationale Zahl gibt, in deren Bruchdarstellung der Nenner, sagen wir, dreistellig ist. Dazu ist zu klären, was unter Nähe, sprich einer guten Näherung, zu verstehen ist. Ein erster Versuch einer solchen Definition stellt sich als nicht tragfähig heraus, da es unendlich viele »gute« rationale Näherungen gibt. Der über dreieinhalb Seiten gehende Beweis des zu-

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



Eröffnungsbild zur Vorlesung »Siebenundzwanzig Geraden« (links) und zu »Kegel umstülpen« (rechts)

gehörigen Satzes verlangt Kenntnisse aus der Vektorrechnung und Routine im Umgang mit Ungleichungen.

Es folgt die typische Kost, an die Besucher von Mathematikvorlesungen gewöhnt sind: Zunächst werden neue Begriffe und Sachverhalte eingeführt, deren Zusammenhang mit dem angestrebten Ergebnis alles andere als offensichtlich ist. Hier ist es der Satz von Hurwitz und Borel über quadratische Näherungen, in dem merkwürdigerweise die Zahl $\sqrt{5}$ eine Rolle spielt. »Was ist die irrationalste aller irrationalen Zahlen, die Zahl, die sich am meisten gegen eine rationale Näherung sträubt? Erstaunlicherweise ist diese schlimmste Zahl ge-

nau die Zahl, die von Generationen von Künstlern, Bildhauern und Architekten am meisten geliebt wurde: Es ist der Goldene Schnitt $(1+\sqrt{5})/2$.«

Es folgt der Begriff des Kettenbruchs; das ist ein Bruch, deren Nenner eine Summe aus einer natürlichen Zahl und einem Bruch ist, dessen Nenner wiederum ... Dann wird erklärt, was Kettenbrüche mit dem euklidischen Algorithmus zu tun haben, jener seit der Antike bekannten Methode, mit der man den größten gemeinsamen Teiler zweier Zahlen bestimmen kann.

Nach einigen Propositionen und Lemmata kommt dann endlich der allesklärende Satz: Es ist die Kettenbruch-

entwicklung, die am Ende die Entscheidung liefert, ob eine Zahl ungefähr rational ist. Im Einzelfall muss die Zahl nur so genau bekannt sein, wie der Taschenrechner sie darstellt; dann kann man alles, was man für die Entscheidung braucht, ausrechnen – mit dem Taschenrechner.

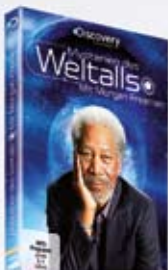
Das Werk ist sehr empfehlenswert für alle, die Freude an höherer Mathematik haben und sich nicht vor der zugehörigen Anstrengung scheuen!

Heinz Klaus Strick

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter eines Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

ANZEIGE

IN DIE UNENDLICHEN WEITEN DES UNIVERSUMS MIT DEN NEUEN **DOKU-HIGHLIGHTS** VON POLYBAND!



MYSTERIEN DES WELTALLS – Mit Morgan Freeman (Staffel 1)*



STEPHEN HAWKING – GEHEIMNISSE DES UNIVERSUMS*



DAS UNIVERSUM – Eine Reise durch Raum und Zeit*



UNSER UNIVERSUM 3D – Die 7 Wunder des Sonnensystems*



UFO HUNTERS – Die komplette erste Staffel



www.polyband.de



Jetzt bei
www.facebook.com/polyband

Überall erhältlich, wo es gute DVDs und Blu-rays gibt.





François Lelord

Das Geheimnis der Cellistin. Beinahe normale Fälle eines ungewöhnlichen Psychiaters

Aus dem Französischen von Ralf Pannowitsch. Piper, München 2011. 380 S., € 19,95

Bekannt geworden ist François Lelord als Autor der Romane von Hector, dem Psychiater auf der Suche nach dem Glück – doch eigentlich ist er selbst einer. In dieser Eigenschaft tritt er hier in die Fußstapfen von Oliver Sacks (»Der Mann, der seine Frau mit einem Hut verwechselte«). An neun typischen Fällen aus seiner Praxis beschreibt er psychische Störungen von Agoraphobie über Autismus und Bulimie bis Schizophrenie samt Behandlungsmöglichkeiten wie Psychoanalyse, Verhaltenstherapie und Psychopharmaka. Für die deutsche Ausgabe des im Original 1993 erschienenen Buchs hat Lelord jedes Kapitel mit einer aktualisierenden Ergänzung versehen. Nicht zuletzt dadurch ist das Buch auch heute lesenswert. Psychiatrisch Vorgebildeten bietet es allerdings nichts Neues, und auch im Unterhaltungswert kommt es nicht ganz an das große Vorbild Sacks heran. HARTWIG HANSER



Josef H. Reichholf

Naturgeschichte{n}. Über fitte Blesshühner, Biber mit Migrationshintergrund und warum wir uns die Umwelt im Gleichgewicht wünschen

Knaus, München 2011. 320 S., € 19,99; Kindle eBook € 15,99

Mit rund 50 faszinierenden Geschichten nimmt uns der bekannte Münchner Biologe Josef Reichholf mit auf erlebnisreiche Kurzreisen in die Natur, vor die Haustür wie auch in ferne Welten. Dabei gelingt ihm mancher überraschende Brückenschlag, vor allem wo er uns selbst den Spiegel vorhält. Wichtiger als humorige Hinweise auf biologisch bestimmte Wesenszüge des Menschen sind ihm Irrtümer, mangelhaft reflektierte Weltansichten und unhaltbare Naturvorstellungen, die er den Experten vom Naturschützer bis zum Ökologen vorhält. So etwa die Idee von der »heilen Natur«, die sich in Wirklichkeit an der Kulturlandschaft des 19. Jahrhunderts orientiert. Und wer ist sich dessen bewusst, dass das wunderschön blühende Rapsfeld viel weniger Arten Lebensraum bietet als eine Großstadt? Durchgehend spannend, oft mit einem Augenzwinkern, dann wieder bissig-kritisch bis witzig lehrt Reichholf uns manche Lektion und verschweigt dabei ungelöste Rätsel nicht. ADELHEID STAHNKE



Magnus Heier

Nocebo: Wer's glaubt wird krank. Wie man trotz Gentests, Beipackzetteln und Röntgenbildern gesund bleibt

Hirzel, Stuttgart 2011. 133 S., € 17,90

Nicht nur Hypochonder kennen das: Kaum liest man die Beschreibung einer Krankheit, schon spürt man die Symptome bei sich selbst. Dahinter steckt der Noceboeffekt (lateinisch »ich werde schaden«), der kaum bekannte dunkle Zwilling der Placebowirkung. Seine Ursachen und Folgen führt uns der Autor, selbst Facharzt für Neurologie, eindringlich vor Augen. Die moderne Diagnostik, die jede noch so unbedeutende Auffälligkeit an den Tag bringt, liefert oft unklare Befunde, die Angst auslösen und wirklich krank machen können. Die Beipackzettel von Arzneimitteln mit ihren langen Listen möglicher Nebenwirkungen tragen zusätzlich zur Verunsicherung bei. Als Heilmittel empfiehlt Heier eine humanere Medizin, die überflüssige Untersuchungen durch ein intensiveres Gespräch mit dem Arzt ersetzt – in unserem Gesundheitssystem freilich ein frommer Wunsch. GERHARD TRAGESER



Georg Brunold

Fortuna auf Triumphzug. Von der Notwendigkeit des Zufalls

Galiani, Berlin 2011. 283 S., € 19,99

Alle Achtung. Der studierte Philosoph, Schriftsteller, Journalist und Übersetzer Georg Brunold hat die 100 Quellen wirklich gelesen und versteht es, die tiefstnigsten Gedanken aus ihnen zu referieren. Da kommt eine bunte Mischung zusammen, die sich nur lose um das Thema Zufall rankt: die Glücksgöttin in der Antike und in der christlichen Umdeutung, Glücksspiel, Wahrscheinlichkeitstheorie, Statistik, Zufall in Literatur, Kunst und der wissenschaftlichen Entdeckung. Vor allem aber geht es Brunold um den freien Willen, den Determinismus (den er überhaupt nicht mag), die Chaostheorie, die irrationalen Zahlen im Allgemeinen und die Zahl π im Besonderen. Bei manchen heftigen Gedankensprüngen wird der Mathematiker nervös (so wie vermutlich der Historiker bei den geschichtlichen Darstellungen); aber amüsant zu lesen ist es schon. CHRISTOPH PÖPPE



Mark Alpert

Crash

Aus dem Amerikanischen von Jochen Stremmel.

Page & Turner, München 2011. 445 S., € 14,99

THRILLER

Der Weltuntergang – gerade noch abgewendet

Während die Bösen es unternehmen, mit modernster Physik das Ende der Welt herbeizuführen, retten die Guten die Welt – mit etwas anderer modernster Physik.

Ein beliebtes Kochrezept für einen Sciencefiction-Roman ist: Nimm an, die Welt sei in einem einzigen Punkt anders, als sie in Wirklichkeit ist. Arbeite unter Beachtung aller übrigen Gesetze der Physik und der Logik die Konsequenzen dieser Annahme aus und mache daraus eine spannende Geschichte.

Mark Alpert, Astrophysiker und Redakteur bei »Scientific American«, hat seine kontrafaktische Annahme schon in dem Vorgängerroman »Die Würfel Gottes« (Page & Turner 2009) getroffen: Albert Einstein hätte nicht, wie in der Realität, jahrzehntelang vergeblich an einer allgemeinen Feldtheorie gearbeitet, sondern sie gefunden – aber nicht veröffentlicht, weil sie zur Konstruktion noch weit schlimmerer Vernichtungswaffen als der Atombombe geeignet wäre. Aber wie diese faustischen Physiker so sind: Er hat es doch nicht übers Herz gebracht, die Weltformel mit ins Grab zu nehmen, sondern jedem seiner letzten vier Assistenten einen Teil davon anvertraut.

In »Die Würfel Gottes« verschaffen sich böse Schurken mit unglaublicher Brutalität die vier Einzelteile; aber bevor sie ernsthaftes Unheil anrichten können, werden sie – mit knapper Not, damit es spannend bleibt – von den Guten aufgehalten. Das sind in erster Linie David Swift, ein Wissenschaftshistoriker, der auffällig viele Gemeinsamkeiten mit Mark Alpert selbst aufweist,

und die Physikerin Monique Reynolds, der Traum des politisch korrekten Amerikaners: schwarz, genial und atemberaubend sexy.

Inzwischen sind David und Monique verheiratet und haben ein kleines Kind, aber wieder schlagen die Bösen zu und entführen Davids autistischen Adoptivsohn, in dessen Kopf unsere Helden das Geheimnis sicher untergebracht wännen. Wieder sind sie nicht nur überaus brutal, sondern verfügen auch über exquisite Kenntnisse der modernen Physik. So können sie mit dem Röntgenlaser, dem Lieblingsspielzeug Ronald Reagans aus der »Star Wars«-Kiste, ungeheure Energien auf beliebig kleinem Raum konzentrieren und damit das Universum zum Absturz bringen.

Zum Programmabsturz, wohlgemerkt, denn das Weltall ist – »Matrix« lässt grüßen – in Wirklichkeit ein gigantisches Computerprogramm, und dessen Designer haben den Speicherplatz für die Werte der Energie ein bisschen knapp bemessen. Also verursacht ein Röntgenlaser so etwas wie einen *exponent overflow*, daraufhin stürzt das Programm ab, und die Welt ist zu Ende: eine Softwareversion des Jüngsten Tages, welche die kühnsten, aber stets erdgebundenen Pläne der James-Bond-Schurken weit in den Schatten stellt.

Um das Ganze zu bewerkstelligen, brauchen die Bösen nicht nur Einsteins Feldgleichungen, sondern auch gigan-

tische Mengen an Energie. Da muss schon eine Atombombe her; und um nicht die ganze Arbeit selbst machen zu müssen, delegieren die Weltzerstörer die Detailarbeit an die Iraner, die schon immer ein Faible für Massenvernichtungswaffen hatten – aber natürlich über das eigentliche Ziel des Projekts getäuscht werden müssen.

Zu allem Überfluss sind die Wegbereiter der Apokalypse auch noch fundamentalistische Christen aus *God's own country*. Das verschafft ihnen ihre unerschütterliche Selbstgewissheit, mit der sie über Berge von Leichen gehen.

Zwischendurch sieht es sehr schlecht aus für das Universum. Aber Rettung naht, weniger in Gestalt von David und Monique, die im späteren Verlauf des Romans eher eine Nebenrolle spielen, als vielmehr durch einige israelische Helden, allen voran einen Physiker, der den Quantencomputer schon viel weiter entwickelt hat, als es der gegenwärtigen Realität entspricht. Also kann er das Faktorisierungsproblem für Produkte großer Primzahlen lösen, damit das Verschlüsselungssystem des amerikanischen Präsidenten knacken und gerade noch rechtzeitig dessen bereits erteiltem Befehl zum Abwurf einer Atombombe den gefälschten Widerruf hinterherschicken. Am Ende opfert er in einer Kamikazeaktion sein Leben, damit die Iraner nicht doch noch selbst an der Bombe zündeln. Aber für diesen Heldentod hat der Leser nicht mehr viele Tränen übrig, nachdem Mark Alpert schon so viele andere Sympathieträger hat über die Klinge springen lassen.

Ja, die Idee, auf sehr moderner, zum Teil spekulativer Physik eine Romanhandlung aufzubauen, hat ihren Reiz. Herausgekommen ist allerdings ein amerikanischer Standardthriller, sauber nach dem Lehrbuch geschrieben – immer dann die Szene wechseln, wenn es am spannendsten ist – und mit einem großen Maß an Gewaltanwendung. Ich gestehe, das hat mir die Freude beim Lesen etwas getrübt.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Fondation Cartier pour l'art contemporain

**Mathématiques, un dépaysement soudain /
Mathematics: A Beautiful Elsewhere**

Ausstellung bis zum 18. März 2012.

261 boulevard Raspail, F-75014 Paris

Geöffnet täglich außer montags 11 bis 20 Uhr, dienstags bis 22 Uhr

Eintritt 9,50 €, ermäßigt 6,50 €

Katalog (französisch oder englisch): 224 S., mit Audio-CD, 44 €

<http://fondation.cartier.com>

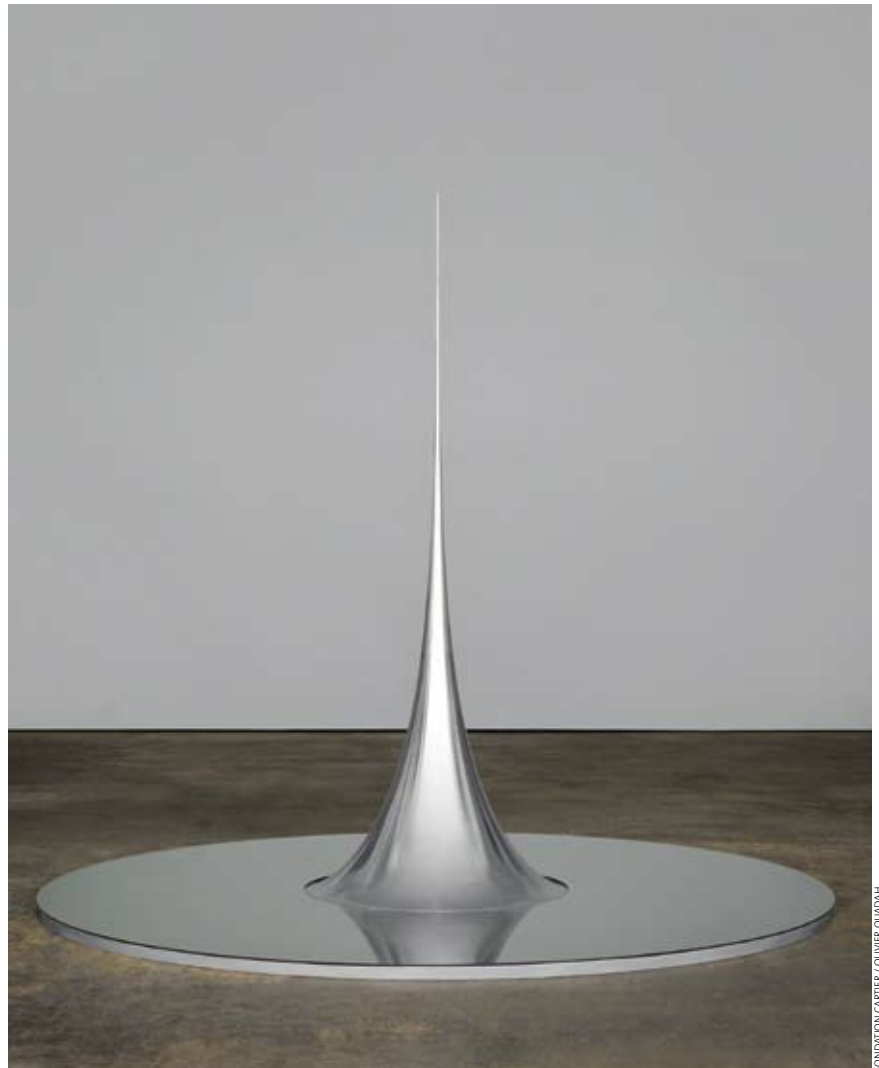
KUNSTAUSSTELLUNG

Plötzliche Heimatlosigkeit oder schönes Anderswo?

Eine Ausstellung über Kunst und Mathematik ist sehenswert –
aber nicht unbedingt wegen der Kunst.

Das Verhältnis zwischen Mathematik und Kunst ist nicht als wirklich herzlich zu bezeichnen. Mathematik als Hilfsmittel der Kunst? Ja, die Geometrie ist hilfreich zum perspektivischen Zeichnen, und der Computer als verallgemeinerter Pinsel ist willkommen. Mathematik als Gegenstand der Kunst? Gelingt, wenn der Künstler etwas von Mathematik versteht, also eher selten. Der Mathematiker, der in der Kunst dilettiert? Da rümpfen die Kunstverständigen die Nase und verweisen ihn zu den Pädagogen: Nichts dagegen, wenn man mit hübschen bunten Bildern – von Fraktalen und mehr – die Leute für die Mathematik begeistert und ihnen vielleicht sogar etwas Wissenschaft vermittelt; aber echte Kunst ist doch etwas anderes.

Die Fondation Cartier, eine Stiftung des gleichnamigen Schmuckherstellers, die sich der Förderung der zeitgenössischen Kunst verschrieben hat, begab sich also auf schwieriges Terrain, als sie vor zwei Jahren mit dem Ziel einer Ausstellung Beziehungen zu den Mathematikern aufnahm. Und wie es sich für Cartier gehört, war nur das Beste gut genug: Michael Atiyah, Jean-Pierre Bourguignon, Alain Connes, Misha Gromov, Cédric Villani und Don Zagier zählen zu den prominentesten Figuren des Fachs. Es traf sich günstig, dass die Mehrheit von ihnen in Paris ansässig ist.



Die Pseudosphäre – nur vollständig mit ihrem Spiegelbild – ist eine besonders interessante Rotationsfläche, weil auf ihr die hyperbolische Geometrie gilt.

Vor allem Gromov ist in der Szene als schräger Vogel bekannt und geschätzt (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 74); auch unter Mathematikern findet man selten jemanden, der sich so bereitwillig zum Affen macht wie er (www.ihes.fr/~gromov). Auf der Künstlerseite fand er einen ähnlich skurrilen Partner in Gestalt des Regisseurs David Lynch, der mit Kultfilmen wie »Wild at Heart« berühmt geworden ist.

Und was ist deren gemeinsamer Beitrag zur Ausstellung? Ein Raum in Form einer Null – na gut, man kann diese Zahl mit einiger Berechtigung als fundamental für die Mathematik ansehen –, an dessen Decke die Größenordnungen der Welt, vom Quark bis zum Galaxienhaufen, in einem Film mit hübschen Zeich-

nungen illustriert werden. An der Wand laufen Zitate aus Gromovs »Library of Mysteries«, einer Sammlung zweifellos bedeutender Werke der Wissenschaft von dem antiken Naturphilosophen Heraklit bis zu dem genialen, im Wortsinn verschollenen Mathematiker Alexander Grothendieck; die Punkmusikerin Patti Smith mit ihrer rauchigen Stimme, verschwommen abgefilmt von David Lynch, steuert etwas mystische Aura bei.

Nebenan ist der Raum der von Gromov postulierten »vier Wunder«: Das sind die Gesetze der Physik, das Leben, das menschliche Gehirn und – die drei anderen umfassend – das Wunder der mathematischen Struktur. Die Exponate in diesem Raum lassen sich allerdings nur mit Mühe in Gromovs Wunderschema einordnen. Da findet sich die Penrose-Pflasterung, für die Kinder zum Puzzeln und in bewegten Bildern projiziert ins Innere einer Halbkugel. Zweifellos nicht mehr ganz neue Mathematik; aber gerade der Film setzt die dahinterstehenden Ideen in faszinierender Weise um. Man merkt, dass die Filmemacher von der Softwarefirma BUF sich intensiv in die Mathematik eingearbeitet haben. Im Wechsel damit kommen erstklassige filmische Darstellungen von Diffusions- und Wellenphänomenen sowie von der Aerodynamik des Fliegens. Wenn die Bilder bloß nicht so hektisch am Betrachter vorbeirauschen würden!

Im selben Raum befinden sich eine hübsch bunte Collage der brasilianischen Malerin Beatriz Milhazes nach Ideen des Mathematikers Cédric Villani sowie ein Stück aktuelle Forschung: Pierre-Yves Odeyer vom Standort Bordeaux des Forschungszentrums INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique) entwickelt Software für das selbsttätige, neugiergetriebene Lernen. Seine künstlichen Subjekte sind kleine Roboter mit Affenköpfen, an deren Gestaltung Gromov und Lynch beteiligt waren.

Ein Stockwerk tiefer finden sich zwei Exponate, die ich für misslungen halte. An einer großen Wand angeschrieben finden sich die Titel der Werke von Henri Poincaré (1854–1912) sowie von Wer-

ken anderer Wissenschaftler, die mit ersteren in einer engen Beziehung stehen. Ein eindrucksvolles Geflecht, zweifellos, Poincaré war in seiner Genialität und Vielseitigkeit eine herausragende Ausnahmefigur – aber wertlos für den, der die Titel nicht zu interpretieren weiß. Und Jean-Michel Alberola hat die Hand von Cédric Villani beim Anschreiben an die Wandtafel abgefilmt, und nichts anderes als die Hand. Angeblich war es ein mathematischer Beweis, den Villani da angeschrieben hat; aber was ist die künstlerische Aussage, wenn das Kunstwerk, so wie es gemacht ist, zuverlässig verhindert, dass man versteht, worum es geht, wozu man bei weniger enger Perspektive vielleicht eine Chance gehabt hätte?

Ein Raum weiter dann das einzige wirklich materielle Kunstwerk der Ausstellung: eine Pseudosphäre aus Aluminium, geschaffen von dem japanischen Künstler Hiroshi Sugimoto (Bild links). Eigentlich ragt diese Fläche konstanter negativer gaußscher Krümmung bis ins Unendliche und wird dabei beliebig dünn. Da erlaubt das Material eine bessere Näherung als die traditionellen Gipsmodelle, die Sugimoto auf die Idee gebracht haben. Aber warum gilt das als Kunst? Die wesentliche Leistung Sugimotos besteht darin, die mathematische Formel in bisher unerreichter Perfektion in ein Objekt umgesetzt zu haben; das ist eigentlich Handwerk, wenn auch erstklassiges.

Hohe Kunst und hohe Mathematik haben sich getroffen und viele Worte produziert, mit denen ich nicht viel anfangen kann. Mit Ausnahme von Gromovs Erinnerungen aus seinem Leben; die sind originell und umwerfend komisch. Als Nebenprodukt sind Werke entstanden, die mich begeistern – aber nicht in erster Linie wegen ihrer künstlerischen Qualitäten, sondern weil sie – ganz pädagogisch – die Mathematik so gut transportieren. Vielleicht soll man den Kunstbegriff nicht so eng fassen. Oder ich bin Kunstbanause.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

NEUES AUS DEM Lesershop



Kalender »Himmel und Erde 2012«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2012« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2012 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand
www.spektrum.com/kalender2012

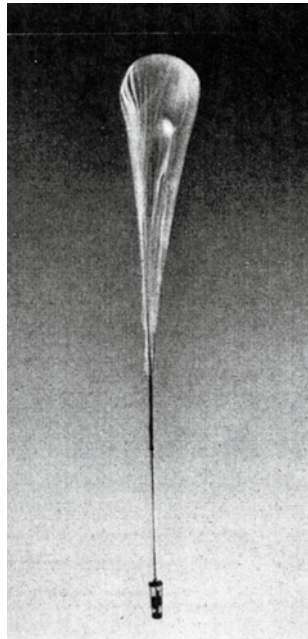
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel.: 06221 9126-743
Fax: 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

Sternwarte in der Stratosphäre

»Die Lufthülle bedeutet für die Erforschung kosmischer Objekte ein großes Hindernis. Wie ein Schleier hängt sie zwischen uns und den Sternen. Verständlich, daß die Astronomen photographische Aufnahmen außerhalb ersehen. Das wurde mit dem »Projekt Stratoskop« erreicht. Ein riesiger Ballon, der eine Höhe von 28000 m erreicht. Nach der Belichtung des Films klappt das Fernrohr zurück und löst sich mit dem Fallschirm vom Ballon. Das Ergebnis waren 300 m Film mit 8000 Einzelaufnahmen.« Kosmos 12, Dezember 1961, S. 518



Ein großer Wetterballon transportierte das Teleskop in die Stratosphäre.

Farbiger Schnee

»Schneemaschinen sind nichts weiter als Berieselungsapparate. Das Wasser enthält chemische Zusätze und fällt als blütenweißer Schnee auf die Hänge nieder. Ein Erfinder ging noch weiter: Er produzierte farbigen Schnee. Eine praktische Anwendung: Der Hang für Anfänger wird blau gesprengt, für Fortgeschrittene grün und für die Meister des Wintersports gelb.« Neuheiten und Erfindungen 315, Dezember 1961, S. 218



Waldmensch in Gefahr

»Die riesigen Flächen des tropischen Regenwaldes von Südost-Asien sind ein Naturreservat. Hier, in Borneo und Sumatra, lebt der Orang-Utan. Heute droht ihm tödliche Gefahr: der Wissensdrang westlicher Nationen. Sie bezahlten hohe Preise für jedes Orangskelett, um ihre Evolutionstheorien zu unterbauen; dagegen unterließen sie es, das Tier in seiner natürlichen Verhaltensweise zu beobachten.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 24, Dezember 1961, S. 745



Gleichzeitig in das Instrument blasen und durch die Nase einatmen – der Aerophor machte es möglich.



Gegen Atemnot bei Blasmusikern

»Der Schweriner Hofmusiker Bernard Samuels hat der musikalischen Welt eine originelle Erfindung gebracht, deren Einführung Musikern große Erleichterung schaffen wird. Blasinstrumente habe zwei Nachteile! Das Spielen erfordert bedeutende Kraftanstrengung der Atmungsorgane, die bei älteren Musikern sich besonders bemerkbar macht. Der zweite Nachteil ist der, daß die Atmung keine absatzlose Ausführung beim Spiel gestattet. Der Aerophor – Luftbringer – beruht auf folgender Konstruktion. Durch einen Schlauch, der in ein Mundstück mündet, wird dem Instrumente ein Luftstrom zugeführt, der durch einen Apparat durch pedalartiges Auftreten mit dem Fuß erzeugt wird. Der Blasebalg ist mit einem Rückschlagventil versehen, um zu verhindern, daß Lungenluft in den Balg geblasen wird.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 49, Dezember 1911, S. 1015

Der Triumph des Aluminiums

»Die Industrie, die sich mit der Gewinnung von Aluminium beschäftigt, hat einen außerordentlichen Aufschwung genommen. Es ist häufiger als das Eisen. Trotzdem war metallisches Aluminium bis 1880 eine Seltenheit. Man kannte noch kein Verfahren, das Metall aus der Tonerde auf billige Art zu gewinnen. Erst die Vervollkommnung der Elektrolyse hat die Mittel dazu gegeben. Im Jahre 1883 wurden nur 83 Pfund Aluminium hergestellt, im Jahre 1909 dagegen über 34 Millionen Pfund. Weder der Kraftwagen, noch die Flugschiffahrt ließen sich denken, wenn nicht im Aluminium ein Metall von unvergleichlicher Leichtigkeit zur Verfügung stände.« Kosmos 12, Dezember 1911, S. 471

Südfrankreich meldet ältesten Neandertaler

»Aus Südfrankreich kommt aufs neue die Kunde von der Aufdeckung fossiler Menschenreste, die der Kulturschicht des Moustérien, also der älteren Steinzeit entstammen und mit großer Wahrscheinlichkeit als dem Neandertalertypus angehörig bezeichnet werden können. Die Ablagerung, in der das Skelett angetroffen wurde, entspricht einem alten Flußlauf. Lagerung und Haltung scheinen darauf hinzudeuten, daß es sich um einen Kadaver handelt, der vom Ufer in den Fluß gestürzt ist oder herabgeschwemmt wurde. Die Fundschicht ist ungestört; es ergibt sich die Berechtigung, dem Skelett ein hohes geologisches Alter zuzusprechen. Es ist älter als alle bisher bekannten menschlichen Skelette.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 51, Dezember 1911, S. 1065

Ein Spielzeug für den Weihnachtsmann



Eine Spieluhr mit Weihnachtsbaumständer – die »Gloriosa« des Stuttgarter Erfinders Johannes Carl Eckardt besaß ein Plattenspielwerk, das über Anreißräder Metallzähne zum Schwingen brachte.



BEIDE FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

Detail: Stahlkamm und Anreißräder des Spielwerks



Der Fabrikant Johannes Carl Eckardt aus Stuttgart erhielt 1884 ein Patent für Neuerungen »an Musikwerken, welche mit Mechanismen zum Drehen von Untersätzen für Weihnachtsbäume versehen sind«; zwei weitere sollten folgen. Eckardt, dessen Firma unter anderem Nähmaschinen für Kinder produziert hatte, verknüpfte damit die Tradition des geschmückten Baums mit jener der festlichen Hausmusik. Zudem machte er sich zu Nutze, dass sich hochwertige und dank der Industrialisierung auch erschwingliche Spielwerke wachsender Beliebtheit erfreuten.

Besonders begehrt war sein Modell »Gloriosa«, das 1880 auf den Markt kam. Für das langsame Drehen des Baums sorgte ein Uhrwerk, dessen Feder über eine Kurbel aufgezogen wurde. Es trieb auch die Musikmechanik an. Eckardt verbaute zunächst Spielwerke, bei denen Walzen mit Metallstiften verschieden lange und damit unterschiedlich gestimmte Zähne von Metallkämmen anzupften (siehe Foto). Bis zu vier solcher Kämmen konnten verbaut sein.

Ab 1892 bot er ein neues Modell an, dem das hier abgebildete Exemplar entspricht. Es nutzte das in Leipzig hergestellte hochwertige Plattenspielwerk Kalliope: »Programmträger« waren nicht mehr Walzen, sondern Metallscheiben mit Nocken auf der Unterseite. Drehte sich die Platte im Instrument, nahmen die Nocken Anreißräder mit, die das Anzupfen des Stimmkamms besorgten. An ihrem Rand hatte jede Scheibe Zacken, in die ein vom Uhrwerk angetriebenes Zahnrad griff. Eine Andruckstange mit Hartgummirollen sorgte für einen gleichmäßigen Abstand von Nocken und Anzupfmechanismus. Solche Plattenspielwerke ermöglichten dem Besitzer einen schnellen Wechsel des zu spielenden Stücks und dem Hersteller eine einfache Erweiterung seines

Angebots. Die Töne wurden durch das Einstanzen von Löchern und die dabei auf der Rückseite entstehenden Nocken kodiert.

Das Unternehmen schaltete Anzeigen (siehe oben) und pries darin die Tonqualität sowie das hochwertige Gehäuse aus mattiertem Nussbaum mit Bronzeverzierungen. Dessen Gestaltung sollte, dem Geschmack der Zeit entsprechend, an Renaissancekassetten erinnern. Ebenso wichtig war freilich die Stabilität, denn der auf dem nur 40 mal 28 Zentimeter großen Gehäuse montierte Ständer musste bis zu ein Zentner schwere Christbäume tragen.

Eckardts klingender Weihnachtsbaumständer waren ein kommerzieller Erfolg: Bis 1911 verkaufte er 100 000 Stück. Für den Einsatz an öffentlichen Orten baute der Erfinder auch Exemplare mit einem Münzeinwurf. Konkurrenten drängten auf den Markt und versuchten, seine Patente zu umgehen. Beispielsweise drehte sich der Christbaumständer »Triumph«, indem sich eine Schnur langsam auf die Achse eines separat stehenden Spielwerks aufwickelte.

Um das Produkt über die Weihnachtszeit hinaus vermarkten zu können, bot die Firma Eckardt wechselbare Aufsätze wie Blumenvasen, Porzellanplatten und anderen Zimmerschmuck an. Das musikalische Repertoire umfasste mehr als 120 Stücke: neben weihnachtlichem Liedgut auch christliche Choräle, leichte Musik wie das Couplet »Immer an der Wand lang« sowie nationale Melodien wie die »Wacht am Rhein«. Die letzten Exemplare der erfolgreichen Produktreihe kamen Ende der 1920er Jahre auf den Markt.

Die Musikwissenschaftlerin **Silke Berdux** ist Kuratorin der Musikinstrumentensammlung des Deutschen Museums.



Vernunft und Glaube

Im Spannungsfeld von Wissenschaft und Religion ringen Philosophen, Theologen und Naturwissenschaftler um die Klärung von Grenzen und Gemeinsamkeiten. Während die Theologie Vernunft und Wissenschaftlichkeit auch für sich reklamiert, bildet für viele Naturwissenschaftler der Glaubensakt die unüberwindliche Barriere zwischen den Bereichen

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUS SCHÄFER

Todesfalle für Dinosauriertrupp

Vor 90 Millionen Jahren versank in der heutigen Wüste Gobi eine Herde junger Dinosaurier im Morast eines Sees – für Paläontologen ein Glücksfall, liefert der einmalige Fund doch unschätzbare Einblicke in das Sozialverhalten der Urzeitechsen

Sein und Nichtsein in der Quantenwelt

Bei Quantenobjekten geht es nicht wie für Shakespeares Hamlet um »Sein oder Nichtsein«. Da der Satz vom ausgeschlossenen Dritten mitunter nicht gilt, kann etwas zugleich existieren und nicht existieren. Das zeigen neue Experimente an den Universitäten Heidelberg und Wien



Windenergie auf dem Vormarsch

Experten zufolge reicht die Leistung, die sich weltweit mit Windkraftanlagen erzielen lässt, mehr als aus, um den globalen Energiebedarf zu decken. Und tatsächlich investieren viele Länder in neue Windparks. Doch damit der Strom aus solchen Anlagen wirklich flächendeckend zur Energieversorgung beitragen kann, sind länder- oder kontinentübergreifende Verbundnetze erforderlich



Die innere Dynamik des Vogelschwarms

In Schwärmen bewegen sich Vögel so exakt aufeinander abgestimmt, als folgten sie einer vorgegebenen Choreografie. Kann allein die Interaktion zwischen benachbarten Tieren ein derart koordiniertes Verhalten hervorbringen?

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Spektrum **EXTRA**

DER WISSENSCHAFT

KOSMOLOGIE
Das simulierte
Universum

BIOMECHANIK
Biomoleküle auf der
virtuellen Streckbank

COMPUTERLINGUISTIK
Wissen für die künstliche
Intelligenz

Datengetriebene Wissenschaft



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Eine Publikation von
Heidelberger Institut für
Theoretische Studien





Reinhard Breuer

Das Unmögliche demnächst – nur Wunder dauern etwas länger

Als ich in die Wissenschaft einstieg, war man schon froh, wenn man mit dem Rechner eine Kurve »plotten« konnte – gerne auch mal in Abhängigkeit von zwei Variablen, also echt dreidimensional! Später gelang es vereinzelt sogar, dynamische Probleme mit Hilfe von Differenzialgleichungen für einige Zeitschritte zu verfolgen. Und das vom »Terminal« aus, ganz ohne Lochstreifen oder -karten – ein absolutes Highlight in der Computersteinzeit.

Der Rückblick sei gestattet, um die Dimensionen des Fortschritts zu begreifen: Welche Probleme sich heute mit Superrechnern behandeln lassen und welche riesigen Datenmengen dabei produziert und gezielt ausgewertet werden, überstieg noch vor wenigen Jahren fast die Vorstellungskraft oder galt schlicht als unmöglich. Darum erstaunt es mich immer wieder, was in der Wissenschaft inzwischen alles machbar ist – und was insbesondere auch an dem vom Wissenschaftsmäzen Klaus Tschira gegründeten Heidelberger Institut für Theoretische Studien passiert, mit dem sich dieser Sonderteil beschäftigt.

Die dort tätigen Forscher stellen ausgewählte Projekte ihrer Arbeit auf den folgenden Seiten selbst vor, betreut und unterstützt von der Redaktion von »Spektrum der Wissenschaft«. Einige haben vorher schon in unserem Magazin geschrieben oder wurden darin porträtiert: so der Computerlinguist Michael Strube (»Wikipedia: Wissen für die Künstliche Intelligenz«, 12/2010, S. 94) und der Astrophysiker Volker Springel (»Vielleicht laufen wir einem Phantom nach«, 11/2010, S. 34).

Wer hätte sich träumen lassen, was Forscher heutzutage mit Hilfe von Simulationen – so nennt man die Berechnungen inzwischen – alles ergründen können: neben der Entstehung von Galaxien (S. 10) und der automatischen Erkennung natürlicher Sprachen (S. 30) auch die Stammesgeschichte von Organismen (S. 22) oder die Wechselwirkung von Proteinen (S. 14). Man möchte an numerische Zauberei glauben, so schnell gerät das (einst) Unmögliche in Reichweite – nur Wunder dauern immer noch etwas länger.

Mit den exponentiell anwachsenden Datenmengen und Publikationen wächst aber zugleich das Problem, sich darin noch zurechtzufinden. Entsprechend arbeiten auch Gruppen am HITS über Datenbankmanagement, beispielsweise um für Forscher Informationen über Stoffwechselprozesse bereitzustellen (S. 26). Denn die Simulation von Problemen mit niemals völlig zutreffenden, aber oft nützlichen Modellen (wie Klaus Tschira in seinem Editorial auf der nächsten Seite vermerkt) ist nur ein Aspekt jener »datengetriebenen Wissenschaft«, die mit dem Siegeszug der Höchstleistungsrechner immer mehr an Bedeutung gewinnt. Auf die immensen Herausforderungen, vor die sie alle Forschungsgebiete stellt, weist HITS-Chef Andreas Reuter in seinem Beitrag ab S. 6 hin. Ob diese Herausforderungen schon überall verstanden sind, lässt sich bezweifeln. Wohin jedoch die abenteuerliche Reise vermutlich geht, können Sie bei der Lektüre der folgenden Artikel erahnen.

Reinhard Breuer
Editor-at-Large
Spektrum der Wissenschaft



TIM WEGNER © KLAUS TSCHIRA STIFTUNG

Klaus Tschira

Alle Modelle sind falsch, aber einige immerhin nützlich

Was tun Wissenschaftler, die in der Grundlagenforschung arbeiten, die also versuchen, bestimmte Teilaspekte der uns umgebenden Welt zu verstehen? Manche von ihnen machen das, was die meisten Menschen von Wissenschaftlern erwarten: Sie beobachten, zählen, messen, registrieren, katalogisieren. Das sind die Empiriker. Sie streben danach, möglichst genaue Informationen darüber zu erhalten, wie Vorgänge in der Natur ablaufen.

Aber das ist nur der eine Teil des wissenschaftlichen Geschäfts. Für den anderen Teil sind die Theoretiker zuständig, die versuchen, in den Beobachtungen der Experimentatoren Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und diese so zu formulieren, dass sie nicht nur mit den vorhandenen Beobachtungen übereinstimmen, sondern auch das Ergebnis von Experimenten voraussagen können, die noch gar nicht durchgeführt worden sind. Solche Gesetzmäßigkeiten können unterschiedliche Gestalt annehmen: Formeln, Diagramme, Computerprogramme und so weiter.

Jede Theorie verkörpert ein Modell des betrachteten Ausschnitts der Wirklichkeit und ist insofern stets eine Abstraktion oder Idealisierung: Sie beschreibt die Realität niemals absolut genau, sondern erfasst bestimmte relevante Aspekte »hinreichend gut« – unter Vernachlässigung anderer, für die Fragestellung irrelevanter Details. So gesehen sind alle Modelle falsch, wie der Statistiker George Box von der University of Wisconsin in Madison provokant formulierte. Sie können gleichwohl nützlich sein, sofern sie die – zumindest näherungsweise – Berechnung von Effekten erlauben, über die noch keine Messungen vorliegen. Die Wettervorhersage etwa beruht auf vielen Vereinfachungen und trifft nicht immer zu – aber sie ist, zumindest gelegentlich, sehr nützlich.

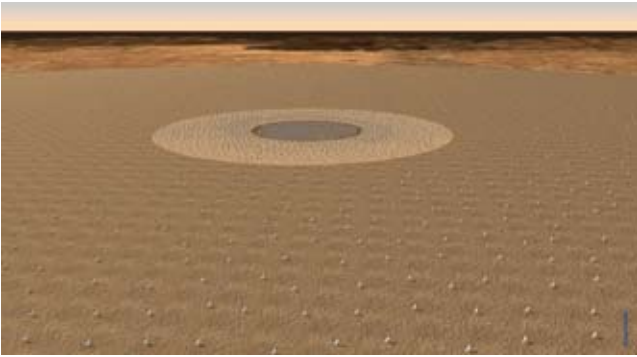
Die zwei genannten Arbeitsweisen ergänzen sich auf fruchtbare Weise. So nutzte Johannes Kepler das umfangreiche Beobachtungsmaterial Tycho Brahes zur Formulierung seiner Planetengesetze – ein klassisches Beispiel dafür, wie Messergebnisse durch Theoriebildung zu neuen Erkenntnissen führen. Manchmal ist das theoretische Modell auch zuerst da. Dann dienen Messungen dazu, es durch Vergleich mit seinen Voraussagen nachträglich zu bestätigen oder zu widerlegen. In diese Kategorie fällt Einsteins allgemeine Relativitätstheorie, die erst Jahre später experimentell untermauert wurde.

Natürlich befruchten Theorien auch die empirische Seite der Wissenschaft. So ermöglichen sie neue experimentelle Fragestellungen oder innovative Messverfahren. Weder Experimente noch Theorien allein verhelfen also zu grundlegenden neuen Einsichten. Nur ihr Wechselspiel bringt die Wissenschaft voran.

Seit etwa 20 Jahren verschiebt sich jedoch die Balance zwischen Experiment und Theorie in einem Maß, das teils schon eine Entkopplung befürchten lässt. Der Hauptgrund dafür ist, dass erheblich mehr Fördermittel in Experimentiereinrichtungen wie Beschleuniger, Teleskope, Sequenzierer oder Computer geflossen sind als in die Theoriebildung. In Verbindung mit dem rasanten Leistungszuwachs in der Halbleitertechnik kam es so zur Ansammlung gigantischer Datenmengen, die kein Mensch mehr allein durch Sichten und Nachdenken verarbeiten kann. Die Frage, wie solche Datenfluten jemals zu Theorien verdichtet, zu Erkenntnis veredelt werden können, geriet völlig in den Hintergrund. Das war für mich der Impuls zur Gründung des gemeinnützigen Heidelberger Instituts für Theoretische Studien (HITS).

Daten gibt es, wie gesagt, in Hülle und Fülle, und zwar auf allen Gebieten der Naturwissenschaften und darüber hinaus. Die Forschungsgruppen des HITS sollen technisch und organisatorisch die Möglichkeit bekommen, Methoden zu entwickeln und zusammen mit experimentell arbeitenden Forschern zu erproben, die es erlauben, diese Datenmengen effektiv zu verwalten und zur Gewinnung neuer Einsichten nutzbar zu machen. Wenn dabei gelegentlich regelrechte Forschungs-Hits entstehen, ist das ganz im Sinne des Erfinders.

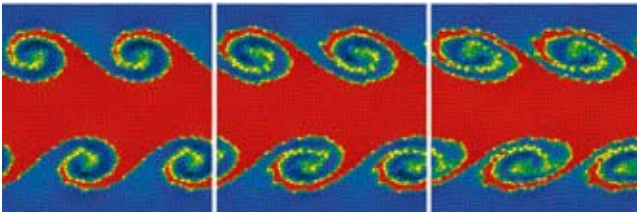
Klaus Tschira
Geschäftsführer HITS gGmbH



6 Datengetriebene Forschung – Herausforderung für die Informatik

Von *Andreas Reuter*

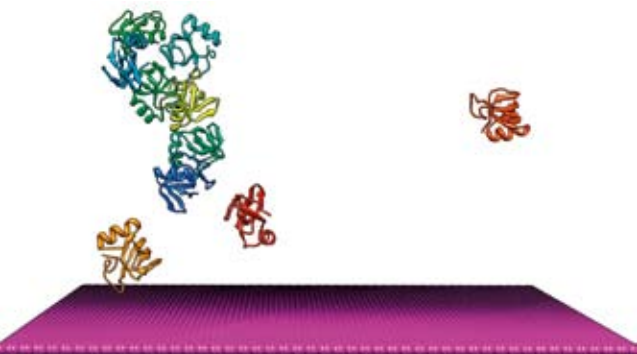
Auf allen Gebieten der Natur- und Ingenieurwissenschaften gewinnt eine Arbeitsmethode an Bedeutung, bei der die Analyse sehr großer Mengen von Daten zu neuen Erkenntnissen führt. Mit welchen technischen und organisatorischen Maßnahmen kann die Informatik eine solche datengetriebene Forschung unterstützen?



10 Der Kosmos im Computer

Von *Volker Springel*

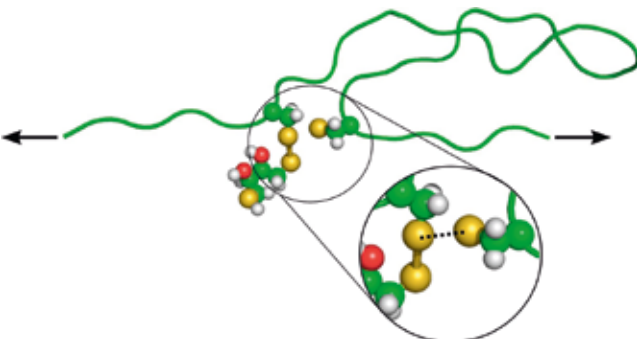
In den fortgeschrittensten Supercomputer-simulationen versuchen Forscher, eine Brücke vom Universum kurz nach dem Urknall bis zur Gegenwart zu schlagen. Sie untersuchen, wie sich aus der einst homogen verteilten Materie die heutige Vielfalt von Galaxien entwickeln konnte



14 Das biomolekulare Erkennungspuzzle

Von *Rebecca C. Wade*

Proteine sind die Funktionsträger des Lebens. Ihre Wechselwirkungen miteinander und mit anderen Biomolekülen sorgen dafür, dass Zellen ihre Aufgabe im Organismus erfüllen. Um diese Wechselwirkungen besser zu verstehen, setzen Forscher zunehmend rechnergestützte Methoden ein. Computersimulationen von Proteininteraktionen leisten auch einen immer wichtigeren Beitrag zum Design von Wirkstoffen gegen Krankheiten und in der Biotechnologie



18 Zerren an Biomolekülen im Computer

Von *Ilona Baldus und Frauke Gräter*

Mechanische Kräfte sind lebenswichtig – im großen wie im kleinen Maßstab. Eine Forschungsgruppe am Heidelberger Institut für Theoretische Studien untersucht ihre Wirkung auf der kleinsten Ebene: vom Protein bis hin zur einzelnen chemischen Bindung

TITELMOTIV: BRETT RYDER

22 Hochleistungsrechner und der Stammbaum des Lebens

Von *Alexandros Stamatakis*

Eine wahre Flut von DNA-Daten ermöglicht inzwischen immer präzisere Rekonstruktionen von Stammbäumen – im Prinzip jedenfalls. In der Praxis überfordern exakte Lösungen auch die leistungsfähigsten Computer. Die Herausforderung heißt deshalb, die Effizienz der Programme für Näherungslösungen zu steigern

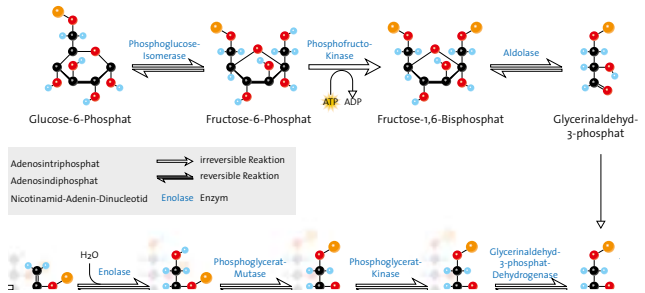


MIT FRIEDRICH VON ANNE ASHLEY UND GERARD MANNING, SALK INSTITUTE

26 Pfade im Informationsdschungel

Von *Wolfgang Müller*

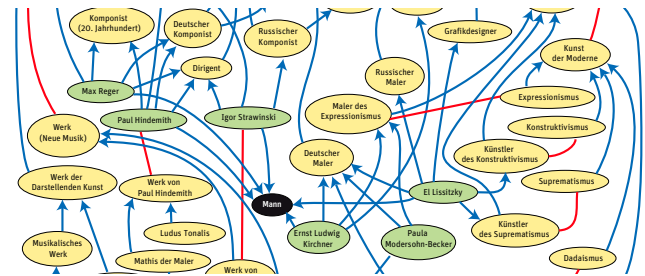
Wer die verschlungenen Wege des Stoffwechsels erforscht, benötigt Orientierungshilfe. Die Datenbank SABIO-RK hilft mit allerlei Feinheiten der Informatik, benötigte Daten in der Flut an Publikationen aufzufinden



30 Kreativ durch Analogien

Von *Michael Strube*

Gleiche Strukturen erkennen bei Dingen, die auf den ersten Blick nichts miteinander gemein haben: Das ist das Arbeitsprinzip, mit dem die interdisziplinäre Computerlinguistik ihre Erfolge erzielt



34 Virtuelle Forschungs-umgebungen für morgen

Von *Uwe Schwiegelshohn*

Um Wissenschaftlern die Infrastruktur bieten zu können, die sie für ihre Arbeit in der Zukunft brauchen, müssen Hochschulen und außeruniversitäre Institutionen ihre Kräfte bündeln und neue Wege beschreiten



38 Wissenschaft braucht Vernetzung

Von *John Wilbanks*

Forscher können der anschwellenden Datenflut nur Herr werden und sie zum raschen Erkenntnisgewinn nutzen, wenn sie sich als Mitglieder eines großen Netzwerks verstehen. Dies erfordert neue Modalitäten der Zusammenarbeit



Datengetriebene Forschung – Herausforderung für die Informatik

Auf allen Gebieten der Natur- und Ingenieurwissenschaften gewinnt eine Arbeitsmethode an Bedeutung, bei der die Analyse von sehr großen Mengen an Daten zu neuen Erkenntnissen führt. Mit welchen technischen und organisatorischen Maßnahmen kann die Informatik eine solche datengetriebene Forschung unterstützen?

Von Andreas Reuter

Derzeit vollzieht sich ein grundlegender Wandel in den Natur- und Ingenieurwissenschaften – und das gleich auf mehreren Ebenen. So ändern sich etwa als Folge des Internets und der darauf aufbauenden Dienste die Kommunikationsstrukturen innerhalb und zwischen den Fachgebieten ganz erheblich. Außerdem entwickeln sich neue Organisationsformen für wissenschaftliche Einrichtungen, die der rasch wachsenden Komplexität der Forschungsvorhaben Rechnung tragen. Das wiederum erfordert neue Finanzierungsmodelle für wissenschaftliche (Groß-)Vorhaben. Ferner wandelt sich die Position der Wissenschaft in der Gesellschaft: Ihr wird – zumindest in den westlichen Ländern – sehr viel mehr Transparenz und Rechtfertigung der Ziele und Methoden abverlangt als früher.

Aber auch die wissenschaftliche Methodik selbst befindet sich im Umbruch. In der öffentlichen Wahrnehmung, die sich in Filmen oder Reportagen widerspiegelt, erscheint Wissenschaft immer noch als Tätigkeit, der einzelne (vorzugsweise geniale) Forscher in der Abgeschlossenheit eines Labors nachgehen. Dort kommen sie nach zähem Ringen und diversen Geistesblitzen zu bahnbrechenden Erkenntnissen – oder aber erfinden eine fürchterliche Waffe, je nachdem, ob sie auf der Seite der Guten oder der Schurken stehen.

Dieses romantisierende Bild hat mit moderner Forschung wenig zu tun. Zum einen wird Wissenschaft in immer größeren, komplexeren Projekten und Projektverbänden organisiert – man denke etwa an den Large Hadron Collider (LHC) bei der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN in Genf. Solche Vorhaben lassen sich ohne industrielle Methoden und eine hochgradig ar-

beitsteilige Vorgehensweise nicht bewältigen. Zum anderen stehen Wissenschaftler immer häufiger nur noch in sehr indirektem Kontakt mit den Gegenständen ihrer Untersuchung, seien es Zellen oder Galaxien.

Wenn wir die Entwicklung im Methodenvorrat der Naturwissenschaften einmal Revue passieren lassen (unterer Kasten auf S. 8), so gab es ganz am Anfang die empirische Beschreibung, die sich gelegentlich zu – gleichfalls empirisch abgeleiteten – Handlungsregeln verdichtete. Parallel dazu, aber doch mit einer merklichen Verzögerung, entwickelte sich die Theoriebildung. Ihr Ziel war, formalisierte Modelle der beobachteten Phänomene zu erstellen. Diese sind aber nur um den Preis idealisierender Annahmen möglich – beispielsweise durch Vernachlässigung der Reibung bei der Beschreibung von Bewegungsgesetzen.

Rasch anschwellende Datenflut

Der nächste Schritt bestand darin, den Grad der Idealisierung zu verringern, um auch komplexe Vorgänge wie etwa die Verformung eines Autos beim Aufprall oder die Flugeigenschaften eines Flugzeugs so realistisch beschreiben zu können, dass sich die Ergebnisse der Modellanalyse auf das tatsächliche System übertragen lassen. Dies führte zu sehr komplizierten Modellen, deren Gleichungen nicht mehr direkt lösbar waren. In solchen Fällen bleibt nur die Möglichkeit, mit Methoden der numerischen Mathematik Näherungslösungen zu bestimmen, was bei großen Problemen wie etwa der Crashtestsimulation im Automobilbau Gleichungssysteme mit Hunderttausenden oder Millionen von Unbekannten ergibt. Deren Handhabung ist überhaupt nur noch mit dem Computer möglich.

Heute gilt die Simulation vielfach als dritte Säule der Wissenschaft – neben Experiment und Theorie. Manche sprechen ihr zwar diesen Rang ab und betrachten sie nur als eine von mehreren möglichen Arten, theoretische Modelle auszuwerten. Tatsache aber ist, dass ohne Simulation viele Modelle »steril« bleiben würden, da es nicht möglich wäre, Ergebnisse daraus abzuleiten.

Von der Simulation führt der Weg schließlich zur datengetriebenen Wissenschaft. Auf den ersten Blick scheint sie nichts grundsätzlich Neues zu bieten; schließlich geht es nur um die Zusammenführung von Experiment (Messung), Theoriebildung und Simulation zu einem kohärenten Methodenvorrat. Das eigentlich Interessante ist jedoch der Grund, der diese Zusammenführung notwendig macht: die rasch wachsende Menge von Daten, die von Messgeräten (wie Satelliten, Teleskopen, Sequenziermaschinen und Microarrays) oder aus Simulationen (etwa Klimavorhersagen und Szenarienanalysen) stammen. Denn die Menge neu erzeugter und gespeicherter Daten verdoppelt sich jedes Jahr, oder anders ausgedrückt: In jedem einzelnen Jahr fallen mehr experimentelle oder Simulationsdaten an als in allen Vorjahren zusammen. Am Anfang sieht eine solche exponentielle Wachstumskurve noch relativ harmlos aus, und tatsächlich konnten Forscher immerhin bis ins 20. Jahrhundert hinein Messergebnisse durch Sichten und Darüberechnen analysieren.

Mit zunehmender Automatisierung der Messgeräte und dem breiteren Einsatz von Simulationsmethoden sind die Daten in vielen Projekten jedoch schon längst auf einen Umfang angewachsen, der es völlig unmöglich macht, sie im herkömmlichen Sinn direkt in Augenschein zu nehmen. Hierzu nur zwei

Beispiele: Das LHC-Experiment des CERN wird im Vollbetrieb 15 Petabytes (PB) pro Jahr erzeugen, und beim Square Kilometer Array (einem für 2024 geplanten System von Radioteleskopen) soll es sogar 1 PB pro Tag sein. Liegen die Milliarden der aktuellen Finanzkrise schon jenseits der menschlichen Vorstellungskraft, so verhält es sich mit den Petabytes noch eine Million Mal schlimmer (oberer Kasten auf S. 8). Wenn ein Mensch 80 Jahre lang ohne Unterbrechung nichts anderes täte, als sich 1 PB an Ergebnissen »anzusehen«, müsste er pro Sekunde 320 000 Buchstaben (ein Taschenbuch) lesen, um ganz durchzukommen.

Es bleibt also nichts anderes übrig, als die experimentellen Daten zunächst von Software unterschiedlichster Art aufbereiten zu lassen. Das Datenvolumen muss durch Verdichtung, Selektion, statistische Analyse, Visualisierung

und andere Verfahren so weit reduziert werden, dass das Ergebnis für den Menschen wieder aufnehmbar ist. Vor 50 Jahren haben Wissenschaftler noch unmittelbar durch die Teleskope oder Mikroskope geschaut, selbst die Messgeräte abgelesen und die Vorgänge im Reagenzglas beobachtet. Heute kommen sie mit den Experimenten oft erst durch das in Berührung, was auf dem Bildschirm ihres PCs erscheint, nachdem es über viele Stufen hinweg gefiltert, komprimiert und visualisiert worden ist.

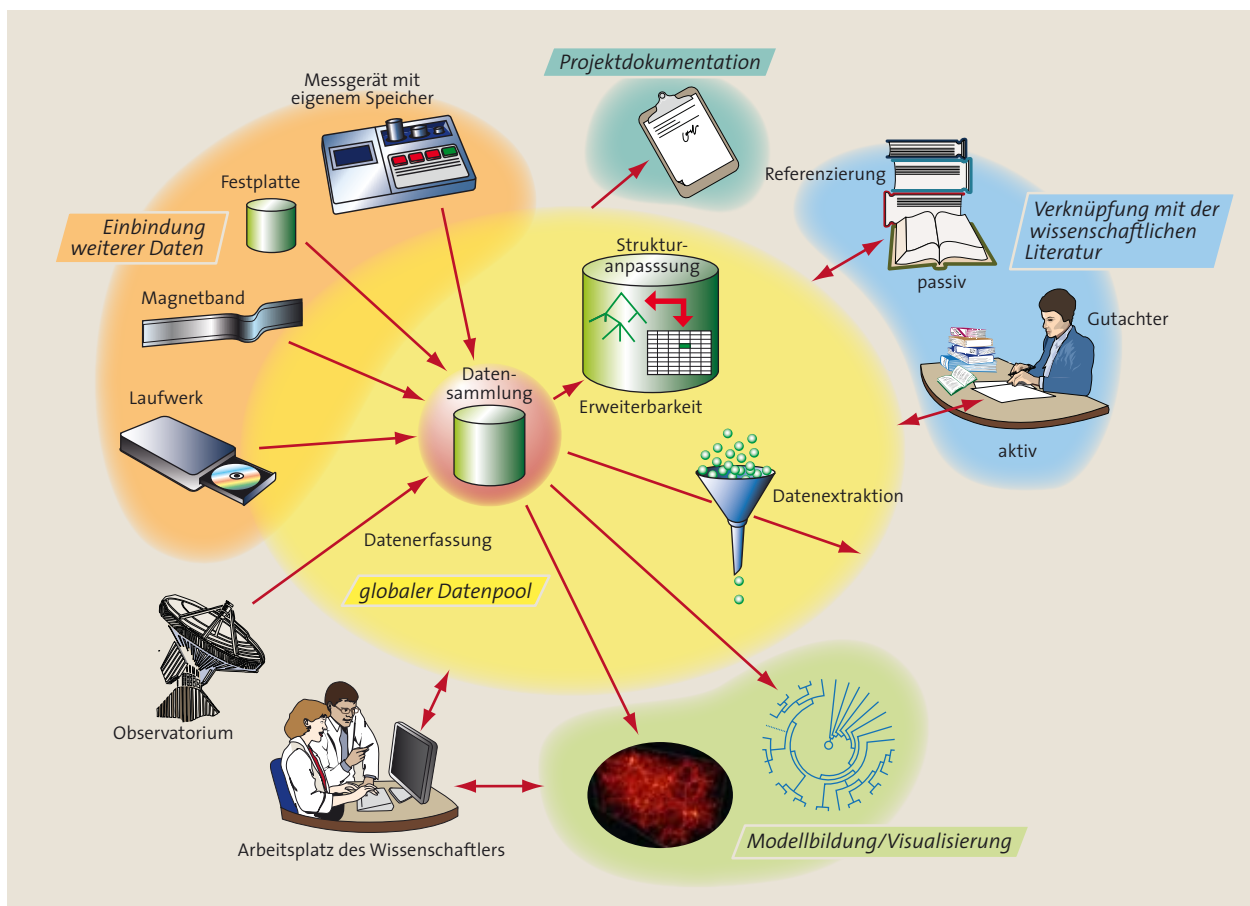
Forschung im heutigen Sinn besteht also großteils in der durch Computer, Datenbanken und viele andere Softwarewerkzeuge unterstützten Verarbeitung sehr großer Mengen von Daten, die aus einer Vielzahl von Quellen stammen. Und damit stellt sich die Frage, was die Informationstechnik (IT) dazu beitragen kann und muss. Die offensichtliche Antwort

lautet: Ihre Aufgabe ist es, Hardware- und Softwaresysteme zur Verfügung zu stellen, die es den Wissenschaftlern ermöglichen, alle für ihre Fragestellung erforderlichen Auswertungen effizient durchzuführen, ohne sich dabei um IT-spezifische Aspekte kümmern zu müssen. Ein Biologe will schließlich Biologie betreiben und nicht programmieren. Aber was heißt das konkret? In den folgenden Abschnitten skizziere ich die wichtigsten Forderungen an die IT (Übersicht im Kasten unten).

Zunächst müssen die von den Experimenten oder Simulationen kommenden Daten zuverlässig gespeichert werden – und dies unter Umständen mit enormer Geschwindigkeit, wenn man an die oben zitierten Beispiele denkt. Es darf keine Unterbrechungen geben, weil viele Versuche nicht wiederholbar sind. Ferner gilt es, die Daten schon beim Erfassen zu prüfen, zu filtern und für die langfristige

Computergestützter Umgang mit riesigen Datenmengen

Zum Anlegen, Verwalten und Nutzbarmachen eines globalen Datenpools braucht es Software, die vielerlei Anforderungen erfüllen muss. Einige wesentliche sind hier in der Grafik veranschaulicht.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH ANDREAS REUTER

Speicherung aufzubereiten, was weitere hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Hard- und Software stellt.

Das Abspeichern hat dabei so zu erfolgen, dass die Bestände wachsen können, unter Umständen um mehrere Größenordnungen. Außerdem muss jederzeit eine Erweiterung um neue Informationskategorien und Datenstrukturen möglich sein.

Verwandt damit ist die Forderung, Daten aus verschiedenen Projekten und Disziplinen

miteinander verknüpfen zu können, um übergreifende Fragen zu untersuchen. Zum Beispiel müssen in der Klimaforschung meteorologische, ozeanografische, geografische, statistische und etliche weitere Datensammlungen zueinander in Beziehung gesetzt werden. Das scheitert heute oft an ihrem unterschiedlichen Aufbau. So verwenden die einzelnen Disziplinen häufig andere Begriffe und Einheiten oder nicht einmal dasselbe Koordinatensystem. Da jedes Fachgebiet zudem seine eigenen

Modellierungsmethoden einsetzt, muss es möglich sein, die Daten flexibel in der dafür erforderlichen Struktur bereitzustellen.

Zur Verarbeitung der Rohdaten gehört auch, sie zu verdichten; denn nur in komprimierter Form kann der Forscher die enthaltene Information aufnehmen. Die Software sollte möglichst verschiedene Arten der Verdichtung erlauben, so dass sich im Einzelfall diejenige Methode auswählen lässt, die am besten zu den jeweiligen Daten und Modellen passt. Von besonderer Bedeutung ist dabei die visuelle Darstellung.

Meist müssen Datenbestände für verschiedene Auswertungen immer wieder durchsucht und verarbeitet werden. Wenn sie sehr groß sind, beansprucht das viel Zeit. Die Geschwindigkeit des Zugriffs auf gespeicherte Daten beträgt heute bestenfalls 10^{12} Bytes (1 Terabyte) pro Sekunde; 10 PB zu durchsuchen, dauert somit rund drei Stunden. Um übermäßige Wartezeiten zu vermeiden, sollte man deshalb den Daten Indexstrukturen überstülpen können, die es erlauben, jederzeit gezielt relevante Teilmengen auszuwählen.

Wenn Forschungsarbeiten auf der Auswertung verschiedener Datensammlungen beruhen, ist es zudem unabdingbar, dass die entsprechenden Publikationen eindeutig auf die zu Grunde liegenden Datenbestände verweisen. Dabei müssen Bestände und Software zur Auswertung auch für die Gutachter und andere Leser der Artikel zugänglich sein, weil eine Beurteilung solcher Veröffentlichungen anders nicht möglich ist.

Schließlich ist zu berücksichtigen, dass wissenschaftliche Projekte immer öfter gemeinsam von mehreren Instituten und Arbeitsgruppen durchgeführt werden. Jede Einrichtung erzeugt oder verarbeitet in diesem Fall einen Teil der Daten, wobei andere Kooperationspartner eventuell auf ihre Ergebnisse zugreifen. Da auch Urheberrechte und Fragen der wissenschaftlichen Priorität eine Rolle spielen, muss gewährleistet sein, dass keine Gruppe Daten einer anderen sehen kann, die diese nicht zur gemeinsamen Nutzung freigegeben hat. Eng damit verwandt ist die Forderung, dass alle Interaktionen der Wissenschaftler mit den Datenbeständen – wie Modelldefinitionen, Auswertungen, Veröffentlichungen und so weiter – automatisch zu einer Projektdokumentation zusammengeführt werden.

Allerdings sollen die Schutzvorkehrungen die Zusammenarbeit nicht behindern. Tat-

Größenvergleich

1 Petabyte = 10^{15} Bytes = 1 000 000 000 000 000 Bytes

Buch mit 330 Seiten: 1 Million = 10^6 Buchstaben (1 Buchstabe entspricht 1 Byte)

Library of Congress: Rund 31 Millionen Bücher (ohne Handschriften, Fotos und so weiter); 1 PB entspricht also dem Umfang von 10 Millionen Kongressbibliotheken.

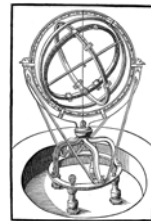
Schnelle DSL-Leitung: 50 Mbit/Sekunde $\approx 8 \times 10^6$ Bytes/Sekunde

Transfer von 1 PB über diese Leitung: $1,25 \times 10^8$ Sekunden ≈ 1448 Tage ≈ 4 Jahre

Entwicklung der wissenschaftlichen Vorgehensweise

BIS VOR RUND 300 JAHREN: EMPIRIE

Wissenschaft beschränkt sich auf die empirische Beschreibung der Naturphänomene. Gelegentlich werden auch (empirisch abgeleitete) Rechenregeln entwickelt, etwa zum Erstellen von Kalendern.



AUS: TICHIO BRANIE, MECHANICA, 1664

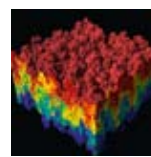
SEIT 300 JAHREN: THEORIE

Forscher gehen dazu über, Naturphänomene zu generalisieren und in Form von (mathematischen) Modellen theoretisch erklärbar zu machen.

$$\left[\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \right] = \frac{4\pi G \rho}{3} - \kappa \frac{C^2}{a^2}$$

SEIT ETWA 50 JAHREN: SIMULATION

Naturphänomene wachsender Komplexität lassen sich mit zunehmender Genauigkeit auf Computern simulieren – oft unter Rückgriff auf mathematische Modelle.



ILLUMINOV

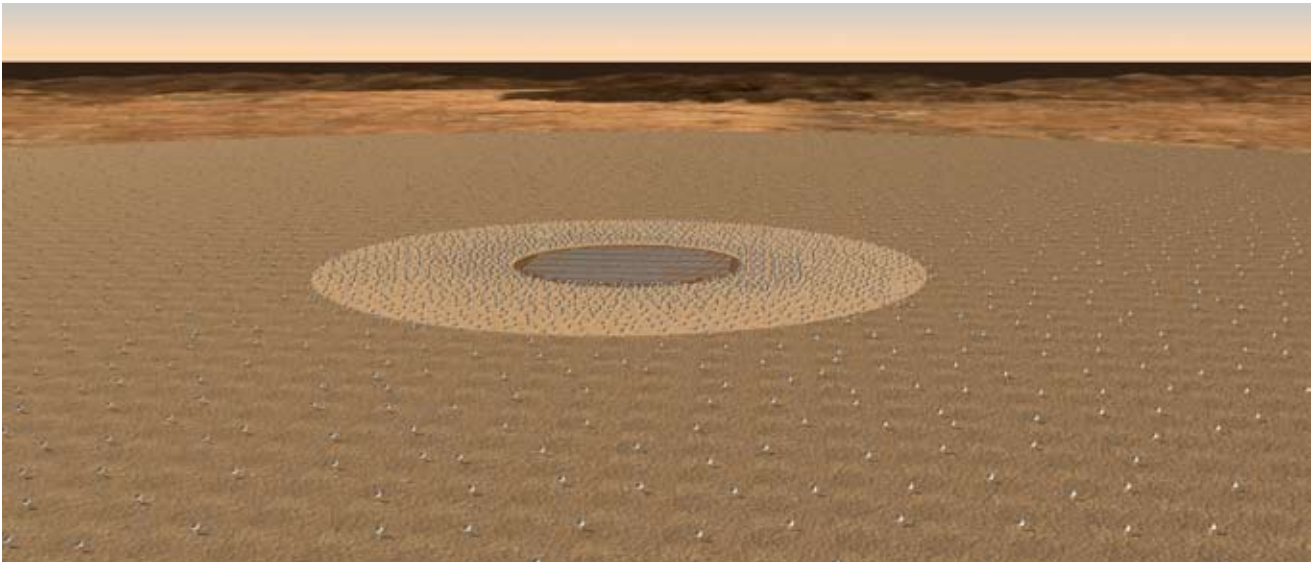
HEUTE: DATENGETRIEBENE WISSENSCHAFT

Experiment, Theoriebildung und Simulation werden zusammengeführt:

- ▶ Geräte und Simulationen erzeugen sehr große Mengen von Daten.
- ▶ Diese Daten werden durch Software aufbereitet.
- ▶ Die Daten und die daraus abgeleiteten Informationen werden in Computern gespeichert.
- ▶ Die Wissenschaftler analysieren die Datensammlungen mit Hilfe von Suchverfahren, statistischen Methoden, Visualisierungsverfahren und so weiter.



KLEINES FOTO: ESO, STÉPHANE GLUISARD; RECHTS: BESSELFUNCTIONS, CC-BY-2.5



SKA/ALLO STUDIOS

Das Square Kilometer Array, ein für 2024 geplantes System von Radioteleskopen, wird 1 Petabyte (PB) an Daten pro Tag liefern. Solch riesige Datenmengen lassen sich nicht mehr ohne äußerst leistungsfähige Computer und ausgefeilte Software auswerten.

sächlich scheuen viele Wissenschaftler immer noch davor zurück, ihre Ergebnisse in eine gemeinsam mit anderen genutzte Datenbank zu stellen, auch wenn es strikte Zugriffskontrollen gibt. Oft schicken dieselben Forscher ihre Daten freilich bedenkenlos per E-Mail an Kollegen, obwohl im Prinzip jeder deren Inhalt während der Übertragung mitlesen kann.

Schließlich muss sichergestellt sein, dass relevante Daten nicht durch Hardwareausfälle oder Bedienfehler verloren gehen können. Viele Förderinstitutionen für Forschungsprojekte verlangen Mindestaufbewahrungsfristen für alle projektbezogenen Daten und Ergebnisse.

Das Ende pragmatischer Schnellschüsse

Heute werden die genannten Probleme oft in jedem Institut oder für jedes Projekt durch Rückgriff auf etwas halbwegs Brauchbares immer wieder von Neuem gelöst. Diese Ad-hoc-Lösungen sind in der Regel aber so spezifisch, dass sie schon für das nächste Projekt nicht mehr taugen (jedenfalls nicht vollständig). Außerdem legt jedes Labor und jede Projektgruppe eigene Regeln und Konventionen fest. Das macht die Übertragbarkeit der Daten oft schwierig bis unmöglich. Statt pragmatischer Schnellschüsse müssen in Zukunft also generische Lösungen her, die sich für eine große Klasse von Problemen und für unterschiedli-

che Auswertungsbedürfnisse eignen. Auf sie hinzuwirken, ist auch eine Aufgabe der nationalen und supranationalen Förderinstitutionen. Anderenfalls wäre eine datenzentrierte Kooperation über verschiedene Disziplinen hinweg zum Scheitern verurteilt.

Im Zusammenhang mit der computergestützten Wissenschaft sind aber nicht nur methodische und Informatikprobleme zu lösen. So erfordert etwa die Möglichkeit zur Integration von Datenbeständen über die Grenzen von Projekten und Disziplinen hinweg die Definition von Standards möglichst großer Reichweite. Außerdem können Zentren zum Verwalten umfangreicher Datenbestände sowie die Hochleistungsrechner zu deren Bearbeitung nicht an jedem Institut oder auch nur an jeder Universität eingerichtet werden – das wäre viel zu teuer. Sinnvoll ist eine hierarchische Organisation mit wenigen Supercomputerzentren an der Spitze, einigen »großen« Zentren darunter und vielen Institutsservern auf der dritten Stufe.

Der Aufbau solcher nationalen oder besser noch internationalen Kooperationsstrukturen ist naturgemäß auch ein politisches Thema, in das Standortpräferenzen und Prestigefragen hineinspielen. Immerhin laufen bereits die erforderlichen Abstimmungsprozesse in Deutschland, Europa, den USA, Australien oder China. Das nächste Ziel für die Spitze der Hierarchie ist jedenfalls schon definiert:

ein Rechner, der rund 1000-mal so schnell arbeitet wie der heutige Rekordhalter, also eine Leistung im Bereich von Exaflops (10^{18} Rechenoperationen pro Sekunde) erbringt.

Die Informationstechnologie hat somit eine ganze Reihe von Problemen zu lösen, um der modernen, datengetriebenen Wissenschaft gerecht zu werden –, und eines der schwierigsten, die Parallelverarbeitung auf Millionen von Rechenknoten, habe ich nicht einmal angesprochen. Wichtig ist, dass die Werkzeugentwicklung auf Seiten der Informatik Hand in Hand mit Methodenentwicklung auf Seiten der Wissenschaft geht. Denn nur so funktioniert jenes Wechselspiel, das seit jeher Triebfeder des wissenschaftlichen Fortschritts war: Neue Methoden stellen neue Anforderungen, und neue technische Möglichkeiten eröffnen den Weg zu neuen Methoden. ~

DER AUTOR



Andreas Reuter ist Professor für Informatik an der Universität Heidelberg und Geschäftsführer des Heidelberger Instituts für Theoretische Studien (HITS).

QUELLEN

Bell, G. et al.: Petascale Computational Systems: Balanced Cyber-Infrastructure in a Data-Centric World. Letter to NSF Cyberinfrastructure Directorate. In: IEEE Computer 39, S. 110–112, 2006
Hey, T. et al.: The Fourth Paradigm – Data-Intensive Scientific Discovery. Microsoft Corporation, 2009

Der Kosmos im Computer

Die Arbeitsgruppe »Theoretische Astrophysik« schlägt eine Brücke vom Universum kurz nach dem Urknall bis zur Gegenwart. In den fortgeschrittensten Supercomputersimulationen untersuchen die Forscher, wie sich aus der einst homogen verteilten Materie die heutige Vielfalt von Galaxien entwickeln konnte.

Von Volker Springel

Astronomie und Astrophysik beschäftigen sich mit dem wohl größten aller denkbaren Forschungsgegenstände: dem Universum als Ganzem. Tatsächlich sprengen die Dimensionen der Zahlen in diesen Disziplinen die menschliche Vorstellungskraft und Erfahrungswelt. Welche physikalische Größe man auch betrachtet – ob Temperatur, Dichte, Druck oder Magnetfeldstärke –, im Universum finden wir dafür fast durchweg Zahlenwerte, die um viele Größenordnungen über allem liegen, was wir auf der Erde und in unseren Laboratorien je werden messen können.

Schon grundlegende Tatsachen über den Kosmos übersteigen unseren Erfahrungshorizont. Wir wissen heute, dass das Universum etwa 13,6 Milliarden Jahre alt ist, dass dieses Raumzeitgebilde expandiert und dass sich die Expansion sogar immer weiter beschleunigt. Wir wissen, dass Sterne viele hundert Millionen Jahre lang leben – aber nicht ewig –, dass Planeten um andere Sterne eher die Regel als die Ausnahme sind und dass große Galaxien gewaltige Schwarze Löcher beherbergen.

Vielleicht die größte Zumutung, welche die moderne Kosmologie für unseren Verstand bereithält, ist aber die Entdeckung, dass das Universum vor allem so genannte Dunkle Materie und Dunkle Energie enthält. Erstere besteht aus einer bislang noch nicht nachgewiesenen Teilchenart, die sich vor allem durch ihre Schwerkraftwirkung verrät. Die Dunkle Energie ist noch rätselhafter. Forscher machen sie für die beschleunigte Ausdehnung des Kosmos verantwortlich.

Im Universum dominieren also keineswegs die Atome der »normalen«, so genannten baryonischen Materie. Vielmehr repräsentiert der Stoff, aus dem wir selbst ebenso wie Sterne und Galaxien bestehen, gerade einmal vier Prozent der kosmischen Energiedichte.

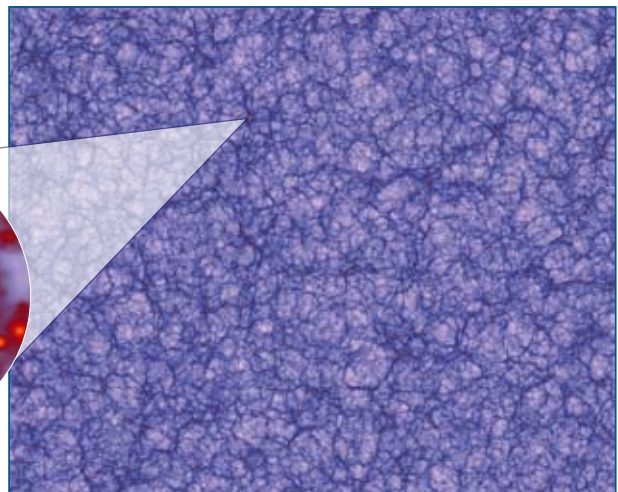
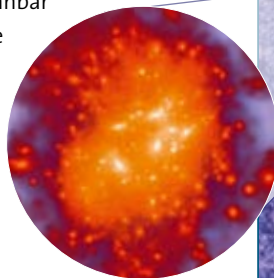
Diese Erkenntnis verdanken wir dem Lambda-CDM-Modell (*Lambda Cold Dark Matter*), das als Standardmodell der Kosmologie gilt. Als umfassende Theorie des Universums erklärt es eine Vielzahl astronomischer Daten und macht auch genaue Voraussagen darüber, wie das All unmittelbar nach dem heißen Urknall vor 13,6 Milliarden Jahren

ausgesehen hat. Zu jener Zeit waren Materie und Strahlung fast perfekt gleichmäßig verteilt, abgesehen von winzigen Abweichungen, den Folgen von Quantenfluktuationen in einer frühen Phase des Urknalls. Diese lassen sich noch heute messen, denn sie sind dem extrem gleichmäßigen »Hintergrund« aus Mikrowellenstrahlung aufgeprägt, der das All erfüllt. Die Astronomen vermuten, dass die Schwankungen gleichsam die Saatkörner für alle späteren von der Schwerkraft geformten Materiestrukturen im Universum darstellen.

Um die Entstehung dieser Strukturen zu untersuchen, sind wir mittlerweile nicht mehr allein auf Beobachtungen angewiesen. Vielmehr haben sich Computersimulationen als außerordentlich wichtiges neues Forschungsinstrument etabliert. Dank ihrer Hilfe lassen sich komplexe physikalische Gleichungssysteme lösen, ohne dass wir auf Vereinfachungen zurückgreifen müssen, welche die Ergebnisse verfälschen. Auch virtuelle astrophysikalische Experimente sind nun möglich. Im Computer können wir beispielsweise zwei Galaxien kollidieren und miteinander verschmelzen

Vom großen Ganzen zum Detail

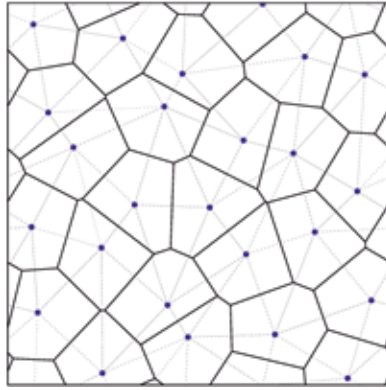
In den Filamenten aus Dunkler Materie, die im Lauf der Millennium-XXL-Simulation entstehen, bilden sich ganze Haufen von Galaxien, im Bildausschnitt rechts erkennbar als kleine, helle Flecken. Die Kantenlänge dieses zweidimensionalen Ausschnitts aus der Simulation beträgt mehrere Milliarden Lichtjahre. Zoomt man in sie hinein (kreisförmiger Bildausschnitt, Durchmesser rund 20 Millionen Lichtjahre), sieht man die Materieansammlungen in höherer Auflösung. Je heller hier die Bildpunkte, desto größer ist die Dichte der Dunklen Materie.



ALLE ABILDUNGEN DIESER ARTIKELS: VOLKER SPRINGEL

Dem Geschehen dynamisch auf der Spur

Um Gase oder Flüssigkeiten in einem Volumen zu untersuchen, kann man den Raum in statische Zellen unterteilen. Besser ist jedoch ein Voronoi-Gitter (Grafik), wie es der Simulationskode AREPO für die Berechnung von strömenden Gasen verwendet. Jede Zelle umfasst den Raumbereich, der dem zugehörigen Punkt am nächsten liegt. Die Wände zwischen den Zellen sind die Ebenen, welche die Verbindungsstrecken (gepunktet) benachbarter Punkte in der Mitte senkrecht durchschneiden. Verschiebt man die Punkte mit der lokalen Gasgeschwindigkeit, verändert sich das Gitter dynamisch. Die räumliche Auflösung des Verfahrens ist dadurch gerade dort besonders hoch, wo viel geschieht.



lassen. Solche Verschmelzungsprozesse spielen eine entscheidende Rolle beim Aufbau immer größerer Galaxien. Während wir sie in der Natur nie beobachten können – schließlich benötigen sie Jahrtausende –, lassen sie sich nun am Rechner simulieren.

Genau solchen Experimenten widmet sich meine Arbeitsgruppe »Theoretische Astrophysik« am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS). Mit ihnen wollen wir eine Brücke vom Universum kurz nach dem Urknall, als es sich durch nur wenige Parameter vollständig beschreiben ließ, bis zu seinem heutigen komplexen Zustand schlagen. Vor allem haben wir uns zum Ziel gesetzt, das Phänomen der Galaxienbildung über die gesamte Zeit seit dem Urknall aufzuklären.

Bei der Entstehung von Galaxien ist ein außerordentlich breites Spektrum an physikalischen Prozessen im Spiel. Es reicht von der Dynamik der Dunklen Materie und der Dunklen Energie über Vorgänge bei der Sternentstehung bis hin zur Entwicklung superschwerer Schwarzer Löcher, zu elektromagnetischen Strahlungsprozessen und zur Magnetohydrodynamik. Es sind vor allem Computersimulationen, welche diese Komplexität berechenbar machen.

Ein aktuelles Beispiel dafür ist die Millennium-XXL-Simulation, die wir unlängst mit Kollegen des internationalen Virgo-Konsortiums auf dem JuRoPa-Supercomputer am Forschungszentrum Jülich durchgeführt haben. In diesem Modell verfolgen wir die Entstehung kosmischer Strukturen wie Galaxien

und Galaxienhaufen. Es enthält 303 Milliarden (6720^3) Dunkle-Materie-Bausteine, die eine würfelförmige Raumregion mit einer Kantenlänge von weit mehr als zehn Milliarden Lichtjahren erfüllen. Die Dunkle-Materie-Bausteine unserer Simulation sind dabei nicht als Elementarteilchen zu verstehen. Vielmehr ist jeder einzelne von ihnen ein fiktives Makropartikel mit einer Milliarde Sonnenmassen.

Die weltgrößte kosmologische Simulation

Ihre Auflösung und ihr Volumen machen Millennium-XXL, die ihren Vorgänger darin um den Faktor 30 übertrifft, zur weltweit größten kosmologischen Simulation überhaupt. Sie liefert unerreicht genaue statistische Daten über die großräumige Struktur des Kosmos und die Entstehungsgeschichte von etwa 500 Millionen Galaxien.

Diese Daten sind unerlässlich, um zukünftige Beobachtungsprogramme, welche die zeitliche Entwicklung der Dunklen Energie im Universum und ihre physikalische Natur ergründen sollen, zu kalibrieren und systematische Fehlerquellen auszuschließen. Der Grundgedanke besteht darin, dass die beobachtbare Galaxienverteilung Rückschlüsse auf die tatsächliche Materieverteilung im Universum zulässt. Welcher Art diese Beziehung ist, die vom Galaxientyp und auch von der Zeit abhängt, können wir dank der Simulationsdaten genau untersuchen. In der Materieverteilung finden wir wiederum so genannte baryonische akustische Oszillationen, die ihrer-

seits eine Signatur der Expansionsgeschichte des Alls darstellen und damit wichtige Hinweise auf die Eigenschaften der Dunklen Energie geben.

Seit den frühen 1980er Jahren hat sich die Zahl der Teilchen in den jeweils größten kosmologischen Simulationen etwa alle eineinhalb Jahre verdoppelt. Diesem langjährigen Trend zufolge hätte die Millennium-XXL-Simulation erst im Jahr 2015 möglich sein sollen. Dass sie schon heute realisiert wurde, ist unseren neuen Strategien im Umgang mit extrem großen Datenmengen und den darauf aufbauenden Galaxienmodellen zu verdanken. Sie fanden ihren Niederschlag zum einen in einer speziell angepassten Version unserer Simulationssoftware GADGET3. Zum anderen reizten wir die Möglichkeiten des JuRoPa-Supercomputers am Forschungszentrum Jülich voll aus.

Dort schufteten alles in allem 12288 Prozessoren gemeinsam an der Rechnung. In insgesamt fast drei Millionen Arbeitsstunden führten sie 86 Trilliarden Kraftberechnungen aus. Jede einzelne davon ermittelt die gravitative Wechselwirkung eines einzelnen Dunkle-Materie-Bausteins mit allen anderen Komponenten der Simulation. Dank der Parallelisierung der Berechnungen erhielten wir das Ergebnis schon nach 9,3 Tagen. Ein gewöhnlicher Computerprozessor, der eine Rechnung nach der anderen ausführt, hätte dazu gut 300 Jahre benötigt.

Einer der wichtigsten Faktoren, welche die Größe solcher Simulationen beschränken, ist der Speicherbedarf. Für unseren neuen Code entwickelten wir daher auch besonders speichereffiziente und schnelle Berechnungsverfahren. Am Ende benötigte die Rechnung für die 303 Milliarden Teilchen dennoch fast 30 Terabyte oder 30 000 Gigabyte Hauptspeicher, womit wir den uns zugeteilten Speicher des Superrechners vollständig ausnutzten.

Das riesige Volumen der Millennium-XXL-Simulation erlaubt es, auch extrem seltene Ereignisse und Objekte aufzuspüren, beispielsweise sehr massereiche Galaxienhaufen. Das Lambda-CDM-Modell sagt voraus, dass die Masse von Galaxienhaufen eine recht scharf definierte Obergrenze im Bereich von einigen 10^{15} Sonnenmassen besitzt. In jüngster Zeit wurden tatsächlich einige Exemplare entdeckt, die recht nahe an dieser Grenze liegen. Manche Forscher behaupten sogar, sie lägen bereits darüber. In der Millennium-

XXL-Simulation bilden sich tatsächlich auch Galaxienhaufen, die ein wenig mehr Masse besitzen. Noch besteht daher kein offensichtlicher Grund zur Besorgnis: Alle Galaxienhaufen, die je beobachtet wurden, lassen sich weiterhin mit dem kosmologischen Standardmodell erklären. Doch schon die Entdeckung eines einzigen Haufens, dessen Masse diese Grenze deutlich überschreitet, könnte es widerlegen.

Eher ein Gas als eine Flüssigkeit

Trotz ihrer beeindruckenden Größe besitzt die Millennium-XXL-Simulation einen Nachteil: Über kleinräumige Strukturen und Vorgänge in einzelnen Galaxien trifft sie nur wenige Aussagen. Schließlich ist selbst ein Objekt von der Größe der Milchstraße durch gerade einmal 1000 Bausteine repräsentiert. Hinzu kommt: Unsere Simulation behandelt die normale baryonische Materie der Einfachheit halber als stoßfreies Fluid; als einzige Wechselwirkung ist also die Schwerkraft berücksichtigt. Tatsächlich unterliegt die Materie aber Druckkräften und verhält sich damit eher wie ein ideales Gas. Außerdem kann sie thermische Energie verlieren, indem sie Strahlung abgibt. Unter der Wirkung der Schwerkraft kann sie also, weil sie von Hitze weniger stark auseinandergetrieben wird, noch viel stärker verklumpen als Dunkle Materie.

Diese Unterschiede von baryonischer und Dunkler Materie werden auf kleinen Skalen wichtig. Wir müssen also die baryonischen Prozesse korrekt simulieren, wenn unser Modell auch über die inneren Regionen von Galaxien Aussagen treffen soll. Die Berechnung des hydrodynamischen Verhaltens normaler Materie erweist sich allerdings als ausgesprochen anspruchsvoll. Die typische Dichte des Wasserstoff- und Heliumgases, das sich zu sternbildenden Galaxien verdichtet, ist sehr niedrig. Ein solches ideales Gas, in dem praktisch keine innere Reibung stattfindet, neigt über einen sehr weiten Skalenbereich hinweg stark zu Turbulenzen. Zudem führen große Unterschiede in Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit zu gewaltigen Überschallströmungen. Und schließlich »spürt« auch jedes Teilchen im Gas die Schwerkraft aller anderen Gaspartikel. Während diese so genannte Eigengravitation bei strömungsmechanischen Problemen auf der Erde völlig vernachlässigbar ist, gewinnt sie in der Astrophysik entscheidende Bedeutung. So kontrahiert

etwa eine Gaswolke nur deshalb allmählich zu einem Stern, weil sich die Teilchen gegenseitig anziehen.

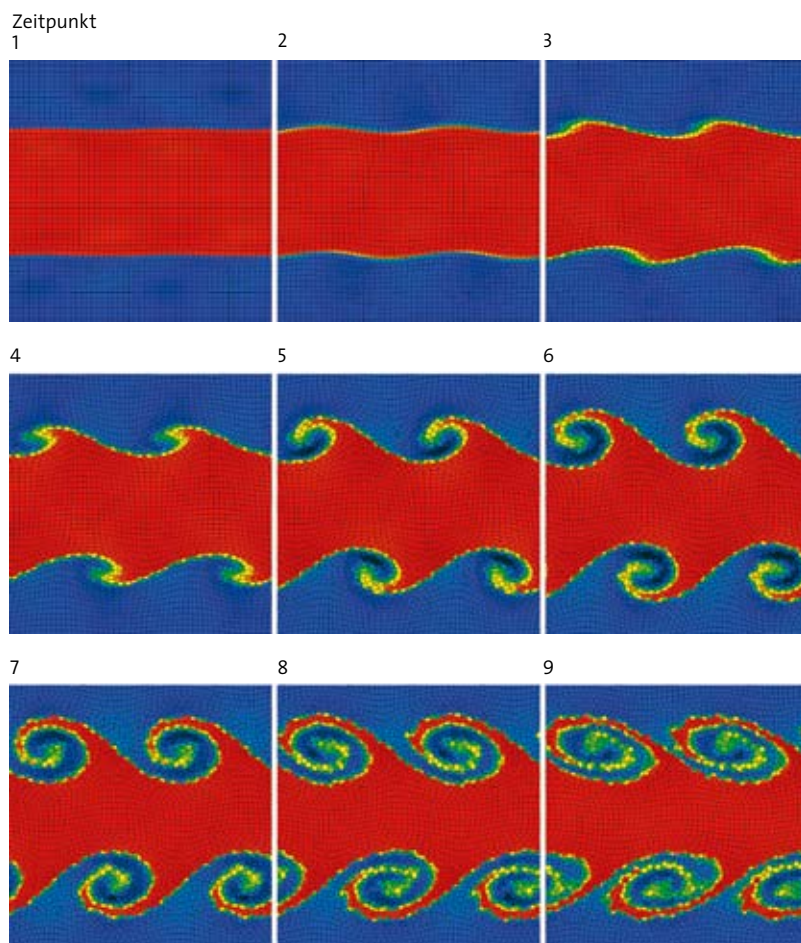
Astrophysiker müssen also neue Wege gehen, um geeignete numerische Verfahren für die Kosmologie zu entwickeln. Die zentrale Idee des Ansatzes zur Simulation baryonischer Gase, den unsere Gruppe entwickelt hat, ist der Einsatz eines unstrukturierten Gitters, das im Unterschied zu herkömmlichen Verfahren nicht stationär ist, sondern sich mit dem Gas mitbewegen kann. Dadurch lässt sich genau dort, wo die relevanten Prozesse stattfinden, eine hohe Auflösung erzielen. Bei der neuen Methode gehen wir von einem Satz von Punkten im Raum aus, die jeweils von einer so ge-

nannten Voronoi-Zelle umgeben sind. Diese besteht einfach aus derjenigen Raumregion, die näher an diesem Punkt liegt als an irgendeinem anderen. Gemeinsam bilden die Voronoi-Zellen dann ein Voronoi-Gitter, das den Raum gewissermaßen pflastert. Die Wände zwischen den Zellen sind die Ebenen, welche die Verbindungsstrecken benachbarter Punkte in der Mitte senkrecht durchschneiden (siehe Abbildung S. 11). Nun kann man, während sich Gestalt und Topologie des Gitters kontinuierlich ändern, die Bewegung der einzelnen Punkte der lokalen Bewegung des Gases anpassen.

Darüber hinaus gelang es uns, ein so genanntes Godunov-Verfahren höherer Ord-

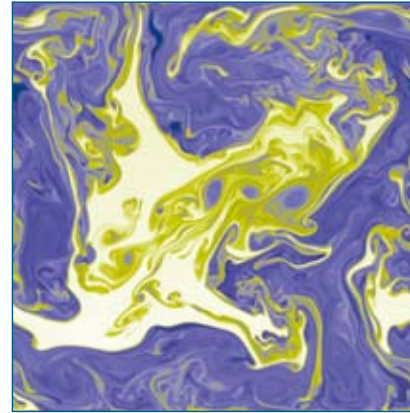
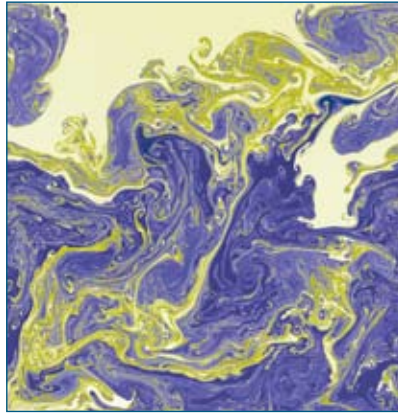
Klügere Algorithmen, weniger Artefakte

Bewegen sich zwei Phasen eines Gases aneinander vorbei – im Beispiel fließt eine dichte Phase (rot) nach rechts, eine weniger dichte (blau) nach links –, entsteht eine so genannte Scherströmung, die zu typischen Kevin-Helmholtz-Wirbeln führt (unterste Zeile). Ein dynamisch mitbewegtes Voronoi-Gitter (schwarz umrandete Gitterzellen) erlaubt es, sie korrekt und ohne Artefakte darzustellen.



Näher an der Realität

Rayleigh-Taylor-Instabilitäten führen dazu, dass sich zwei Phasen eines Fluids turbulent miteinander vermischen. Das Bild links zeigt das Simulationsergebnis bei mitbewegtem Gitter, rechts kam ein traditionelles festes Gitter zum Einsatz. Letzteres führt zu größeren Advektionsfehlern, so dass sich die simulierten Fluide lokal viel stärker als in der Realität vermischen. Auch die feine Schichtung der Phasen geht früher verloren.



nung auf dem bewegten Gitter zu implementieren. Mit seiner Hilfe können wir mit analytischen Methoden bestimmen, wie viel Masse, Energie und Impuls eine Zelle nach jedem Zeitschritt enthält.

Mitfließende Gitter

Der wesentliche Vorteil ist dabei der lagrange-sche Charakter der Methode. Wenn irgendwo im Universum eine neue Galaxie entsteht und sich die Gasdichte in dieser Region millionenfach erhöht, dann fließt das Gitter automatisch mit. Es erlaubt also genau dort eine stark erhöhte räumliche Auflösung, wo die Galaxie entsteht. Daneben erweisen sich die Zahlenwerte der Ergebnisse, anders als in traditionellen Gittermethoden, als vollständig unabhängig vom verwendeten Bezugssystem.

Das fließende Gitter verringert zudem Advektionsfehler. Zu diesem Typ von Berechnungsfehler kommt es, wenn ein Masseteilchen mit der Strömung mitgeführt wird und dabei nicht vollständig, sondern nur teilweise von einer Zelle in die nächste übertritt, so dass es zu einem unerwünschten Ausschmieren der Strömung kommt. Wegen der diskreten Struktur des Gitters lässt sich dieser Vorgang mathematisch nicht exakt darstellen. In einem bewegten Gitter kann die Zelle hingegen passend mitbewegt werden, so dass sich viele Advektionsfehler von vornherein vermeiden lassen und ein künstliches Mischen in hohem Maß verhindert wird.

Ein Beispiel zeigen die Bilder links. Hier strömen unterschiedlich dichte Gase aneinander vorbei. Dabei wachsen kleine Störungen an der Grenzfläche schnell zu wellenartigen Wirbeln heran, welche die beiden Phasen schließlich turbulent miteinander vermischen.

Will man diese so genannten Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten numerisch beschreiben, führen Advektionsfehler in der Regel dazu, dass sich die Phasen im Modell früher vermischen als in der Realität. Indem wir diese Fehler stark reduzieren, können wir Überschallströmungen und Turbulenzen mit größerer Präzision darstellen (Bilder links und oben). Deshalb wollen wir das neue Verfahren auch in unserer Simulationssoftware AREPO einsetzen. An ersten Rechnungen dieser Art arbeiten wir bereits intensiv, sowohl mit Kollegen am Harvard Center for Astrophysics in Cambridge (Massachusetts) als auch im Virgo-Konsortium.

Außerdem wollen wir in der nächsten Zeit endlich die Entstehung von Spiralgalaxien besser verstehen lernen. Sternsysteme dieses Typs sind zwar die häufigsten im Universum, doch in bisherigen Simulationen bildeten sich fast ausschließlich elliptische Galaxien. Wir vermuten die Gründe dafür in einem unzureichenden Verständnis der Regulation der Sternentstehung durch bestimmte astrophysikalische Prozesse wie etwa die Explosion von Sternen als Supernovae. Auch die mangelnde Genauigkeit der bisher eingesetzten numerischen Methoden spielt eine Rolle. Zumindest dieses zweite Problem wird unser neuer AREPO-Kode möglicherweise lösen können.

Die vielleicht größte Aufgabe der Kosmologen besteht in diesen Jahren aber darin, die Rätsel um die Dunkle Seite des Kosmos aufzuklären. Mit unseren Simulationen versuchen wir, sie dabei zu unterstützen – indem wir physikalische Modelle überprüfen helfen, die eines Tages unser gesamtes Universum beschreiben könnten. ∞

DER AUTOR



Volker Springel hat in Tübingen und an der University of California in Berkeley Physik studiert und im Jahr 2000 an der Ludwig-Maximilians-Universität München promoviert.

Als Postdoc war er an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, wo er anschließend bis 2010 eine Forschungsgruppe zur numerischen Kosmologie leitete. Seither ist er Professor für Theoretische Astrophysik an der Universität Heidelberg. Hier forscht er am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) und am Astronomischen Recheninstitut des Zentrums für Astronomie.

QUELLEN

Springel, V.: E pur si muove: Galilean-invariant Cosmological Hydrodynamical Simulations on a Moving Mesh. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 401, S. 791–851, 2010. Vorab publiziert auf <http://arxiv.org/abs/0901.4107>

Vogelsberger, M. et al.: Moving Mesh Cosmology: Numerical Techniques and Global Statistics. Eingereicht. Vorab publiziert auf <http://arxiv.org/abs/1109.1281>

WEBLINK

www.h-its.org/tap

Details zu Millennium-Simulationen und weiteren Simulationsprojekten der HITS-Arbeitsgruppe Theoretische Astrophysik

Das biomolekulare Erkennungspuzzle

Proteine sind die Funktionsträger des Lebens. Ihre Wechselwirkungen miteinander und mit anderen Biomolekülen sorgen dafür, dass Zellen ihre Aufgabe im Organismus erfüllen. Um diese Wechselwirkungen besser zu verstehen, setzen Forscher zunehmend rechnergestützte Methoden ein. Computersimulationen von Proteininteraktionen leisten auch einen immer wichtigeren Beitrag zum Design von Wirkstoffen gegen Krankheiten und in der Biotechnologie.

Von Rebecca C. Wade

In einer Zelle wimmelt es geradezu von großen und kleinen Molekülen, die ständig in Bewegung sind. Wie finden und erkennen sie in diesem Gewirr ihre jeweiligen Bindungspartner? Wie können sie mit mehreren anderen Molekülen zusammen Komplexe bilden? Und wie kommt es, dass manche dieser Vorgänge schnell und andere langsam ablaufen? Bei der Suche nach Lösungsstrategien für das Puzzle der biomolekularen Erkennung helfen neben ausgeklügelten Experimenten und biochemischen Untersuchungen vermehrt Berechnungen und Simulationen am Computer. Mit ihnen befassen wir uns in der Arbeitsgruppe »Molekulare und zelluläre Modellierung« am Heidelberger Institut für Theoretische Studien.

Betrachten Sie zum Beispiel ein Puzzle aus 2000 Teilen, das ein Schloss in einer schönen Landschaft zeigt. Einige Plättchen lassen sich ganz einfach platzieren: Flaggen, Turmspitzen oder auch Mauerkanten. Bei anderen hilft nur geduldiges Probieren. Das gilt etwa für grünlliche oder bräunliche Teile, die zu den Bäumen im Wald gehören, oder für solche in den verschiedenen Blautönen des Himmels.

Bei der Bindung zwischen Biomolekülen spielt wie im Puzzle die Passform eine wesentliche Rolle. Dies erkannte vor über einem Jahrhundert bereits Emil Fischer, der die Wechselwirkungen zwischen Enzymen und Substraten mit dem Bild von Schlüssel und Schloss beschrieb. Doch wie bei den Puzzleteilen reicht die Gestalt nicht aus, um alle möglichen Wechselwirkungen eindeutig zu beschreiben. Einige Moleküle tragen gut definierte »Flaggen«, die ihre Position in der Zelle oder ihre Beziehung zu anderen Stoffen bestimmen. So legen etwa bei manchen Protei-

nen kurze lineare Sequenzmotive fest, an welcher Stelle sich eine andere Substanz anlagern kann. In vielen Fällen jedoch ist weniger offensichtlich, woran Moleküle einander erkennen.

Wie stark und selektiv sich zwei Substanzen aneinander binden, hängt von der freien Energie der betreffenden Bindung ab. Diese wiederum setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. Das Problem ist, dass diese oft groß sind und teils entgegengesetzte Wirkungen haben. Aus diesem Grund bedarf es sehr genauer Berechnungen, um aus den Einzelkomponenten die (häufig sehr kleine) Summe korrekt zu ermitteln.

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass die relative Bedeutung der Komponenten von Fall zu Fall variiert, was es schwer macht, ein allgemein gültiges Computermodell für ein solches Problem zu entwickeln. So dominieren bei einer Bindung zwischen Proteinen manchmal weit reichende elektrostatische Kräfte, dank deren sich Moleküle auch über

größere Distanzen hin finden. Manchmal spielen sie dagegen kaum eine Rolle. In solchen Fällen leisten zum Beispiel anziehende Kräfte zwischen hydrophoben (Wasser meidenden) Gruppen, die nur eine geringe Reichweite haben, den größten Beitrag zur Bindungsstärke. Das Problem der genauen Beschreibung der physikochemischen Wechselwirkungen zwischen Molekülen – sei es mit einer auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten basierenden Energiefunktion oder einer rein empirisch aufgestellten Funktion – wird gewöhnlich als Scoring-Problem bezeichnet.

Eine weitere Herausforderung ist das so genannte Sampling-Problem. Schon beim Puzzle gibt es unzählige denkbare Kombinationen der einzelnen Plättchen – und der Spieler bemüht sich, die Möglichkeiten einzugrenzen, um die Anzahl der vergeblichen Versuche beim Einpassen eines Teils zu verringern. Ein Puzzle ist jedoch nur ein zweidimensionales Objekt. Das Durchprobieren

Suche nach Enzymhemmern am Computermodell

Auf dem Strukturbild eines Enzyms namens LmPTR1, das nur im *Leishmania*-Parasiten vorkommt und sich deshalb als Angriffspunkt für Medikamente gegen die Leishmaniose eignet, ist die Oberfläche der vier identischen Untereinheiten in verschiedenen Farben dargestellt (links). An einem der aktiven Zentren haftet sein gewöhnliches Substrat, ein Molekül namens Pteridin (dunkelviolet), zusammen mit dem Kofaktor (NADPH, türkis). Die Ausschnittvergrößerung (rechts) zeigt die Bindungstasche des Enzyms (graue Moleküloberfläche) mit zwei daran angelagerten potenziellen Hemmstoffen. Farblich hervorgehoben sind Proteinregionen, die laut Berechnung die Bindung Wasser abweisender (gelb) oder Wasser liebender funktioneller Gruppen (blau) begünstigen. Die Wirkstoffkandidaten (gelb, hellblau) lagern sich zwischen dem Kofaktor (grau) und den ringförmigen aromatischen Seitenketten zweier Aminosäuren des Proteins ein (alle drei als Stäbchenmodell dargestellt).

möglicher Konstellationen in einem dreidimensionalen biomolekularen System mit ungleich mehr »Teilen« stellt noch viel höhere Anforderungen.

So hat jedes Teilchen im Raum drei Freiheitsgrade für die Translation und drei für die Rotation. Hinzu kommt, dass die Moleküle nicht starr wie Puzzleteile sind, sondern auf Grund thermischer Bewegungen ständig ihre Gestalt ändern. Auch können sie, wenn sie eine Bindung eingehen, ihre Form aneinander anpassen. Biomolekulare Systeme haben also extrem viele Freiheitsgrade, was die Entwicklung detaillierter Modelle erschwert. Diese müssen schließlich alle für die molekulare Erkennung relevanten Variablen genau genug berücksichtigen, ohne dabei die Möglichkeiten des Computers zu überschreiten.

Viele Wege führen zum Modell

Es gibt verschiedene Ansätze zur Konstruktion von Modellen, mit denen sich die Erkennung zwischen Biomolekülen simulieren und vorhersagen lässt. Hier möchte ich auf die zwei gebräuchlichsten näher eingehen, die sich auch miteinander kombinieren lassen.

Die erste Strategie folgt dem bioinformatischen Ansatz. Die Grundlage sind hier experimentelle Ergebnisse, die in eigens dafür angelegten Datenbanken gesammelt werden. Dabei handelt es sich etwa um Molekülstrukturen oder um die Abfolge der Aminosäuren von Proteinen oder die Basensequenz von Genen.

Die Datenbanken werden nun nach Übereinstimmungen beziehungsweise Unterschieden zwischen den Einträgen durchsucht. Findet man etwa Ähnlichkeiten in der Sequenz von Genen oder Proteinen, so deutet das da-

rauf hin, dass die betreffenden Bereiche auf Grund ihrer Funktion während der Evolution weit gehend erhalten geblieben sind. Anhand solcher Sequenzmotive sowie der räumlichen Anordnung der Atome im Molekül gelingt es in einigen Fällen, Bindungsstellen zu identifizieren und die Position der Bindungspartner im Komplex vorherzusagen. Mit Hilfe der dreidimensionalen Molekülstrukturen und der wissensbasierten Analysemethoden können die Forscher dann die Bindungsaffinitäten zwischen Molekülen abschätzen.

Die wachsende Menge an genetischen und strukturellen Daten macht diese Strategie zwar zusehends leistungsfähiger, aber die Qualität ihrer Ergebnisse variiert stark mit den verwendeten Daten und hängt zudem davon ab, inwieweit es gelingt, die jeweils relevanten Informationen aus Datenbanken herauszufiltern.

Die zweite Strategie nutzt physikalisch-chemische Prinzipien zur Modellierung biomolekularer Interaktionen. Dabei erstellen die Forscher mathematische Energiefunktionen, in die physikalische Bindungsfaktoren wie die Van-der-Waals-Wechselwirkungen oder elektrostatische Kräfte eingehen. Nur in wenigen Fällen lohnt es sich hierbei, auf die genauen, aber auch sehr rechenintensiven Methoden der Quantenmechanik zurückzugreifen.

Üblicherweise beschränkt man sich auf den Einsatz molekularmechanischer Modelle, bei denen jedes Atom durch eine passend gewählte Kugel repräsentiert wird. Die Rolle der Bindungen zwischen den Atomen übernehmen Federn mit empirisch bestimmten Eigenschaften wie der Rückstellkraft.

Für die Simulation großer Systeme mit sehr vielen Atomen reicht oft eine weniger de-

taillierte Darstellung. In solchen so genannten *Coarse-Grain*-Modellen werden mehrere Atome, zum Beispiel Seitenketten von Proteinen oder sogar ganze Proteine, zu größeren Partikeln zusammengefasst und mit parametrisierten Interaktionsprofilen versehen.

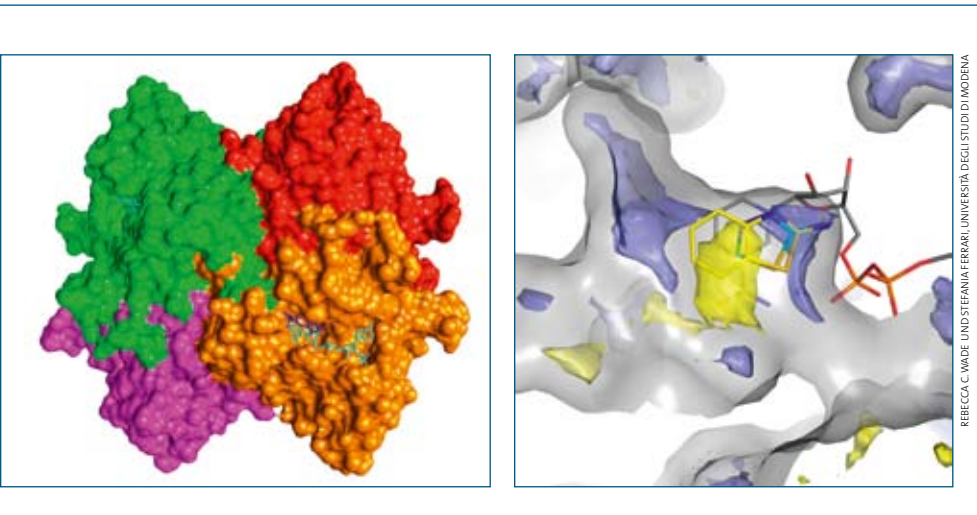
Durch Verwendung geeigneter Energiefunktionen, wie sie bei Moleküldynamik- oder Monte-Carlo-Verfahren zum Einsatz kommen, lassen sich zudem thermische Bewegungen und Verformungen der Biomoleküle simulieren. Das erlaubt nicht nur die Vorhersage von Bindungsstellen und der Struktur von Molekülkomplexen, sondern auch eine Abschätzung der Bindungsstärke und -kinetik. Letztere beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die Bindung bildet beziehungsweise auflöst.

Das Problem, wie sich Biomoleküle erkennen, gehört zwar zunächst in die Grundlagenforschung, ist aber auch beim gezielten Entwurf von Medikamenten und der Entwicklung künstlich modifizierter Proteine von großer Bedeutung. So werden die rechnergestützten Methoden zur Lösung dieses Problems besonders in der pharmazeutischen, agrochemischen und biotechnologischen Industrie eingesetzt. Dort leisten sie gute Dienste vor allem bei der Suche nach biomolekularen Interaktionen in der Wirkstoffentwicklung und bei der Vorhersage, wie sich Mutationen auf die Struktur und Eigenschaften von Proteinen auswirken. Hier möchte ich den Einsatz dieser computergestützten Methoden anhand unserer eigenen Arbeiten beschreiben. Diese reichen von der Medikamentenentwicklung bis zu Untersuchungen der DNA-Anordnung, der Oligomerisierungszustände von Proteinen und der Oberflächenaktivierung.

Wirkstoffe gegen Parasiten

Die Leishmaniose ist eine schwere Erkrankung, an der weltweit rund zwölf Millionen Menschen leiden. Sie tritt hauptsächlich in ärmeren Ländern der warmen Klimazonen auf. Auslöser sind einzellige Parasiten aus der Familie der Trypanosomatidae, die durch Bisse von Sandmücken übertragen werden. Heutige Medikamente sind nur bedingt wirksam und haben viele Nebenwirkungen. Außerdem ist der Erreger gegen viele von ihnen schon mehr oder weniger resistent.

Als aussichtsreicher Angriffspunkt für neuartige Arzneimittel gegen den Parasiten *Leishmania major* ließ sich eine Pteridinreduktase



namens LmPTR1 ausmachen. Sie gehört gemeinsam mit der Dihydrofolatreduktase (DHFR) zum Folatstoffwechselweg und ist wichtig für die DNA-Synthese. Wird sie zusammen mit DHFR gehemmt, kann der Parasit keine neue Erbsubstanz synthetisieren und sich folglich auch nicht vermehren.

Beiden Enzymen ist gemeinsam, dass sie sowohl den Kofaktor NADPH als auch das Substrat Folsäure (oder Abwandlungen davon) bei ihrer enzymatischen Aktivität verwenden. Im Gegensatz zur Dihydrofolatreduktase, die bei den Parasiten wie auch beim Menschen vorkommt, findet man die Pteridinreduktase jedoch nur beim Parasiten. Gelingt es nun, Verbindungen zu finden, die nicht aus der Stoffklasse der Folsäuren stammen, sich aber dennoch spezifisch an das parasitäre Enzym LmPTR1 heften, minimiert man das Risiko von Nebenwirkungen beim Menschen.

Die Kristallstruktur des Enzyms LmPTR1 war schon bekannt. Wir konnten sie also benutzen, um bei einem virtuellen Screening eine große Substanzbibliothek nach geeigneten Verbindungen zu durchsuchen, die gut in das aktive Zentrum des Enzyms passen und keine Ähnlichkeiten zu Folsäurederivaten aufweisen. Um die angestrebte Hemmwirkung

zu erzielen, war es wichtig, dass die Ringstrukturen der Wirkstoffkandidaten zwischen denen des Kofaktors und den aromatischen Seitenketten des Proteins zu liegen kommen (siehe Kasten auf S. 14/15).

Wie Kollegen in Italien und Belgien anhand von Laborexperimenten zeigen konnten, hemmen einige der von uns identifizierten potenziellen Wirkstoffe tatsächlich die Enzymaktivität von LmPTR1. Um diese Substanzen zu optimieren, untersuchten wir in weiteren Simulationen, wie sich durch Austausch einzelner Atome oder Atomgruppen die Bindung an das aktive Zentrum des Enzyms verstärken lässt.

Zwei rechnerbasierte Entwicklungsdurchgänge und eine anschließende experimentelle Prüfung am isolierten Enzym lieferten so 18 spezifisch wirksame LmPTR1-Inhibitoren. Sechs davon hemmten nicht nur die Aktivität des isolierten Enzyms, sondern auch das Wachstum der Parasiten in Zellkultur. Eine dieser Substanzen entspricht sogar dem Wirkstoff eines Medikaments, das bereits zur Behandlung von Erkrankungen des Zentralnervensystems zugelassen ist. Möglicherweise lässt sich dessen Anwendungsbereich auf die Therapie parasitärer Erkrankungen ausweiten.

Dieses Projekt macht deutlich, wie sich unsere rechnergestützten Proteinsimulationen und die von unseren Kollegen in Italien und Belgien durchgeführten Laborexperimente erfolgreich ergänzen. Auch wenn solche computerbasierten Ansätze in der pharmazeutischen Industrie weit verbreitet sind, darf das nicht darüber hinwegtäuschen, dass Standardverfahren häufig Einschränkungen unterliegen und an das zu untersuchende Zielprotein speziell angepasst werden müssen. Beim LmPTR1 war es etwa entscheidend, dass wir vier Wassermoleküle im aktiven Zentrum des Proteins berücksichtigten. Dadurch gelang es, die für die Wirkstoffentwicklung wichtige korrekte Orientierung der Wirkstoffkandidaten zu ermitteln, auch wenn wir die Enzymaktivität beziehungsweise Bindungsstärke nicht zuverlässig vorhersagen konnten.

Raffinierte Packung der DNA

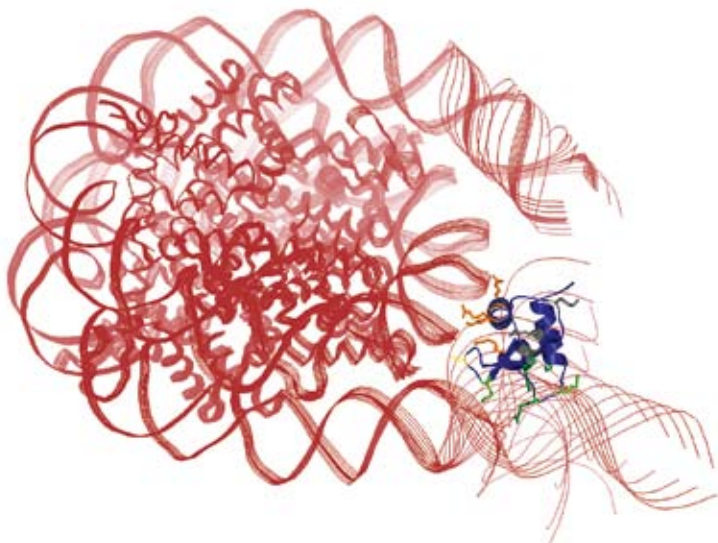
Der Kern einer eukaryotischen Zelle enthält fadenförmige DNA mit einem Durchmesser von etwa 10 bis 20 Mikrometern und einer Gesamtlänge von zwei Metern. Damit die Erbsubstanz überhaupt in die Zelle passt, muss sie zu einer kompakten Struktur, dem so genannten Chromatin, aufgewickelt werden. Um dies zu bewerkstelligen, benutzt die Zelle Histone: positiv geladene Proteine, die sich an die negativ geladenen Nukleinsäuren binden, aus denen die Erbsubstanz besteht.

Den Grundbaustein des Chromatins bilden die Nukleosomen, um deren Proteinkern sich die DNA spulenförmig wickelt. Zwischen ihnen erstrecken sich zunächst noch freiliegende Abschnitte des DNA-Fadens, die als Linker-DNA bezeichnet werden. An die Nukleosomen heften sich die so genannten Linker-Histone. Diese kleinen Proteine sorgen dafür, dass sich die perlschnurartige Nukleosomenkette zickzackförmig zusammenlagert oder wie eine Wendeltreppe windet und so die kompakten Chromatinfasern bildet. Ferner tragen sie dazu bei, das Abschreiben und Vervielfältigen der DNA zu regulieren.

Anders als die Ladungsunterschiede zwischen den Histonen und der DNA vermuten lassen, beruht die Bindung nicht nur auf elektrostatischen Wechselwirkungen. Wir wollten daher genauer wissen, wie sich die Linker-Histone an die Nukleosomen anlagern. Zu diesem Zweck untersuchten wir die Wanderung der kleinen Proteine zum Nukleosom, indem wir ihre brownsche Molekularbewe-

Erbfaden am Wickel

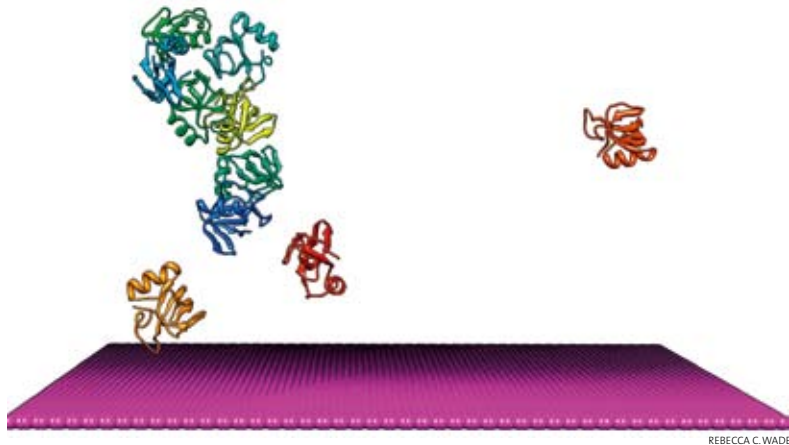
Simulationen ergaben, wie sich das Linker-Histon (blau) an das Nukleosom (braun) bindet und so zur Packung der DNA beiträgt. Unter Berücksichtigung der Flexibilität der beiden Enden des DNA-Stücks gibt es eine Reihe möglicher Anordnungen, von denen 13 als Überlagerung dargestellt sind. Die an die DNA gebundenen Aminosäurereste sind in Orange (nukleosomale DNA) und Grün (Linker-DNA) gezeigt.



REBECCA CWADE

Der Haftkraft von Pilzsporen auf der Spur

Die Simulation der Diffusion von Hydrophobinmolekülen in wässriger Lösung in Gegenwart einer Graphitoberfläche half, ihre hohe Haftfähigkeit zu ergründen. Rote Schleifen zeigen helikale Abschnitte, gelbe Pfeile Faltblattstrukturen des Proteins.



gung simulierten. Dabei konnten wir beobachten, wie elektrostatische Interaktionen das Linker-Histon anziehen und es so lenken, dass es sich in einer bestimmten Orientierung an das Nukleosom bindet. Außerdem sahen wir, wie die räumliche Gestalt des Nukleosoms den Vorgang beeinflusst.

In unseren Simulationen ließen wir das Linker-Histon an verschiedene Konformationen des Nukleosoms beziehungsweise seiner flankierenden Linker-DNA-Stücke anlagern und konnten so den vorherrschenden Bindungsmodus herausfinden. Dieser entspricht den experimentell ermittelten Daten. Es zeigte sich, dass das Linker-Histon asymmetrisch am Übergang zwischen der nukleosomalen DNA und einem der beiden Linker-DNA-Stücke haftet (siehe Kasten links). War die Konformation des Nukleosoms weniger kompakt, band es sich an einer stärker beengten Stelle an die Linker-DNA. Die Entdeckung zweier unterschiedlicher Bindungsarten deutet darauf hin, dass das Linker-Histon mit über die Struktur des Chromatins bestimmt. Indem es die Nukleosomen konformationsabhängig erkennt und stabilisiert, fördert es die Bildung enger Zickzack- oder lockerer Schraubenwindungen.

Damit das Durchprobieren vieler verschiedener Konformationen und Bindungsstellen die Kapazität unserer Computer nicht überstieg, nahmen wir für die Simulationen Vereinfachungen vor. Ausgehend von den errechneten

diffusionsgetriebenen »Begegnungskomplexen« lassen sich nun mit einem verfeinerten Modell, das die Flexibilität der Makromoleküle vollständig berücksichtigt, weitere Details untersuchen. So kann jetzt beispielsweise bestimmt werden, wie die Partnermoleküle ihre Gestalt während des Bindungsvorgangs aneinander anpassen und welchen Einfluss dabei die nur auf kurze Distanzen wirksamen Wasserstoffbrückenbindungen und hydrophoben Wechselwirkungen haben.

Das Geheimnis extremer Oberflächenaktivität

Hydrophobine sind kleine Proteine mit der höchsten Oberflächenaktivität aller bekannten Eiweißstoffe. Sie kommen in der Hülle von Pilzsporen vor und haften auch an äußerst glatten Oberflächen. Wegen dieser Eigenschaft sind Hydrophobine für biotechnologische Anwendungen wie die Herstellung von Biosensoren oder die Immobilisierung von Enzymen von großem Interesse. Wir wollten wissen, wie sie sich in Lösung verhalten und worauf ihre extreme Haftfähigkeit an Oberflächen beruht. Dazu simulierten wir die brownische Molekularbewegung von hundert Hydrophobinmolekülen in wässriger Lösung in Gegenwart einer Graphitoberfläche.

Ausgehend von einer experimentell ermittelten Proteinstruktur des Klasse-II-Hydrophobins (HFBI) aus dem Schimmelpilz *Trichoderma reesei* verwendeten wir ein Modell,

bei dem die Proteine mit atomarer Auflösung dargestellt waren, aber nicht ihre Konformation verändern konnten. Die Simulationen zeigten, wie Dipol-Dipol-Wechselwirkungen das Erkennen der Moleküle untereinander fördern. Zudem konnten wir sehen, wie die Proteine Oligomere bilden: Die in der Simulation gefundene Zusammenlagerung von jeweils vier Hydrophobinen entspricht den kristallografisch nachgewiesenen Homotetrameren. An der Graphitoberfläche neigen diese Oligomere dazu, sich aufzulösen und über ihre hydrophobe Außenseite mit dem Festkörper in Kontakt zu treten (Kasten links).

Die biomolekulare Erkennung ist ein anspruchsvolles Problem, das modernste rechnergestützte Methoden aus den verschiedensten Fachgebieten erfordert. Die drei hier beschriebenen Anwendungen sind gute Beispiele dafür, wie Computersimulationen dabei helfen können, dieses äußerst komplexe Problem zu lösen. ~

DIE AUTORIN



Rebecca C. Wade studierte Physik an der University of Oxford (B. A. hons. 1985) und promovierte in molekularer Biophysik (Dr. phil. 1988). Danach forschte sie an den Universitäten Houston und

Illinois. 1992 bis 2001 war sie Gruppenleiterin am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg. Seit 2001 leitet sie die Gruppe »Molecular and Cellular Modeling« (MCM), zunächst bei der EML Research GmbH und seit 2010 am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS).

QUELLEN

Ferrari, S. et al.: Virtual Screening Identification of Nonfolate Compounds, Including a CNS Drug, as Antiparasitic Agents Inhibiting Pteridine Reductase. In: Journal of Medical Chemistry 54, S. 211–221, 2011

Mereghetti, P. et al.: Brownian Dynamics Simulation of Protein Solutions: Structural and Dynamical Properties. Biophysical Journal 99, S. 782–791, 2010

Mereghetti, P., Wade, R. C.: Diffusion of Hydrophobin Proteins in Solution and Interactions with a Graphite Surface. In: BMC Biophysics 4, Artikel 9, 2011, doi:10.1186/2046-1682-4-9

Pachov, G. et al.: On the Structure and Dynamics of the Complex of the Nucleosome and the Linker Histone. In: Nucleic Acid Research 2011, doi: 10.1093/nar/gkr101

Zerren an Biomolekülen im Computer

Mechanische Kräfte sind lebenswichtig – im großen wie im kleinen Maßstab. Eine Forschungsgruppe am Heidelberger Institut für Theoretische Studien untersucht ihre Wirkung auf der kleinsten Ebene: vom Protein bis hin zur einzelnen chemischen Bindung.

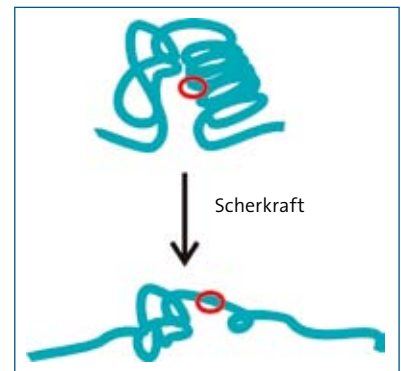
Von Ilona Baldus und Frauke Gräter

Ob Pflanze oder Säugetier, kein Lebewesen kann ohne Einwirkung mechanischer Kräfte überleben. Ein beeindruckendes Beispiel dafür kommt aus der Raumfahrt: Während eines mehrwöchigen Aufenthalts im All würde ein Astronaut ohne spezielles Krafttraining einen erheblichen Teil seiner Knochenmasse verlieren. Woran liegt das? Der menschliche Körper erneuert ständig sein Knochengewebe und baut es dafür kontinuierlich ab. Der gleichzeitige erneute Aufbau hängt allerdings davon ab, wie stark der Knochen benutzt wird – das heißt, in welchem Maß Kräfte durch Stehen, Gehen und Laufen darauf einwirken. Im Weltall ist die Gravitation um ein Vielfaches geringer als am Erdboden, was die Belastung der Knochen stark reduziert und ihren Wiederaufbau verzögert. Nur das Krafttraining im All verhindert also, dass ein Raumfahrer mit stark geschwächtem Skelett auf die Erde zurückkehrt.

Der große Einfluss mechanischer Kräfte auf das Leben zeigt sich selbst auf der Ebene einzelner Zellen. Auch sie reagieren in einer ungewohnten Umgebung manchmal anders als normal, wie beispielsweise André E. X. Brown und Dennis E. Discher von der University of Pennsylvania in Philadelphia 2009 festgestellt haben. Demnach wachsen Nervenzellen auf dem harten Boden der im Labor verwendeten Petrischalen weitaus schlechter als auf einer weichen, elastischen Oberfläche, an der sie fester haften. Das wirft natürlich die Frage auf, wie lebende Organismen oder gar einzelne Zellen die auf sie einwirkende mechanische Kraft eigentlich spüren. Verfügen sie über spezielle Sensoren, die einen Zug

Kontrolle der Blutgerinnung

Der **Von-Willebrand-Faktor** spielt eine wichtige Rolle bei der Blutgerinnung. Scherspannungen beim Austreten von Blut aus einer Wunde strecken das verknäuelte fadenförmige Molekül. Dadurch wird es klebrig und verbindet sich mit Blutplättchen zu engmaschigen Netzwerken. Wie Computersimulationen ergaben, legt die Entfaltung allerdings auch eine Stelle frei, an der Enzyme das Molekül zerschneiden können (roter Kreis). Das verhindert ein Überschießen der Gerinnungsreaktion und die Bildung von Thromben. In der Schemazeichnung ist nur der relevante Teil des in Wahrheit viel größeren Proteins gezeigt.



oder Druck registrieren und mit einem Signal darauf antworten, das ein biochemisches Programm in Gang setzt?

Der Antwort auf diese Frage sind Forscher in den letzten Jahren ein gutes Stück näher gekommen. Offenbar gibt es tatsächlich Kraftsensoren, und vereinzelt wurden sie auch schon identifiziert. Wie sie genau funktionieren, lässt sich experimentell aber nur schwer und oft ausschließlich indirekt beobachten; denn es handelt sich meistens um Proteine, also Eiweißstoffe, die typischerweise nicht mehr als wenige Nanometer (milliardstel Meter) messen.

In der Gruppe für »Molekulare Biomechanik« am Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) benutzen wir deshalb leistungsstarke Computer und physikalische Modelle, um den Einfluss mechanischer Kräfte auf einzelne Proteinmoleküle zu ergründen. Wir möchten die Funktionsweise solcher win-

zigen molekularen Kraftsensoren im Detail verstehen. Manche Krankheiten beruhen darauf, dass das Messen und Verarbeiten der mechanischen Kraft in bestimmten Geweben gestört ist. Mit unseren Untersuchungen verfolgen wir das Ziel, in Zusammenarbeit mit Medizinern die molekularen Mechanismen hinter solchen Störungen aufzudecken.

Scherkräfte im Blut

Der so genannte Von-Willebrand-Faktor (VWF) bietet ein anschauliches Beispiel für den Einfluss mechanischer Kräfte auf Vorgänge in Lebewesen. Es handelt sich um ein Protein im Blut, das die Blutgerinnung einleitet. Fehlt der VWF oder wirkt er nur unzureichend, kommen Blutungen nicht zum Stillstand, was tödlich sein kann. In diesem Fall sprechen Mediziner auch vom Von-Willebrand-Syndrom. Umgekehrt kann eine zu starke Wirkung des VWF, also eine über-

mäßige Blutgerinnung, die Bildung von Pfropfen – Thrombosen – verursachen. Mechanische Kräfte kontrollieren das Gleichgewicht zwischen Blutfluss und -gerinnung in den Adern und besonders im Umkreis einer Wunde.

Generell gilt: Wann immer eine Flüssigkeit durch ein Rohr strömt, entsteht eine Scherkraft, weil die Strömung in der Rohrmitte schneller ist als am Rand. Ein mit schwimmender Faden wird dadurch gestreckt. Der VWF ist ein solcher Faden, allerdings so winzig klein und dünn, dass er sich nur im Mikroskop erkennen lässt. Er geht im Scherfluss, der bei einer Verletzung besonders hoch ist, von einem verknäuelten in den langgestreckten Zustand über (Kasten links). Als Folge davon wird er besonders klebrig und verbindet sich mit anderen solchen Fäden und mit Blutplättchen zu engmaschigen Netzwerken. Sie bilden das erste Gerüst für Blutgerinnsel, die das Ausfließen von Blut verhindern.

Interessanterweise gibt es im langen Fadenmolekül des VWF eine Stelle, an der ihn ein anderer Blutbestandteil, eine Protease, zerschneiden kann. Im verknäuelten Zustand ist diese Schnittstelle tief im Inneren – in der so genannten A2-Domäne – verborgen und damit für die molekulare Schere schlecht zugänglich. Wir vermuteten jedoch, dass sie frei gelegt wird, wenn sich der Faden durch die Scherkraft streckt.

Um Klarheit zu gewinnen, untersuchten wir den Vorgang in Computersimulationen. Hierzu befestigten wir an den Enden des verknäuelten Proteins virtuelle Federn und bewegten diese voneinander weg. Das klingt viel einfacher, als es ist. Tatsächlich erforderte es sehr aufwändige Rechnungen, denen Modelle der klassischen newtonschen Physik zu Grunde lagen. Am Ende aber konnten wir so ermitteln, wie sich der VWF unter Zugspannung entfaltet. In der Tat geben bestimmte Teile des Fadenmoleküls sukzessive der Kraft nach und lösen sich voneinander. Dabei wird schließlich auch die Spaltstelle frei gelegt, an der die Schneideenzyme ansetzen können.

Das ist für die biologische Rolle des VWF sehr wichtig. Die Netzwerke, zu denen sich die von der Scherkraft gestreckten Fäden zusammenlagern, sind zwar für die Blutgerinnung notwendig, doch ein unbegrenztes Wachstum würde das Gefäß für alle Zeit

komplett verstopfen. Besonders hohe Zugkräfte entfalten den VWF deshalb so weit, dass die Protease Zutritt zur Schnittstelle erhält. So kann sich ein Gleichgewicht zwischen Blutgerinnung und Auflösung der Blutpfropfen einstellen. Der Kraftsensor dafür ist der VWF. Er übersetzt ein rein mechanisches in ein biochemisches Signal – ein lebenswichtiger Vorgang.

Bindungsbruch unter Spannung

Spielen mechanische Kräfte auch in noch kleineren Dimensionen eine Rolle? Jegliche feste Materie besteht aus Atomen, die durch chemische Bindungen zusammengehalten werden. Diese ähneln Klebstoffen unterschiedlicher Haftkraft. Je nach Funktion des Moleküls sind sie sehr stark oder leicht zu lösen. Manche wirken als Schalter, der nach Bedarf geöffnet wird, andere sollen einer molekularen Struktur dauerhafte Stabilität verleihen. Das gilt zum Beispiel für die Bindungen, die das Rückgrat eines Proteins aufbauen.

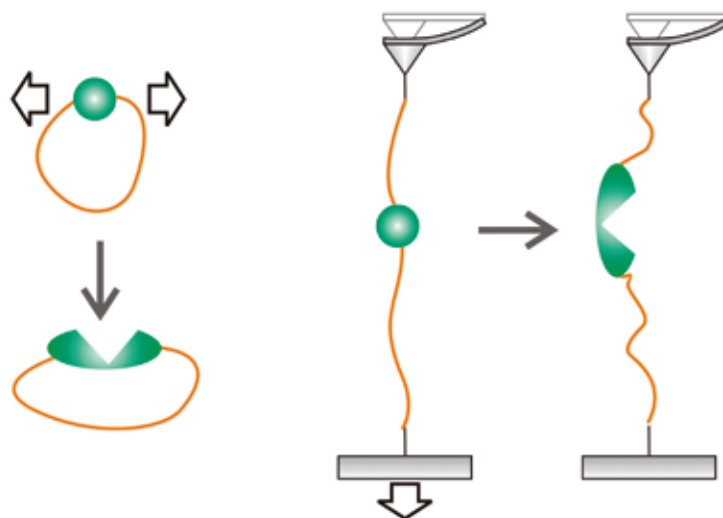
Angesichts der großen Bedeutung mechanischer Signale in Lebewesen liegt die Vermutung nahe, dass Zugspannungen auch

chemische Bindungen in Molekülen verstärken oder schwächen können. Wann und wie passiert das? Dieser Frage sind wir nachgegangen. Wir wollten wissen, wie leicht sich eine Bindung lösen lässt, wenn man von beiden Seiten daran zieht wie an einem Seil. Allerdings ist rohe Gewalt nicht immer das beste Mittel. Man denke nur an eine klemmende Tür. Meist gibt sie zwar umso eher nach, je stärker man dagegedrückt. Trotzdem ist es nicht immer angebracht, sich mit voller Wucht dagegenzuwerfen. Besser versucht man vielleicht zunächst, die Tür vorsichtig mit der Klinke zu öffnen. Auch bei der chemischen Bindung hängt die ideale Öffnungsmethode vom Einzelfall ab.

In Proteinen gibt es verschiedenste Wechselwirkungen zwischen den Atomen. Zwei davon wollen wir hier betrachten: Wasserstoffbrücken und kovalente Bindungen. Erstere ähneln Klettverschlüssen. Einzeln lassen sie sich leicht lösen, aber im Verbund sind sie sehr stabil. Wasserstoffbrücken halten Strukturelemente wie das Beta-Faltblatt und die Alpha-Helix zusammen. Im letzteren Fall sind die Proteinbausteine, die Aminosäuren, wie

Auf Biegen und Brechen

Inwieweit mechanische Kräfte das Öffnen einer Bindung erleichtern, lässt sich experimentell ermitteln. So herrscht in Ringmolekülen je nach ihrer Größe eine unterschiedlich starke Spannung (links). Man kann nun prüfen, ob sich dieser Umstand auf die Geschwindigkeit des Bindungsbruchs auswirkt. Eine andere Möglichkeit ist, das Molekül in ein Kraftmikroskop einzuspannen und durch Verbiegen des Tastarms (Cantilevers) einen Zug darauf auszuüben (rechts).

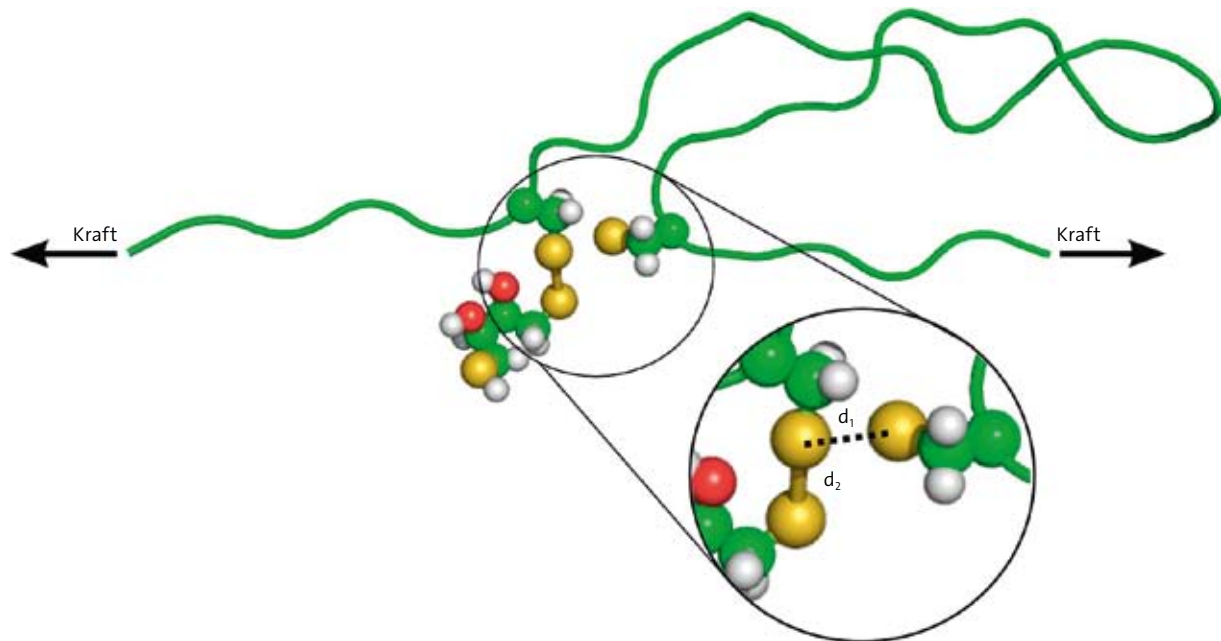


ILONA BALDUS UND FRAUKE GRÄTER

Molekulare Brückensprengung

Das kleine Molekül DTT (Dithiothreitol) zerstört die Disulfidbrücke d_1 in einem Protein (Titin) unter Bildung einer neuen Disulfidbrücke d_2 . Wie Computersimulationen ergaben, erleich-

tert eine angelegte Zugspannung den Bindungsbruch vor allem dadurch, dass das Schwefelatom von DTT schon aus größerer Entfernung die neue Disulfidbindung eingehen und die alte dabei lösen kann.



ILONA BALDUS UND FRAUKE GRÄTER

in einer Wendeltreppe angeordnet: Das Rückgrat bildet das Gerüst und die Wasserstoffbrücken das Gelände. In einem Beta-Faltblatt verlaufen zwei Abschnitte des Proteinrückgrats parallel zueinander. Wasserstoffbrücken verbinden diese Stränge durch elektrostatische Kräfte miteinander. Beta-Faltblätter geben Proteinen zwar große Stabilität, lassen sich aber bei genügend Zugkraft auftrennen.

Kovalente Bindungen sind wesentlich fester. Dabei teilen sich zwei Atome ein Elektronenpaar. Ein biologisch wichtiges Beispiel sind Schwefel-Schwefel-Bindungen oder, wie Chemiker sagen, Disulfidbrücken. Sie bilden sich etwa zwischen zwei Molekülen der Aminosäure Cystein. Solche Bindungen haben meist die Aufgabe, die Struktur des Proteins zu stabilisieren – auch gegen von außen einwirkende Zugkräfte.

Neuerdings lässt sich im Labor beobachten, wie Disulfidbrücken oder andere kovalente Bindungen unter Zugspannung aufbrechen (Kasten auf S. 19). Dazu befestigt man ein einzelnes Molekül in einem Kraftmikroskop mit einem Ende an der Unterlage und

mit dem anderen an der Spitze des Tastarms. Dieser besteht aus einer Blattfeder, mit der sich eine mechanische Kraft auf das eingespannte Molekül ausüben lässt. So kann man direkt verfolgen, wie leicht sich die Bindung bei welcher Zugkraft öffnet.

Doch nackte Gewalt führt dabei nicht zum Ziel. Wie in der Natur geht es darum, die Bindung so sanft wie möglich zu lösen. Das gelingt durch Zugabe von kleinen Hilfsmolekülen, so genannten Reduktionsmitteln. Diese enthalten bei Disulfidbrücken ein Schwefelatom, das sich mit dem einen Teil der Disulfidbrücke verbindet und so den anderen daraus verdrängt.

Derartige Messungen im Labor ergaben, dass sich Disulfidbindungen in Proteinen unter Mitwirkung eines Reduktionsmittels sehr leicht aufbrechen lassen. Zugspannungen von wenigen hundert Piconewton reichen bereits aus. Das entspricht in etwa der Kraft, die ein einzelner Mensch aufwenden müsste, um mit der gesamten Weltbevölkerung zusammen ein 1-Euro-Stück hochzuhalten. Dabei gilt: Je größer die Zugspannung, desto in-

stabiler wird die Bindung und desto schneller löst sie sich. Dies ist ganz ähnlich wie bei einem Gummiband: Je stärker man daran zieht, desto eher reißt es.

Man könnte meinen, die Mechanochemie einer solchen Reaktion damit verstanden zu haben – gerade weil man sich den Effekt der Zugkraft intuitiv vorstellen kann. Aber wie so oft sind die Zusammenhänge komplexer, als sie auf den ersten Blick erscheinen. So gibt es Reaktionspartner, bei denen die mechanische Kraft das Öffnen der chemischen Bindung erschwert! In einem anderen Fall, den eine Gruppe um Roman Boulatov von der University of Illinois in Urbana-Champaign 2009 entdeckte, löst sich die Disulfidbrücke unabhängig von der an ihr angreifenden Zugspannung immer gleich schnell. Für dieses Experiment bauten die Wissenschaftler die Schwefel-Schwefel-Bindung in kleine ringförmige Moleküle ein. Über die Größe des Rings konnten sie die darin herrschende Spannung gezielt verändern (siehe Kasten auf S. 19).

Wie beeinflusst eine mechanische Kraft also eine chemische Bindung? Warum er-

leichtert sie in bestimmten Fällen deren Öffnung? Wird die Bindung durch die Zugspannung vorgedehnt oder auf andere Weise geschwächt? Oder ist sie einfach nur leichter zugänglich für das Reduktionsmittel, weil das gesamte Molekül dabei auseinandergezogen wird?

In unserer Forschungsgruppe am HITS in Heidelberg suchen wir auf numerischem Weg nach Antworten auf diese Fragen. Deshalb haben wir den Bindungsbruch am Computer simuliert. Dabei zeigte sich in Einklang mit den experimentellen Befunden, dass sich Bindungen normalerweise mit steigender Kraft schneller lösen.

Wir können allerdings auch gewissermaßen genauer hinschauen, was im Einzelnen passiert. So erhalten wir Einblicke in Abläufe, die experimentell nur sehr schwer und mit großem Aufwand zugänglich wären. Zum Beispiel können wir die Reaktion in Einzelschritte zerlegen. Das Öffnen der Disulfidbrücke beginnt damit, dass sich das Schwefelatom des Reduktionsmittels der Bindung nähert, die unter Spannung steht. Es nimmt mit einem der beiden Brückenschwefelatom Kontakt auf und bildet mit ihm eine neue Disulfidbindung. Dabei wird das andere Schwefelatom verdrängt und die ehemalige Disulfidbrücke gesprengt (Kasten links).

Paradoxe Wirkung einer äußeren Zugkraft

Diesen Vorgang bezeichnen Chemiker als bimolekulare nukleophile Substitutionsreaktion (S_N2). Am Computer haben wir die einzelnen Schritte unter die Lupe genommen. Dabei interessierten wir uns für zwei Messgrößen: den Abstand zwischen den Schwefelatomen in der aufbrechenden (d_1) und in der neu entstehenden Disulfidbrücke (d_2).

Das Ergebnis war überraschend. Zwar hatten wir erwartet, dass sich beide Bindungslängen, also d_1 und d_2 , während des Reaktionsprozesses ändern und die ursprüngliche Schwefel-Schwefel-Bindung von der Zugkraft verlängert wird. Allerdings fiel die Dehnung nur sehr gering aus. Wirklich unerwartet war hingegen, dass auch d_2 von der externen Kraft beeinflusst wird, obwohl diese nur auf d_1 wirkt. Wie wir feststellten, muss sich unter Zugspannung das Schwefelatom des Reduktionsmittels der Bindung nicht mehr so weit nähern, um sie zu öffnen. Sie zer-

bricht schon in größerem Abstand, weil sie von der äußeren Kraft geschwächt ist. Das beschleunigt die Reaktion.

Wie man sieht, sind der Ablauf des Bindungsbruchs und der Einfluss der Kraft darauf komplexe Angelegenheiten. Das macht die Computersimulationen und ihre Interpretation äußerst aufwändig. Es gibt jedoch eine dazu komplementäre Methode, die direkter und dadurch einfacher ist: die Betrachtung der Energielandschaft einer Reaktion. Daraus lässt sich unmittelbar ersehen, wie leicht eine Umsetzung abläuft.

Energielandschaften gleichen Gebirgen. Am wohlsten fühlen sich die Stoffe im Tal. Je tiefer es ist, desto besser. Der Weg von einem Tal ins andere führt über einen Berg oder Pass. Im Falle der Disulfidbrücke ist das zu erreichende Tal die offene Bindung.

Auch die Rolle der mechanischen Kraft lässt sich mit der Energielandschaft veranschaulichen. Sie hebt das betreffende Molekül ein Stück weit aus seinem Tal heraus, was den Weg über den Berg bereits deutlich erleichtert. Außerdem senkt sie das zu erreichende Tal ab und erniedrigt zugleich den Pass dorthin.

Wir haben auch solche Energielandschaften berechnet. Dabei bestätigte sich, dass mit steigender Zugkraft, die auf eine Disulfidbrücke wirkt, das Tal für die offene Bindung immer weiter absinkt. Das macht das Lösen der Verknüpfung energetisch vorteilhafter. Im Einklang mit den Ergebnissen der Computersimulation dehnt die Kraft also nicht einfach nur die Disulfidbrücke, sondern wirkt sich auf das ganze Molekül aus. So ändert sie Winkel und dreht Strukturelemente, was die Schwefel-Schwefel-Bindung zusätzlich destabilisiert. Sobald die Brücke bricht, können Winkel und verzerrte Strukturelemente ihre ursprüngliche Position wieder einnehmen. Bei diesem Entspannen wird sehr viel Energie frei. Auch hier bietet sich der Vergleich mit dem Gummiband an: Spannt man es stark und zerschneidet es, so kehrt es mit einem kräftigen Schnalzen in seinen ungespannten Zustand zurück.

Wie man sieht, sind lebendige Systeme auf verschiedenste Weise mechanischen Kräften ausgesetzt. Biologische Strukturen, von kleinen Eiweißmolekülen bis zu Zellen und Geweben, haben im Verlauf der Evolution die Fähigkeit erlangt, gezielt darauf zu reagieren. So kann der Organismus mechanische

Reize als lebenswichtige Informationen direkt in biochemische Signale umwandeln und verarbeiten. Computersimulationen, wie wir sie in der Gruppe »Molekulare Biomechanik« am HITS in Heidelberg durchführen, helfen Schlüsselprozesse aufzudecken, die sich diese Kraftsensoren zu Nutze machen. Die Erkenntnisse, die wir dabei gewinnen, schaffen letztendlich die Voraussetzung dafür, korrigierend in Störungen der Signalkaskade bei Krankheiten einzugreifen oder die natürlichen Vorbilder im Labor für andere Zwecke nachzuahmen. Wir sind gespannt! ∞

DIE AUTORINNEN



Ilona Baldus (oben) hat an der Universität Heidelberg Chemie studiert. Sie ist Doktorandin bei Frauke Gräter und untersucht den Einfluss mechanischer Kräfte auf Redoxpotenziale von Proteinen.



Frauke Gräter ist seit 2009 Leiterin der Forschungsgruppe »Molekulare Biomechanik« am Heidelberger Institut für Theoretische

Studien (HITS). Zuvor leitete sie eine Nachwuchsforschergruppe, die an der Chinese Academy of Sciences in Shanghai, einem Partnerinstitut der Max-Planck-Gesellschaft, und an der Universität Heidelberg angesiedelt war. Nach ihrer Promotion an der Universität Göttingen war die Chemikerin bis 2007 am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen und an der Columbia University in New York tätig.

QUELLEN

- Baldauf, C. et al.:** Shear-Induced Unfolding Activates von Willebrand Factor A2 Domain for Proteolysis. In: *Journal of Thrombosis and Haemostasis* 7, S. 2096–2105, 2009
- Brown, A. E. X., Discher, D. E.:** Conformational Changes and Signaling in Cell and Matrix Physics. In: *Current Biology* 19, S. R781–R789, 2009
- Kucharski, T. J. et al.:** Kinetics of Thiol/Disulfide Exchange Correlate Weakly with the Restoring Force in the Disulfide Moiety. In: *Angewandte Chemie* 121, S. 7174–7177, 2009
- Li, W., Gräter, F.:** Atomistic Evidence of how Force Dynamically Regulates Thiol/Disulfide Exchange. In: *Journal of the American Chemical Society* 132, S. 16790–16795, 2010
- Wiita, A. P. et al.:** Probing the Chemistry of Thioredoxin Catalysis with Force. In: *Nature* 450, S. 124–127, 2007

Hochleistungsrechner und der Stammbaum des Lebens

Eine wahre Flut von DNA-Daten ermöglicht inzwischen immer präzisere Rekonstruktionen von Stammbäumen – im Prinzip jedenfalls. In der Praxis überfordert die Suche nach der optimalen Lösung auch die leistungsfähigsten Computer. Die Herausforderung heißt deshalb, die Effizienz der Programme für Näherungslösungen zu steigern.

Von Alexandros Stamatakis

Die computergestützte Berechnung von Stammbäumen, welche die Verwandtschaftsverhältnisse zwischen Organismen wiedergeben, ist eine verhältnismäßig junge Disziplin. Doch reichen ihre Anfänge immerhin bis in die 1960er Jahre zurück. Für jeden Organismus beziehungsweise jede Spezies, deren Position im Stammbaum ermittelt werden soll, liegen typischerweise DNA-Daten oder Angaben zu morphologischen Merkmalen vor – etwa über die Knochenform. Bei Bakterien kann es sich auch um chemische Eigenschaften handeln, die für die jeweilige Spezies charakteristisch sind.

Das Ziel besteht darin, anhand geeigneter Modelle denjenigen Stammbaum zu rekonstruieren, der am besten zu den vorliegenden Daten passt. Mathematisch gesehen, handelt es sich also um ein Optimierungsproblem. Dahinter steckt die stillschweigende Annahme

oder Hoffnung, dass der »optimale« Stammbaum auch der wahre ist. An seinen Blättern befinden sich die Organismen, für welche DNA-Daten vorliegen. Die inneren Knoten – sprich: Verzweigungen – repräsentieren hypothetische gemeinsame Vorfahren.

Von diesen existieren in der Regel keine DNA-Daten, weil sich normalerweise nur aus lebenden Organismen Erbsubstanz gewinnen lässt. Allerdings gab es in letzter Zeit bedeutende Fortschritte bei der Sequenzierung alter DNA; dadurch ist es insbesondere der Gruppe um Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig gelungen, das Neandertalergenom zu entziffern.

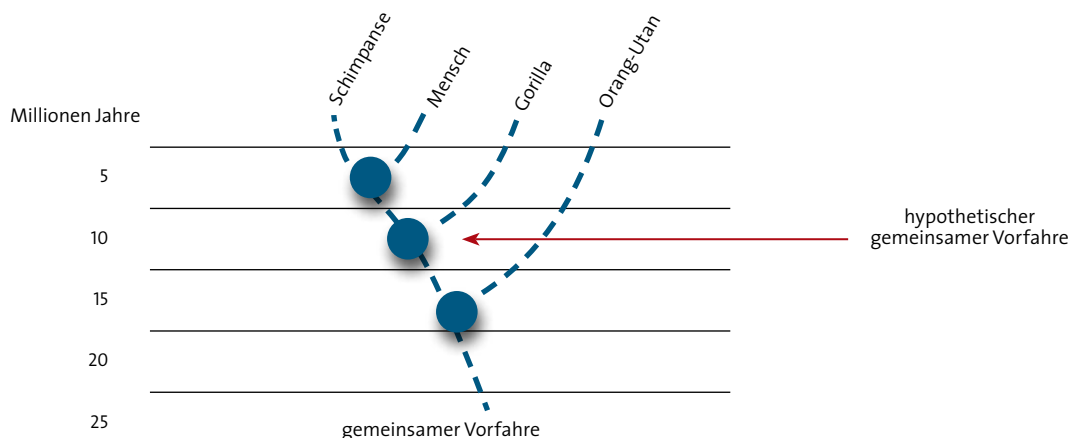
Betrachten wir ein klassisches Beispiel: den Stammbaum von Mensch, Schimpanse, Gorilla und Orang-Utan. Der auf DNA-Sequenzen beruhende Eingabedatensatz könnte, grob vereinfacht, dann so aussehen:

Mensch	AAACCCCGTTTTT
Gorilla	AAACTTTAAGGGT
Schimpanse	AAGATTCGTTTTT
Orang-Utan	AGAATCCGTTTGT

Dabei stehen die Buchstaben für die Basen Adenin, Thymin, Cytosin und Guanin, die das genetische Alphabet ausmachen. Ein möglicher Stammbaum für diese Daten ist im Kasten unten gezeigt. Dabei bleibt offen, wo der gemeinsame Vorfahr aller Menschenaffen, das heißt die Wurzel des Baums, liegt. Diese wird zur Vereinfachung der mathematischen Modelle üblicherweise weggelassen.

Grundlage für die Optimierung ist eine abstrakte Funktion f , eine Rechenvorschrift, die zu einem gegebenen Stammbaum und zu gegebenen DNA-Daten einen Zahlenwert liefert: die »Plausibilität« (*likelihood*). Je höher dieser Wert, desto besser ist der Stammbaum mit den Daten vereinbar. Wenn man also drei

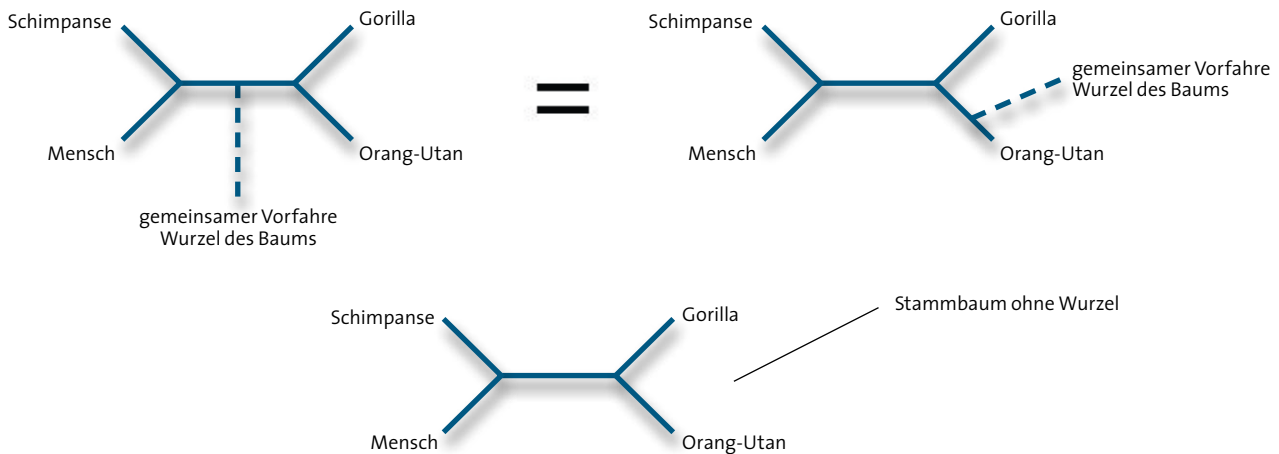
Der DNA-Stammbaum der Menschenaffen



ALLE ABBILDUNGEN DIESES ARTIKELS: ALEXANDROS STAMATAKIS

Stammbäume ohne Wurzel

Anhand von DNA-Daten der Menschenaffen allein lässt sich keine Aussage über die Wurzel des Stammbaums machen. Sie kann an den verschiedensten Stellen liegen (oben). Dem trägt die Darstellung ohne Wurzel Rechnung (unten).



Stammbäume in Betracht zieht, muss man die Funktion für alle drei berechnen. Der optimale Baum ist dann derjenige, für den der größte Wert herauskommt.

In unserem Beispiel mit den Menschenaffen lässt sich dieses Problem leicht lösen, weil für vier Organismen nur drei unterschiedliche wurzellose Bäume existieren (Kasten oben). Dabei erweist sich derjenige, bei dem der Mensch mit dem Schimpansen näher verwandt ist als beide mit dem Gorilla und dem Orang-Utan, als plausibelste Lösung. Doch wie sieht die Funktion f aus? In der Praxis benutzt man dafür statistische Modelle, die auf Schätzungen beruhen, wie wahrscheinlich Mutationen sind, bei denen eine der vier Basen durch eine andere ersetzt wird.

Das grundsätzliche Problem bei diesem Verfahren ist, dass die Anzahl der möglichen Bäume extrem stark mit der Anzahl der enthaltenen Spezies zunimmt. So beläuft sie sich bei 50 Arten, was heutzutage noch eine relativ kleine Zahl ist, bereits auf $2,84 \cdot 10^{76}$ Kandidaten. Für jeden von ihnen müsste der Wert der Funktion f berechnet werden, denn es gibt keinen Trick, einen Großteil davon von vornherein auszuschließen. Unter der optimistischen Annahme, dass diese Berechnung für einen Baum mit 50 Organismen eine Sekunde Rechenzeit benötigt, würde die Evaluierung aller Bäume auf einem einzelnen Prozessor $9 \cdot 10^{68}$ Jahre dauern. Selbst mit der gesamten Rechenkraft auf der Erde wäre diese

Aufgabe vermutlich nicht innerhalb eines vernünftigen Zeitraums zu schaffen.

Optimierungsprobleme, für die der Bedarf an Rechenzeit derart schnell zunimmt, kommen in vielen Bereichen der Informatik vor und heißen NP-vollständig. Peter Gritzmann und René Brandenberg beschreiben sie in ihrem populärwissenschaftlichen Buch »Das Geheimnis des kürzesten Weges« auf für Laien gut verständliche Art und Weise.

Automatische Suchverfahren

Da das Problem nicht exakt lösbar ist, behilft man sich mit so genannten heuristischen Suchverfahren, die zwar nicht die beste, aber zumindest eine ziemlich gute Lösung liefern. Leider gibt es bei der Berechnung von Stammbäumen keine Möglichkeit, mit Sicherheit zu sagen, wie weit das Ergebnis einer solchen approximativen Suche vom Optimum entfernt ist. Deshalb ist es unerlässlich, dass Biologen den gefundenen Baum anhand ihres Wissens auf Plausibilität prüfen.

Man kann das Suchverfahren auch an sehr schnell evolvierenden Organismen wie etwa Viren testen, deren Stammbaum über die letzten Jahre bis Jahrzehnte bekannt ist. Auch im Erfolgsfall bietet das jedoch keine Gewähr dafür, dass die Methode bei Lebewesen, die sich im Verlauf von Jahrtausenden entwickelt haben, genauso gut funktioniert.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor ist die Programmverifikation. Selbst wenn die Evo-

lutionsmodelle und Rekonstruktionsverfahren perfekt sind, heißt das nicht, dass sie auch korrekt auf dem Computer umgesetzt wurden. Durch die starke Zunahme rechnerbasierter Datenanalysen in der Biologie haben Fehler in Veröffentlichungen, die auf Programmierfehlern beruhen, in jüngster Zeit stark zugenommen. Zusammen mit meinem Doktoranden Fernando Izquierdo-Carrasco habe ich die Probleme der Verifikation von Stammbäumen und von Programmen zu deren Berechnung kürzlich ausführlich dargestellt (*Briefings in Bioinformatics* 12, S. 270).

Trotz solcher Schwierigkeiten und Unsicherheiten kommen Verfahren zur Rekonstruktion von Stammbäumen in der medizinischen und biologischen Forschung heute routinemäßig zum Einsatz. So dienen sie etwa dazu, den Ursprung von Virusepidemien zu ermitteln oder die bakterielle Zusammensetzung der Darmflora zu analysieren. Um das berühmte Zitat des russischen Genetikers Theodosius Dobzhansky (1900–1975) zu bemühen: »In der Biologie macht nichts Sinn, außer im Licht der Evolution.«

Was sind die aktuellen Entwicklungen und Herausforderungen auf dem Gebiet der Stammbaumberechnung? Zuallererst ist die Revolution bei der DNA-Sequenzierung zu nennen. Die Analyse des Erbguts wurde durch bahnbrechende Fortschritte in den letzten fünf bis sechs Jahren wesentlich vereinfacht und beschleunigt, so dass zugleich die Kosten

dramatisch gesunken sind. Dadurch lassen sich inzwischen auch komplette Genome einer Spezies sehr viel leichter entziffern. Während vor zehn Jahren die Sequenzierung des menschlichen Erbguts noch Schlagzeilen machte, nehmen heute selbst Biologen eher gelangweilt zur Kenntnis, dass schon wieder irgendein Genom entschlüsselt wurde.

Die Herausforderung verlagert sich daher zunehmend vom Labor zur Datenverarbeitung. Das Hauptproblem besteht darin, dass die Menge der DNA-Daten wesentlich schneller zunimmt als die Rechengeschwindigkeit der Computer oder Prozessoren zu ihrer Analyse. Das betrifft sowohl die Bioinformatik als auch ihre Teildisziplin, die rechnergestützte Ermittlung von Stammbäumen. Die Computerwissenschaftler stehen deshalb vor der schwierigen Aufgabe, immer effizientere Programme und Methoden zur Datenspeicherung und -analyse bereitzustellen.

Ohne Hoch- und Höchstleistungsrechner, in denen mehrere Einzelrechner (Prozessoren) gleichzeitig an einem Problem arbeiten, lässt sich die Datenflut vielfach nicht mehr bewältigen. Zur Rekonstruktion von Stammbäumen standen noch vor zehn Jahren lediglich die Sequenzen von ein oder zwei Genen zur Verfügung, die jeweils etwa 1000 Basenpaare umfassten. Inzwischen liegen immer öfter die weitaus umfangreicheren kompletten Genome vor. So besteht das Erbgut des Menschen aus etwa 20 000 bis 25 000 Genen; nach einigen Schätzungen sind es sogar bis zu 75 000.

Diese Datenflut stellt die Informatiker vor enorme Probleme. Das gilt insbesondere für den Speicherplatzbedarf der Programme zur Stammbaumrekonstruktion, da zur Berechnung der Bewertungsfunktion f zunehmend komplette Genome für 50 oder 100 Spezies im Arbeitsspeicher gehalten werden müssen.

Ziel: Effiziente Bewertung der Güte eines Stammbaums

Solche Programme verbringen bis zu 99 Prozent ihrer Gesamtlaufzeit damit, die Funktion f für verschiedene denkbare Bäume auszuwerten (Kasten unten). Deshalb besteht eines der Hauptziele der von mir geleiteten Scientific Computing Group am Heidelberger Institut für Theoretische Studien darin, die Zeit und den Speicherplatzbedarf für diese Aufgabe so weit wie möglich zu reduzieren.

Über die vergangenen zehn Jahre haben wir das frei verfügbare Programm RAXML (*Randomized Accelerated Maximum Likelihood*) entwickelt. Statt die Menge aller Stammbäume erschöpfend abzuarbeiten – was aussichtslos wäre –, konstruiert das Programm zu Beginn eine Anzahl von Bäumen, indem es Blatt für Blatt in zufälliger Reihenfolge an jeweils optimaler Stelle einfügt. Es versucht diese Bäume zu verbessern, indem es ganze Äste abschneidet und an anderer Stelle wieder einsetzt, das Ganze im Rahmen eines kombinatorischen Optimierungsverfahrens namens *simulated annealing*. RAXML gehört zu den fünf bis sechs weltweit am meisten benutzten Programmen zur Stammbaumrekonstruktion.

Der Webserver <http://phylobench.vital-it.ch/raxml-bb/> bietet auch interessierten Laien die Möglichkeit, es auszuprobieren; ein kleiner Testdatensatz findet sich unter www.exelixis-lab.org/dna.phy.

Zur Beschleunigung der Rechnung verfolgen wir verschiedene Ansätze. So sind wir auf der Suche nach Tricks, um redundante Berechnungen zu vermeiden und Speicherplatz zu sparen. Ausgangspunkt hierfür ist die mathematische Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsberechnungen: Wir bemühen uns, die Funktion f so zu transformieren, dass sie bei geringerem Speicherbedarf und weniger Rechenoperationen genau das gleiche Ergebnis liefert. Von großer Bedeutung ist auch, das Programm an moderne Rechnerarchitekturen anzupassen. Dadurch lassen sich die Ressourcen der eingesetzten Prozessoren besser nutzen. Das ermöglicht einen höheren Datendurchsatz und steigert so die Anzahl der evaluierten Bäume pro Sekunde.

Wir gehen allerdings auch den umgekehrten Weg und fragen uns, wie die ideale Rechnerarchitektur für unser Programm aussehen würde. In diesem Teilprojekt entwerfen wir optimale Schaltkreise zur Berechnung der Wahrscheinlichkeitsfunktion f . Zum Testen und Verifizieren unserer Architekturen benutzen wir so genannte Field Programmable Gate Arrays, bei denen es sich um eine Art programmierbare Hardware handelt. Sie bestehen aus vielen elektronischen Grundbausteinen (»Gattern«), die sich mittels einer Hardware-Beschreibungssprache dynamisch miteinander verbinden lassen, um die vorgegebene Schaltung nachzubilden.

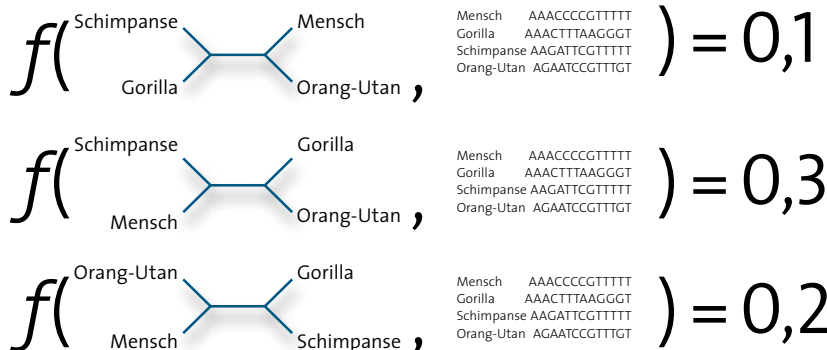
Bei all diesen Versuchen achten wir darauf, dass unsere Ergebnisse nicht nur auf RAXML anwendbar sind, sondern auch auf alle anderen likelihood-basierten Programme zur Stammbaumberechnung. Deren Geschwindigkeit hängt ja gleichfalls entscheidend davon ab, wie effizient die Funktion f auf dem Rechner umgesetzt ist.

Wie erwähnt, lassen sich sehr umfangreiche, speicherintensive Datensätze inzwischen nur noch mit Hochleistungsrechnern verarbeiten. Am HITS steht uns solch ein großer Parallelrechner zur Verfügung. Das System besteht aus 42 Rechenknoten mit je 48 Prozessoren, die durch ein leistungsfähiges Netzwerk miteinander verbunden sind.

Idealerweise gilt es, diese insgesamt 2016 Prozessoren alle gleichzeitig zu beschäftigen.

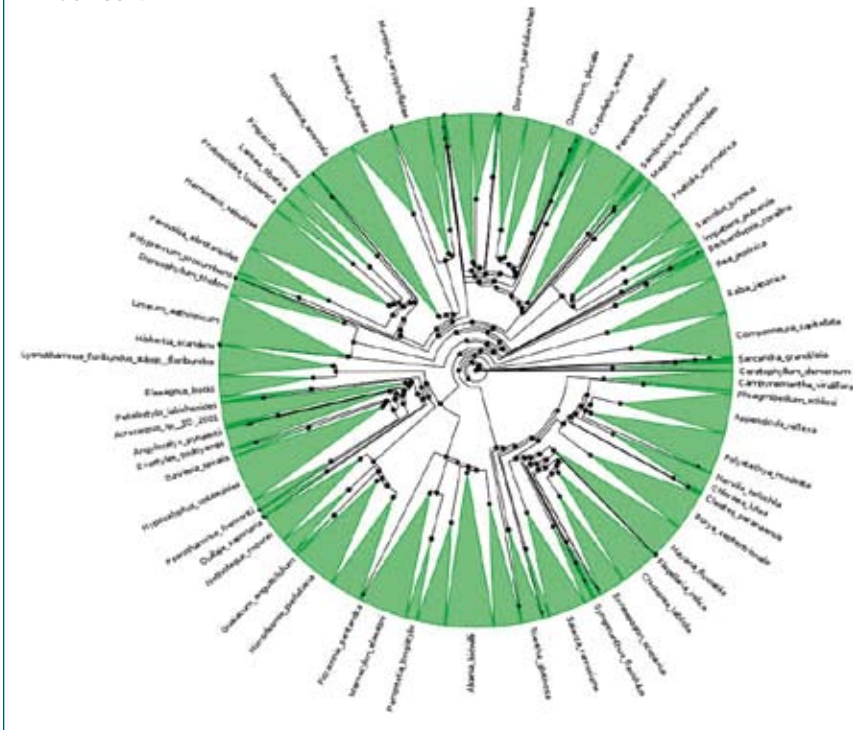
Berechnung des Verwandtschaftsgrads

Für vier Spezies existieren nur drei unterschiedliche wurzellose Stammbäume. Die Funktion f berechnet die Wahrscheinlichkeit, dass der betreffende Baum zu den DNA-Daten passt. Ihre Werte zeigen, dass Mensch und Schimpanse enger miteinander verwandt sind als mit Gorilla und Orang-Utan.



Beispiel eines ausgedehnten DNA-Stammbaums

Diesen Stammbaum für 56 000 Pflanzen errechnete die Gruppe des Autors kürzlich in Zusammenarbeit mit Forschern von der Yale University und der Brown University in den USA.



Am besten wäre es, wenn jeder von ihnen einen anderen Stammbaum evaluieren würde. Dazu müsste der einzelne Prozessor jedoch das komplette Datenmaterial im eigenen Arbeitsspeicher verfügbar haben – wozu dieser möglicherweise nicht ausreicht. Da liegt es nahe, die Aufgabe in Teilaufgaben zu zerlegen, die jede für sich nur eine relativ kleine Teilmenge aller Daten erfordern, und diese entsprechend auf die Prozessoren zu verteilen. Allerdings darf die einzelne Teilaufgabe auch nicht zu klein sein; sonst nimmt der Austausch von Daten, der vor und nach der Erledigung jeder Teilaufgabe erforderlich ist, einen zu großen Teil der Rechenzeit in Anspruch. Die Analyse und Identifizierung solcher Teilaufgaben ist nicht einfach und bildet einen der Schwerpunkte im Teilgebiet der Informatik, das sich mit der parallelen Programmierung beschäftigt.

Auch hier gilt, dass die angewandten Parallelisierungsstrategien auf alle likelihood-basierten Programme übertragbar sein sollten und es auch sind. Mit RAxML wurden schon bis zu 1024 Prozessoren simultan zur Berechnung der Funktion f für einen einzigen

Stammbaum eingesetzt, wobei diese Zahl kein Limit darstellt. Das Programm nutzt auch die Fähigkeit zur Parallelverarbeitung bei Mehrkernprozessoren, wie sie in allen neueren Laptops und Desktops zu finden sind.

Abgesehen von unseren Bemühungen, die Effizienz der Programme zur Stammbaumberechnung zu steigern, beschäftigen wir uns aber auch mit der Analyse sehr großer biologischer Datensätze. Diese interdisziplinären Projekte verbessern unser Verständnis der Biologie und helfen uns, aktuelle rechnerische oder methodische Herausforderungen zu erkennen. Beispielhaft sei hier das »plant tree of life grand challenge project« genannt, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der National Science Foundation in den USA gefördert wird. Sein Hauptziel besteht darin, einen umfassenden Stammbaum der Pflanzen mit etwa 500 000 Spezies zu berechnen und online zur Verfügung zu stellen, so dass Biologen ihn für weiterführende Analysen nutzen können. Das ist eine Herkulesaufgabe, zumal die benötigten Daten keineswegs komplett vorliegen. Noch nie konnte ein Stammbaum dieser Größenord-

nung berechnet werden. Allerdings lassen sich auf dem Hochleistungsrechner des HITS mit Daten von etwa 20 Genen schon Bäume für 120 000 Spezies berechnen. In Zusammenarbeit mit Kollegen an der Yale University und der Brown University in den USA haben wir vor Kurzem einen Stammbaum der Pflanzen mit etwa 56 000 Spezies rekonstruiert und publiziert – den größten seiner Art bisher (Kasten links).

Obwohl es noch ein weiter Weg ist, kommen wir unserem Endziel, der Berechnung des Stammbaums aller Lebewesen, allmählich näher. Die stetige Verbesserung der Sequenzierverfahren und Rechnerarchitekturen lässt uns hoffen, dass wir dieses Ziel eines Tages auch erreichen werden. ~

DER AUTOR



Alexandros Stamatakis leitet am Heidelberger Institut für Theoretische Studien die Scientific Computing Group. Er hat an der Technischen Universität München Informatik studiert und

dort im Jahr 2004 in der Informatik promoviert. Nach Postdoc-Stationen auf Kreta und an der ETH Lausanne (Schweiz) war er von 2008 bis 2010 als Nachwuchsgruppenleiter an der Ludwig-Maximilians-Universität und später an der TU München (Emmy-Noether-Programm der DFG) tätig, bevor er im Oktober 2010 ans HITS kam.

QUELLEN

- Alachiotis, N. et al.:** A Reconfigurable Architecture for the Phylogenetic Likelihood Function. Konferenzbeitrag, FPL Prag 2009. Online unter: <http://sco.h-its.org/exelixis/nikos/publications.html>
- Gritzmann, P., Brandenburg, R.:** Das Geheimnis des kürzesten Weges: ein mathematisches Abenteuer. Springer, Berlin/Heidelberg 2004
- Ott, M. et al.:** Large-Scale Maximum Likelihood-Based Phylogenetic Analysis on the IBM BlueGene/L. In: Proceedings of IEEE/ACM Supercomputing (SC2007) Conference, Reno, Nevada, November 2007
- Stamatakis, A., Izquierdo-Carrasco, F.:** Result Verification, Code Verification and Computation of Support Values in Phylogenetics. In: Briefings in Bioinformatics 12, S. 270–279, 2011
- Stamatakis, A., Alachiotis, N.:** Time and Memory Efficient Likelihood-Based Tree Searches on Gappy Phylogenomic Alignments. In: Bioinformatics 26, S. i132–i139, 2010

Pfade im Informationsdschungel

Wer die verschlungenen Wege des Stoffwechsels erforscht, benötigt Orientierungshilfe. Die Datenbank SABIO-RK hilft mit allerlei Feinheiten der Informatik, benötigte Daten in der Flut an Publikationen zu finden.

Von Wolfgang Müller

Allein vor dem Rechner sitzend, versunken in einer abstrakten Welt aus Bits und Bytes – das ist das Bild, das sich viele von der Arbeit des Informatikers machen. Tatsächlich sieht die Realität oft anders aus. So unterstützt die HITS-Gruppe »Scientific Databases and Visualization« (SDBV) Systembiologen durch die Einrichtung und Pflege spezieller Datenbanken. Das erfordert interdisziplinäre Zusammenarbeit und regen Austausch mit den Nutzern.

Systembiologen betrachten Vorgänge in lebenden Organismen nicht isoliert, sondern in größeren Zusammenhängen. Da sich hierbei schnell zu viele Informationen für einen einzigen Kopf anhäufen, arbeiten diese For-

scher disziplinübergreifend zusammen. Während Experimentatoren sich zum Beispiel intensiv mit der Messung von Vorgängen innerhalb der Zelle befassen, haben Theoretiker etwa Stoffwechselketten und deren Kombinationen im Blick. Sie versuchen die zu Grunde liegenden biochemischen Prozesse in mathematischen Modellen zu formulieren, um nicht allein das »Wer reagiert mit wem?« zu beantworten, sondern auch Fragen wie »Wie schnell läuft die Reaktionskette bei den gegebenen äußeren Bedingungen ab?«. Solche kinetischen Modelle sind Differenzialgleichungen, die beispielsweise die zeitliche Veränderung der Glukosekonzentration und der durch den Abbau des Moleküls entstehenden Produkte widerspiegeln (unter anderem ATP und ADP,

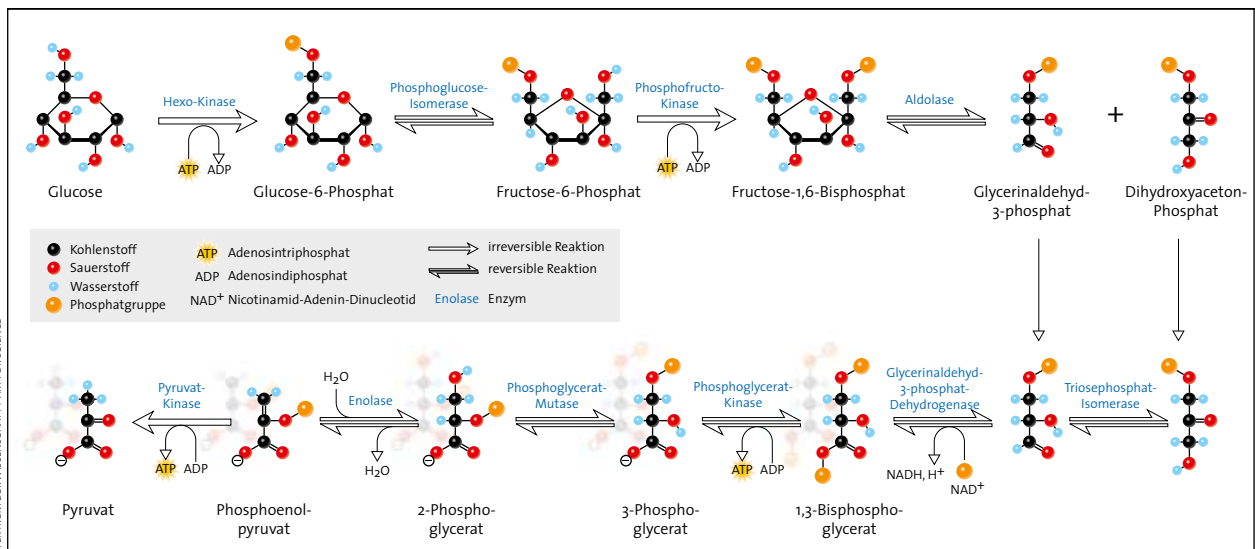
die als Energieträger im Körper fungieren). Über Koeffizienten lassen sich diese Gleichungen an die Temperatur, den pH-Wert und andere Parameter anpassen.

Wie überall in der Wissenschaft folgt der Erkenntnisgewinn dem immer gleichen Schema: Auf der Basis bereits publizierter Forschungsergebnisse entsteht eine Hypothese, die experimentell überprüft wird; die Analyse der Messergebnisse begründet dann ein Modell dessen, was im Experiment passiert ist. Alle gewonnenen Informationen werden schließlich publiziert und speisen wiederum neue Theorien und Experimente.

Und gerade an dieser Stelle helfen Datenbanken. Denn der Austausch über gedruckte Journale ist nicht nur langsam, es fällt Wissen-

Reaktionsketten im Visier der Forscher

Beim Glukosestoffwechsel wird das Zuckermolekül in einer Reaktionskette zu Pyruvat umgesetzt; es entstehen außerdem die Energieträger Adenosindiphosphat und Adenosintriphosphat (ADP und ATP). Immer wieder greifen dabei Enzyme wie die Hexokinase ein und katalysieren einen Zwischenschritt. Wie schnell aber laufen die Reaktionen ab, welchen Einfluss haben die Stoffkonzentrationen und die Umgebungsbedingungen? Solche Zusatzinformationen zu Stoffwechselwegen enthält die Datenbank SABIO-RK.



The screenshot shows the SABIO-RK search interface. The search term 'hum' is entered in the 'Organism' field. The search results table is as follows:

Reaction	Enzyme			Tissue	Organism	Parameters (besides concentration)	Environment	
	ECNumber	Protein	Enzyme Variant (wildtype (m)utant)				°C	pH
Pyruvate + ATP = Phosphoenolpyruvate + ADP	2.7.1.40		wildtype		Streptococcus mutans	Km	25	7
Pyruvate + ATP = Phosphoenolpyruvate + ADP	2.7.1.40		wildtype		Streptococcus mutans		25	7

Below the table, a detailed view for 'Entry ID: 24732' is shown, including general information (Organism: Streptococcus mutans, Strain: JC2), EC Class (2.7.1.40), and substrates (Phosphoenolpyruvate).

Der Screenshot illustriert eine Schlagwortsuche mit SABIO-RK. In diesem Fall gab der Nutzer das Enzym »Pyruvate kinase« ein, das System meldet 615 mögliche Resultate. Um die Suche auf den menschlichen Stoffwechsel einzugrenzen, erfolgt die Eingabe von »hum« in die Suchmaske, die Datenbank liefert dazu eine Reihe von Vorschlägen.

schaftlern auch zunehmend schwerer, aus der gesamten Flut an Informationen nur die das jeweilige Thema betreffenden herauszufiltern. Aktuell verzeichnet PubMed, eine der wichtigsten Publikationsverzeichnisse für die Medizin, allein zur Leber – dem zentralen Organ des Stoffwechsels – mehr als 700 000 Veröffentlichungen. Um die jeweils relevanten zu ermitteln und daraus die für eine bestimmte Fragestellung wichtigen Daten zu entnehmen, benötigt ein Forscher die Unterstützung der elektronischen Medien.

Hierzu hat unsere Gruppe die Datenbank SABIO-RK (*System for the Analysis of Biochemical Pathways – Reaction Kinetics*) entwickelt. Wie es der Name andeutet, enthält sie von uns aufbereitete Angaben zu Stoffwechselwegen. So genannte Biokuratoren wählen zunächst potenziell nützliche Artikel anhand der Zusammenfassungen in PubMed aus. Hilfskräfte lesen diese Publikationen und geben die daraus entnommenen Daten zunächst in eine nichtöffentliche Version der Datenbank ein. Nun kommen wieder die Biokuratoren zum Zuge, die zum einen darauf achten, dass Gleiches gleich gespeichert wird. Dies betrifft sowohl die formale Struktur der Infor-

mationen als auch die Detailtiefe eventueller zusätzlicher Kommentare. Zum anderen sollte Gleiches auch gleich bezeichnet sein.

Über eine Suchmaske mit geeigneten Filtern kann ein Nutzer auf die Datenbank zugreifen – etwa nach Reaktionen suchen, an denen bestimmte Moleküle beteiligt sind. Die Informationen werden zudem auf Wunsch als SBML-Dateien ausgegeben, also in der Systems Biology Markup Language, einem international standardisierten Dateiformat der systembiologischen Modellierung. Ferner gibt es Verknüpfungen zu anderen Datensammlungen: So kann man sich mit einem Klick bei ChEBI (*Chemical Entities of Biological Interest*), einer Datenbank, die am European Bioinformatics Institute in Hinxton (England) entwickelt und gepflegt wird, weitere Informationen zu einem Reaktionspartner holen.

Problematische Vielfalt der Namen

Für diese Arbeit benötigen wir mehr als die Expertise in der Informatik. Es genügt nicht zu wissen, wie Nutzer in einer Datenbank suchen und wie man sie dabei optimal unterstützen kann. Wir müssen auch verstehen, wie Systembiologen Daten gewinnen und einset-

zen. Zudem ist SABIO-RK zwar einerseits eine Webanwendung, die wie ein Ingenieursprodukt geplant und gebaut werden muss. Darum herum ranken sich aber andererseits auch interessante Forschungsthemen.

So sind die Namen der reagierenden Stoffe oft nicht eindeutig, was die Forderung, Gleiches gleich zu benennen, zu einer anspruchsvollen Aufgabe macht. Beispielsweise bezeichnen das deutsche »Wasser« und die chemische Formel H_2O die gleiche Substanz. Für das englische *water* listet die Datenbank ChEBI nicht weniger als 14 Synonyme auf.

Auch die IUPAC, eine internationale Organisation, die regelt, wie chemische Verbindungen zu bezeichnen sind, lässt hier viel Spielraum. Ein Beispiel aus dem Glukosestoffwechsel: Glyceraldehyd-3-Phosphat, das korrekt auch als 3-Phosphoglyceraldehyd geschrieben werden kann, denn die standardisierte Nomenklatur erlaubt die Umstellung von Namensteilen.

Eine Vereinheitlichung ist bereits Teil der Kuratierung. So darf es schon bei der Eingabe nur entweder Glucose oder Glukose geben. Genauer gesagt, speichern wir nicht einen Textnamen, sondern die standardisierten Be-

zeichner der ChEBI: Der Glukose entspricht dort der Identifikator ChEBI:17234, der eindeutig und sprachunabhängig ist. Um eine derartige Umsetzung in einen standardisierten Bezeichner schon bei der Eingabe von Suchbegriffen durch die Nutzer zu unterstützen, lassen sich gängige Verfahren der Sprachverarbeitung wie Stemming-Algorithmen leider nicht einsetzen. Diese bilden Worte auf einen gemeinsamen Wortstamm ab, könnten beispielsweise für »geht« und »geht« die Basis »geh« finden.

In langjähriger Zusammenarbeit mit der Gruppe von Uwe Reyle an der Universität Stuttgart entstanden zwei neue Verfahren zur Namen-Normalisierung. Das eine folgt einem morphologischen Ansatz, untersucht also die Form des Wortes. Dazu müssen wir jeden Na-

men in Wortbestandteile zerlegen. Diese werden sortiert, manche durch andere ersetzt. Die einzelnen Schritte sind jeweils so gewählt, dass Wörter gleichen Sinns auf gleiche künstliche Wörter abgebildet werden. Beispielsweise entfernt dieses Verfahren in den IUPAC-konformen englischen Bezeichnungen *1-butanol* und *butan-1-ol* die Bindestriche, sortiert die Wortbestandteile und kommt in beiden Fällen zu dem identischen Ergebnis *1butanol*.

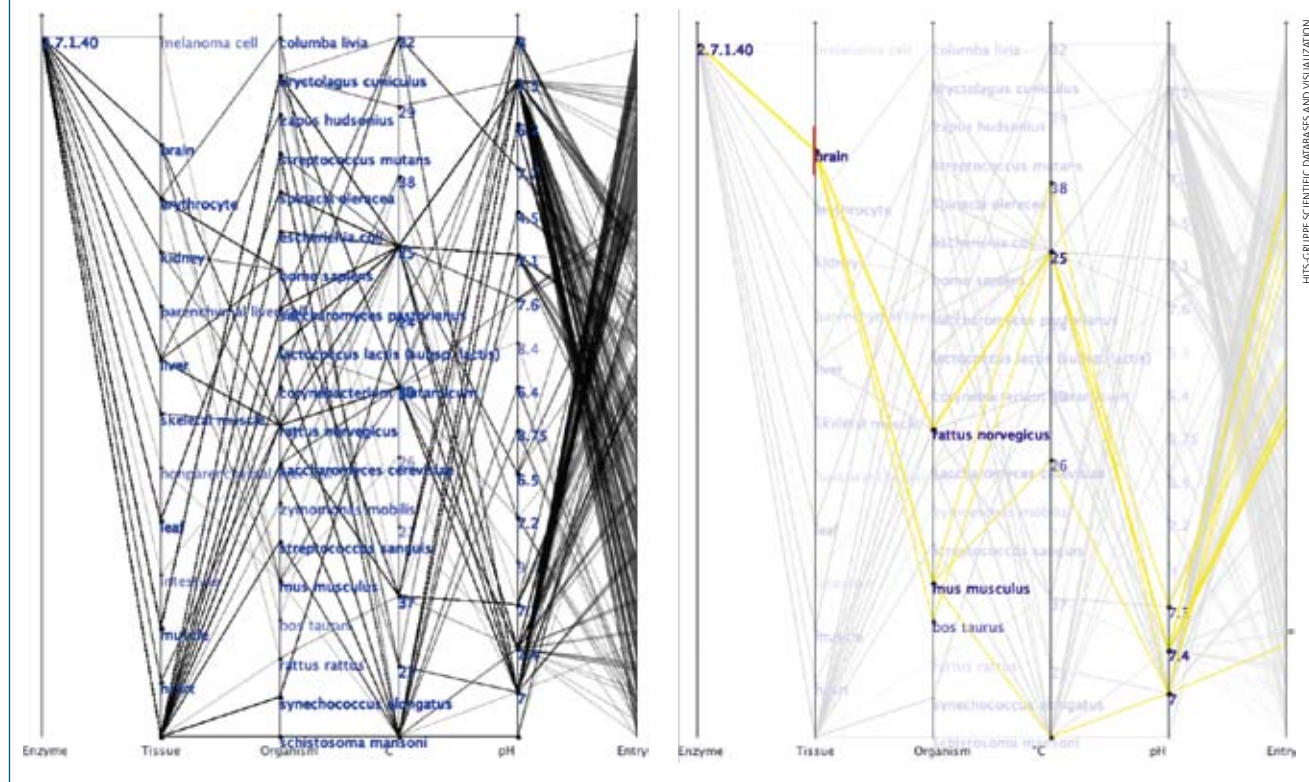
Der zweite Ansatz hingegen beschäftigt sich mit dem Sinn der Wörter, ist also semantischer Natur. Dieser Algorithmus übersetzt Molekülbezeichnungen in chemische Strukturformeln und käme damit im Beispielfall ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die zwei verschiedenen Wörter identische chemische Strukturen bezeichnen. Zwar wird aus dem

Problem, korrekte Wort-Transformationsregeln zu suchen, nun die Aufgabe, Molekülnamen korrekt in Strukturen umzusetzen. Doch kann der semantische Ansatz viel mehr, vermag sogar mit Überbegriffen umzugehen: Sucht man etwa nach einer Reaktion eines Alkohols mit einem anderen Molekül, wäre der semantische Ansatz der Namen-Normalisierung im Vorteil, einerlei um welchen Alkohol es sich handelt; ein morphologischer Ansatz müsste hierzu stark erweitert werden.

Wir verfolgen deshalb beide Verfahren parallel. Die morphologische Methode steht kurz vor dem Einsatz, die semantische ist davon noch weiter entfernt. In der aktuellen Implementierung arbeitet sie auch deutlich langsamer. Als Anbieter einer Dienstleistung müssen wir uns fragen, mit welchem Aufwand wir

Stöbern in der Datenbank mit parallelen Koordinaten

Die Datenbank SABIO-RK entspricht einem vieldimensionalen Raum. So genannte parallele Koordinaten ermöglichen dennoch eine intuitive Herangehensweise. Das Beispiel beschränkt die Suche auf sechs Dimensionen: Enzym, Gewebetyp, Organismus, Umgebungstemperatur, pH-Wert und den Eintrag in der Datenbank (Entry-ID). Fragt man nach Reaktionen, die durch eine Pyruvatkinase katalysiert werden, ergibt sich das linke Bild. Offenbar wären Daten für verschiedene Zelltypen wie Melanome oder Erythrozyten abrufbar (linke Grafik), im Fokus der Suche stehen aber nur Informationen zu Gehirnzellen. Markieren des Kreuzungspunkts »Brain Tissue« lässt nicht relevante Linien verblassen. Auf einen Blick sieht der Nutzer nun beispielsweise, dass er Messergebnisse für Experimente an Ratten (*Rattus norvegicus*) abrufen kann (rechte Grafik). Sofern er sich aber für die Kinetik des Enzyms bei 26 Grad Celsius interessiert, müsste er auf Messungen an Mäusen (*Mus musculus*) zurückgreifen.



wie viel Resultat im Sinne unserer Nutzer bekommen. Gibt es Problemstellungen, bei denen er gern mehrere Sekunden wartet, bis ein Ergebnis vorliegt? Die Diskussion ist noch offen. Klar ist aber, dass wir mit beiden Ansätzen nicht immer richtigliegen. Ihr einziger Zweck ist es, den vom Nutzer gewählten Bezeichner einmalig in einen standardisierten umzusetzen. Intern wird dann nur noch dieser verwendet.

Wer in SABIO-RK nach bestimmten Reaktanten sucht, profitiert von dieser Namen-Normalisierung, denn er muss sich keine Gedanken darum machen, wie die Substanz oder das Enzym in den für ihn wichtigen Publikationen bezeichnet wurde. Viele Nutzer bringen aber weniger Vorwissen über unsere Datensammlung mit. Prinzipbedingt enthält sie nur einen sehr kleinen, aber gut gewählten und relevanten Teil der veröffentlichten reaktionskinetischen Daten.

Das Mantra der Datenbanksuche

Wir wollen einem Biologen ermöglichen, schnell herauszufinden, ob die für ihn wichtigen Daten in unserer Sammlung vorhanden sind. Das lässt sich vielleicht mit einem Kunden vergleichen, der ein Kaufhaus betritt, um eine ihm passende Hose zu finden. Vielleicht ist schon die Größe klar, aber andere Merkmale kommen erst bei der Suche selbst in den Sinn (Jeans, blau, elastischer Stoff).

Die meisten der heutzutage gebräuchlichen Such-Interfaces ermöglichen das, was die Computerwissenschaftler Ben Shneiderman und Catherine Plaisant von der University of Maryland *fact finding* und *extended fact finding* nennen. Hier geht es im Wesentlichen darum, bereits vorhandenes Wissen zu ergänzen wie: Es gibt eine Naturkonstante c , die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum. Wie groß ist diese? Oder im Kontext der Systembiologie: Wie stark bindet ein bestimmtes Enzym bei einem pH-Wert von fünf an sein Substrat?

Dem Kunden im Kaufhaus wäre damit nicht geholfen, da er nur sehr vage Vorgaben machen kann. Dennoch wird er das gewünschte Produkt finden, da Einkaufszentren Anhaltspunkte zur Navigation geben. So wird er die Parfümerie- oder Süßwarenabteilung ignorieren, die richtige Etage für die Herrenoberbekleidung ansteuern, dort zu den Hosenständern gelangen, eine Grobauswahl anhand der Größen treffen und so fort.

Diesem Vorgehen entsprechen so genannte explorative Suchansätze. Sie sollen einem Nutzer sozusagen ein Gefühl für die Datensammlung vermitteln. Shneiderman hat dazu 1996 sein Visual Information Seeking Mantra für die Datenbankprogrammierung formuliert: »*Overview first, zoom and filter, details on demand*« – zunächst gilt es, einen Überblick zu vermitteln, dann immer näher heranzugehen und Daten herauszufiltern, schließlich Details bei Bedarf anzuzeigen.

Das bekannte Webprogramm Google Maps ist ein schönes Beispiel für eine gelungene Realisierung dieses Mantras. Nehmen wir an, Sie möchten einen abgelegenen Campingplatz in Südfrankreich finden, dann würden Sie von der Weltkugel ausgehend nach Südfrankreich zoomen, dort besonders grüne Regionen und darin wiederum nach Campingplätzen suchen. Erst dann kommen Details: Wie heißt der Ort, wie der Campingplatz, wie haben Nutzer ihn bewertet? Und all das geht so schnell vonstatten, dass kaum jemand bemerkt, wie die Satellitenkarte mit jedem Zoom nachgeladen wird.

Dass diese Technik auch für die Wissenschaft taugt, beweist SubtiPathways, eine Entwicklung der Universität Göttingen. Anstatt der Landkarten präsentiert es Stoffwechselwege; an manchen Orten darauf sind weitere Informationen hinterlegt. Dieser Ansatz eignet sich aber nur für Datensätze mit maximal fünf Dimensionen. Volker Springels Sternsimulationen (siehe den Beitrag S. 10) sind dafür ein beeindruckendes Beispiel: Verschiedene Energiedichten im dreidimensionalen Raum werden durch Helligkeiten als vierte Dimension dargestellt, deren zeitliche Veränderung erweitert die Simulation um eine fünfte Achse.

Stoffwechselffade sind aber vielschichtiger: Es ist wichtig, an welchem Organismus, welchem Gewebe und welchem Zelltyp eine Messung durchgeführt wurde; oft sind vier bis fünf verschiedene Moleküle an einer Reaktion beteiligt, die sich je nach den äußeren Bedingungen unterschiedlich verhalten. Um einen solchen Prozess auf unseren dreidimensionalen Anschauungsraum abzubilden – und dann Techniken wie in Google Maps einzusetzen –, müssten wir Dimensionen weglassen.

Für deren Auswahl gibt es zwar durchaus Verfahren, wünschenswert im Sinne der explorativen Suche wäre aber nach wie vor, die Gesamtheit intuitiv erfassen zu können. Die von uns favorisierte Lösung sind so genannte

parallele Koordinaten. Hier werden Punkte in hochdimensionalen Räumen nicht auf den dreidimensionalen Anschauungsraum projiziert, sondern als miteinander verknüpfte Linienzüge dargestellt (siehe Kasten linke Seite). Dabei entspricht jeder dieser Züge einer Dimension, daher die Bezeichnung des Verfahrens: Die Koordinatenachsen werden parallel zueinander gestellt, ein Punkt im vieldimensionalen Raum auf einen Linienzug in einer Fläche abgerollt.

Das Grundverfahren wurde bereits im ausgehenden 19. Jahrhundert entwickelt und seitdem auf verschiedene Problemstellungen angepasst. Seine Anwendung in Suchszenarien ist dennoch keineswegs trivial, da viele Fragen zu beantworten sind: Wie sollte man die Achsen anordnen, wie Kreuzungen besser kenntlich machen, wie dem Nutzer die Auswahl der ihn interessierenden Bereiche erleichtern? Für all diese Fragestellungen gibt es generelle und auch für das Problem angepasste Antworten.

Die beschriebenen Techniken – die Namen-Normalisierung ebenso wie die explorative Suche – haben zum Ziel, dem Nutzer einen Überblick zu geben und in ihm Erwartungen an Suchresultate zu wecken, die das System dann auch erfüllen kann. Um dies gut machen zu können, müssen wir erfahren, wie die Nutzer arbeiten, sowie ihre Wünsche und ihre Prioritäten kennen. Wir müssen als interdisziplinär arbeitende Gruppe in der Lage sein, Vorschläge zu machen. Dabei sind unsere Kuratoren wichtig, die aus der Biologie und Biochemie kommen und die Rolle der Nutzer übernehmen können, gleichzeitig aber auch informatisches Verständnis haben. Für viele andere Fragestellungen hingegen ist die direkte Zusammenarbeit mit Systembiologen außerhalb der Gruppe unerlässlich. ~

DER AUTOR



Wolfgang Müller studierte Experimentalphysik in Konstanz und parallel dazu Informatik an der Fernuniversität Hagen. Er habilitierte sich an der Universität Bamberg mit einer

Arbeit zur Suche in selbstorganisierten verteilten Systemen. Seit 2009 leitet er die SDBV-Gruppe, die 1999 am EML Research, dem Vorgänger des HITS, von Isabel Rojas gegründet wurde.

Kreativ durch Analogien

Gleiche Strukturen erkennen bei Dingen, die auf den ersten Blick nichts miteinander gemein haben: Das ist das Arbeitsprinzip, mit dem die interdisziplinäre Computerlinguistik ihre Erfolge erzielt.

Von Michael Strube

Die Computerlinguistik vereinigt Elemente von Informatik und Linguistik; sie verwendet darüber hinaus Methoden aus weiteren Gebieten wie Mathematik, Psychologie, Statistik und künstliche Intelligenz. Der Reiz und die Herausforderung einer solchen interdisziplinären Wissenschaft liegen darin, Analogien zwischen Konzepten aus weit entfernten Teilgebieten zu erkennen und zu nutzen.

Paradebeispiel dafür ist einer der entscheidenden Durchbrüche, welche die Computerlinguistik prägten. Es geht um das »Parsing«: Ein Computerprogramm, genauer gesagt ein Compiler, nimmt Zeichen für Zeichen den Input des Benutzers entgegen, der in diesem Fall seinerseits aus dem Text eines Computerprogramms besteht, und ermittelt dessen

Struktur. Im Prinzip dasselbe tut ein Mensch, der einen gesprochenen Satz hört und versteht.

Diese Analogie ist noch nicht besonders bemerkenswert, weil die Entwickler der Programmiersprachen und der zugehörigen Parserprogramme von Anfang an stark von der Linguistik beeinflusst waren; da verwundert es nicht, dass sie deren Denkstrukturen übernommen haben. Aber die Analogie funktioniert auch in Gegenrichtung. Erst als die Informatiker Methoden aus dem Kompilieren formaler Sprachen – insbesondere Programmiersprachen – auf natürliche Sprache übertragen, wurde das Parsing von gewöhnlichen Sätzen überhaupt effektiv berechenbar. Erst dann konnten sie also Programme schreiben, die einen normalen, gesprochenen Satz hören

und in akzeptabler Zeit zumindest seine grammatische Struktur erkennen.

Mehr noch: Ein solches Programm soll vor dem eigentlichen Parsing kontinuierliche Sprache erkennen, das heißt im pausenlosen Strom der gesprochenen Laute einzelne Wörter und damit auch die Grenzen zwischen den Wörtern ausfindig machen, und das unabhängig von der Person des Sprechers und mit großem Wortschatz. Diese Aufgabe in ausreichender Qualität zu lösen, gelang erst mit Hilfe einer weiteren Analogie. Man interpretiert das Sprachsignal als verrauschte, das heißt durch zufällige Störungen verunreinigte Version einer Zeichenkette, die dekodiert werden muss. Dank der neuen Betrachtungsweise lassen sich nun statistische Methoden aus der Informationstheorie anwenden.

Koreferenzresolution mit annotierten Paaren

As we know, Putin has kept putting off this visit to Japan since last year, like back then when Yeltsin repeatedly postponed his trip to Japan.

That is to say, Japan asked for too high a price.

That is, it asked the Russian president to come to Japan to make concessions on territorial issues.

Well, well, the Russian president was still unwilling, was unwilling to make concessions.

Im Text oben sind als koreferent erkannte Erwähnungen farbig unterlegt und durch gleichfarbige Striche miteinander verbunden. Hier kommt es nicht nur darauf an zu verstehen, dass »his« sich auf »Yeltsin« bezieht und »it« auf Japan, sondern auch darauf, dass mit »the Russian president« »Putin« gemeint ist. Letzteres erfordert sogar Weltwissen, nämlich dass zu der Zeit, als dieser Text geäußert wurde, nicht mehr Boris Jelzin, sondern Wladimir Putin russischer Präsident war.

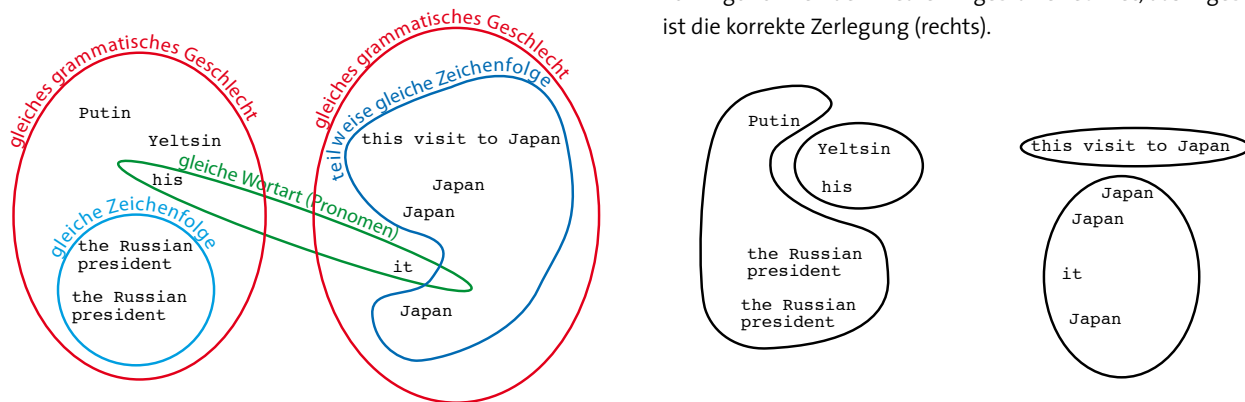
Als Trainingsmaterial für Lernprogramme dienen Listen (»Annotationen«) aus Paaren von Erwähnungen, zum Beispiel aus obigem Text, mit der – von menschlichen Bearbeitern hinzugefügten – Angabe, ob diese Erwähnungen sich auf denselben Gegenstand beziehen (koreferent sind, blauer Strich) oder nicht (roter Strich).

Putin	_____	this visit to Japan
Putin	_____	Japan
this visit to Japan	_____	Japan
Japan	_____	Yeltsin
this visit to Japan	_____	Yeltsin
Putin	_____	Yeltsin
Yeltsin	_____	his
his	_____	Japan
Yeltsin	_____	Japan
Japan	_____	Japan
Japan	_____	it
it	_____	the Russian president
Japan	_____	the Russian president
Japan	_____	the Russian president
his	_____	the Russian president
Yeltsin	_____	the Russian president
Japan	_____	the Russian president
this visit to Japan	_____	the Russian president
Putin	_____	the Russian president
...	_____	...

Koreferenzresolution mit Hypergraphen

Das Programm definiert zunächst mit Hilfe einzelner Merkmale Teilmengen aller Erwähnungen (Hypergraphen) als Kandidaten

für Koreferenzketten. Die Teilmengen sind im linken Bild durch farbige Umrandungen dargestellt. Sie werden dann mit Hilfe von Algorithmen der linearen Algebra verrechnet; das Ergebnis ist die korrekte Zerlegung (rechts).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MICHAEL STRUBE

Von den so entwickelten Methoden profitierte schließlich immens die maschinelle Übersetzung. Hier trägt dieselbe Analogie: Die Ausgangssprache wird als verrauschte Version der Zielsprache angesehen. Obwohl die automatische Übersetzung auf den ersten Blick nichts mit der Spracherkennung gemein hat, erkannten Computerlinguisten eine Strukturähnlichkeit und übertrugen den Lösungsansatz von der Spracherkennung auf die automatische Übersetzung.

Ist »er« Putin oder Jelzin?

Hier wird ein Muster deutlich: Man löst ein computerlinguistisches Problem, indem man eine Analogie zu einem scheinbar entfernten Gebiet erkennt – natürliche Sprachen und Programmiersprachen, Spracherkennung und Informationstheorie, maschinelle Übersetzung und Spracherkennung. Zwei Studien aus meiner Arbeitsgruppe zeigen im Folgenden, wie eine solche Übertragung im Einzelfall geleistet werden kann.

Eine wichtige Aufgabe beim automatischen Verstehen von Texten ist die so genannte Koreferenzresolution: zu erkennen, dass sich mehrere Ausdrücke im Text (»Erwähnungen«) auf denselben Gegenstand beziehen (»koreferieren«). Eine Erwähnung kann zum Beispiel ein Eigenname in unterschiedlichen Varianten, ein Pronomen oder auch eine zusammengesetzte Nominalphrase sein. In dem Text im Kasten links sind die Erwähnungen »Putin« und »the Russian president« koreferent, ebenso »Yeltsin« und »his« sowie »Japan«

und »it«. Formal gesprochen kommt es darauf an, alle Erwähnungen in Teilmengen aufzuteilen, deren Elemente zueinander koreferent sind; und natürlich darf eine Erwähnung nicht zwei verschiedenen Teilmengen angehören. Diese Mengen heißen auch »Koreferenzketten«, weil sie häufig, wie im Kasten, durch verbindende Striche dargestellt werden.

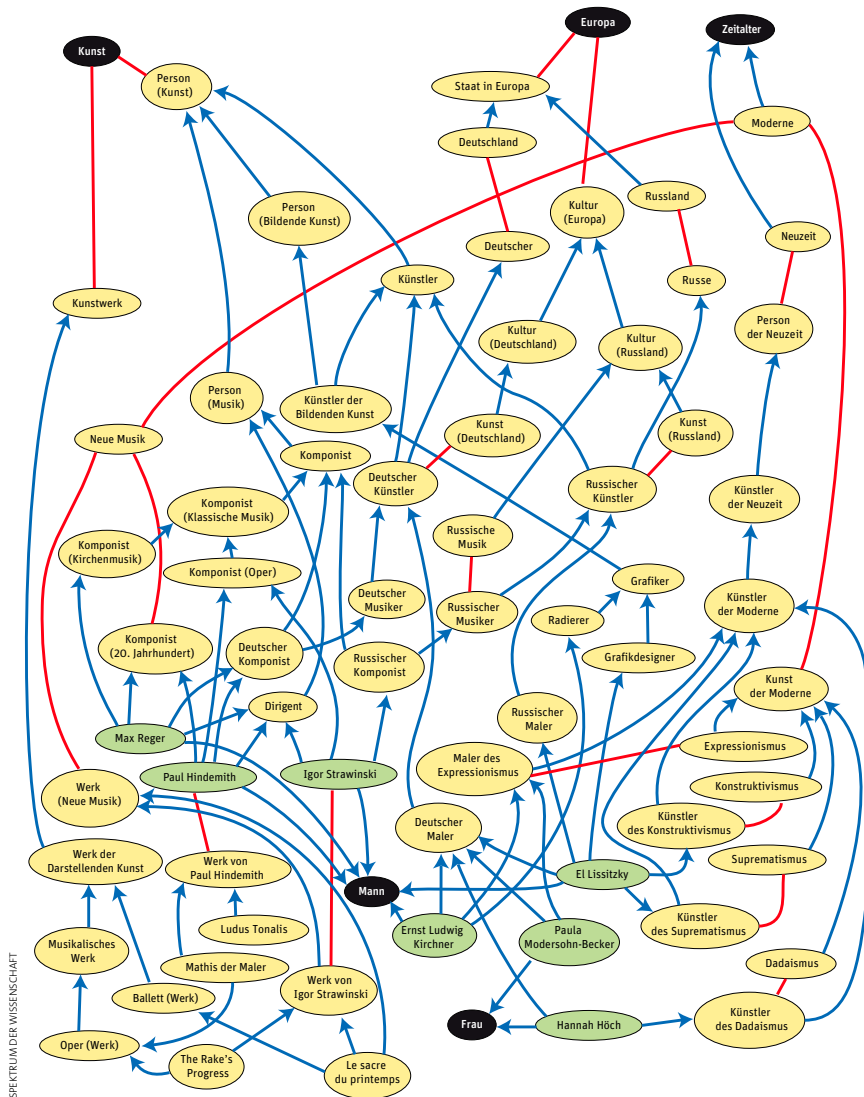
Frühe Arbeiten in der Computerlinguistik griffen Erkenntnisse aus der Linguistik auf und stellten komplexe Regeln für die Koreferenzresolution auf, die eine vollständige syntaktische und häufig auch semantische Analyse des Textes voraussetzten. Da dieser Ansatz nicht robust genug für eine Anwendung im größeren Stil war, wurden seit den späten 1990er Jahren zunehmend Verfahren des maschinellen Lernens eingesetzt: Ein Programm leitet automatisch aus von Menschen vorgege-

benen korrekten Lösungen, die als Trainings- und Testdaten dienen (»Annotationen«), Regeln oder statistische Zusammenhänge ab.

Damit die Standardverfahren des maschinellen Lernens angewendet werden können, arbeitet man mit Paaren von Erwähnungen. Eine Annotation besteht aus einer Liste solcher Paare mitsamt der Angabe, ob die beiden Erwähnungen eines Pairs koreferent sind oder nicht (Kasten links, rechte Grafik). Das Programm lernt nicht nur danach, es gibt zu einem neu vorgelegten Text Listen von Paaren aus. Diese »paarweise Klassifikation« hat den Vorteil, dass sie bekannten und gut verstandenen Methoden des maschinellen Lernens zugänglich ist. Nachteil ist, dass Wissen um den Kontext verloren geht. So kann es einem solchen Programm durchaus passieren, dass es »Putin« und »Yeltsin« durch

Glossar

- **Syntax** ist die grammatische Struktur eines Textes, Semantik seine Bedeutung.
- **Parsing:** Einen Eingabetext Zeichen für Zeichen entgegennehmen, dabei Grenzen zwischen bedeutungstragenden Elementen (»Wörtern«) und in gewissen Grenzen die Struktur des Texts erkennen.
- Zwei Ausdrücke im Text (»Erwähnungen«) **koreferieren**, wenn sie denselben Gegenstand bezeichnen.
- **Koreferenzresolution** ist die Identifizierung koreferenter Erwähnungen.
- **Annotation** ist ein von einem menschlichen Bearbeiter mit Zusatzinformationen versehenes Textbeispiel für das maschinelle Lernen.
- Ein **Synset** ist eine Menge annähernd synonyme Ausdrücke in der Datenbank WordNet.



Dieser kleine Ausschnitt aus dem Kategoriennetz der deutschen Wikipedia konzentriert sich auf die nähere Umgebung der Einträge zu einigen Künstlern vom Beginn des 20. Jahrhunderts. Blaue Pfeile haben die Bedeutung »ist ein« (»ein russischer Komponist ist ein Komponist«, »Igor Strawinski war ein Dirigent«), rote Linien kennzeichnen das Wissen, dass eine solche Beziehung nicht besteht.

eine lange Koreferenzkette verbindet – und damit in einen Topf wirft –, weil an irgendeiner Stelle das Pronomen »his« zum einen wie zum anderen passt und schon die Feststellung, dass »his« nur einen der beiden Herren meinen kann, über die Betrachtung einzelner Paare hinausgeht.

Dies war – stark vereinfacht – der Stand der Forschung, als vor drei Jahren Jie Cai als Doktorandin in meiner Arbeitsgruppe anfragte. Wir fragten uns, wie man das Problem der Koreferenz angemessener repräsentieren und insbesondere Wissen über den Kontext in die Entscheidung mit einbeziehen kann. Dabei legten wir das oben beschriebene Konzept zu

Grunde, dass Koreferenzketten eigentlich Mengen sind und es darum geht, jede Erwähnung genau einer Menge zuzuweisen. In der Informatik fanden wir ein geeignetes Analogon zu dieser Aufgabe: die Clusteranalyse. Man ordnet Datenpunkte Mengen (»Clustern«) zu, und zwar so, dass eng benachbarte Datenpunkte in der Regel in ein und denselben Cluster geraten. Nur kann man zwar zu zwei (durch Koordinaten gegebenen) Datenpunkten in einfacher Weise deren Entfernung definieren; aber das funktioniert für Erwähnungen nicht. Allenfalls sind Erwähnungen Punkte (»Knoten«) in einem Graphen, die genau dann durch eine Kante verbunden sind,

wenn sie koreferent sind; aber das ist ja erst das Ergebnis der Analyse und nicht der Ausgangspunkt. Diese Kanten wiederum drücken nichts weiter aus als eine paarweise Klassifikation und bieten daher keinen Fortschritt.

Weiter kommt man mit einem neuen Konzept. Ein Hypergraph ist ein verallgemeinerter Graph, bei dem eine Kante mehr als zwei Knoten miteinander verbinden kann. Damit ist er die graphentheoretische Entsprechung einer Menge, und wir haben eine angemessene Darstellung des Koreferenzproblems gefunden: Erwähnungen sind Knoten im Hypergraphen, und jeder Gegenstand ist eine Hyperkante, die alle seine koreferenten Erwähnungen umfasst. Das Problem der Koreferenzresolution kann dann als Clusteranalyse für Hypergraphen aufgefasst werden.

Mit diesem neuen theoretischen Rahmen ist unser Programm zur Koreferenzresolution nicht mehr ausschließlich auf die Beispielpaare der paarweisen Klassifikation angewiesen. Vielmehr zieht es eine Vielzahl von »Merkmalen« (*features*) heran. Ein Merkmal ist ein Indiz dafür, dass zwei Erwähnungen im Prinzip koreferent sein können. Eines von ihnen zeigt an, ob Erwähnungen der gleichen semantischen Klasse angehören, also zum Beispiel beide eine Person, einen Ort oder ein Fahrzeug bezeichnen. Ein anderes Merkmal stellt dar, ob Erwähnungen die gleiche Zeichenkette enthalten (»Präsident Putin«, »Wladimir Putin«, »Putin«, ...). Weitere Merkmale enthalten Wissen über grammatische Eigenschaften einer Erwähnung wie Genus, Numerus und Person, über ihre syntaktische Rolle (Subjekt, Objekt, ...) oder bestimmte syntaktische Beziehungen zwischen zwei Erwähnungen, etwa dass eine Erwähnung Apposition einer anderen ist (»Wladimir Putin, der russische Präsident, ...«). Auch der Abstand im Text zwischen zwei Erwähnungen, gezählt in Wörtern oder Sätzen, wird als Merkmal ausgedrückt. Insgesamt arbeiten wir mit etwa 20 unterschiedlichen Merkmalen.

Unser Programm erstellt im ersten Schritt zu jedem Merkmal einen Satz von Hyperkanten. Diese sind manchmal gewöhnliche Kanten, verbinden also nur zwei Erwähnungen, zum Beispiel bei dem Merkmal für den Abstand im Text. Die meisten aber umfassen mehr als zwei Erwähnungen; sie machen die Stärke des Verfahrens aus. Allen Hyperkanten werden mit Hilfe von annotierten Trainingsdaten Gewichte zugewiesen; das sind Zahlen,

die bezeichnen, wie stark das mit dem Merkmal ausgedrückte Indiz für Koreferenz ist. Da das Verfahren robust ist gegenüber kleinen Abweichungen bei den Gewichten, kommt es mit fünf Prozent der Trainingsdaten aus, die für die paarweise Klassifikation erforderlich sind. Das ist von entscheidender Bedeutung, da Annotationen für jedes Sachgebiet neu erstellt werden müssen, viele Stunden menschlicher Arbeit erfordern und daher teuer sind.

Die mit Gewichten versehenen Hyperkanten lassen sich in Matrizen umwandeln. Die wiederum kann man mit Standardmethoden aus der linearen Algebra so transformieren, dass am Ende eine korrekte Zerlegung in Mengen koreferenter Erwähnungen steht (Kasten S. 31 oben).

Wikipedia als lexikalische Datenbank

In Experimenten mit Standarddatensätzen konnten Jie Cai und ich zeigen, dass unsere Methode trotz deutlich geringeren Bedarfs an Lernstoff wesentlich bessere Ergebnisse bei der Koreferenzresolution erzielt als die üblichen Verfahren, und das in etwa einem Viertel der Rechenzeit. Wegen des geringen Trainingsaufwands ist es uns auch gelungen, unser Verfahren ohne größere Mühe auf ein neues Sachgebiet zu übertragen: Inzwischen analysiert es nicht nur Nachrichtentexte, sondern auch Arztberichte.

Aufgaben wie die Koreferenzresolution benötigen über das linguistische Wissen (»Ist ›Putin‹ ein Substantiv oder ein Verb?«) hinaus auch Wissen über Objekte in der Welt und ihre Beziehungen zueinander (»Ist ›Putin‹ ein Mensch oder ein Ort?«). Koreferenzrelationen bestehen häufig zwischen einem Unter- und einem Oberbegriff, etwa »Wladimir Putin« und »der russische Präsident«, »der russische Politiker«. Im Oktober 2005 stellte sich meinem damaligen Doktoranden Simone Paolo Ponzetto und mir die Frage, wie wir unserem Koreferenzresolutionssystem dieses Wissen zur Verfügung stellen können.

Die in der Computerlinguistik populärste Ressource für derartiges Wissen ist »WordNet«, eine lexikalische Datenbank, die Wörter so genannten »Synsets« zuordnet, die jeweils eine Menge (annähernd) synonyme Ausdrücke enthalten. Die Synsets sind in einer Taxonomie angeordnet und durch viele weitere semantische Relationen miteinander verknüpft, so dass sich ein reichhaltiges semantisches

Netzwerk ergibt. WordNet enthält aber nur wenig Wissen über durch mit Eigennamen bezeichnete Konzepte. So gibt es in der aktuellen Version (Stand 30. Mai 2011) zwar einen Eintrag über »Vladimir Putin«; »Boris Yeltsin« hat allerdings nie Eingang in die Datenbank gefunden. Wir waren also auf der Suche nach einer Wissensquelle, die mehr Informationen über durch Eigennamen bezeichnete Konzepte enthält und dennoch so gut strukturiert ist wie WordNet.

Ein Blick auf die im Oktober 2005 noch recht kleine »Wikipedia« zeigte uns, dass diese Online-Enzyklopädie die erste Bedingung erfüllt. Die zweite Bedingung erforderte einen erneuten, unbefangenen Blick. Im Gegensatz zu gewöhnlichen, unstrukturierten Webseiten enthält Wikipedia neben dem ebenfalls unstrukturierten Text einige Strukturelemente, die unserer Aufgabe dienlich waren. So findet man am Ende jedes Artikels die Liste der Kategorien, denen er angehört. Die Kategorien selbst sind ebenfalls kategorisiert, so dass man mit ihrer Hilfe von einem Artikel zu einem anderen gelangen kann, der mit dem ersten semantisch verwandt ist.

Damit war klar: Wenn es gelingt, aus den Wikipedia-Kategorien ein semantisches Netz zu extrahieren, dann verfügt man über eine Ressource, die WordNet zumindest bei den durch Eigennamen bezeichneten Konzepten überlegen ist. In der Folge haben Ponzetto und ich (später stieß Vivi Nastase als Postdoc zum Team) mehrere Verfahren entwickelt, die Wikipedia zuerst in ein semantisches Netzwerk umwandeln, dann in eine Taxonomie und schließlich in ein Netzwerk mit reichhaltigen semantischen Relationen (Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 94; Bild S. 33). Die Anwendung auf mehrere computerlinguistische Probleme belegte die Richtigkeit unserer Grundannahme.

Die beiden hier beschriebenen Projekte weisen eine Gemeinsamkeit auf. Beim Problem der Koreferenzresolution kam es darauf an, auf einer abstrakten Ebene die Strukturgleichheit zwischen dem linguistischen Phänomen der Koreferenz, dem mathematischen Konzept der Menge und dem graphentheoretischen Konstrukt des Hypergraphen zu sehen. Bei der Wissensextraktion aus Wikipedia ging es darum, das Kategoriensystem in Wikipedia als Netzwerk zu erkennen, dessen Kanten semantische Nähe ausdrücken und dessen Knoten – Wikipedia-Artikel und -Ka-

tegorien – den »Synsets« aus WordNet entsprechen. Hat man diese Strukturgleichheit erst einmal gefunden, ist es relativ leicht, sie zu nutzen – in diesem Fall Wikipedia in ein semantisches Netzwerk umzuformen und darauf weitere Strukturen aufzubauen.

In beiden Beispielen war es entscheidend, Analogien zwischen auf den ersten Blick nicht zusammenhängenden Gebieten zu erkennen. In einem interdisziplinären Gebiet wie der Computerlinguistik gilt dies auch eine Abstraktionsstufe höher: Es kommt darauf an, Analogien zwischen Analogien zu sehen. »Good mathematicians see analogies between theorems or theories. The very best ones see analogies between analogies«, so der bedeutende Mathematiker Stanislaw Ulam (1909–1984) in seinem Werk »Analogies between analogies«.

Die wissenschaftliche Umgebung bei HITS stellt in dieser Beziehung eine einmalige Chance dar, da die Interdisziplinarität zu den Voraussetzungen seiner Existenz zählt. Vielleicht werde ich eines Tages sogar Methoden aus der Biomechanik oder der theoretischen Astrophysik auf computerlinguistische Probleme anwenden! ∞

DER AUTOR



Michael Strube, Jahrgang 1965, wurde 1996 an der Universität Freiburg mit einer Dissertation in Computerlinguistik promoviert. Nach einer Postdoc-Zeit an der

University of Pennsylvania in Philadelphia kam er 2000 als wissenschaftlicher Mitarbeiter zur EML Research GmbH in Heidelberg. Ein Jahr später wurde er Leiter der Natural Language Processing Group des Instituts, das mittlerweile Heidelberger Institut für Theoretische Studien heißt. Er ist Honorarprofessor an der Universität Heidelberg im Fach Computerlinguistik.

QUELLEN

Cai, J., Strube, M.: End-to-End Coreference Resolution via Hypergraph Partitioning. In: Proceedings of the 23rd International Conference on Computational Linguistics, Peking, 23.–27. August 2010, S. 143–151. Download über www.aclweb.org/anthology/C10/

Ponzetto, S. P., Strube, M.: Taxonomy Induction Based on a Collaboratively Built Knowledge Repository. In: Artificial Intelligence 175, S. 1737–1756, 2011

Virtuelle Forschungsumgebungen für morgen

Um Wissenschaftlern die Infrastruktur bieten zu können, die sie für ihre Arbeit in der Zukunft brauchen, müssen Hochschulen und außeruniversitäre Institutionen ihre Kräfte bündeln und neue Wege beschreiten.

Von Uwe Schwiegelshohn

Nur dort, wo der Boden und das Angebot an Wasser und Licht ihren Bedürfnissen genügen, werden Pflanzen gedeihen und Frucht tragen. Genauso verhält es sich auch mit der Wissenschaft: Ein Forscher benötigt eine seinem Thema angemessene Umgebung, um herausragende Ergebnisse zu erzielen. Das war schon in der Antike so, wobei sich die erforderliche Infrastruktur im Lauf der Jahrhunderte freilich beträchtlich erweitert hat. Doch auch wenn wir heute von »virtuellen Forschungsumgebungen« sprechen, sind die Grundbedürfnisse doch erstaunlich gleich geblieben. Gelehrte brauchen vor allen Dingen eines: die Möglichkeit, sich mit anderen Experten ihres Fachs auszutauschen.

Weil diese beiden Grundpfeiler jeder Forschung Ende des 4. Jahrhunderts v. Chr. am Museion Alexandrias gegeben waren, wurde es zur zentralen Stätte antiker Gelehrsamkeit. Nirgends sonst beherbergte eine Bibliothek eine solche Vielzahl an Schriften – hunderttausende sollen es gewesen sein. Nicht anders als heute ermöglichten diese frühen Publikationen eine indirekte Kommunikation zwischen Forschern über Generationen hinweg.

Auf Grund seiner Bedeutung wurde das Museion oft von den Großen der Zeit geleitet, etwa von Eratosthenes, der den Erdumfang und die Schiefe der Ekliptik vermaß, oder von dem frühen Sprachwissenschaftler Aristophanes. Selbst längere Reisen und die damit verbundenen Gefahren schreckten Wissen Suchende nicht ab. Seine einzigartige Ausstattung verdankte das Museion dem Engagement des ptolemäischen Herrscherhauses. Obwohl die Wirtschaftsmacht ihres Landes noch nicht davon abhing, wissenschaftliche Erkenntnisse in technische Innovationen umzumünzen, legten diese Könige großen Wert darauf, den »Forschungsstandort« Alexandria

attraktiv zu machen und so in der Antike den Wettbewerb um die klügsten Köpfe zu gewinnen.

Während es damals nur wenige solcher Stätten der Gelehrsamkeit gab, änderte sich die Situation im Spätmittelalter deutlich. Mit dem Untergang des Römischen Reichs im 5. Jahrhundert war eine Phase weit gehender wissenschaftlicher Stagnation angebrochen. Nun aber wurden die antiken naturphilosophischen Erkenntnisse wiederentdeckt, und die Mächtigen ihrer Zeit gründeten Universitäten als neue Form, Studium und Forschung eine Heimat zu geben. Das Modell erwies sich als erfolgreich. Um 1230 gab es bereits etwa 20 solcher Einrichtungen in Europa, 1789 waren es schon 142. Im deutschen Sprachraum vollzog sich diese Entwicklung etwas langsamer. Bis 1400 gab es erst drei Universitäten, bis 1500 wuchs ihre Zahl aber auf zehn. Heute sind es in Deutschland allein ungefähr 100. Hinzu kommen noch andere Arten von Hochschulen und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen.

Niedergang der Bibliotheken

Auch in den mittelalterlichen Universitäten spielten die Bibliotheken eine tragende Rolle, und daran hat sich bis in die Gegenwart nichts geändert. Nach wie vor ist die Publikation das primäre Mittel, Forschungsergebnisse in der Fachwelt zu verbreiten. Seit der Erfindung des Buchdrucks durch Johannes Gutenberg Mitte des 15. Jahrhunderts lassen sie sich leicht vielfältigen – und dank des Aufkommens der Zeitungen und schließlich des Wissenschaftsjournalismus auch einer breiten Öffentlichkeit vermitteln.

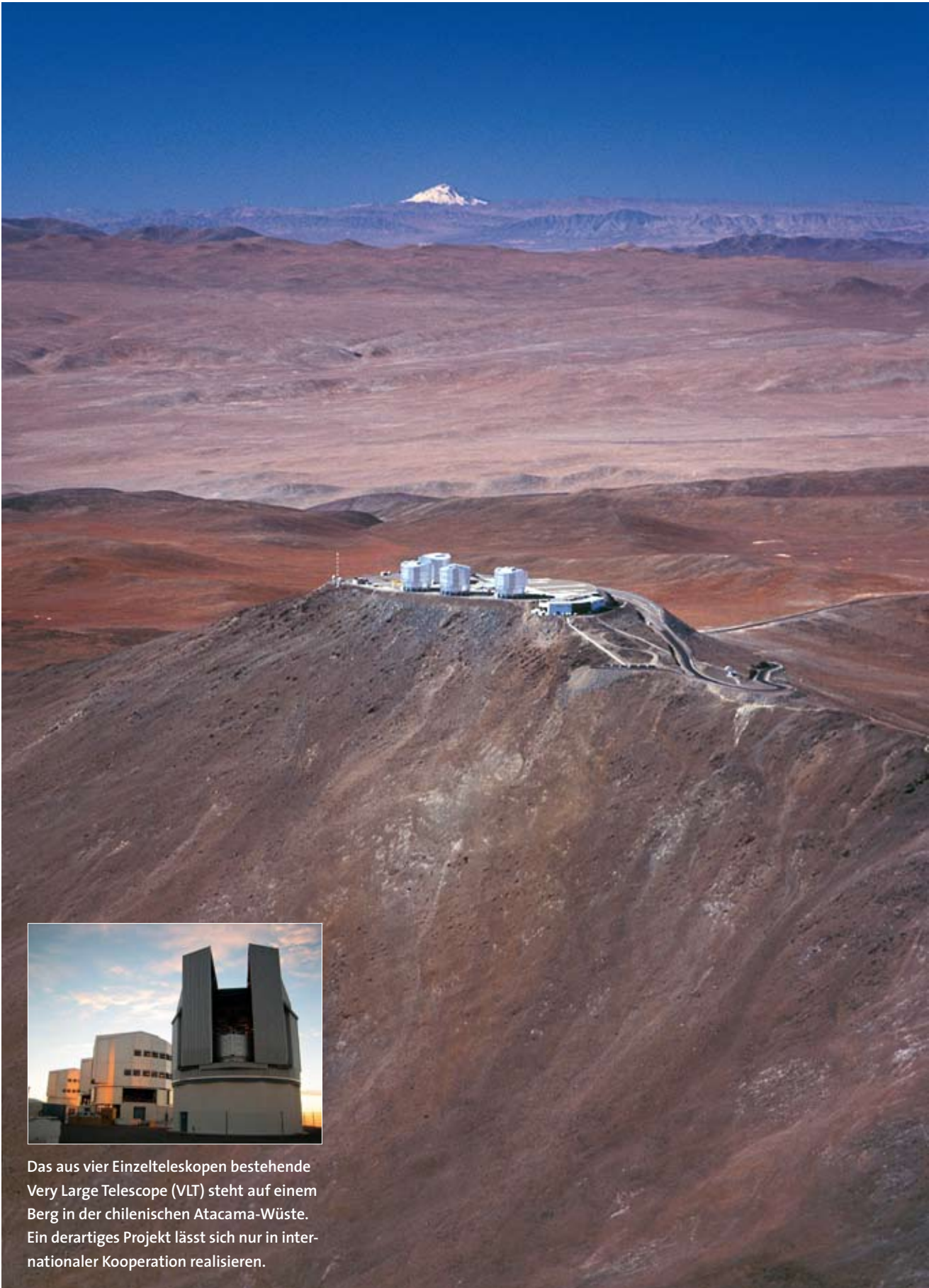
Dennoch gab es seit den Zeiten Galileo Galileis (1564–1642) eine strukturelle Veränderung: Schriften – und damit die Bibliotheken – verloren mit der Einführung von

Experiment und Beobachtung ihre Alleinstellung im Erkenntnisprozess. Dieser Trend setzt sich bis in die Gegenwart fort, in der neben den Bibliotheken als weitere Querschnittsfunktion die Rechenzentren zur Verarbeitung von Forschungsdaten aufkamen. Inzwischen wendet eine typische technische Universität durchschnittlich weniger als zwei Prozent ihres jährlichen Etats für die Ausstattung ihrer Bibliothek auf, hingegen über fünf Prozent für Laborräume und technische Einrichtungen. Dies war und ist die Konsequenz einer veränderten Forschungslandschaft, in der sich die Natur- von den reinen Geisteswissenschaften lösten und größeren Raum einnahmen.

Da Experimente disziplinspezifisch sind, erfordern sie unterschiedliche Forschungsumgebungen. Angesichts einer wachsenden Zahl von Teildisziplinen wird es für eine Universität immer aufwändiger, das ganze Spektrum der Wissenschaften abzubilden, auch wenn sich Forschungsumgebungen bei vergleichbaren Fragestellungen durchaus ähneln.

Mitunter benötigen wissenschaftliche Instrumente spezifische Einsatzorte. Dazu gehören astronomische Teleskope, die einen dunstfreien Himmel erfordern (siehe Foto rechts), oder die polaren Beobachtungsstationen und Forschungsschiffe der Klimaforscher. Die effiziente Nutzung dieser weit entfernten Beobachtungsstandorte verlangt, große Datenvolumina von dort schnell zu den jeweiligen Wissenschaftlern an ihren Heimatuniversitäten zu übermitteln.

Während Gelehrte noch Anfang des 20. Jahrhunderts in Briefwechseln Informationen austauschten und Theorien diskutierten, wollen Forscher heute mit anderen ohne Verzögerung und unabhängig vom Aufenthaltsort in Verbindung treten können. Das leisten die modernen, globalen Kommunikationssysteme, darunter vor allem das Internet. Hierfür



KLEINES FOTO: ESO, GROSSES FOTO: ESO, GERHARD HILDEPICH



Das aus vier Einzelteleskopen bestehende Very Large Telescope (VLT) steht auf einem Berg in der chilenischen Atacama-Wüste. Ein derartiges Projekt lässt sich nur in internationaler Kooperation realisieren.

die technische Infrastruktur bereitzustellen, ist ebenfalls eine Kernkompetenz der Rechenzentren. Sie versetzen nicht nur Wissenschaftler – vorwiegend Naturwissenschaftler – aus unterschiedlichen Einrichtungen und Ländern in die Lage, gemeinsam zu forschen und zu veröffentlichen, sie unterstützen auch den zunehmend interdisziplinären Charakter der Wissenschaft. Fragt man beispielsweise, welche Auswirkungen die globale Erwärmung und die mit ihr einhergehenden Veränderungen von Lebensräumen auf die Verbreitung von Krankheiten haben werden, sind Spezialisten verschiedener Fachrichtungen gefragt.

Von modernen Forschungsumgebungen wird erwartet, dass sie eine solche Vernetzung unterstützen. Das Vorhandensein der genannten Kommunikationssysteme allein genügt dafür nicht mehr. Ebenso wichtig wird die Kompatibilität zwischen früher isoliert funktionierenden Laboren. Das erfordert die Einrichtung und Pflege möglichst standardisierter Schnittstellen, was ebenfalls in die Kompetenz der Rechenzentren fällt und ihre Bedeutung noch steigert.

Die wachsende Anzahl der Universitäten und die immer aufwändigere technische Ausstattung lässt freilich die Kosten steigen. So entstand der Begriff der Forschungsinfrastruktur, die neben der Qualität der darin erhaltenen Forschungsumgebungen auch organisatorische Aspekte wie die Kosteneffizienz berücksichtigt. Eines der ersten Beispiele da-



Das Studium von Schriften bildete im Mittelalter die Basis aller Gelehrsamkeit (oben: ein Hörsaal der Pariser Sorbonne im 15. Jahrhundert). Mit dem Aufkommen des Experiments im 16. Jahrhundert verloren Bibliotheken an Bedeutung. Manche Forschungsfragen

für waren die in den 1970er Jahren entstandenen deutschen Bibliotheksverbände. Zunächst wurden Zentralkataloge geschaffen, in denen ein Titel nur einmal aufgeführt ist, was die Katalogpflege vereinfacht. Später kam die Onlinefernleihe hinzu, die einzelne Büchereien entlastete, weil nun keine mehr ein komplettes Literaturangebot vorhalten musste. Dank der modernen Kommunikationstech-

nik verlängert sich die Wartezeit nur geringfügig.

Eine weitere Neuentwicklung ist die virtuelle Forschungsumgebung, die annähernd die gleiche Funktionalität wie eine ideal ausgestattete lokale aufweist, obwohl nicht mehr alle Komponenten am Standort existieren. Voraussetzung ist eine gesteuerte Kooperation zwischen den Trägern der lokalen Umgebungen und die Vernetzung der einzelnen Forscher untereinander. Somit ist die typische Forschungsumgebung von heute immer eine virtuelle, da sie unterschiedliche Standorte verbindet.

Das betrifft insbesondere wissenschaftliche Experimente, die aus Kostengründen nur an wenigen oder gar nur an einem Ort durchgeführt werden können. Man denke etwa an die Projekte aus dem Bereich der Teilchenphysik am Large Hadron Collider (LHC) am CERN (Europäische Organisation für Kernforschung) in der Nähe von Genf. Solche Organisationen wurden gegründet, um Großexperimente durchzuführen. Sie sind in der Regel durch öffentliche Mittel finanziert und bilden eine wesentliche Säule von Forschungsinfrastrukturen. Umfangreiche und den angeschlossenen Wissenschaftlern zugänglich zu machende Datenvolumina entstehen aber auch durch die Digitalisierung von Literatur und Kultur oder im Zuge einer Vielzahl klei-



Im 3. Jahrhundert v. Chr. avancierte die Universität Alexandrias zu einem Zentrum des Wissens. Von christlichen Fanatikern zerstört, wurde sie im 4. Jahrhundert n. Chr. andersorts neu gebaut. Polnische Archäologen glauben, einige der Hörsäle entdeckt zu haben.



erfordern die Konzentration von Experimentiereinrichtungen an einem Ort (im Bild oben der LHC am CERN). Von dort müssen die Ergebnisse über Kommunikationsnetzwerke zu den über die ganze Welt verteilten Wissenschaftlern weitergeleitet werden.

nerer Studien mit aufwändigen Bilddaten wie in der Medizin. Diese Informationen werden in der Regel in großen Archiven gesammelt und wiederum anderen Forschern zur Verfügung gestellt.

Sowohl aus dem Interesse der Beteiligten als auch aus Effizienzgründen sollten all diese Daten möglichst vielen Gruppen zugänglich sein. Damit entsteht ein Bedarf an virtuellen Forschungsumgebungen, die institutionsübergreifend aufgebaut sind. Im Gegensatz zum erwähnten Bibliotheksverbund oder zum Rechenzentrum wären diese zwar disziplinspezifisch, durch Synergieeffekte würden aber die Kosten reduziert.

Rechnen in der Wolke

Virtuelle Forschungsumgebungen sollen vor allem notwendige Dienste für die beteiligten Wissenschaftler anbieten, angefangen von der Verbindung zu anderen Forschern, wissenschaftlichen Geräten oder Datenspeichern an weit entfernten Orten bis hin zur Bereitstellung und Pflege benötigter Software für die Auswertung von Messergebnissen. Es wäre ineffizient, wenn solche Software von jedem Wissenschaftler selbst erstellt werden müsste, wie dies in der Vergangenheit oft der Fall war. Nachdem aber jetzt die Institutionsgrenzen einmal aufgebrochen sind, bietet es sich an, sie auch hier zu überschreiten. Bei

den LHC-Experimenten ist das durch das so genannte Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) – ein aus miteinander kommunizierenden Rechnern auf der ganzen Welt bestehendes Netzwerk – bereits in Ansätzen geschehen.

Das erfordert eine dienstleistungsorientierte Softwaretechnologie. Ein Beispiel dafür ist das so genannte Cloud Computing. Eine solche »Rechnerwolke« besteht aus einem Netzwerk von Computern, aus dem ein Anbieter die nachgefragten Ressourcen dynamisch zuweist. Letzterer weiß also nicht mehr, wo konkret jene Maschinen stehen, die seine Daten oder eine bestimmte Software vorhalten – all das bleibt ihm wie hinter einer Wolke verborgen.

Hier bietet sich eine weitere Chance für die Hochschulen, Kosten zu sparen und gleichzeitig ein Mehr an Infrastruktur zu bieten. Gegenwärtig versorgen ihre Rechenzentren noch die vor Ort arbeitenden Forscher. Angesichts der Fragmentierung der Hochschullandschaft in viele Disziplinen mit jeweils nur einer kleinen Zahl von Wissenschaftlern pro Universität lässt sich auf diese Weise kaum die nötige hohe Auslastung erreichen. Vernünftiger wären Rechenzentrumsverbände analog den Bibliotheksverbänden; erste Schritte in diese Richtung wurden sowohl innerhalb von Bundesländern als auch

über Bundesländergrenzen hinweg schon unternommen.

Im Extremfall könnte ein Rechenzentrum die gesamte Infrastruktur stellen – beziehungsweise als eigenständiges Unternehmen ausgegliedert werden; man spricht von Infrastructure-as-a-Service. Dieser Ansatz ist vor allem in solchen Fächern sinnvoll, die die verfügbare Technologie möglichst optimal ausnutzen wollen. Geht es dagegen nur um die Ausführung von bestimmten Programmen, etwa zur statistischen Auswertung, ist das Konzept Software-as-a-Service interessanter. Ein Forscher könnte dann eine speziell für seine Aufgabenstellung entwickelte Software verwenden, ohne sich um deren Implementierung kümmern oder selbst über die notwendige Hardware verfügen zu müssen.

Das würde auch die lokalen Rechenzentren entlasten, da sie in Zukunft kaum in der Lage sein werden, die Vielzahl unterschiedlicher Anwendungssoftware für die jeweils wenigen Nutzer bereitzustellen und zu pflegen. Zudem sinkt das Risiko, dass ein in einem Projekt entwickeltes Verfahren vergessen und in einem anderen neu entwickelt wird.

Die entstehende Forschungsinfrastruktur besitzt dann zwei Komponenten, deren Zusammenspiel noch nicht geklärt ist: Auf der einen Seite übernimmt die Universität disziplinübergreifend die Strukturierung der Forschungsumgebung vor Ort, auf der anderen arbeitet der Träger einer virtuellen disziplinspezifischen Forschungsumgebung über die Grenzen der Institutionen hinweg. Offen sind bis jetzt die Mechanismen der Zusammenarbeit und die Finanzierung solcher Infrastrukturen. Um den Forschungsstandort Deutschland auch für die Zukunft gut zu positionieren, sollten diese Fragen so schnell wie möglich gelöst werden. ☺

DER AUTOR



Uwe Schwiegelshohn

leitet das Institut für Roboterforschung der Technischen Universität Dortmund, wo er sich vor allem auf die Gebiete Grid Computing und autonome mobile Roboter

konzentriert. Er ist zudem Prorektor für den Geschäftsbereich Finanzen der Hochschule. In diesem Rahmen befasst er sich auch mit fakultätsübergreifenden Fragen der Strukturentwicklung.

Wissenschaft braucht Vernetzung

Forscher können der rapide anwachsenden Datenmengen nur Herr werden und sie zum rascheren Erkenntnisgewinn nutzen, wenn sie ihre Rolle als Mitglieder eines großen Netzwerks verstehen und akzeptieren. Dies erfordert neue Formen des Umgangs mit urheberrechtlichen Fragen und neue Modalitäten der Zusammenarbeit.

Von John Wilbanks

Die Gewinnung neuer Erkenntnisse durch die Analyse großer Datensammlungen wird oft als »viertes Paradigma« wissenschaftlichen Arbeitens bezeichnet. Unabhängig davon, ob man dem zustimmt, ist es sinnvoll, die ursprüngliche Bedeutung des Begriffs Paradigmenwechsel in Thomas Kuhns »Structure of Scientific Revolutions« noch einmal zu reflektieren.

Kuhns Modell beschreibt eine Welt der Wissenschaft, in der ein System von Ideen die Vorherrschaft erringt, sich etabliert und so eine Sicht der Welt hervorbringt (das »Paradigma«), die für sich selbst Macht und Einfluss gewinnt. Dieses System von Ideen bezieht seine Geltung daraus, dass es eine plausible Erklärung für beobachtbare Phänomene liefert. Auf diese Weise haben wir zum Beispiel den Äther als Träger des Lichts bekommen sowie die Miasmen-Theorie für Infektionskrankheiten und die Vorstellung, dass die Sonne um die Erde kreist. Das System von Ideen, die Sicht der Welt, das Paradigma verfestigt sich durch schrittweise Erweiterung. Jeder einzelne Wissenschaftler arbeitet in der Regel so, dass er das Paradigma Stück für Stück ergänzt. Wem es gelingt, ein großes Stück hinzuzufügen, der erlangt Autorität, Forschungsaufträge, Preise und Auszeichnungen – und Direktorenposten.

Alle Beteiligten profitieren von ihren Investitionen in ein System von Ideen, das über die Ideen selbst hinausreicht. Firmen und Regierungen (und die Leute, die für sie arbeiten) gründen Geschäftspläne und politische Vorgaben auf eine solche Sicht der Welt. Das führt zum Aufbau eines Schutzwalls – einer Art Immunsystem –, der das Weltbild gegen Angriffe abschirmt. Zweifler werden ins Ab-



WIKIPEDIA
Die freie Enzyklopädie

Das Onlinelexikon Wikipedia ist das bekannteste Beispiel einer für alle frei zugänglichen Website, welche die Gemeinschaft der Internetnutzer weltweit unentgeltlich aufgebaut hat, stetig erweitert, pflegt und aktualisiert.

seits gedrängt. Neue Ideen fallen nicht auf fruchtbaren Boden, bekommen kein Geld und kein Personal. Furcht, Unsicherheit und Skepsis bestimmen die Reaktion auf originelle Vorstellungen, Methoden, Modelle und Ansätze, die dem herrschenden Paradigma zuwiderlaufen.

Doch Weltanschauungen gehen unter und Paradigmen stürzen, wenn sie die Beobachtungen nicht mehr erklären können oder wenn ein Experiment zweifelsfrei nachweist, dass sie falsch sind. Der Äther hat sich nach Hunderten von Jahren stetiger Verfeinerung als Schimäre erwiesen, und so erging es dem Miasma und dem Geozentrismus. Die Zeit für einen Wechsel ist dann gekommen, wenn

die alten Erklärungsmuster den neuen Realitäten nicht mehr gewachsen sind.

Dies scheint mir die Idee hinter Jim Grays Begründung eines vierten Paradigmas und dem Bild von der »Datenflut« zu sein: dass unsere Fähigkeit, Daten zu messen, zu speichern, zu analysieren und zu visualisieren, die neue Realität ist, der sich die Wissenschaft stellen muss. Daten sind der Kern dieses neuen Paradigmas, und es steht auf einer Stufe mit dem, was wir für den wissenschaftlichen Methodenvorrat halten: der experimentellen Beobachtung, der Theoriebildung und der Simulation.

Müssen wir die ersten drei Paradigmen also begraben? Keineswegs, vielmehr will ich sie feiern. Mit der experimentellen Beobachtung und Theoriebildung sind wir weit gekommen – von einem Weltbild, in dem die Sonne um die Erde kreist, bis zur Quantenphysik. Simulation ist das Herzstück vieler aktueller Forschungsaktivitäten, von der Rekonstruktion des antiken Rom bis hin zur Wettervorhersage. Die Genauigkeit von Simulationen und Prognosen steht im Zentrum heißer politischer Debatten um die Wirtschaftsentwicklung und den Klimawandel. Und natürlich gilt, dass Beobachtung und Theorie unabdingbar sind für gute Simulationen. Ich kann auf meinem Bildschirm sehr schön etwas simulieren, in dem die Gravitation nicht vorkommt, aber wenn ich mit meinem Auto über einen Klippenrand fahre, wird mich die Schwerkraft gnadenlos wieder einholen.

So gesehen handelt es sich also nicht um einen Paradigmenwechsel im kuhnschen Sinne. Daten werden nicht die gute alte Realität beiseiteschieben. Stattdessen stellen sie eine Reihe von Anforderungen an die Methoden und Konventionen, mit denen wir über Beob-

achtungen und Theorien kommunizieren, aber auch an die Robustheit und Komplexität unserer Simulationen und schließlich an die Art, wie wir unser Wissen darlegen, weitergeben und integrieren.

Was sich ändern muss, ist das Paradigma von uns selbst als Wissenschaftlern, nicht die alten Paradigmen des Erkenntnisgewinns. Als wir anfangen zu begreifen, dass alles Stoffliche aus Atomen besteht, dass wir das Produkt unserer Gene sind und dass die Erde um die Sonne kreist – da vollzogen sich Paradigmenwechsel im kuhnschen Sinne. Was wir hier diskutieren, geht quer durch all diese Umbrüche.

Datengetriebene Forschung, richtig verstanden, wird mehr Paradigmenwechsel bei wissenschaftlichen Theorien in kürzerer Zeit hervorbringen, weil wir unser jeweiliges Weltbild sofort mit der »objektiven Realität« vergleichen können, die sich so effektiv messen lässt.

Netzwerke beschreiben den Umbruch durch die Datenflut vielleicht besser als die kuhnsche Dynamik. Ihre Skalierbarkeit

kommt der Beherrschung von Unmassen an Daten entgegen – Netzwerke können gewaltige Mengen von Informationen in etwas Nützliches verwandeln, so dass die Überfülle an Informationen nicht länger ein »Problem« ist, das »gelöst« werden muss. Und beim Umgang mit der Datenflut können wir vom Entwurf der Netzwerke lernen: Wenn wir ihrer Herr werden wollen, müssen wir eine offene Stra-

Der Apache-Webserver, der populärste Webserver im Internet, ist ein Paradebeispiel für Open-Source-Software, die Enthusiasten weltweit unentgeltlich programmieren und der Allgemeinheit zur Verfügung stellen.

The screenshot shows the Apache Webmin interface. At the top, the browser window title is "Webmin 1.180 on wasabi (Debian GNU/Linux 3.1) - Mozilla". The address bar contains "https://localhost:10000/apache/". The main heading is "Apache-Webserver" with the version "Apache Version 1.3.33".

Globale Konfiguration

- Prozesse und Grenzwerte
- Netzwerk und Adressen
- Apache-Module
- MIME-Typen
- Verschiedenes
- CGI-Programme
- Per-Directory Einstellungsdateien
- Installierte Module neu konfigurieren
- Definierte Parameter bearbeiten
- Bearbeite Konfigurationsdateien

Virtuelle Server

Standard-Server

Definiert die Standard-Einstellungen für alle anderen virtuellen Server und beantwortet alle unbehandelten Anfragen.

Adresse Beliebig
Port Beliebig

Server-Name localhost
Dokument-Root /var/www

Einen neuen virtuellen Server anlegen

Behandle Verbindungen auf Adresse

- Die nicht von nicht von anderen Servern behandelt werden
- Jede Adresse
- Definierte Adresse .. [input field]
- Füge den Name einer virtuellen Serveradresse hinzu (wenn benötigt)
- Lausche auf Adresse (wenn benötigt)

Port

Standard Beliebig [input field]

Dokument-Root [input field] ...

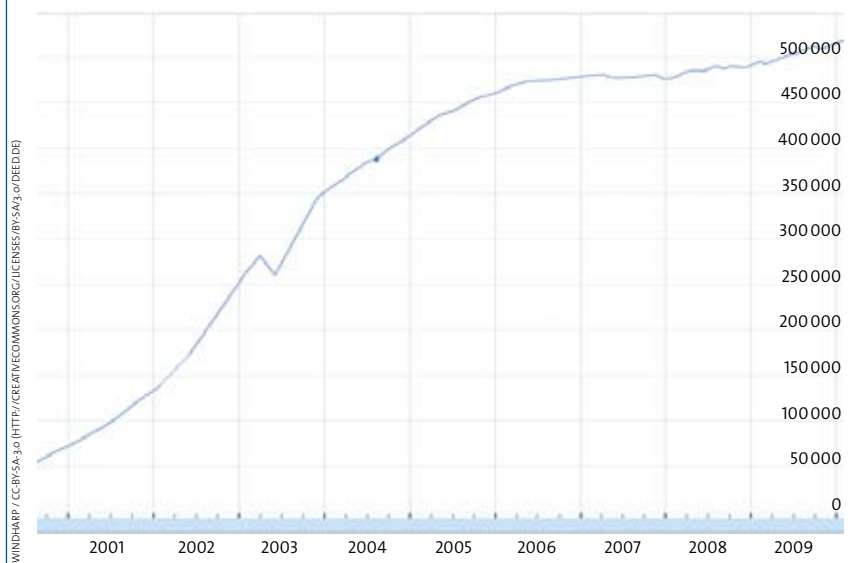
Server-Name

- Automatisch [input field]

Freie Inhalte im Internet

Das **Open Directory Project (ODP)** gilt als größtes von Menschen gepflegtes Webverzeichnis des World Wide Web. Seine Inhalte sind für jeden kostenlos zugänglich und werden von freiwilligen Redakteuren unentgeltlich bearbeitet und aktualisiert. Die Grafik zeigt die Entwicklung der Einträge im deutschsprachigen Zweig des ODP.

QUELLE: [HTTP://DE.WIKIPEDIA.ORG/W/INDEX.PHP?TITLE=DATEI:ODP_SITECOUNT_WORLD_DEUTSCH.PNG&FILETIMESTAMP=2010021081729](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ODP_Sitecount_World_Deutsch.png&filetimestamp=2010021081729)



ategie verfolgen, die auf den Erfahrungen mit Netzwerken beruht.

Damit meine ich die Rechner- und Kommunikationsnetzwerke, die lediglich auf einem Satz von Protokollen aufgebaut sind, Schicht für Schicht, von Endpunkt zu Endpunkt. Das Internet und das Web sind anhand von Dokumenten realisiert worden, die standardisierte Methoden dafür definieren, wie Daten übertragen und dargestellt werden,

und die zugleich ein Namensschema für Rechner und Dateien vorgeben. Da wir uns alle dieser Methoden bedienen und jeder sie nutzen kann, ohne um Erlaubnis zu fragen, entwickelt sich das Netzwerk ganz von selbst und wächst immer weiter.

So gesehen sind Daten nicht ein »viertes Paradigma«, sondern eine »vierte Netzwerkschicht« (auf dem Ethernet, TCP/IP und dem World Wide Web), die, von oben nach unten,

mit den anderen Schichten kompatibel ist und zusammenwirkt oder »interoperiert«, wie Computerwissenschaftler sagen. Ich glaube, diese Sichtweise wird dem Wesen wissenschaftlicher Methodik eher gerecht als das Konzept eines Paradigmenwechsels mit seinem destruktiven Ansatz. Daten sind das Ergebnis allmählicher Fortschritte bei den Mess- und Beobachtungsverfahren. Sie untermauern die Theorie, sie treiben und validieren die Simulation, und sie werden am besten in standardisierter wechselseitiger Kommunikation mit den genannten Schichten des Wissensnetzwerks ausgetauscht.

Vorzüge des Prinzips der Offenheit

Krass gesagt ist das Paradigma, das zerstört werden muss, die Idee, dass wir Wissenschaftler als unverbundene Individuen forschen. Wenn denn diese Metapher akzeptabel erscheint, hält sie für uns, die wir über den Entwurf eines Netzwerks für die wissenschaftliche Kommunikation nachdenken, zwei Lektionen bereit.

Die erste Lektion, frei nach David Isenberg, ist die, dass das Internet seine Durchschlagskraft einer ganz speziellen Eigenschaft verdankt: Es ist öffentlich. Das gilt gleich in mehrfacher Hinsicht. Die Definitionen der Standards, auf denen das Internet beruht, sind offen und frei zugänglich – frei zum Lesen, zum Herunterladen, zum Kopieren, zum Verwenden. Sie sind frei im urheberrechtlichen Sinn. Die Spezifikationen können von jedem herangezogen werden, der sie verbessern und

Eine Publikation von *Spektrum der Wissenschaft* und dem *Heidelberger Institut für Theoretische Studien*

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Claus Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Anja Albat-Nollau, Britta Feuerstein
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Heidelberger Institut für
Theoretische Studien



Geschäftsführer: Dr. Klaus Tschira, Prof. Dr. Andreas Reuter
Presse- und Öffentlichkeitsarbeit: Dr. Peter Saueressig
Anschrift: HITS gGmbH, Schloss-Wolfsbrunnengasse 35, 69118 Heidelberg, Tel.: 06221 533-245, Fax: 06221 533-198

www.h-its.org

Spektrum CUSTOM
DER WISSENSCHAFT PUBLISHING

Leitung: Dr. Joachim Schüring
Anschrift: Spektrum der Wissenschaft – Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-612, Fax: 06221 9126-5612

www.spektrum.com/cp

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2011 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 12/2011

erweitern möchte, aber ihr Wert beruht nicht auf Optimierungen durch Einzelne, sondern darauf, dass sehr viele Menschen sie benutzen. Wie Isenberg anmerkt, bringt dies eine Reihe von »Wundern« hervor: Das Netzwerk wächst ohne zentrale Kontrollinstanz, es lässt uns Dinge verbessern, ohne um Erlaubnis zu fragen, es erschließt und fördert neue Märkte (denken Sie an E-Mail, Instant Messaging, soziale Netze – oder Pornografie). Versuche, die offene Struktur des Internets zu verändern, würden es in seiner Existenz gefährden. Das muss denjenigen unter uns, die in einer Welt der wirtschaftlichen Rivalitäten und der klassischen ökonomischen Theorien aufgewachsen sind, unbegreiflich erscheinen. Von ihrer Warte aus ist es widersinnig, dass Wikipedia existiert und noch dazu der Encyclopedia Britannica den Rang streitig macht.

Aber, mit Galilei gesprochen: »Sie bewegt sich doch.« Wikipedia existiert, und das Netz – eine einvernehmliche Halluzination, die auf einer Sammlung technischer Standards beruht – transportiert Skype-Video-Anrufe zwischen mir und meiner Familie in Brasilien – und zwar umsonst. Es ist eine Innovationsmaschine wie keine je zuvor. Das Netz lehrt uns, dass neue Netzwerkschichten für den Umgang mit Daten die Idee der Offenheit beherzigen sollten – der Nutzung von Standards, die uns allen erlauben, frei zusammenzuarbeiten und die Segnungen des Netzes, die wir von der riesigen Dokumentensammlung des World Wide Web kennen, für die gigantischen Datensammlungen nutzbar zu machen, die wir so leicht zusammentragen können.

Die zweite Lektion kommt aus einer anderen offenen Welt, derjenigen der Open-Source-Software. Die Erstellung von Software nach dem Modell verteilter kleiner Einzelbeiträge, zusammengeführt durch technische und rechtliche Standardisierung, war auch so eine theoretische Unmöglichkeit, die durch die Realität des Internets einen wahrhaft kuhnischen Paradigmenwechsel erfuhr. Die Möglichkeit der jederzeitigen Kommunikation, verbunden mit günstigem Zugang zu Programmierwerkzeugen, und die weitsichtige Anwendung öffentlicher Urheberrechtslizenzen hatten einen seltsamen Effekt: Sie brachten Software hervor, die funktionierte und mit der Zeit immer umfangreicher und leistungsfähiger wurde. Die wichtige Erkenntnis ist, dass wir Millionen von Gehirnen anzapfen können, wenn wir standardisieren,

und die so entstehenden Produkte in vielen Fällen besser sind als die in traditionellen, zentralisierten Umgebungen erzeugten. (Ein gutes Beispiel ist der Apache-Webserver, der seit 1996 der populärste Webserver im Internet ist.)

Creative Commons hat diese Lektionen auf die Lizenzierung angewendet und einen Satz von Standardlizenzen für digitale Medienprodukte entwickelt. Diese haben sich

explosionsartig verbreitet und schützen mittlerweile mehrere hundert Millionen digitaler Objekte im Netz. Es zeigt sich, dass offene Lizenzen bemerkenswerte Vorteile haben: Sie ermöglichen (bei vernachlässigbaren Transaktionskosten) für digitale Objekte wie Musik oder Fotografien – und für wissenschaftliche Information – denselben Grad gemeinschaftlicher Nutzbarkeit, den wir von technischen Netzwerken kennen.

Urheberrechtsschutz für online publizierte Werke

Creative Commons bietet die Möglichkeit, geistiges Eigentum im Internet unter verschiedenen strikten Lizenzbedingungen zu veröffentlichen.



In diesem Lokal in Spanien ist nur Musik mit Creative-Commons-Lizenz aus dem Internet zu hören.





*Ich dachte,
ich spüre einen Paradigmenwechsel,
aber mir war nur die Unterhose hochgerutscht.*

Scheinbar fehlende Anreize sind bei alledem der Punkt, der klassischen ökonomischen Theorien zuwiderläuft. Das ist ein anderes Beispiel für einen wahrhaft kühnschen Paradigmenwechsel – die alte Theorie konnte keine Welt beschreiben, in der Menschen umsonst arbeiten, doch die neue Realität zeigt, dass genau dies passiert.

Forscher als Knoten im Netzwerk

Es gibt im Netz durchaus Widerstand gegen eine datenintensive Schicht. Doch der beruht längst nicht im gleichen Maß auf Urheberrechtsbedenken, wie das bei Software der Fall war (gleichwohl ist das Beharrungsvermögen des Urheberrechts groß, wenn es um die Anpassung der Fachgutachter-Kultur bei wissenschaftlichen Veröffentlichungen geht, was die »Webrevolution« in der wissenschaftlichen Literatur de facto verhindert). Zwar existieren im Zusammenhang mit Daten Urheberrechtsprobleme, aber Widerstand kommt noch von vielen anderen Seiten: Es ist schwierig, Daten mit Anmerkungen zu versehen und sie dann erneut zu benutzen, es ist schwierig, große Datenmengen zu übermitteln, es ist schwierig, Daten miteinander zu kombinieren, die nicht von vornherein dafür ausgelegt wurden, und so weiter. Dadurch haben Daten für alle außer denen, die sie erzeugen, eine sehr kurze Halbwertszeit. Dieser Widerstand hat seinen Ursprung im Paradigma von uns selbst als individuellen Wissenschaftlern, nicht in den Paradigmen der experimentellen Beobachtung, der Theoriebildung oder der Simulation.

Um ihn zu überwinden, müssen wir in Annotation und Qualitätssicherung investieren, in Hardware zur Speicherung und Wiedergabe von Daten sowie in die Grundlagen zu ihrer gemeinsamen Visualisierung und Analyse. Wir brauchen offene Standards, die es erlauben, Daten allen zugänglich zu machen und im Verbund zu nutzen. Wir brauchen eine verbindliche Definition für die Datenschicht. Und vor allem müssen wir Wissenschaftler aus allen Gebieten darin unterweisen, auf dieser neuen Datenschicht zu arbeiten. Solange unsere Ausbildungskultur von den Prinzipien der gildenartigen Mikrospezialisierung geprägt ist, wird der Wissenschaftsbetrieb der Datenschicht weiter erheblichen Widerstand entgegengesetzt.

Wir sollten uns selbst als vernetzte Knoten sehen, die Daten weitergeben, Theorien testen und die Simulationen anderer Wissenschaftler benutzen. Angesichts der Tatsache, dass jede Kurve zur Beschreibung der Kapazitäten für das Sammeln von Daten exponentiell ansteigt, müssen wir unsere eigenen Kapazitäten zur Nutzung dieser Daten entsprechend steigern – und das schnellstmöglich. Wir müssen uns und unser Wissen vernetzen. Nichts, was die Menschen bislang hervorgebracht haben, wächst so schnell wie offene Netze.

Wie alle Vergleiche hat natürlich auch die Netzmetapher ihre Grenzen. Wissen ist schwieriger zu vernetzen als Dokumente. Ein kooperativer Arbeitsstil kann sich bei der Softwareentwicklung leichter von selbst heraus-

bilden, weil die Werkzeuge billig und überall zugänglich sind – das trifft auf die Teilchenphysik oder Molekularbiologie nicht zu. Einige der großartigen Dinge im Web eignen sich nicht so gut für Wissenschaft und Forschung, weil das Prinzip der auf Konsens basierenden Einschätzungen nur die langweiligen Dinge zu Tage fördert, denen jeder zustimmt, aber nicht das Abgelegene, das oft viel interessanter ist.

Dennoch gibt es herzlich wenige Alternativen zum Netzwerkansatz. Die Datenflut ist da, und sie ebbt nicht ab. Wir können mehr und schneller messen als jemals zuvor. Und wir können Messungen in enormer Zahl gleichzeitig nebeneinander durchführen. Unsere Gehirnkapazität bleibt dagegen für alle Zeit auf ein Gehirn pro Person beschränkt. Wir müssen also zusammenarbeiten, wenn wir Schritt halten wollen, und Netzwerke sind die besten Kooperationswerkzeuge, die unsere Kultur hervorgebracht hat. Das aber bedeutet, dass wir unseren Umgang mit Daten genauso offen gestalten müssen wie die Protokolle, die Rechner und Dokumente miteinander verbinden. Es ist der einzige Weg, auf dem wir die erforderliche Leistungsstufe erreichen können. ∞

DER AUTOR



SCIENCE COMMONS / CC-BY-3.0

John Wilbanks ist Executive Director of Science Commons bei der Organisation Creative Commons. Er hat die Bioinformatikfirma Intellico gegründet, die semantische

Graphennetzwerke für die pharmazeutische Forschung entwickelt, und gehört dem Beirat der U.S. National Library of Medicine's PubMed Central an.

QUELLEN

Bell, G. et al.: Beyond the Data Deluge. In: Science 323, S. 1297–1298, 2009, doi: 10.1126/science.1170411

Kuhn, T.S.: The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press, Chicago 1996

Science Commons Protocol on Open Access Data: <http://sciencecommons.org/projects/publishing/open-access-data-protocol>

Gekürzte Übersetzung des Kapitels »I Have Seen the Paradigm Shift, and It Is Us« aus »The Fourth Paradigm – Data-Intensive Scientific Discovery«. Herausgegeben von Tony Hey, Stuart Tensley und Kristin Tolle. Microsoft 2009



Das **Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS)** ist das Forschungsinstitut der gemeinnützigen Klaus Tschira Stiftung. Der methodische Schwerpunkt liegt auf der Theorie- und Modellbildung. Dabei spielen rechnergestützte Simulationen und Datenerschließung eine zentrale Rolle. Derzeit arbeiten rund achtzig Forscher aus fünfzehn Ländern in den sechs Arbeitsgruppen, darunter zahlreiche Doktoranden und junge Gastwissenschaftler.



Heidelberger Institut für
Theoretische Studien



Think Beyond
the Limits!

Heidelberger Institut für
Theoretische Studien

