

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

 **ENERGIEVERSORGUNG**
CYBERANGRIFF
AUF STROMNETZE
**Wie sicher ist unsere
Infrastruktur?**

OKTOBER 2011

STRINGTHEORIE
**Exotische Zahlen
erklären Welträtsel**

KLIMA
**Lehren aus der letzten
Erderwärmung**

EVOLUTION
**Das erste
Mal Sex**

Netzwerk Gehirn

Die Komplexitätstheorie hilft
unserem Geist auf die Spur zu kommen



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





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Hirn mit Berechnung

Neulich saß ich mit dem Rektor einer großen deutschen Universität beisammen. Seit vielen Jahren ist er Abonnent von »Spektrum der Wissenschaft«; auch hat er bereits für unser Magazin geschrieben. Im Lauf des Gesprächs stellte er mir die Frage, warum wir überdurchschnittlich oft astrophysikalische und neurowissenschaftliche Artikel im Angebot hätten. Ich entgegnete, dass Themen wie Schwarze Löcher, Paralleluniversen oder eben Hirnforschung ihm vermutlich vor allem deshalb ins Auge springen, weil wir sie besonders häufig zu Titelthemen erheben. Der Grund dafür ist natürlich, dass entsprechend aufgemachte Hefte erfolgreicher am Kiosk sind. Haben wir also zu häufig Astro- und Neurothemen im Heft – oder präsentieren wir sie nur sehr oft prominent auf dem Cover?

Auch das neue Titelthema ist eine Hirngeschichte. Schon vor zwei Jahren berichtete der Wissenschaftsjournalist Carl Zimmer in »Spektrum« über die Erforschung höherer kognitiver Fähigkeiten. Konkret ging es um die erheblichen Schwierigkeiten, spezielle Gene für Intelligenz festzumachen. Offenbar sind unsere geistigen Leistungen auf ein unerwartet komplexes Wechselspiel aus Erbanlagen und Umwelteinflüssen zurückzuführen (»Das Versteckspiel der Intelligenz«, Heft 7/2009, S. 74). Das Thema hat Zimmer seither nicht losgelassen. Nachdem er zwei weitere Jahre recherchiert hat, präsentiert er nun eine Zusammenschau neuer Studien zu der Frage, wieso Netzwerke von Milliarden Neuronen den menschlichen Geist hervorbringen können – während eine einzelne Nervenzelle lediglich ein sehr überschaubares Reiz-Reaktions-Verhalten zeigt. Mathematiker wie Daniel N. Rockmore und Scott D. Pauls vom Dartmouth College in New Hampshire versuchen derzeit, dieses Rätsel mit Methoden zu lösen, die sich bei der Analyse anderer komplexer Systeme bis zu einem gewissen Grad bewährt haben – Aktienmärkten etwa. In beiden Fälle ist das Einzelelement – hier das feuernde Neuron, dort der handelnde Aktienhändler – in all seinem Tun in ein riesiges komplexes Netzwerk eingebunden. Es steht mit kleinen Ausschnitten desselben in Kontakt und übt Einfluss aus, mit den meisten Teilen ist es jedoch nicht direkt verbunden. Wer die dynamische Architektur eines solchen Netzwerkes versteht, hat gute Chancen, die emergierenden Phänomene wie Intelligenz einerseits und Kursentwicklungen andererseits zu begreifen, so der Forschungsansatz von Rockmore und Pauls.

Wie steht es um die Themenvielfalt in »Spektrum«? Teilen Sie den Eindruck, dass wir manchen Themen – etwa aus dem Bereich der Neurowissenschaften – zu häufig Vorrang einräumen? Finden Sie Beiträge in unseren Heften, die Sie persönlich besonders interessieren? Wir freuen uns über Ihr Feedback!

Herzlich Ihr

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der Paläontologe **John A. Long** ist Experte für Fischevolution. Im australischen Busch entdeckte er sensationelle Fossilien. Sie verlegen die Erfindung von Geschlechtsakt und Lebendgeburt vor – zu den ausgestorbenen Panzerfischen, von denen auch wir abstammen (ab S. 30).



Der Geowissenschaftler **Lee R. Kump** von der Pennsylvania State University ahnt, was der Klimawandel bringen wird – denn er kennt die Folgen der drastischen Erderwärmung vor 56 Millionen Jahren (ab S. 76).



Für den Computingenieur und Sicherheitsberater **David M. Nicol** ist ein Cyberangriff auf unser Stromnetz eine realistische Bedrohung. Wie sich Betreiber davor schützen können, erklärt er ab S. 82.



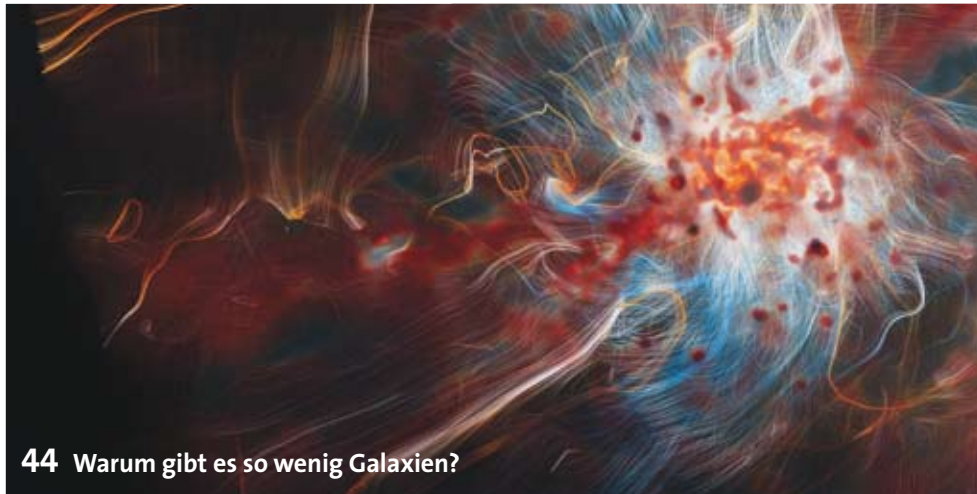
62 Esskultur und Gene



76 Treibhaus vor Jahrmillionen



82 Schutz der Stromversorgung



44 Warum gibt es so wenig Galaxien?

BIOLOGIE & MEDIZIN

TITELTHEMA

- ▶ 22 **Das vernetzte Gehirn**
Carl Zimmer
Das Geheimnis der Leistungsfähigkeit unseres Denkkorgans steckt im hochkomplexen Verknüpfungsmuster der Hirnzellen
- ▶ 30 **Die Pioniere des Sex**
John A. Long
Die Kopulation erfanden vor 375 Millionen Jahren schon die längst ausgestorbenen Panzerfische. Ihr Erbe prägt uns bis heute
- 36 **Echte Gefahr durch falsches Botox**
Kenneth D. Coleman, Raymond A. Zilinskas
Das Gift – neuerdings als Schönheitsmittel eingesetzt – könnte allzu leicht in falsche Hände geraten

PHYSIK & ASTRONOMIE

- 44 **Die fehlenden Galaxien**
James E. Geach
Astronomen suchen nicht nur nach Dunkler Materie. Die Zählung von Galaxien ergibt, dass sie offenbar auch den größten Teil der normalen Materie übersehen
- SCHLICHTING!
52 **Aufgewühlte See im Bermudadreieck**
H. Joachim Schlichting
Lassen aus dem Ozean aufsteigende Gasblasen ganze Schiffe sinken?
- ▶ 54 **Exotische Zahlen – Retter der Stringtheorie?**
John C. Baez und John Huerta
Vielleicht liefern die Quaternionen und die Oktonionen eine Erklärung dafür, warum die Welt in vielen Theorien zehndimensional ist

MENSCH & KULTUR

- 62 **Evolution und Esskultur**
Olli Arjamaa, Timo Vuorisalo
Seit der Menschwerdung entwickelten sich Ernährungsgeohnheiten in Koevolution von genetischen und kulturellen Anpassungen
 - MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
70 **Thomas Bayes oder die Tücken der Statistik**
Marc Dressler
Erst posthum kam er mit seinem Theorem über bedingte Wahrscheinlichkeiten zu Ruhm
- Titelmotiv: Jen Christiansen, nach Hagmann P, Sporns, O. et al., PLoS Biology 6, S. 1479–93, 2008, Fig. 3 C, mit frdl. Gen. von Olaf Sporns; Hintergrund: fotolia / Viktoriya Sukhanova*
- Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet

TITELTHEMA

Das Gehirn als Netzwerk



ERDE & UMWELT

► 76 Was lehrt uns die letzte Erderwärmung?

Lee R. Kump

Vor 56 Millionen Jahren geriet die Erde schon einmal zum Treibhaus. Doch damals ließ sich der Klimawandel viel mehr Zeit als heute, wie neue Studien zeigen. Die rasante Erderwärmung der Gegenwart ist beispiellos

Nach S. 94 folgt eine 16-seitige Sonderpublikation des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

TECHNIK & COMPUTER

► ENERGIEVERSORGUNG



82 Angriff auf das Stromnetz

David M. Nicol

Drohen Cyberattacken auf die Elektrizitätsinfrastruktur?

88 Schwierige Hackerabwehr

Maik G. Seewald

Die Automation in der Energiewirtschaft birgt Sicherheitsrisiken

90 Stromzähler im Visier

André Suhr

Smart Grids müssen gegen Hacker gefeit sein

92 Auftakt zum Cyberkrieg?

Sharon Weinberger

Das Computervirus Stuxnet zielte speziell auf Industrieanlagen

SPEKTROGRAMM

- 8 Dreifarbige Flüssigkristalle • Mantelströmungen hoben und senkten Afrika • Windräder mit Schwarmin-telligenz • Blutbestandteile lassen Hirn altern • Teamarbeit bei verschachtelten Symbionten • Antiprotonenring umhüllt die Erde

BILD DES MONATS

11 Elektronisches Tattoo

FORSCHUNG AKTUELL

12 Kunstorgan statt Tierversuch

Biochips simulieren Leber und Lunge für die Wirkstoffforschung

15 Warum ist der Mars so klein?

Die wandernden Gasplaneten ließen den Roten Planeten verkümmern

18 Ursuppe, eiskalt serviert

Tiefgekühlte Quantengase simulieren heißes Urknallplasma

20 Springers Einwürfe

Lehren aus Fukushima

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial

6 Leserbriefe / Impressum

96 Rezensionen

Lewis Smith:

Warum die Gepardin fremdgeht

Stephen Baker:

Final Jeopardy

Gottfried Schatz:

Feuersucher

u. a.

102 Wissenschaft im Rückblick

Vom Kreiselkompass zur Urzeitfährte

103 Exponat des Monats

Die Geschichte der Melkmaschinen

106 Vorschau

Einseitige Berichterstattung über Fukushima?

Vier Experten für Reaktorsicherheit erläuterten den Ablauf der Katastrophe von Fukushima und stellten die Frage, ob sich die Ereignisse in Japan in Deutschland wiederholen könnten. (»Fukushima auch in Deutschland?«, August 2011, S. 76)

Schäden am Reaktor

Guido Carl, Lorsch: Die Autoren schreiben, alle betroffenen Reaktoren seien nach dem Erdbeben zunächst in einen stabilen Zustand überführt worden. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass schon vor dem Tsunami erhebliche Schäden an den Reaktoren auftraten:

- Bruch von Wasserleitungen im Reaktor 1: www.webcitation.org/5ygMQfEn5
- Schädigung des Notkühlsystems im Reaktor 3: www.webcitation.org/5ytvAtYHZ

Auch soll es schon sehr früh Messungen radioaktiver Teilchen gegeben haben, was auf eine Beschädigung des Containments schließen ließe. Es verwundert, dass die Autoren solche Hinweise außer Acht lassen, denn sie verändern die Sachlage von Grund auf. Das untergräbt die Glaubwürdigkeit ihrer gesamten Untersuchung.

Antwort der Autoren **Dr.-Ing. Ludger Mohrbach, Dr.-Ing. Bernhard Kuczera,**

Dr. Walter Tromm und Dr.-Ing. Joachim Knebel

Die geschilderten Hinweise sind in den beiden Quellen nicht zu finden. In der ersten wird ein Augenzeuge zitiert, der sich beim Erdbeben im Reaktorgebäude von Block 1 in einem Bereich befindet, in dem keine Schutzkleidung zu tragen ist. Er berichtet von Rohren, deren Schweißnähte aufbrechen, von austretendem Wasser und der Unsicherheit, ob es kontaminiert ist. Stichhaltige Belege dafür, dass es sich dabei um sicherheitstechnisch bedeutende Systeme gehandelt habe, gibt der Augenzeugenbericht nicht her.

In der zweiten Quelle sind keine Aussagen zur Beschädigung des Notkühlsystems im Block 3 vor dem Eintreffen des Tsunamis auffindbar. Dort heißt es vielmehr, dass das Beben keine größeren Schäden an den Reaktoren verursachte und dass es keine Hinweise auf Sicherheitsanomalien bis zum Eintreffen des Tsunamis gibt.

Die Behauptung, es habe frühzeitig vor dem Tsunami Beschädigungen am

Sicherheitsbehälter und dadurch Freisetzungen von Radioaktivität gegeben, lässt sich aus den bisher veröffentlichten offiziellen Berichten zum Unfallhergang und den gemessenen Ortsdosisleistungen nicht ableiten.

Unterschlagnene Fakten

Jutta Paulus, Neustadt an der Weinstraße: Wenn, wie die Autoren schreiben, Notstromdiesel und Treibstoffvorräte in Deutschland verbunkert sind, warum taucht dann eben dieser Punkt in sämtlichen Prüfkatalogen beziehungsweise Nachrüstungsforderungen auf? Woher kommt die Behauptung, die deutschen Atomkraftwerke seien dafür ausgelegt, auch das »100 000-jährige« Erdbeben am jeweiligen Standort unbeschadet zu überstehen? Neckarwestheim war nicht für die im nahe gelegenen Oberrheingraben auftretenden Beben (etwa in Basel im 14. Jahrhundert) ausgelegt.

Mehrere Experten halten Tepcos Darstellung, der Wasserstoff sei aus Block 3 in Block 4 gelangt, für haltlos. Dazu hätte er im Wetwell unter die Wasseroberfläche diffundieren und von dort aus das Einspeiserrohr erreichen müssen. Viel wahrscheinlicher ist das »Siphoning«, das durch einen Kühlwasserungsverlust nach dem Prinzip der kom-

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Jan Osterkamp (Spektrumprogramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke
E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
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 wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Christian Hammer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Andreas Nestke, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L/Sfr. 14,-); im Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,00. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten 5dW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: 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, kundenbetreuung@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 Preislisite 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 Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



munizierenden Röhren zur Freilegung der Brennstabköpfe führt.

Antwort der Autoren

Die Auslegung der Kernkraftwerke laut Regelwerk wird in periodischen Sicherheitsüberprüfungen regelmäßig auf den Stand von Wissenschaft und Technik hin überprüft und bei Bedarf durch Nachrüstung verbessert. Bei neuen Erkenntnissen kommen alle Auslegungsdetails auf den Prüfstand, also auch solche, die schon in der Vergangenheit mehrfach überprüft worden sind.

Laut Reaktorsicherheitskommission ergab die Sicherheitsüberprüfung aller deutschen Anlagen unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima ein unverändert hohes Sicherheitsniveau. Bundesumweltminister Norbert Röttgen hat daher auch noch am 17. Mai 2011 betont, es gebe keinen sicherheitstechnischen Grund, Hals über Kopf aus der Kernenergie auszusteigen.

Die Vermutung, dass die Wasserstoffexplosion durch einen »Siphon-Effekt« verursacht wurde, der Wasser aus den Abklingbecken abgesaugt hat, ist eine schlüssige technische Erklärung. Der vermutete Übertrag von Wasserstoff aus dem Block 3 in den Block 4 erscheint dagegen unwahrscheinlich.

Gesundheitliche Folgen

Thorsten Amrhein, Hannover: Bezüglich der gesundheitlichen Folgen von Fukushima hätten die Autoren besser geschwiegen. Es ist schon eine Anmaßung, sich als Ingenieur über die gesundheitlichen Auswirkungen der radioaktiven Belastungen in Japan zu äußern und sie dann auch noch herunterzuspielen. Die Aussage der Autoren, dass bisher auch praktisch keine Langzeitschäden aufgetreten seien, grenzt an eine Verhöhnung der Kraftwerksmitarbeiter und großer Teile der japanischen Bevölkerung.

Antwort der Autoren

Das heutige Wissen über die langfristigen Auswirkungen radioaktiver Strahlung ist im weltweiten Konsens in der linearen Dosis-Wirkungs-Beziehung der

internationalen Strahlenschutzkommission ICRP sicher abdeckend zusammengefasst. Nach dieser steigt das Risiko einer tödlichen Krebserkrankung durch Strahlenexposition bei einer Effektivdosis von 1 Sievert (Sv) um zehn Prozent an.

Das natürliche Hintergrundrisiko (Krebssterberisiko) liegt für die Bevölkerung bei 25 Prozent. Für Raucher ist dieses Risiko mit 35 Prozent deutlich höher. Bei einer Dosis von 0,2 Sievert erhöht sich das Krebssterberisiko der Bevölkerung nach der sicher abdeckenden Dosis-Wirkungs-Beziehung um zwei Prozentpunkte auf 27 Prozent.

Für Fukushima Daiichi liegen bislang Daten von 3538 Personen vor, die dort im März gearbeitet haben. Davon haben neun Arbeiter jeweils eine Dosis von mehr als 0,2 Sievert erhalten, alle anderen deutlich weniger. Die höchste Einzeldosis betrug 0,67 Sievert; das Krebsrisiko hat sich für den betroffenen Arbeiter um 6,7 Prozent erhöht. Vor diesem Hintergrund ist die Aussage gerechtfertigt, dass sich Gesundheitsschäden durch den Unfall bislang zum Glück in Grenzen halten.

Restrisiko

Dr. Peter Ziegler, Alsbach-Hähnlein

Wie von der Atomindustrie vom »Restrisiko« gesprochen wird, ist Menschen verachtend. Denn wird dieses Restrisiko Realität, dann sind ganze Landstriche unbewohnbar, und die hier lebende Bevölkerung verliert ihre Heimat und den größten Teil ihres Besitzes. Dabei sind diese Schäden nicht durch Versicherungen der Kernkraftwerksbetreiber abgedeckt! Weiterhin dürfte zum Beispiel bei einem Super-GAU in Biblis das Rheintal unpassierbar werden – mit unabsehbaren Folgen für die europäische und deutsche Wirtschaft. Man muss nur einmal nachsehen, welche wichtigen Verkehrswege durch dieses Gebiet führen. Fazit: Dieses »Restrisiko« ist nicht zu verantworten.

Antwort der Autoren

Natürlich darf das »Restrisiko« nicht Realität werden, muss also äußerst klein

FOLGEN SIE UNS IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

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

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

sein. Allerdings ist Risiko als Schadensausmaß mal Eintrittswahrscheinlichkeit definiert, und diese wurde in Japan nachweislich falsch bewertet. Zum Kritikpunkt der mangelnden Versicherbarkeit lässt sich festhalten, dass die Betreiber nach einem Dreistufenmodell haften: Mit einer über den Versicherungsmarkt gedeckten Haftpflichtversicherung bis 250 Millionen Euro und darüber hinaus bis 2,5 Milliarden Euro über einen Haftungsverbund der Betreiber auf Gegenseitigkeit. Außerdem haften die Mutterkonzerne mit ihrem Gesamtvermögen für Schäden, die diese Grenze überschreiten. Eine unbegrenzte Haftpflichtversicherung wäre vermutlich unangemessen; denn würde diese Forderung auch an andere Industriezweige gerichtet, so wäre deren internationale Wettbewerbsfähigkeit massiv eingeschränkt.

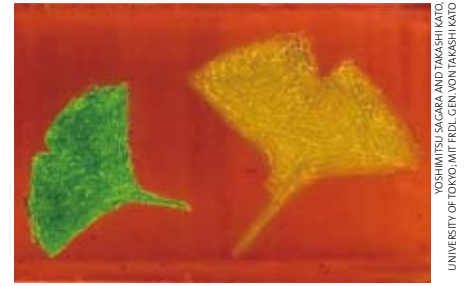
LEUCHTSTOFFE

Dreifarbige Flüssigkristalle

Japanische Forscher haben den ersten Flüssigkristall entwickelt, der zwischen drei Farben wechseln kann. Ein dünner Film, den Yoshimitsu Sagara und Takashi Kato von der University of Tokyo daraus fertigten, lässt sich durch Temperaturänderungen und/oder Reiben zwischen Rot, Grün und Gelb umschalten – und das beliebig oft. Aufgebaut ist er aus zwei unterschiedlich großen Dendrimeren: Molekülen, die sich nach außen baumartig verzweigen. Diese Struktur verleiht dem Material seine flüssigkristallinen Eigenschaften. Das größere Molekül enthält in der Mitte eine aus drei aneinandergereihten Benzolringen bestehende Anthracen-Einheit, die ihm fluoreszierende Eigenschaften verleiht.

Im Normalzustand lagern sich die beiden Dendrimere zu kugelförmigen Gebilden (Mizellen) zusammen, die sich in einem kubischen Gitter anordnen und dann bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht rot leuchten. Wird der Film auf 90 Grad Celsius erhitzt und eine Scherspannung angelegt, stapeln sich die Moleküle dagegen zu Säulen übereinander und fluoreszieren nun grün. Durch Reiben bei Raumtemperatur entsteht schließlich eine weniger geordnete Struktur, die sich noch nicht genau bestimmen ließ. In diesem Zustand erscheint der Film unter UV-Licht gelb.

Sowohl die grüne als auch die gelbe Form lassen sich durch Erhitzen auf 150 Grad Celsius in die rote zurückver-



YOSHIMITSU SAGARA AND TAKASHI KATO
UNIVERSITY OF TOKYO, MIT FRODO, GEN VON TAKASHI KATO

Flüssigkristall zeigt dreifarbiges Bild.

wandeln. Die Lichtausbeute ist zwar geringer als bei vielen anderen lumineszierenden Farbstoffen, reicht nach Angaben der Wissenschaftler für Anwendungen wie Mechanosensoren, Displays und Datenspeicher aber völlig aus.

Angewandte Chemie International Edition 10.1002/anie.201100914, 2011

GEODYNAMIK

Mantelkonvektion hob und senkte Afrika

Einige Hochplateaus und Senken auf dem afrikanischen Kontinent rühren von Strömungen im Erdmantel her. Das fanden nun Robert Moucha und Alessandro M. Forte von der Universität du Québec in Montreal heraus, als sie die Fließbewegungen des Mantelmaterials unter dem Kontinent über die letzten 30 Millionen Jahre hinweg simulierten und mit den geologischen Zeugnissen für die Hebung und Senkung der Kruste an der Erdoberfläche in Verbindung brachten.

Die seismische Tomografie macht dank jüngster Fortschritte heute selbst noch Strukturen im Erdinneren sichtbar, die deutlich weniger als 1000 Kilometer messen. Auf der Basis solcher Daten simulierten die kanadischen Forscher rückschreitend die Dynamik des Mantels unter Afrika. Die Hebungen und Senkungen der Kruste erschlossen sie aus der Erosion und Ablagerung von Gestein sowie der Geschwindigkeit, mit der sich Flusstäler ins Gelände einschneiden.

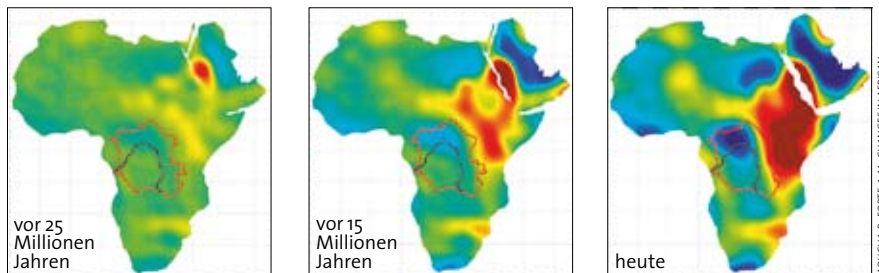
Demnach bewegte sich vor 30 Millionen Jahren ein Strom heißen Mantelmaterials unter der Arabischen Halbinsel, die damals noch mit Afrika verbunden war, nach Süden. Dabei hob er die Kruste dort um mehrere hundert Meter an und riss das Rote Meer auf, was den Vulkanismus in Ostafrika auslöste. Auf seinem weiteren Weg erzeugte er außerdem die Äthiopischen und Ostafrikanischen Plateaus.

Daneben gab es kleinere Strömungen heißen Mantelmaterials. Sie verursachten Hebungen in der Zentralsahara, von denen die Massive von Hoggar und Tibesti zeugen, und an den Küsten von Angola und Mosambik. Absinken-

de Gesteinsmassen abseits der heißen Ströme zogen dagegen Teile des afrikanischen Kontinents nach unten. Besonders ausgeprägt waren diese Abwärtsbewegungen am Westrand Arabiens sowie im Kongobecken.

Nature Geoscience 10.1038/ngeo1235, 2011

Computersimulationen ergaben die hier gezeigten Veränderungen in der durch Mantelströme hervorgerufenen Topografie Afrikas in den letzten 30 Millionen Jahren. Die Spanne reicht von einer Hebung um 1000 Meter (dunkelrot) bis zu einer Absenkung um denselben Betrag (tiefblau).



MOUCHA R., FORTE A. M. CHANGES IN AFRICAN TOPOGRAPHY DRIVEN BY MANTLE CONVECTION. IN: NATURE GEOSCIENCE DOI:10.1038/ngeo1235, 2011, FIG. 2

ENERGIE

»Schwarmintelligenz« macht Windräder effizienter

Die Windkraft gehört mittlerweile zu den wichtigsten regenerativen Energiequellen. Ihr Preis pro Kilowattstunde könnte schon bald mit dem von Strom aus konventionellen Kraftwerken konkurrieren. Windparks benötigen jedoch viel Platz. Außerdem gefährden die Rotoren Vögel und Fledermäuse. Auch fühlen sich Anwohner oft durch fliegende Schatten oder Geräusche belästigt.

Robert Whittlesey vom California Institute of Technology in Pasadena und seine Kollegen wollen diese Probleme nun umgehen, indem sie Windparks nach dem Vorbild von Fischschwärmen aufbauen. Die Fische formieren sich so, dass sie mit möglichst geringen Reibungsverlusten ihren Vortrieb optimieren. Jedes Tier erzeugt dabei Wirbel, die auf die Artgenossen hinter ihm – bei geeignetem Abstand – einen Sog ausüben, der sie vorwärtszieht. Entsprechend ordnete Whittleseys Team die Windräder in seiner Versuchsanlage paarweise so an, dass jedes Paar seinen Nachbarn etwas Luft zufächelt und kaum Energie durch Turbulenzen verloren geht.

Dieses System funktioniert allerdings nur, wenn die Rotoren horizontal um den Turm kreisen – und nicht, wie üblich, vertikal. Das macht sie eigentlich weniger effizient, weil der von der Seite kommende Wind lediglich ein Viertel des sich parallel zum Boden drehenden Rotors überstreicht. Diesen Nachteil gleichen die Alternativmodelle freilich mehr als aus, indem sie Winde aus den verschiedensten Richtungen nutzen können.



Versuchsanlage zum Test horizontaler Windräder in besonders günstiger Anordnung

Außerdem stehen sie dichter beieinander als herkömmliche Windräder.

Auf diese Weise konnten Whittlesey und seine Kollegen die Leistung ihrer Versuchsanlage auf 20 bis 30 Watt pro Quadratmeter Fläche steigern – das Zehnfache der Ausbeute herkömmlicher Windfarmen. Dabei lieferten die Turbinen in der letzten Reihe nur fünf Prozent weniger Strom als die an der Windfront. Es traten also kaum Reibungsverluste auf.

Anders als gängige Rotoren können die Windräder mit vertikalen Drehachsen auch an kleineren Türmen befestigt werden und benötigen keine 100 Meter hohen Masten. Dadurch sind sie optisch weniger auffällig und stellen ein geringeres Risiko für Großvögel dar. Allerdings können sehr große Fliehkräfte und starke Vibrationen auftreten, die schwer zu beherrschen sind und den Alltagseinsatz bislang noch einschränken.

Nature Geoscience 10.1038/ngeo1235, 2011

NEUROGENESE

Blutbestandteile lassen Hirn altern

Seit den 1990er Jahren weiß man, dass auch im Gehirn erwachsener Menschen neue Nervenzellen entstehen können. Sie bilden sich aus Stammzellen, die sich im Unterschied zu ausgereiften Neuronen noch teilen können. Die Anzahl solcher neuronalen Stammzellen verringert sich jedoch mit zunehmendem Alter. Für den Rückgang sind offenbar Signalstoffe im Blut mitverantwortlich. Das hat nun ein Forscherteam bei Experimenten an Mäusen entdeckt.

Der Neurowissenschaftler Tony Wyss-Coray von der Stanford Universi-

ty (Kalifornien) und seine Kollegen bildeten Paare aus jeweils einer jungen und einer alten Maus oder zwei gleich alten Tieren und verknüpften operativ die Blutkreisläufe der beiden Nager. »Auf diese Weise konnten wir beobachten, wie sich das Blut der alten Maus auf das Hirn der jungen auswirkte – und umgekehrt«, erklärt Saul Villeda, der an dem Experiment beteiligt war. Bei den Tierpaaren mit unterschiedlichem Alter veränderte das vermischte Blut die Neurogenese: Während die Anzahl neuer Nervenzellen in den Gehirnen der alten Mäuse stieg, sank

sie in denen der Jungtiere. Bei Gleichaltrigen dagegen veränderte sich das Zellwachstum nicht.

In weiteren Experimenten identifizierten die Forscher schließlich sechs Substanzen, die im Blut älterer Tiere gehäuft vorkamen, darunter einen Signalstoff namens Eotaxin. Spritzten sie ihn jungen Mäusen, bildeten sich in deren Gehirnen weniger neue Nervenzellen. Auch schnitten die betreffenden Tiere bei räumlichen Gedächtnistests schlechter ab.

Nature 476, S. 450–453 und S. 454–457, 2011

BIOLOGIE

Verschachtelte Symbionten teilen sich Aminosäuresynthese

Eine ungewöhnliche Mehrfach-Symbiose haben zwei US-Forscher in der Zitruschmierlaus (*Planococcus citri*) entdeckt. Das Insekt beherbergt als Symbionten ein Beta-Proteobakterium, das seinerseits einen bakteriellen Untermieter mitbringt. Wie John McCutcheon und Carol von Dohlen feststellten, erzeugen beide Mikroben Genprodukte, die für die Produktion lebenswichtiger Aminosäuren notwendig sind. Keiner der beteiligten Partner verfügt jedoch über die vollständige Reaktionskaskade, so dass alle drei eine Reihe lebenswichtiger Moleküle arbeitsteilig herstellen.

Der Symbiosepartner der Schmierlaus, für den die Forscher den Namen *Tremblaya princeps* vorschlagen, hat das kleinste Genom, das je in einer Zelle gefunden wurde. Trotzdem enthält es Gene für die Synthese von

insgesamt zehn Aminosäuren. Allerdings ist überraschenderweise keiner der Synthesewege vollständig.

Dieser Symbiont hat also das gleiche Problem, das er für seinen Wirt eigentlich lösen soll: Er kann keine essenziellen Aminosäuren produzieren. Hier kommt die zweite Mikrobe ins Spiel, von den Forschern vorläufig *Moranella endobia* getauft. Dieser Organismus lebt im Zytosol von *Tremblaya*, kodiert ebenfalls Teile von Reaktionsketten für die Produktion essenzieller Aminosäuren und schließt so die Lücken in den Biosynthesewegen der Wirtsmikrobe.

Nur in Kooperation also können *Tremblaya* und sein Symbiont *Moranella* dem gemeinsamen Wirt die in der Nahrung fehlenden Moleküle liefern. Für die Herstellung von Phenylalanin, Arginin und Isoleucin sind anscheinend sogar noch Gene der Schmierlaus

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie auf spektrumdirekt.de



selbst notwendig. Wegen der Verschachtelung der Biosynthesewege müssen die Partner entweder Zwischenprodukte untereinander austauschen oder die Enzyme für deren Herstellung. Da keiner der Mikroorganismen dafür geeignete Transportproteine produziert, liegt noch völlig im Dunkeln, wie sie das machen.

Current Biology
10.1016/j.cub.2011.06.051

TEILCHENPHYSIK

Antiprotonenring umhüllt die Erde

Ständig prasseln geladene Teilchen aus der kosmischen Strahlung auf die Erde – und erzeugen dabei neue Teilchen, wenn sie mit Partikeln der Atmosphäre kollidieren. Überraschend fanden sich darunter jetzt auch Antiprotonen: Sie sammeln sich im inneren Bereich des so genannten Van-Allen-Gürtels – einem Kringel aus energiereichen geladenen Teilchen, die vom Magnetfeld der Erde eingefangen wurden.

Die Entdeckung machten Piergiorgio Picozza von der Università di Roma und

seine Kollegen mit Hilfe des Teilchendetektors PAMELA (Payload for Antimatter-Matter Exploration and Light-Nuclei Astrophysics), der an Bord des russischen Satelliten Resurs-DK1 die Erde umkreist. Eigentlich wollten sie damit die kosmische Strahlung untersuchen, doch registrierten die Messgeräte auch insgesamt 28 negativ geladene Antiprotonen, die in spiralförmigen Bahnen um die Magnetfeldlinien unseres Planeten kreisen. Im Bereich der so genannten Südatlantischen Anomalie

reicht der Van-Allen-Gürtel am nächsten an die Erde heran. Da PAMELA diese Region immer nur sehr kurz untersucht, mutmaßen die Forscher, dass im gesamten inneren Strahlungsgürtel unseres Planeten Milliarden Antiprotonen gefangen sein könnten und dort für Minuten oder Stunden überdauern.

Bislang dachte man, dass die relativ schweren Teilchen recht schnell in die oberen Atmosphärenschichten absinken und dort auf »normale« Materie treffen, wobei sie zerstrahlen. Das Magnetfeld im inneren Strahlungsgürtel der Erde ist aber offensichtlich so stark, dass sich die Antimaterie auf sehr engen Spiralbahnen bewegt, was ihren Absturz verzögert. Bisher kannten Physiker aus dem Van-Allen-Gürtel nur Positronen, die positiv geladenen Gegenstücke der Elektronen.

Astrophysical Journal Letters
10.1088/2041-8205/737/2/L29, 2011



Bei dieser Simulation des Van-Allen-Gürtels mit Hilfe von Plasma im Labor überwacht ein NASA-Wissenschaftler das Experiment durch ein Fenster im Tank.

ELEKTRONISCHES TATTOO



Statt Kabelgewirr und sperriger Messgeräte nur ein kleines, hauchdünnes Pflaster: Ein neu entwickeltes elektronisches »Tattoo« misst physiologische Daten in gleicher Qualität wie gängige Apparaturen. Dünner als ein Haar, ist der luftdurchlässige Film auf Polyesterbasis genauso biegsam und dehnbar wie menschliche Haut. Um das zu gewährleisten, wurden die elektronischen Schaltungen in Form von Schlangenlinien auf der Kunststoffunterlage aufgebracht. Das Tattoo braucht auch keinen Kleber, sondern haftet allein durch Van-der-Waals-Kräfte auf der Haut.

Verschiedene Sensoren und eine eingebaute Minisolarzelle ermöglichen es, über Stunden kontinuierlich Messwerte – etwa ein EKG – aufzuzeichnen und per Funk kabellos zu übertragen. Nach Gebrauch lässt sich die Folie einfach abziehen.

Science 333, S. 838–843, 2011



LAB-ON-CHIP

Künstliches Organ statt Tierexperiment

Mit biotechnischen Systemen Gewebe zu simulieren, könnte die Wirkstoffforschung voranbringen und manchen Tierversuch ersparen.

VON MONYA BAKER

Seit mehr als einem Jahrzehnt ätzen Wissenschaftler Rillen in Siliziumchips und Kunststoffplatten, setzen lebende Zellen hinein und hoffen, dass sich ihre Konstrukte am Ende so verhalten wie Lebergewebe oder Darmschleimhaut. Forscher vom Wyss Institute for Biologically Inspired Engineering der Harvard University in Boston (Massachusetts) gelang nun eines der bislang raffiniertesten Systeme – ein Lungenchip: »Unsere Startkonfiguration bestand nur aus Deckzellen der Atembläschen und Blutkapillaren, später fügten wir Immunzellen hinzu«, erklärt Institutsleiter Donald Ingber.

Der Lungenchip trägt zwei mikroskopisch dünne Kanäle, die durch eine poröse Membran getrennt sind. Einer ist mit einer Schicht Epithelzellen aus Lungenbläschen ausgekleidet, der andere mit Endothelzellen von Blutkapillaren. Strömt durch den ersten Luft,

durch den zweiten Flüssigkeit als Blutersatz, lässt sich der Gasaustausch bei der Atmung simulieren. An die Kanäle angeschlossene Vakuumkammern erzeugen überdies mechanische Kräfte, wie beim Heben und Senken der Brust.

Das Ziel solcher Entwicklungen ist nicht der biotechnische Organersatz, sondern ein wirklichkeitstreuere Testsystem, an dem sich beispielsweise Wirkungen und Nebenwirkungen neuer Medikamente studieren lassen. Es gibt heute zwar vielfältige Methoden, Experimente an isolierten Proteinen oder Zellkulturen durchzuführen, doch um ganze Gewebe ins Visier zu nehmen, bleiben nur entweder frisch entnommene Organe oder Tierversuche. Erste Experimente sind teuer, die zweiten ethisch problematisch, die Ergebnisse bei beiden oft unzuverlässig.

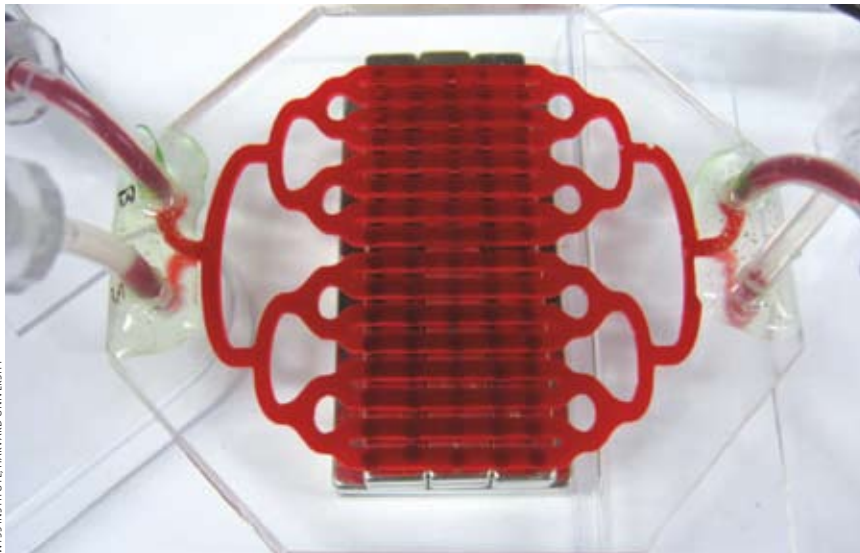
Um beispielsweise die Effekte von Luftverunreinigungen auf die Lungen

nachzustellen, brachten die Forscher toxische Nanopartikel auf den Lungenbläschenzellen auf. Wurde das Atmen mechanisch imitiert, änderte sich offenbar das Verhalten der Zellen, denn es gelangten nun mehr Schadstoffe in den »blutführenden« Kanal als zuvor. Die bis jetzt bei solchen Untersuchungen gebräuchlichen Zellkulturen in Petrischalen geben die Verhältnisse offenbar nicht richtig wieder, die tatsächliche Toxizität eingeatmeter Partikel wird vermutlich unterschätzt.

Auch komplexere Vorgänge konnten die Forscher in ihrer künstlichen Lunge beobachten: Brachten sie Substanzen in den lufthaltigen Kanal ein, die beim Menschen eine Immunreaktion auslösen, wanderten tatsächlich weiße Blutkörperchen aus dem blutführenden Kanal durch die Membran in das belüftete Kompartiment – genau wie im »echten« Lungengewebe bei Entzündungsprozessen.

Organchips stehen zwar noch am Anfang ihrer Entwicklung, doch die Zellkulturtechniken werden immer besser. Ein großer Vorteil: Experimente mit Lab-on-chips lassen sich einfacher auf eine bestimmte Fragestellung hin ausrichten als solche an Tieren, bei denen wesentlich mehr Faktoren das Ergebnis beeinflussen. Judith Swain, Geschäftsführerin des Singapore Institute for Clinical Sciences, erklärt dazu: »Wenn es gelingt, die Grundbausteine der Organfunktionen mit einfachen technischen Modulen abzubilden, lassen sich Experimente besser kontrollieren und damit variieren die Ergebnisse weit weniger.«

»Wir finden diesen Ansatz hoch spannend, aber bis Organchips Tierex-



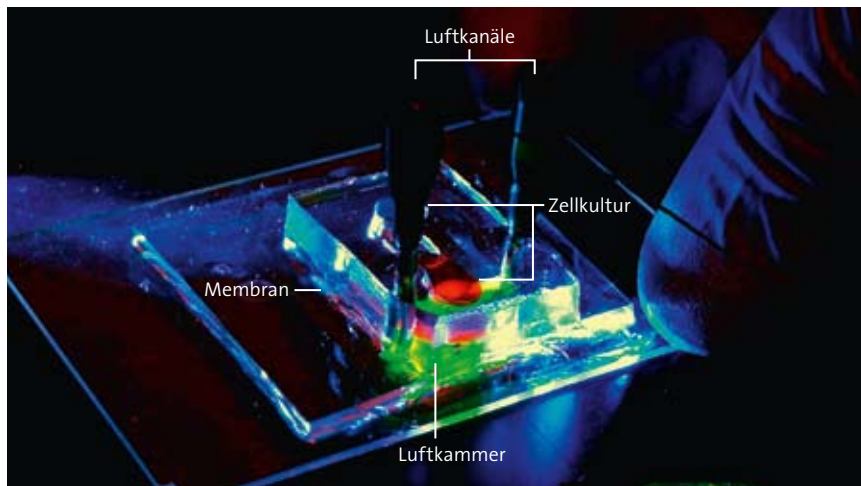
WYSS INSTITUTE, HARVARD UNIVERSITY

Forscher konstruieren miniaturisierte künstliche Organe (hier ein Milzsystem), um potenzielle Arzneistoffe auf Wirkungen und Nebenwirkungen zu testen.

perimente ersetzen können, ist es noch ein ziemlich weiter Weg«, dämpft hingegen Jesse Goodman, wissenschaftlicher Direktor der US-amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) die Erwartungen. Dennoch erarbeitet seine Behörde schon jetzt entsprechende Leitlinien. Es ist zwar möglich, dass die FDA bei einem Antrag auf Medikamentenzulassung Experimente an Organchips als Entscheidungsgrundlage niemals akzeptieren wird. Doch könnte diese Technik helfen, die pharmazeutische Forschung voranzubringen, indem sie die Auswahl geeigneter Substanzen für weiterführende Tierexperimente erleichtert.

Ideen gibt es genug. Alan Ezekowitz, Immunologe an den Merck Research Laboratories in Rahway (US-Bundesstaat New Jersey) möchte beispielsweise in das Lungenmodell Muskelzellen einbauen, um zu erforschen, unter welchen Umständen die Bronchialmuskulatur kontrahiert. Zudem enthält die aktuelle Version des am Wyss Institute entwickelten Lungenchips bislang nur neutrophile Granulozyten als Immunzellen, während im echten Organ ganz unterschiedliche Typen patrouillieren und sich gegenseitig in ihren Aktivitäten beeinflussen. Ingber hat das Chip-system daher ergänzt – in einigen Fällen auch um Zellen von Patienten, beispielsweise um das Fortschreiten einer Lungenfibrose oder die Aufnahme inhalierter Wirkstoffe messen zu können. Organchips könnten seines Erachtens Tierexperimente mitunter ersetzen oder ergänzen, vor allem bei Erkrankungen, für die es keine guten Tiermodelle gibt.

Angesichts der Schwierigkeiten bei der Rekonstruktion eines einzelnen Organs erscheint die Imitation ganzer Körper auf Chips geradezu vermessen. Tatsächlich jedoch war dies das Ziel eines der ersten Projekte auf dem Gebiet. Michael Shuler, Biotechnologie-Ingenieur an der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York), prägte bereits in den 1990er Jahren den Begriff des »Chiptiers« (*animal on a chip*),



Wird eine unter der Lungenzellkultur (rot) gelegene Membran (hier nicht sichtbar) durch einen Luftstrom verformt, simuliert das die Belastung der Zellen bei Atembewegungen.

nachdem er und sein Kollege Gregory Baxter Kompartimente und Mikrokanäle in Siliziumchips geätzt hatten, um darin Leber-, Darmschleimhaut- und Fettzellen unterzubringen und mit Nährstoffen zu versorgen. Dieses Konstrukt, das Shuler ein »Analogon zu Zellkulturen im Mikromaßstab« nannte, beruhte auf mathematischen Modellen zur Verteilung und Anreicherung von Wirkstoffen in den entsprechenden Organen.

Die Wirkstoffbarriere Darmschleimhaut nachbilden

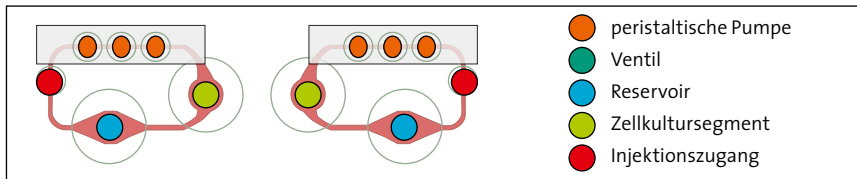
Ein Hauptproblem derart komplexer Chips ist die Blutflusssimulation. Shuler zufolge gelingt es bislang lediglich, die Verteilung zu den Organen hin zu imitieren, nicht aber den weiteren Verlauf in den Geweben. Eine zusätzliche Schwierigkeit: Aktuelle Geräte verwenden Zellen, die in Kultur problemlos wachsen. Interessanter wären aber oft andere, auf bestimmte Aufgaben spezialisierte Zellen, welche die Organfunktion viel besser repräsentieren würden. Ein wichtiger Kandidat für die weitere Entwicklung ist hier die Darmschleimhaut, weil oral eingenommene Medikamente sie überwinden müssen. Mit nur drei Zelltypen – Darmepithelzellen, Mucin produzierende Zellen und Lymphozyten – konstruierten Shuler

und seine Kollegen eine vereinfachte Version. Mit Hilfe eines Polymergels gelang es sogar, ein Kollagengerüst aufzubauen, das die Zotten der Darmschleimhaut nachbildet. Derzeit versucht die Arbeitsgruppe, auch die peristaltischen Bewegungen des Darms mit Hilfe von Vakuumkammern zu imitieren. Wie bei dem eingangs beschriebenen Lungenchip können sie daran beobachten, wie Moleküle in die Blutkapillaren übertreten.

Aus Deutschland kommt eine Gemeinschaftsentwicklung des Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahlentechnik in Dresden und des Fachgebiets Medizinische Biotechnologie der Technischen Universität Berlin. Erstmals gelang es Forschern, einen Hautchip zu bauen, der auch ein Haarfollikel enthält. Diese auf der gesamten Oberfläche des menschlichen Körpers mit Ausnahme der Handflächen und Fußsohlen anzutreffenden Elemente bilden eine Eintrittspforte für unterschiedliche Substanzen. Das neue Modell müsste also weit verlässlichere Aussagen über Wirkungen und Nebenwirkungen ermöglichen.

Frank Sonntag, Biosystemingenieur am Dresdner Fraunhofer-Institut, leitet dort die Entwicklung »multi-mikroorganoider Kultursysteme«. Um Langzeiteffekte untersuchen zu können,

AUS: DOUVILLE, N.J., TAKAYAMA, S. ET AL.: COMBINATION FLUID AND SOLID MECHANICAL STRESSES CONTRIBUTE TO CELL DEATH AND DETACHMENT IN A MICROFLUIDIC ALVEOLAR MODEL. IN: LAB CHIP 11, S. 609–619, 2011; MIT: FRIDL. GEN. VON SHUICHI TAKAYAMA



Flüssigkeitsgefüllte Kanäle simulieren den Blutstrom zu den »Organen« auf dem Chip (hier der Doppelkammerkreislauf einer Dresdner Forschungs Kooperation).

werden diese Systeme mit Nährstoffen versorgt und auf der richtigen Temperatur gehalten. Sensoren erheben die entsprechenden Daten, ein Mikrokontroller aktiviert gegebenenfalls Pumpen oder Thermoelemente.

»Der übliche Glas-Silizium-Aufbau wäre dafür viel zu kostspielig, die Integration von Peristaltikmikropumpen schwierig«, erklärt der Forscher. »Herzstück unseres Lab-on-chip ist eine Kunststoffflusszelle, die alle Kanäle, Ventile und einige Pumpenelemente enthält (siehe Bild oben) sowie Zellkultureinsätze – also mit einem Raster von winzigen Nöpfchen versehene Kulturplatten. Wir fertigen diese Flusszelle durch Abformung von einem Master, ähnlich wie man Spekulatiuskexen mit einem Model das gewünschte Relief verleiht. Zwei Platten aus Polycarbonat oder auch aus Glas geben der dazwischenliegenden Zelle Stabilität und enthalten alle Sensoren, Aktoren und Anschlüsse.«

Der Mediziner und Biotechnologe Uwe Marx von der Technischen Universität Berlin arbeitet überdies daran, die technischen Versorgungskanäle durch aus Endothelzellen gebildete Kapilla-

ren zu ersetzen. So ließen sich modellierte Organe deutlich länger am Leben erhalten, und bei dem oben erwähnten Follikel-Haut-Chip könnten auch Organregeneration und Wundheilung simuliert werden.

Die Gefahr von Leberschäden frühzeitig erkennen

Der häufigste Grund für den Abbruch klinischer Prüfungen neuer Medikamente ist eine unvorhergesehene Schädigung der Leber. Es kommt aber auch vor, dass Leberenzyme mitunter einen Wirkstoff neutralisieren. Um solche Effekte zu untersuchen, verwendet man bislang Primärkulturen von Leberzellen, die Verstorbene entnommen wurden. Abgesehen von der begrenzten Verfügbarkeit verhalten sich solche Zellen oft uneinheitlich; zudem sterben sie in Zellkulturgefäßen mit flachem Boden rasch ab. Ein Leberchip könnte hier entscheidend weiterhelfen, daran arbeiten verschiedene Forschergruppen.

Im März dieses Jahres präsentierte das Unternehmen Hepregen aus Medford (US-Bundesstaat Connecticut) seinen Chip HepatoPac. Dabei kommt eine Mikrofabrikationstechnik zum Einsatz,

die der Ingenieur Sangeeta Bhatia am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt hat: Ein Trägermaterial wird punktuell mit Kollagen beschichtet, das verschiedene Zelltypen der Leber fixiert. Auf diese Weise in ein dreidimensionales Gerüst eingebunden wie in der Natur, bleiben die Zellen für etwa vier bis sechs Wochen aktiv. Als Testfall wählten die Forscher den Wirkstoff Fialuridin gegen das Hepatitis-B-Virus, der in den 1990er Jahren wieder vom Markt genommen wurde. Trotz erfolgreicher Tests im Tierexperiment hatte er schwere Leberschäden verursacht. Und genau das hätten die Untersuchungen mit HepatoPac auch erwarten lassen.

Auch Linda Griffith, Bioingenieurin am MIT, baut dreidimensionale Kultursysteme, dazu verwendet sie Siliziumgerüste von weniger als zwei Zentimeter Durchmesser, in deren Kammern Leberzellen wachsen sollen. Winzige Pumpen erzeugen Sauerstoff- und Nährstoffgradienten zwischen den Kammern – so wie sie im menschlichen Körper auch auftreten. Derzeit vergleicht Griffith sie solche aufwändigen Systeme mit flachen Kulturen. Welche Technik liefert mehr Informationen über mögliche toxische Nebenwirkungen? Ihr Ziel ist, je nach Fragestellung das einfachste System zu nutzen. »Vielleicht genügen für das erste Screening ganz simple Kulturen, während kompliziertere Systeme nur für schwierigere Aufgaben notwendig sind.«

Allerdings ist es schon wesentlich einfacher geworden, letztere herzustellen, wendet Shuichi Takayama ein, Bioingenieur an der University of Michigan in Ann Arbor. Er baut Organoidchips, die Knochen, Leber und Lunge simulieren. Die Zelltypen, die dafür benötigt werden, sind leichter zugänglich, das Gleiche gilt für die Wachstumsfaktoren und extrazellulären Matrixproteine, um die Funktion der Zellen zu erhalten.

Bei Geweben, die dicker sind als drei Millimeter, müssen die Chips zwar mit einem Versorgungssystem ausgestattet sein, die wirkliche Herausforderung sieht Takayama aber in der Simulation

dynamischer Prozesse: Zugbelastung auf Haut und Muskeln, hydrodynamische Scherkräfte auf Blutgefäße, Druck auf Knochen und so weiter. Und natürlich bringt jedes Organ seine eigenen Probleme mit sich. Um etwa das Gewebe des schlagenden Herzens zu rekonstruieren, müssen die Muskelzellen auf einem Chip montiert werden, der ihre elektrische Aktivität nicht stört.

Weitere Schwierigkeiten ergeben sich aus den Eigenschaften der Trägersysteme, erklärt Shuler. So sind die Effekte von Polymeren und Mikrofluidik auf biologische Zellen noch zu wenig untersucht. Die winzigen Proben erschweren die Rückgewinnung von Stoffwechselprodukten, und einige Materialien absorbieren diese Substanzen sogar. Daher lassen sich manche Organchips nur mit

Spezialkenntnissen sinnvoll einsetzen, was ihre Verwendbarkeit in Labors ohne einschlägige Erfahrungen einschränkt.

Monya Baker ist Redakteurin für Technologie bei »Nature« und »Nature Methods«.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 471, S. 661–665, 31. März 2011

PLANETENENTSTEHUNG

Warum ist der Mars so klein?

Astrophysiker wundern sich seit jeher über den Zwergwuchs des Mars. Computersimulationen zeigen nun den wahrscheinlichen Grund: Die Gasriesen Jupiter und Saturn wanderten einst durch das innere Sonnensystem und hinterließen dem Roten Planeten nur noch wenig Baumaterial.

VON THORSTEN DAMBECK

Im frühen Sonnensystem herrschte inoch ein ziemliches Durcheinander. Insbesondere wanderten die großen Gasplaneten Jupiter und Saturn damals unbeständig umher. Unmittelbar nach ihrer Entstehung befanden sie sich näher an der Sonne als heute und bewegten sich zunächst auf sie zu. Dieser Entwicklung gebot erst Saturn Einhalt. Er näherte sich dem Jupiter »von außen«, fing ihn ein und entfernte sich mit ihm zusammen allmählich wieder von der Sonne, bis beide an ihren heutigen Positionen zur Ruhe kamen.

Mit einem Computermodell nahm eine französisch-amerikanische Gruppe um Kevin Walsh von der Universität Nice diese Vorgänge nun genauer unter die Lupe (Nature 475, S. 206–209, 2011). Demnach hatte die Wanderung der Gasriesen gravierende Folgen für die spätere Entstehung der Gesteinsplaneten: Nur in Sonnennähe erreichten diese eine stattliche Größe, der sonnenferne Mars blieb hingegen ein Zwerg.

Astrophysiker sind sich einig darüber, dass Jupiter und Saturn einst binnen weniger Millionen Jahre heranwuchsen – mit Material aus der massereichen, aus Gas- und Staubteilchen

bestehenden protoplanetaren Scheibe rund um die junge Sonne. Die Geburt der Gesteinsplaneten dauerte dagegen erheblich länger. Sie vollzog sich, wie der US-Planetenforscher George Wetherill schon in den 1970er Jahren erkannte, in einem mehrstufigen Prozess.

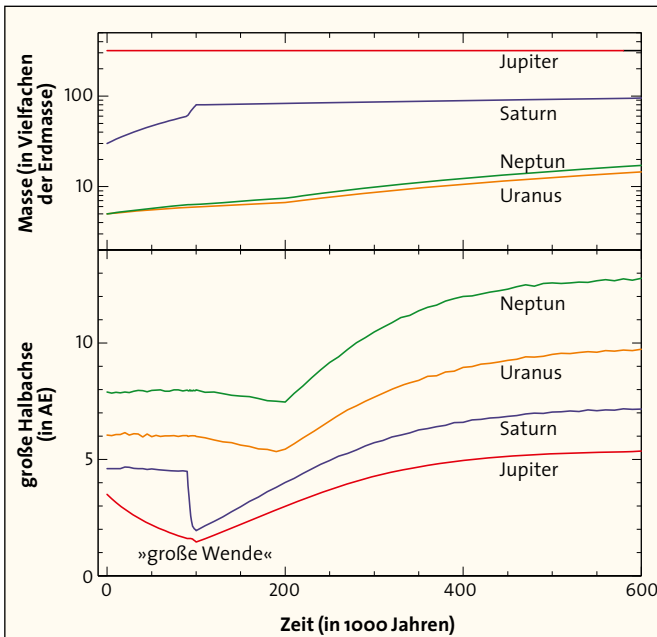
Altbekanntes Szenario mit offenen Fragen

Am Anfang verklumpten die Staubteilchen des solaren Urnebels zu sogenannten Planetesimalen: Gesteinskörpern mit Ausmaßen von einigen Kilometern. Diese zogen sich gegenseitig an und vereinigten sich zu eher lockeren Gebilden. Dabei erreichten manche eine Größe zwischen der von Erdmond und Mars. Die Gravitation dieser Objekte reichte nun aus, sie zu einem einheitlichen Körper zusammenzupressen, der sich dabei erhitzte und im Inneren schmolz. Die derart entstandenen Protoplaneten wuchsen weiter, indem sie Planetesimale aus ihrer direkten Nachbarschaft einfingen. Auf diese Weise brachte es beispielsweise die Erde auf etwa zehn Prozent ihrer späteren Masse. Die heutigen Planeten entstanden schließlich, als ihre Vorläufer aufeinander

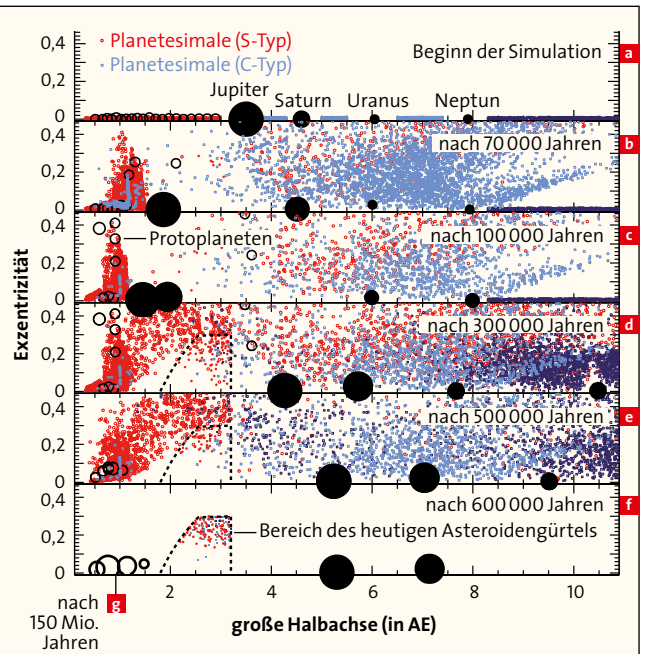
derprallten und dabei miteinander verschmolzen. Den Schlusspunkt dieser je nach Schätzung bis zu 100 Millionen Jahre währenden Ära markierte der vermutete Zusammenstoß eines marsgroßen Körpers mit der Erde – ein dramatisches Ereignis, bei dem der Erdmond entstanden sein soll.

Doch das geschilderte Szenario lässt Fragen offen – darunter die, warum der Mars im Vergleich zu Erde und Venus so klein ist. Er bringt lediglich elf Prozent der Erdmasse auf die Waage, obwohl terrestrische Planeten umso massereicher sein müssten, je weiter sie von der Sonne entfernt sind. Denn mit zunehmendem Bahnumfang, so die Vorstellung der Astronomen, haben immer häufiger Materiebrocken die Bahnen der wachsenden terrestrischen Planeten gekreuzt. Des Rätsels Lösung fand das Team um Kevin Walsh, indem es in seiner Simulation die Zeit untersuchte, in der zwar die Gasriesen bereits existierten, die Geburt der erdähnlichen Planeten aber noch bevorstand.

Jupiter ist in dem Computermodell schon voll entwickelt und umläuft die Sonne in der vergleichsweise geringen Distanz von 3,5 Astronomischen Ein-



Zu Beginn der Simulation hatte Jupiter seine endgültige Masse bereits erreicht (links oben) und näherte sich langsam der Sonne (links unten). Dabei trieb er zahlreiche Planetesimale vor sich her, die sich in einer Materiescheibe um die Sonne sammelten (rechts, **b**). Als Saturn auf 60 Erdmassen angewachsen war, begann er Jupiter schnell zu folgen. Bald kam er ihm so nahe, dass die Gasplaneten in eine Resonanz gerieten und nach einer »großen Wende« gemeinsam nach außen drifteten. Bei ihrer



Reise fegten sie den Bereich des heutigen Asteroidengürtels zunächst frei (**c**), füllten ihn durch gravitative Wechselwirkungen später aber wieder (**d**, **e** und **f**; in **f** sind Planetesimale außerhalb des Asteroidengürtels nicht dargestellt). Während einer Wachstumsphase, die Dutzende von Millionen Jahre andauerte, erreichten auch die terrestrischen Planeten ihren endgültigen Zustand (**e**). Mars war in dieser Zeit vom Baumaterial der sonnennahen Materiescheibe abgeschnitten – er blieb ein Zwerg.

heiten (1 AE entspricht der Distanz Erde – Sonne). Der weiter außen gelegene Saturn erreicht seine endgültige Größe hingegen erst im Verlauf der Simulation.

In diesem frühen Entwicklungsstadium sind die Bahnen der jungen Gasplaneten noch instabil. Laut Hubert Klahr vom Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie, der nicht an der Studie beteiligt war, kann das Gas der protoplanetaren Scheibe starke Kräfte auf einen jungen Planeten ausüben und ihn dabei abbremsten oder beschleunigen. Dadurch verändert sich seine Umlaufbahn: Verliert der Himmelskörper durch die Wechselwirkung mit der Scheibe Drehimpuls, wandert er zur Sonne hin – und umgekehrt (siehe auch SdW 6/2008, S. 24).

»Jupiter war einer delikaten Kräftebalance unterworfen«, erklärt Klahr. »Zwar drückte ihn das schneller umlaufende Gas der von ihm aus gesehen inneren Scheibe nach außen. Die äußere

Scheibe wirkte aber entgegengesetzt und schob den Planeten in Richtung Sonne.« Zunächst überwog wohl der Einfluss der äußeren Scheibe, die mehr Masse als der Planet selbst besaß, und brachte den Gasriesen auf Sonnenkurs.

Saturn zwingt Jupiter zur »großen Wende«

Den Simulationen von Walshs Team zufolge dauerte Jupiters *Tour du Soleil* etwa 100 000 Jahre, bis er auf 1,5 AE an die Sonne herangerückt war. Dabei hatte er zahlreiche Planetesimale vor sich hergetrieben (siehe Abbildung oben rechts). Bei diesem Effekt spielen neben gravitativen Wechselwirkungen mit dem Gas der Scheibe unter anderem so genannte Resonanzen eine Rolle. Dabei stehen die Umlaufzeiten von Planet und Planetesimal in einem ganzzahligen Verhältnis, wodurch Kräfte in einer bestimmten Richtung dominieren.

Die nach innen geschleuchten Planetesimale sammelten sich nun gemein-

sam mit bereits vorhandenem Material in einer Scheibe rund um die Sonne, deren äußere Begrenzung bei etwa 1 AE lag – genau dort, wo heute die Erde kreist. Durch den Zuwachs verdoppelte sich die Gesamtmasse dieser Minischeibe auf etwa zwei Erdmassen.

Jupiter wäre wohl weiter Richtung Sonne marschiert – an manchen extrasolaren Gasriesen lässt sich dieses Phänomen tatsächlich beobachten –, hätte ihn Saturn nicht vorher eingefangen. Der Ringplanet kam dem Ausreißer sehr nahe und veränderte dabei die Dichteverteilung der Scheibenmaterie so, dass Jupiter die äußere Scheibe praktisch nicht mehr spürte. »Nun waren es die Gezeitenkräfte der inneren Scheibe, die beide Planeten zur Umkehr zwangen«, so Walsh, »sie drifteten nach außen.« Jupiters Umkehrpunkt bei 1,5 AE bezeichnet er in Seglersprache als »große Wende«.

Nahe der Sonne war nun die Wiege für die terrestrischen Planeten bereit.

Aus den zahlreichen Planetesimalen, die sich dort angesammelt hatten, bildeten sich in den nächsten Dutzenden von Millionen Jahren Merkur, Venus und Erde. Der sonnenfernere Mars hingegen – heute liegt sein Bahnradius bei rund 1,5 AE – war vom Baumaterial abgeschnitten und entwickelte sich kümmerlich.

Trifft das Wendemodell zu, muss es auch die Zusammensetzung des Asteroidengürtels zwischen Mars und Jupiter erklären können, der die Sonne heute in einem Abstand von etwa zwei bis mehr als drei AE umgibt. In seinem äußeren, sonnenabgewandten Teil dominieren C-Klasse-Asteroiden. Dieser häufigste Asteroidentyp ist durch seine kohlenstoffhaltige Oberfläche gekennzeichnet (C steht für Kohlenstoff). Im inneren Gürtel ist vor allem der S-Klasse-Typ vertreten (S bezeichnet Silikat, den Hauptbestandteil von Gestein).

Diese Verteilung hängt damit zusammen, wie die Planetesimale einst ent-

standen sind. Nahe der Sonne, bis in etwa drei AE Entfernung, der so genannten Schneegrenze, bildeten sie sich wohl vorwiegend aus Silikatgestein. Weiter außerhalb, zwischen Jupiter und Neptun, war es kalt genug, dass auch flüchtige Substanzen kondensierten und sich in den Urkörpern ablagerten. Diese enthielten darum – wie man dies bei den heutigen C-Klasse-Asteroiden vermutet – außer kohlenstoffhaltigen Verbindungen bis zu zehn Prozent Wasser.

Erst einmal fegten die Gasplaneten den Bereich des heutigen Asteroidengürtels bei ihrer Durchreise frei. Dabei schleuderten sie zahlreiche s-artige Körper nach außen, wo sie sich jenseits einer Sonnenentfernung von drei AE in einer Scheibe sammelten. Als auch die Gasriesen selbst diese Region erreichten, schleuderten sie einige der Körper wieder zurück in den Asteroidengürtel. Ähnliches geschah weiter außen erneut; auch von dort gelangte Material in das Gebiet des heutigen Asteroiden-

gürtels. Letztlich sammelten sich, wie die Simulationen zeigen, im inneren Asteroidengürtel tatsächlich vorwiegend die s-artigen Körper und im äußeren die c-artigen.

Auch eine weitere alte Frage der Astronomen könnten die Modelle beantworten: Wie gelangte einst das Wasser auf die Erde? Einer der gängigen Theorien zufolge brachten es einschlagende Asteroiden mit. Tatsächlich belegen die Simulationen, dass die Umlaufbahnen der wasserhaltigen C-Körper jene der wachsenden terrestrischen Planeten kreuzten. »Noch wissen wir nicht, wie viel von dem Wasser der nach und nach auftreffenden Körper auf der Erde verblieb«, so Walsh. »Nach unseren Schätzungen dürfte die Gesamtmenge aber genügen, um alles heute vorhandene irdische Wasser zu erklären.«

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und arbeitet als Wissenschaftsautor in Heidelberg.

ANZEIGE

11. MÜNCHNER WISSENSCHAFTSTAGE 2011

22.–25. Oktober

Wissen für alle

alle Veranstaltungen kostenfrei



Herausforderung Gesundheit!

an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an über 30 weiteren Orten im Großraum München

Marktstände und Vorträge, Führungen und Workshops
spezielles Programm für Schüler und Kinder

Die Gesundheit ist ein merkwürdiges Phänomen. Erst wenn sie uns fehlt, beginnen wir sie richtig zu schätzen. Verschiedenste Berufsgruppen und Institutionen befassen sich damit: Ärzte, Wissenschaftler, Krankenhäuser, Pharmaunternehmen und viele andere. Gerade im Großraum München wird verstärkt auf medizinische Forschung gesetzt.

Rund 20 Vorträge im Audimax, über 35 Marktstände der Wissenschaft, ein spannendes Kinderprogramm und 4 Themenabende, dazu etwa 50 dezentrale Veranstaltungen im Großraum München und verschiedene Schüler- und Lehrerworkshops präsentieren in diesem Jahr die faszinierende Welt der Forschung für unsere Gesundheit. Mehr als 300 Spitzenwissenschaftler und Experten stellen sich Fragen wie: „Isst sich die Menschheit krank?“, „Welche Bedeutung hat die Genforschung für die Medizin?“, „Wann ist Arbeit Auslöser für Burnout?“, „Was leistet die moderne Transplantationsmedizin?“ oder „Ist unsere gesundheitliche Versorgung zu teuer?“ und „Müssen arme Menschen früher sterben?“.



Länderhauptstadt München

Allianz



Bayer Stiftung

bene

Spektrum
muenchen.de

www.muenchner-wissenschaftstage.de

Ursuppe, eiskalt serviert

Bislang konnten nur riesige Teilchenbeschleuniger den heißen Urzustand des Universums simulieren. Innsbrucker Experimentatoren fanden nun eine Alternative: Quantengase nehmen bei minus 273 Grad Celsius Eigenschaften an, die denen des Quark-Gluon-Plasmas verblüffend ähneln.

VON ROBERT GAST

Unmittelbar nach dem Urknall bestand das Universum aus einem unvorstellbar heißen Gemisch von Quarks und Gluonen. Dieses Quark-Gluon-Plasma existierte aber nur Sekundenbruchteile lang. Dann war der explosionsartig expandierende Kosmos so weit abgekühlt, dass sich aus den Teilchen die Kernbausteine formen konnten. Den Gluonen kam dabei die Rolle eines Klebstoffs zu (*to glue*: englisch für kleben): Sie sorgten für eine starke Wechselwirkung zwischen den Quarks, dank derer sich je drei davon zu Neutronen und zu Protonen zusammenfanden. In diesen Kernbausteinen blieben die Quarks schließlich gefangen, denn die Bindung zwischen ihnen wird umso stärker, je mehr man sie voneinander zu entfernen sucht.

Quark-Gluon-Plasmen (QGP) gibt es heute allenfalls noch im Inneren von Neutronensternen. Um sie trotzdem zu erforschen – schließlich können sie uns viel über die Zeit gleich nach dem Urknall verraten –, greifen die Forscher zu einem nahe liegenden Trick: Sie versuchen Temperaturen zu erzeugen, wie sie damals herrschten. Dazu eignen sich Teilchenbeschleuniger, die schwere Atome wie Gold oder Blei mit nahezu Lichtgeschwindigkeit aufeinander schießen. Eine solche Kollision heizt die dabei entstehenden Trümmer auf mehrere Billionen Grad Celsius auf – heiß genug, um die Quarks und Gluonen trotz ihrer engen Bindung für eine winzige Zeitspanne voneinander zu lösen. Das ist sowohl am amerikanischen Schwerionenbeschleuniger RHIC (Rela-

tivistic Heavy Ion Collider in Upton) als auch kürzlich am europäischen LHC (Large Hadron Collider) bei Genf schon gelungen.

Ein raffinierter Kniff

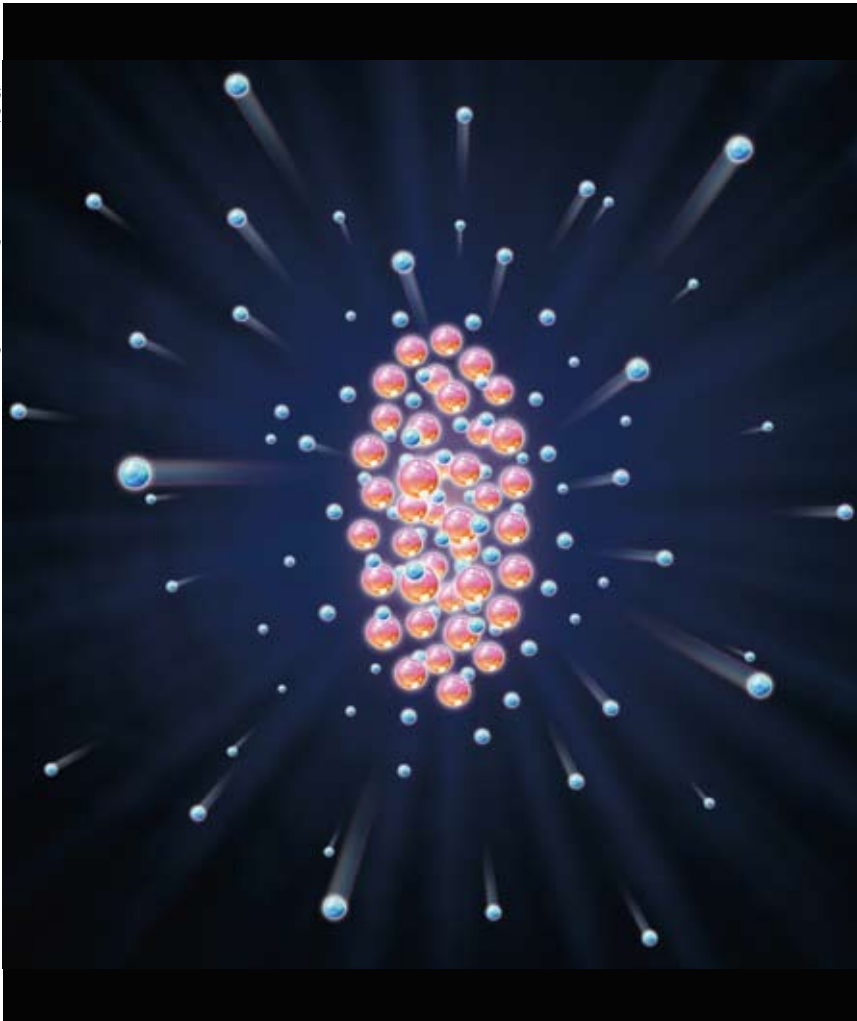
Aber es geht auch anders. Italienische, australische und österreichische Forscher um Rudolf Grimm und Florian Schreck vom Institut für Quantenoptik und Quanteninformation der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Innsbruck zeigten nun, dass womöglich auch der umgekehrte Weg zum Ziel führt (Physical Review Letters 106, S. 115304, 2011). Die Physiker kühlten ein Gasgemisch so weit ab, dass seine Temperatur nur ganz knapp über dem absoluten Nullpunkt lag, also bei minus 273,15 Grad Celsius.

Mit solchen ultrakalten Gasen experimentieren Forscher schon länger. Da die Gasatome bei so tiefen Temperaturen kaum noch Bewegungsenergie besitzen, kann man an ihnen die bizarren Regeln der Quantenwelt studieren. Gluonen sind so genannte Bosonen, Quarks hingegen gehören zu den Fermionen. Das so genannte Pauli-Prinzip besagt nun, dass sich Fermionen in mindestens einer Quantenzahl, zum Beispiel ihrem Eigendrehimpuls, Spin genannt, unterscheiden müssen, um sich am selben Platz aufhalten zu können. Bosonen hingegen zeigen sich durch die Gegenwart identischer Teilchen gänzlich unbeeindruckt.

Bei sehr hohen Temperaturen wie im QGP spielt das Pauli-Prinzip keine Rolle, da für die Fermionen genügend mögliche Energieniveaus zur Verfügung stehen. Dagegen streben bei sehr tiefen Temperaturen sämtliche Teilchen nach demselben, nämlich dem



Um das Verhalten eines Quark-Gluon-Plasmas näherungsweise zu untersuchen, genügt künftig vielleicht ein Laserlabor wie das der Forschergruppe um Rudolf Grimm.



Schwere Kalium-40-Atome (rot in der Illustration) waren in dem Innsbrucker Experiment zunächst von einer Hülle aus Lithium-6-Atomen (blau) umgeben. Als die Forscher das tiefgekühlte Quantengas frei ließen, expandierte es ähnlich einem heißen Quark-Gluon-Plasma.

das die möglichen Energieniveaus der Bindung beeinflusst, können die Forscher diese so genannte Feshbach-Resonanz gezielt herbeiführen.

In ihrem ausgeklügelten Versuchsaufbau kühlten die Forscher das Gasgemisch zunächst stark ab. Für den ersten Kühlungsschritt verwendeten sie eine magnetooptische Falle aus drei Laserpaaren, die jeweils ihr Licht in gegenläufiger Richtung aussenden. So schubsten die aus allen drei Raumdimensionen eintreffenden Photonen die Atome immer wieder in die Mitte der Falle. Dadurch wurden sie abgebremst, also gekühlt. Ihre Temperatur lag nun bei 300 millionstel Grad. In einem zweiten Schritt, der Verdampfungskühlung, hielten sie die Atome in einem infraroten Laserstrahl gefangen. Dieser wurde so eingestellt, dass die »heißesten« Atome jeweils doch entkommen konnten. So kühlten sie das Ensemble schließlich auf 0,05 millionstel Grad über dem Temperaturnullpunkt ab. Daneben verhinderte ein magnetisches Dipolfeld, dass die Atome in anderen Richtungen aus der Falle entkommen konnten.

Ein weiteres Magnetfeld beeinflusste die Energiezustände der Atome so, dass es deren Paarbildung zunächst verhinderte. Die Teilchen zogen sich also nicht paarweise stark an. Sobald die Messung begann, stellten die Forscher das Magnetfeld aber genau auf eine Feshbach-Resonanz ein, so dass die Gasatome auf einmal stark wechselwirkten. Gleichzeitig deaktivierten sie die Atomfalle und ließen die Wolke frei.

Eingesperrt besaß das ultrakalte Gasgemisch die Form einer Zigarre. Die schweren Kalium-40-Atome klumpten in der Mitte der lang gezogenen Wolke zusammen, während die Lithium-6-Atome eine Hülle darum formten. Freigelassen verformte sich das elliptische

niedrigsten Energieniveau. Nahe dem Temperaturnullpunkt fallen Bosonen daher einfach in genau den Quantenzustand, in dem schon zehntausende identischer Teilchen sitzen. Für Fermionen ist dies jedoch unmöglich.

Auf den ersten Blick scheinen kalte Quantengase daher eher ungeeignet, um etwas über das Quark-Gluon-Plasma zu lernen: In Ersteren gehen sich die fermionischen Teilchen ständig aus dem Weg, während sie im QGP dank der Gluonen eine starke Wechselwirkung erfahren und darum auch häufig miteinander kollidieren. Mit einem Kniff machten die Innsbrucker ihre kalten Gase dem QGP ähnlicher: »Wir nehmen einfach zwei verschiedene Fermionenspezies, beispielsweise Kalium- und Lithiumatome«, erklärt Florian Schreck. »Vertreter unterschiedlicher fermionischer Atomsorten können sehr wohl miteinander zusammenstoßen.«

Zwar lassen sich auch Atome derselben Sorte derart manipulieren, dass sie unterschiedliche Quantenzustände aufweisen. So aber bestand das untersuchte Gemisch aus Teilchen unterschiedlicher Massen und war dem QGP dadurch ähnlicher, weil auch Quarks unterschiedliche Massen besitzen.

Per Resonanz zum Urknallplasma

In ihrem Experiment wollten die Wissenschaftler zugleich die extrem starken Wechselwirkungen des Quark-Gluon-Plasmas simulieren. Dafür nutzten sie einen weiteren quantenmechanischen Effekt aus. Begegnen sich zwei Stoßpartner mit einer Energie, die genau der ihres gebundenen Zustands entspricht, kommt es tatsächlich zu einer starken Wechselwirkung: Sie ziehen sich gegenseitig an und bilden häufig ein Paar. Mit Hilfe eines Magnetfelds,

Lehren aus Fukushima

Endlagerung bleibt die eigentliche Achillesferse der Kerntechnik.

Vor gut einem halben Jahr ereignete sich der katastrophale Nuklearunfall von Fukushima. Unter dem Eindruck des Ereignisses beschlossen in Deutschland Regierung und Bundestag den beschleunigten Ausstieg aus der Kernenergie. Den Ausschlag für die »Energiewende« gaben weniger betriebstechnische Argumente als ein politischer Stimmungsumschwung: Es herrschte allgemeines Erschrecken über das Ausmaß der Katastrophe und über die Hilflosigkeit der Gegenmaßnahmen in einem hochtechnischen Industrieland.

Kein Wunder, dass sich in der Fachwelt bald Kritik am deutschen Ausstieg regte: Die Verhältnisse, unter denen ein Erdbeben der Stärke 9 und ein vernichtender Tsunami auf einen Schlag sämtliche Kühlsysteme lahmgelegt hatten, seien nie und nimmer auf Deutschland übertragbar. Um die Betriebssicherheit heimischer Anlagen stünde es nach Fukushima keinen Deut schlechter als vorher. »Es gibt somit keinen sicherheitstechnischen Grund, deutsche Kernkraftwerke vorzeitig abzuschalten«, schrieben vier ausgewiesene Experten für Reaktorsicherheit in der Augustnummer dieser Zeitschrift.

Das trifft zu – solange man den Blick nur auf Aspekte der technischen Betriebssicherheit richtet und vom menschlichen Faktor absieht, der in der Vergangenheit zu den Unfällen von Three Mile Island und Tschernobyl geführt hat und in Zukunft Kernkraftwerke zum Ziel von Terrorakten machen könnte. Jedenfalls gilt: Rein betriebstechnisch betrachtet geben deutsche Reaktoren mit ihrer mehrfach redundanten Systemausstattung nach wie vor keinen Anlass zu Befürchtungen.

Dennoch sind aus dem japanischen Desaster mehrere Lehren zu ziehen, auf deren Bedeutung nun Allison Macfarlane von der George Mason University in Fairfax (Virginia) hinweist (Science 333, S. 1225–1226). Die Geologin gehört der Expertenkommission des US-Energieministeriums »über Amerikas nukleare Zukunft« an.

Zum Risiko der Kerntechnik trägt nach ihrer Bewertung entscheidend bei, dass die verbrauchten Brennelemente direkt neben den Kraftwerken dicht gepackt in Abklingbecken und Zwischenlagern aufbewahrt werden. Zur bislang im Einzelnen ungeklärten Explosion im Block 4 von Fukushima, der gar nicht in Betrieb war, kam es offenbar, weil die dort unter Kühlwasser gebunkerten hochradioaktiven Brennstäbe trocken fielen. In aller Welt sind solche Zwischenlager zum Bersten gefüllt, weil es noch nirgends eine akzeptable Lösung für das Endlagerproblem gibt.

Macfarlane zieht deshalb drei Lehren aus Fukushima. Erstens muss die Zwischenlagerung abgebrannter Elemente als separates Sicherheitsproblem erkannt und neu überdacht werden. Zweitens darf es kein Atomprogramm ohne langfristig geplante Endlagerung geben. Und drittens gilt es zu berücksichtigen, dass die tektonischen Verschiebungen, die zu Erdbeben und Tsunamis führen, noch längst nicht so gut verstanden sind, dass man von Geologen präzise Prognosen erwarten darf. »Die Plattentektonik«, so Macfarlane, »ist eine relativ junge Wissenschaft.«

Der deutsche Atomausstieg wäre in der Tat schlecht begründet, wenn es nur darum ginge, dass nach Stimmungen und Stimmen witternde Politiker aus einer Naturkatastrophe in Japan plötzlich ein drastisch erhöhtes Unfallrisiko bei deutschen Kraftwerken herleiten wollten. Dennoch ist der Ausstieg richtig – eben wegen des ungelösten Endlagerproblems. Was ist das für eine Technik, die Abfälle erzeugt, welche über geologische Zeiträume hinweg lebensgefährlich bleiben, ohne dass sie zuvor für deren geologisch sichere Unterbringung zu sorgen vermag?



Michael Springer

Ensemble innerhalb weniger Millisekunden zu einer um 90 Grad gedrehten Ellipse. »In Längsrichtung der Zigarre sind die Kaliumatome nicht gut vorangekommen. In Querrichtung befanden sich dagegen weniger Lithiumatome, so dass sich die Wolke in dieser Richtung verformte«, erläutert Schreck. »Ohne starke Anziehung zwischen den Atomspezies wäre die Gaswolke nach kurzer Zeit einfach rund. So aber besitzt sie am Ende die umgekehrte Ellipsität.«

»Höllisch schwierige« Berechnungen

Dieses so genannte hydrodynamische Verhalten des ultrakalten Gemischs gleicht tatsächlich eher dem einer Flüssigkeit als dem eines Gases und ist – bei Energien, die um 20 Größenordnungen höher lagen – auch schon in QGP-Experimenten am RHIC und am LHC nachgewiesen worden. Und noch ein weiteres Indiz weist in Richtung Ursuppe: »In einem normalen Gasgemisch würden die Lithiumatome wegen ihrer geringeren Masse deutlich schneller expandieren als das trägere Kalium«, sagt Schreck. »Wir haben aber beobachtet, dass sich beide Atomsorten gleich schnell ausbreiten.« Die Lithiumatome ziehen beim Wegfliegen das träge Kalium gewissermaßen mit – auch dies untypisch für ein Gas.

Die Untersuchung des QGP ist indes nur ein möglicher Anwendungsfall des Verfahrens von vielen. Das Ergebnis der Innsbrucker Forscher weist ganz offensichtlich einen neuen Weg zum Studium von Vielteilchensystemen. »Stark wechselwirkende Umgebungen, in denen sich zig Teilchen alle gegenseitig beeinflussen, gehören zu den fundamentalen Zuständen der Natur«, sagt Schreck. »Aber es ist höllisch schwierig, ihr Verhalten zu berechnen.« Ultrakalte Fermigase bieten nun die vergleichsweise einfache Möglichkeit, an experimentelle Daten zu kommen – auch über jenen extremen Materiezustand, in dem sich das Universum direkt nach seiner Geburt befand.

Robert Gast ist Diplomphysiker und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Exklusives Angebot

Wirtschafts
Woche

4 x WirtschaftsWoche für nur 11,80 € plus Geschenk.



Bergmann popcube

Retro-UKW-Radio im Kompaktformat. Mit digitalem Sendersuchlauf und Direct-Dock-in für fast alle gängigen MP3-Player. Farbe: hochglanz weiß. Lieferung ohne iPod.



...oder

CERRUTI Rollerball

Einzigartigen Schreibkomfort bietet dieser Rollerball aus der CERRUTI-Manufaktur. Mit auswechselbarer, schwarz schreibender Mine.



5 gute Gründe die WirtschaftsWoche zu lesen:

- ✓ **Früher wissen, was wichtig wird:**
Die WirtschaftsWoche informiert Sie vor allen Anderen über die entscheidenden Themen der Wirtschaft.
- ✓ **Lesen mit Preisvorteil:**
Im Vorteilsabonnement sparen Sie 35%.
- ✓ **Profitieren schon zum Start:**
Wir belohnen Ihr Vertrauen mit einem Geschenk Ihrer Wahl.
- ✓ **Genießen am Wochenende:**
Sie erhalten die WirtschaftsWoche bereits am Samstag – 48 Stunden vor Erscheinen im Handel.
- ✓ **Informiert auch unterwegs:**
Zusätzlich zum Abonnement nutzen Sie das E-Magazin gratis.

Jetzt direkt bestellen unter:
Tel. 018 05/99 00 20* oder
www.wiwo.de/4-hefte

*14 Ct./Min. aus dem dt. Festnetz; Mobilfunkhöchstpreis 42 Ct./Min.)

Ja, ich lese 4 Ausgaben der WirtschaftsWoche für nur 11,80 € mit 35% Ersparnis. Als Geschenk wähle ich:

- Bergmann popcube (W20374CW)
 CERRUTI Rollerball (W20374CR)

Geschäftsadresse
 Privatadresse

Name, Vorname

Firma Abteilung

Straße/Hausnr. Geburtstag Geburtsjahr

PLZ Wohnort

Mit der Angabe meiner Telefonnummer und E-Mail-Adresse erkläre ich mich damit einverstanden, dass mich die Handelsblatt-Gruppe über interessante Produkte per E-Mail/telefonisch informiert.

Telefon E-Mail

Ich zahle bequem und bargeldlos per Bankeinzug (nur im Inland):

Name der Bank

Konto-Nr. BLZ

Wenn mich Ihr Angebot überzeugt, kann ich die WirtschaftsWoche danach für z. Zt. nur 4,04 EUR statt 4,50 EUR pro Heft (Inland) lesen. Andernfalls sende ich Ihnen nach Erhalt der 2. Ausgabe eine kurze Nachricht. Ein gesetzliches Widerrufsrecht besteht nicht.

Widerspruchsbelehrung: Sie können der Verarbeitung oder Nutzung Ihrer Daten für Zwecke der Werbung oder der Markterforschung beim Kundenservice WirtschaftsWoche, Postfach 9245, 97092 Würzburg, Tel. 0 18 05 / 99 00 20 (14 Ct./Min. a. d. dt. Festnetz; Mobilfunkhöchstpreis 42 Ct./Min.), E-Mail: vertriebsservice@wiwo.de (verantwortliche Stelle i.S.d. BDSG) widersprechen.



Datum, Unterschrift

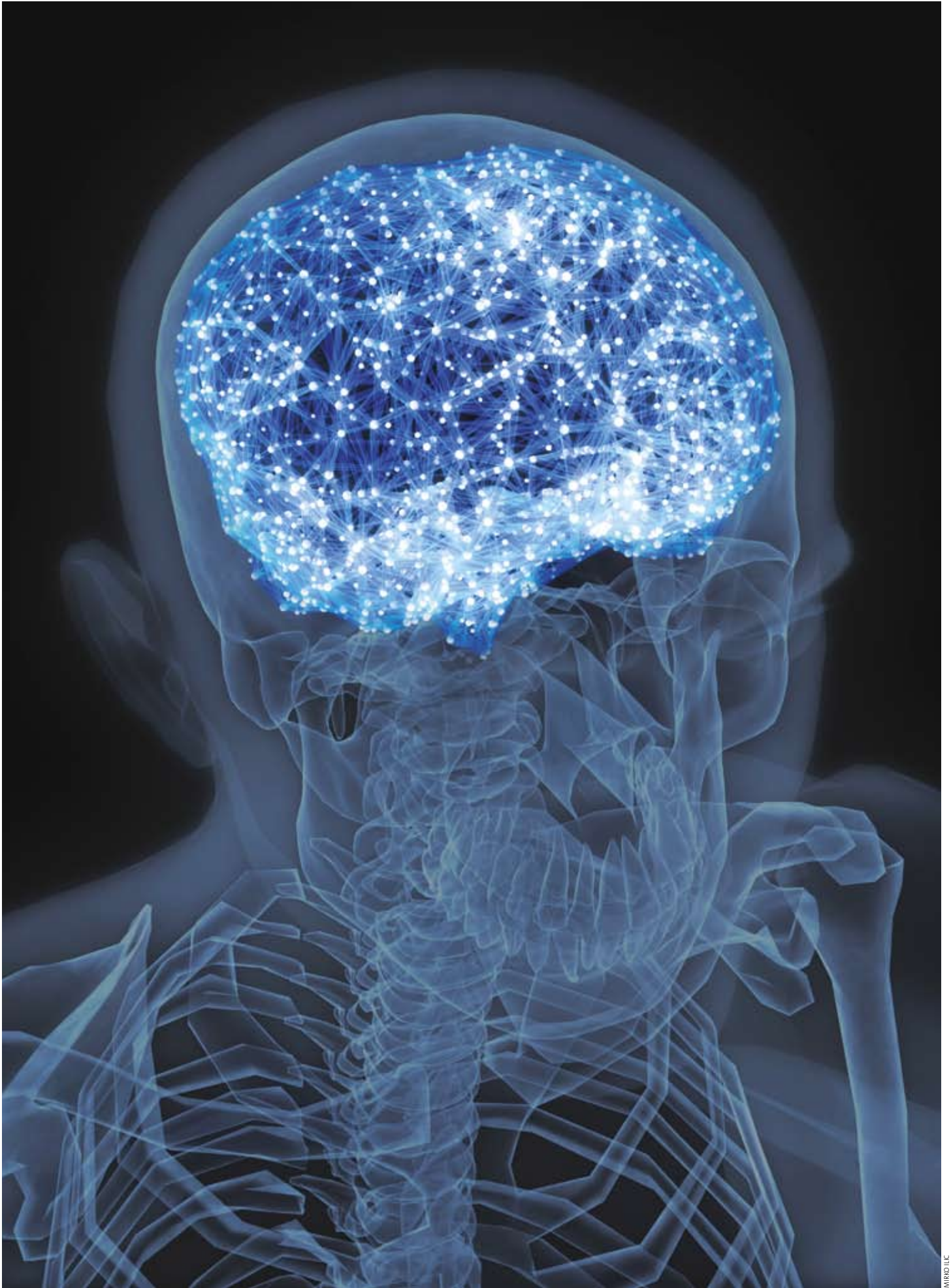
Tel 0 18 05 / 99 00 20
(14 Ct./Min. aus dem dt. Festnetz;
Mobilfunkhöchstpreis 42 Ct./Min.)

Fax 0211 / 8 87-36 47

www.wiwo.de/4-hefte

Post Kundenservice WirtschaftsWoche, 97061 Würzburg

Jetzt bestellen und Geschenk sichern!



TITELTHEMA: NEUROWISSENSCHAFTEN

Das Gehirn als Netzwerk

Wenn Milliarden von Gehirnzellen miteinander kommunizieren, erzeugen sie Erregungsmuster, die ein Schlüssel zum Verständnis des menschlichen Geistes sein könnten. Ihre Analyse offenbart verblüffende Parallelen zwischen unserem Denkorgan und anderen komplexen Systemen – beispielsweise Aktienmärkten!

Von Carl Zimmer

Ein einsames Neuron in einer Petrischale ist ziemlich nutzlos. Von Zeit zu Zeit erzeugt es spontan einen elektrischen Spannungspuls, der an seinem Axon, einem langen, faserartigen Fortsatz, entlangläuft. Reizt man seinen Zellkörper mit schwachen Stromstößen, feuert es Salven solcher Pulse ab. Durch Zugabe verschiedener Neurotransmitter lassen sich Stärke und Häufigkeit der elektrischen Signale verändern. Doch das ist auch schon alles. Sonst kann die Nervenzelle nicht viel tun und vor allem keine sinnvolle Funktion ausüben.

Ganz anders die Situation, wenn man Neurone miteinander kombiniert. Nur 302 Nervenzellen, geeignet verschaltet, ergeben bereits das vollständige Nervensystem des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*. Und das kann schon eine ganze Menge: Es registriert Umweltreize, trifft Entscheidungen und steuert die Körperfunktionen des Nematoden. 100 Milliarden Nervenzellen, vernetzt über 100 Billionen Verknüpfungen, bilden schließlich das menschliche Gehirn, dessen Leistungsfähigkeit schier unermesslich scheint.

Wie dieses hochkomplexe Gewebe von Neuronen unseren Geist hervorbringt, ist freilich immer noch ein großes Rätsel. Bei dessen Lösung sind die Neurowissenschaftler, ungeachtet ihrer sonstigen Erfolge, bisher nicht weit gekommen. Vielleicht liegt das ja an ihrem begrenzten Blickwinkel. Einige von ihnen schauen ganz genau hin und widmen ihr gesamtes Forscherleben der Funktionsweise einiger weniger Nervenzellen. Andere wählen einen etwas größeren Ausschnitt und erforschen zum Beispiel, wie der Hippocampus, eine Ansammlung aus mehreren Millionen Neuronen, Gedächtnisinhalte abspeichert. Wieder andere gehen noch eine Ebene höher: Sie untersuchen, welche Hirnregionen bei bestimmten Funktionen aktiv werden – sei es beim Lesen oder Sichfürchten.

Bisher haben jedoch nur wenige Forscher gewagt, der Gehirnfunktion auf mehreren Ebenen gleichzeitig nachzuspüren. Das ist verständlich, bedenkt man das schiere Ausmaß der Aufgabe. Schon die Interaktionen weniger Nervenzellen erzeugen ein kaum überschaubares Geflecht von Rückkopplungen. Bei 100 Milliarden Neuronen wird das Unterfangen zu einem Problem von albraumhafter Komplexität.

Dennoch halten einige Neurowissenschaftler die Zeit für gekommen, diese Herausforderung anzunehmen. Ihrer Ansicht nach werden wir nie verstehen, wie das Gehirn den menschlichen Geist hervorbringt, solange wir seine Komponenten auf verschiedenen Größenmaßstäben separat untersuchen. Diese Vorgehensweise gleiche dem Versuch, herauszufinden, was beim Gefrieren von Wasser geschieht, indem man entweder nur einzelne Wassermoleküle unter die Lupe nimmt oder aber die Flüssigkeit als Ganzes betrachtet. Beide Blickwinkel sind zu eingeschränkt, um den entscheidenden Vorgang zu erfassen: wie sich Wassermoleküle durch Wechselwirkung miteinander zu Kristallen zusammenlagern.

Beim ganzheitlichen Blick auf das Gehirn können sich Neurowissenschaftler von anderen Fachgebieten inspirieren las-

AUF EINEN BLICK

100 BILLIARDEN VERKNÜPFUNGEN

1 Ein **einzelnes Neuron** hat für sich genommen kaum eine sinnvolle Funktion. Vernetzt man jedoch einige hundert, entsteht ein **einfaches Nervensystem**, das bereits ausreicht, um die Lebensfunktionen eines Wurms zu steuern.

2 Höhere Organismen benötigen mehr Neurone. Eines der großen ungelösten **Rätsel der Neurobiologie** ist die Frage, wie das **menschliche Gehirn** mit seinen rund 100 Milliarden Neuronen und deren 100 Billionen Verknüpfungen den **Geist hervorbringt**.

3 Einige Neurowissenschaftler fassen unser Denkorgan primär als Netzwerk auf, das aus **interagierenden Systemen** miteinander **verschalteter Nervenzellen** besteht. Seine Konfiguration ist auf **maximale Effizienz** zugeschnitten: schnellstmögliche Informationsverarbeitung bei minimalem Aufwand.

4 In Aufbau und Funktion ähnelt das Gehirn anderen komplexen **kybernetischen Systemen**. Deshalb haben Mathematiker begonnen, es mit dem Instrumentarium der **Komplexitätstheorie** zu analysieren. Dabei entdeckten sie unter anderem überraschende **Ähnlichkeiten mit Aktienmärkten**.

5 Eine tieferes Verständnis der **Netzwerkstruktur** des menschlichen Gehirns hätte auch praktische Bedeutung. So könnte es dazu beitragen, die körperlichen **Ursachen neuropsychiatrischer Erkrankungen** wie Schizophrenie oder Depression zu finden.

Das virtuelle Gehirn

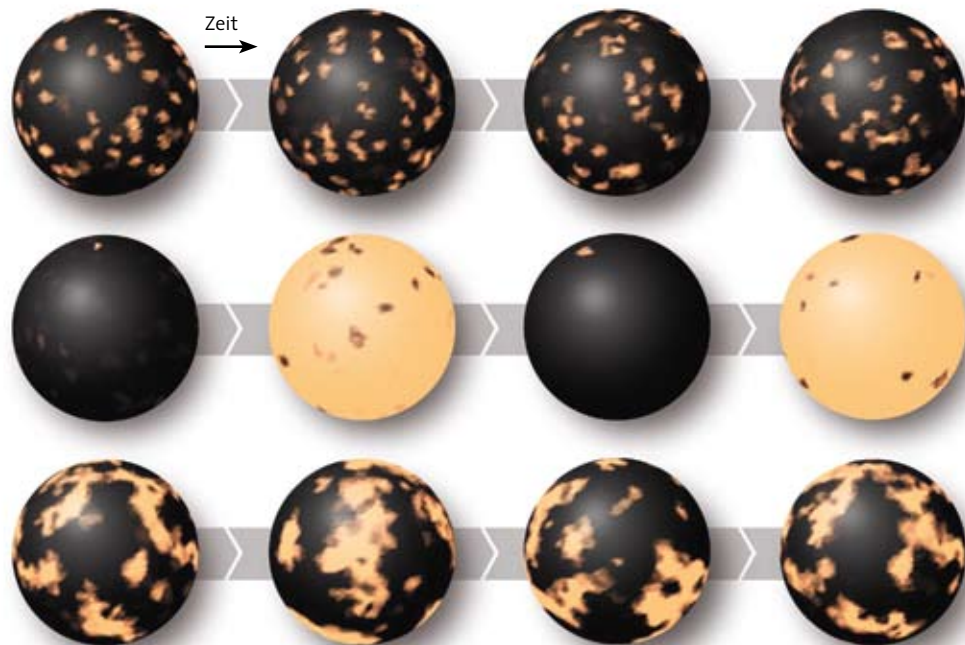
Olaf Sporns und seine Kollegen von der Indiana University in Bloomington haben ein einfaches Computermodell des Gehirns entwickelt, indem sie 1600 virtuelle Neurone auf einer Kugeloberfläche anordneten und probeweise auf drei verschiedene Arten miteinander vernetzten. In der Simulation senden

manche Nervenzellen spontan elektrische Impulse aus und regen andere damit zum Feuern an (gelb), während der Rest inaktiv bleibt (schwarz). Die Forscher untersuchten, wie die Konfiguration des Neuronennetzes die räumlich-zeitlichen Muster der neuronalen Aktivität im Modellgehirn beeinflusst.

Sind die Neurone ausschließlich mit ihren unmittelbaren Nachbarn verbunden, bringt das Netzwerk nur ein zufällig verteiltes punktuelltes Aufblackern von Aktivität hervor.

Wenn jedes Neuron mit jedem anderen vernetzt ist, wechselt das virtuelle Gehirn zwischen zwei Zuständen hin und her, bei denen fast alle Zellen gleichzeitig aktiv oder inaktiv sind.

Eine Mischung aus Verbindungen kurzer und langer Reichweite ergibt einen Zustand mittelstarker, unvorhersagbarer, aber nicht zufälliger Aktivität wie in einem echten Gehirn.



OLAF SPORNS, INDIANA UNIVERSITY

sen. Seit Jahrzehnten schon untersuchen Forscher die unterschiedlichsten komplexen Systeme – von Aktienmärkten über Verschaltungen im Computer bis hin zu den interagierenden Genen und Proteinen einzelner Zellen. Neurone und Aktien scheinen zunächst nicht viel gemeinsam zu haben. Dennoch haben Wissenschaftler in allen untersuchten komplexen Systemen grundlegende Parallelen entdeckt und zu ihrer Analyse ein mathematisches Instrumentarium entwickelt, das sich auch dazu nutzen lässt, die extrem komplizierte Funktionsweise unseres Denkkorgans aufzuklären.

Experimente mit Minigehirnen im Computer

Noch stehen die Hirnforscher dabei am Anfang, doch können sie schon erste viel versprechende Ergebnisse vorweisen. So haben sie die Regeln erkannt, nach denen sich Milliarden Neurone in Teilnetzen zusammenschließen, die zu jenem Ganzen verknüpft sind, das wir Gehirn nennen. Wie sich zeigte, ist die Organisation dieses riesigen Netzwerks entscheidend für unsere Fähigkeit, angemessen auf immer neue Situationen in einer sich stets wandelnden Welt zu reagieren. Störungen in seinem inneren Gefüge könnten neuropsychiatrische Erkrankungen wie Schizophrenie oder Demenz verursachen.

Neurone bilden Netzwerke, indem sie über ihren langen Ausläufer, das Axon, Kontakt miteinander aufnehmen. So

vermögen sie Signale an andere Nervenzellen zu senden und diese zu erregen oder zu hemmen. Da jedes einzelne Neuron mit bis zu mehreren tausend weiteren verknüpft ist – sowohl in der unmittelbaren Umgebung als auch in weiter entfernten Hirnregionen –, können die Neuronennetze eine unüberschaubare Anzahl verschiedener Konfigurationen annehmen. Ihr Organisationsmuster in einem individuellen Gehirn hat großen Einfluss auf dessen Leistungsfähigkeit.

Wie lassen sich solche hochkomplexen Netzwerke näher untersuchen? Mit welchen Methoden könnten Wissenschaftler die Milliarden von Verbindungen darin ausfindig machen und ihre jeweilige Rolle im Funktionsgefüge aufklären? Ein radikalerer Ansatz ist, einfach ein Miniaturmodell des Gehirns zu konstruieren. Damit lässt sich untersuchen, wie Neuronennetze reagieren, deren Neurone auf verschiedene Weise verknüpft sind. Olaf Sporns und seine Kollegen von der Indiana University in Bloomington haben ein solches Modell im Computer entwickelt. Sie verteilten 1600 simulierte Nervenzellen auf der Oberfläche einer virtuellen Kugel. Dann vernetzten sie jedes mit einigen anderen.

Neurone neigen dazu, spontan elektrische Impulse auszusenden. Dadurch können sie manchmal weitere Neurone, zu denen sie Kontakt haben, ebenfalls zum Feuern anregen. Sporns und seine Kollegen variierten das Verknüpfungsmus-

ter zwischen den Nervenzellen und beobachteten, wie sich das auf die Aktivität ihres Modellgehirns auswirkte. Zunächst verbanden sie die Neurone jeweils nur mit den unmittelbaren Nachbarn. Ein derart vernetztes »Gehirn« zeigte ein schwaches, zufällig verteiltes Flackern. Ein spontan feuernes Neuron regte zwar manchmal in der Umgebung eine Aktivitätswelle an, doch die breitete sich nicht besonders weit aus. Als Nächstes verknüpften Sporns und sein Team sämtliche Nervenzellen im gesamten Modell direkt miteinander. Nun entstand ein ganz anderes Erregungsmuster: Das Gehirn schaltete sich in regelmäßigen Abständen komplett ein und aus.

Schließlich sorgten die Forscher für eine heterogene Netzwerkstruktur, in der teils benachbarte und teils weit voneinander entfernt liegende Neurone miteinander verbunden waren. Unter diesen Umständen entstanden plötzlich komplexe Aktivitätsmuster. Sobald Nervenzellen zu feuern begannen, bildeten sich großflächige Aktivitätszonen, die das Netz wellenartig durchfluteten. Einige trafen aufeinander und verschmolzen, andere waberten ungehindert in kreisförmigen Bewegungen durch das simulierte Gehirn.

Simulation neuronaler Lawinen

Diese Resultate machen deutlich, dass die Architektur eines Netzwerks sein Aktivitätsmuster bestimmt. Damit geben sie wichtige Hinweise auf die Entstehung neuronaler Komplexität. Weitergehende Erkenntnisse lassen sich jedoch nur gewinnen, wenn es gelingt, die Muster im Modell mit denen in echten Gehirnen zu vergleichen. Leider ist es noch nicht möglich, jedes der 100 Milliarden Neurone unseres Denkkorgans einzeln zu erfassen. Daher nutzen Wissenschaftler ausgeklügelte Verfahren, um die Aktivität relativ weniger Nervenzellen detailliert zu messen, und versuchen, aus den erhaltenen Mustern Rückschlüsse auf das Gesamtsystem zu ziehen.

Einer von ihnen ist Dietmar Plenz, Neurowissenschaftler am National Institute of Mental Health in Bethesda (Maryland). Um die Architektur des Gehirns zu entschlüsseln, kultivieren er und seine Kollegen Hirngewebestückchen in der Größe von Sesamkörnern in Petrischalen. Mit 64 Elektroden, die sie in die Gewebeprobe hineinstecken, registrieren sie dann das spontane Feuern der Neurone. Was sie dabei aufzeichnen, sind so genannte neuronale Lawinen: Salven schnell aufeinander folgender elektrischer Entladungen.

Auf den ersten Blick scheint es so, als handle es sich um ein Zufallsmuster. In diesem Fall müssten jedoch winzige und weiträumige neuronale Lawinen gleich häufig auftreten. Das ist aber nicht der Fall. Plenz und seine Kollegen beobachteten kleine Exemplare viel öfter als große. Zeichnet man die Größenverteilung der Lawinen in einem Diagramm auf, ergibt sich eine glatte, abfallende Kurve.

Wissenschaftler kennen diesen Kurvenverlauf aus anderen Zusammenhängen. Zum Beispiel sind die Abstände zwischen

den Herzschlägen nicht gleich, sondern streuen um einen Mittelwert. Dabei kommen kleine Abweichungen von der durchschnittlichen Dauer – ein wenig kürzer oder länger – öfter vor als große. Erdbeben folgen dem gleichen Muster: Schwache Erschütterungen treten viel häufiger auf als starke. Auch bei einer Epidemie gibt es auf dem Höhepunkt weitaus die meisten Neuerkrankungen. Die Fallzahlen davor und danach verringern sich mit der zeitlichen Distanz. Das ergibt eine Verteilung in Form einer Glockenkurve, die beiderseits des Mittelwerts exponentiell abfällt. Dasselbe gilt für die Abstände zwischen den Herzschlägen – und für Erdbeben, wobei hier allerdings nur eine der beiden symmetrischen Kurvenhälften vorliegt.

Dieser allgemeine Kurvenverlauf, dem ein mathematisches Potenzgesetz zu Grunde liegt, ist ein Merkmal komplexer Netzwerke, die Verbindungen über kurze und weite Distanzen enthalten. Die konkrete Form der Verteilungskurve erlaubt dabei Rückschlüsse auf das genaue Verknüpfungsmuster.

Plenz und seine Kollegen testeten verschieden konfigurierte Modellnetze im Computer, um herauszufinden, welche davon eine ähnliche Verteilung neuronaler Lawinen erzeugte wie lebendes Hirngewebe. Die beste Übereinstimmung ergab eine Architektur mit 60 Neuronengruppen, deren Mitglieder alle direkten Kontakt zueinander hatten. Jeder solche »Cluster« war im Durchschnitt mit zehn weiteren verknüpft. Doch dieser Wert schwankte stark: Einige Cluster waren mit vielen anderen verbunden, die meisten aber nur mit sehr wenigen. Wissenschaftler bezeichnen das als Kleine-Welt-Netzwerk. Seine Architektur hat zur Folge, dass eine Erregungswelle zwar überwiegend auf den Ursprungscluster beschränkt bleibt, aber über wenige Zwischenstationen auf jeden beliebigen anderen überschwappen kann.

Wie sich herausstellte, versetzt genau diese Konfiguration unser Gehirn in die Lage, auf Signale unterschiedlichster Stärke mit der angemessenen Empfindlichkeit anzusprechen – ähnlich wie ein leistungsfähiges Mikrofon fast unhörbar leise und extrem laute Töne gleichermaßen gut erfasst. Plenz und sein Team verabreichten ihren Gewebeprobe Stromstöße verschiedener Stärke und beobachteten die Reaktion der Neurone. Das Ergebnis: Schwache elektrische Reize ließen nur wenige Nervenzellen feuern, starke erregten dagegen einen großen Teil von ihnen.

Um zu sehen, wie die Eigenschaften des Netzwerks die Reaktion beeinflussten, behandelten Plenz und seine Kollegen die Gewebeprobe anschließend mit einem Wirkstoff, der die Aktivierbarkeit der Neurone herabsetzte. Das beeinträchtigte die Verbindung zwischen ihnen. Unter diesen Umständen reagierten die Neuronennetze nicht mehr auf schwache Reize. Gaben die Wissenschaftler jedoch einen Wirkstoff zu, der die Feuerbereitschaft der Nervenzellen erhöhte, so lösten selbst leichte Stromstöße dieselbe heftige Reaktion aus wie

Interagieren Milliarden von Neuronen, entstehen hoch- komplexe Sys- teme mit einer Vielzahl von Rückkopplungen

starke. Diese Experimente verdeutlichen, wie genau Neuronennetze eingestellt sein müssen; erst diese Feinabstimmung befähigt sie, Signale adäquat zu verarbeiten. Bei nur geringfügig anderer Konfiguration wäre die Reaktion der Neurone inkohärent und damit sinnlos.

Doch spiegeln die Vorgänge in der Gewebekultur auch die Arbeitsweise des realen Gehirns wider? Tatsächlich treten dort Muster spontaner Aktivität ähnlich denen auf, die Plenz in seinen »Minihirnen« beobachtete. Marcus E. Raichle von der Washington University in St. Louis (Missouri) und seine Mitarbeiter fanden heraus, dass sich auch dann, wenn wir uns gerade entspannt zurücklehnen und an nichts Besonderes denken, Wellen elektrochemischer Aktivität in komplexen Arrangements über das gesamte Gehirn ausbreiten. Neueren Untersuchungen zufolge spielt diese Spontanaktivität eine wesentliche Rolle für unsere geistige Gesundheit. Vielleicht ermöglicht sie dem ruhenden Geist, sich mit sich selbst zu beschäftigen, Erinnerungen zu verarbeiten und sein neuronales Gleichgewicht zu bewahren.

Im Visier: der Schaltplan des Gehirns

Um mehr über diese Spontanaktivität zu erfahren, verfolgen Neurowissenschaftler inzwischen das Ziel, die Verbindungen zwischen Neuronen im gesamten Gehirn zu kartieren. Das ist eine enorme Herausforderung, wenn man bedenkt, welchen Aufwand Plenz und seine Kollegen schon bei der Untersuchung winzig kleiner Gewebestückchen treiben mussten. Olaf Sporns leitet eines der ambitioniertesten Projekte zur Kartierung des Gehirns. Gemeinsam mit Patric Hagmann und dessen Neuroimaging-Gruppe an der Universität de Lausanne (Schweiz) analysierte er Anfang des vergangenen Jahrzehnts Daten, die mittels Diffusions-Tensor-Bildgebung an den Gehirnen von fünf Probanden gewonnen wurden. Mit dieser Methode, einer anspruchsvollen Variante der Magnetresonanztomografie (MRT), lässt sich der Verlauf der neuronalen Axone im Gehirn sichtbar machen (Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 13). Diese sind meist zu Fasern gebündelt, die verschiedene Regionen der Hirnrinde (Kortex) miteinander verbinden. Von einer dünnen, fettstoffreichen Myelinschicht umhüllt, bilden sie die so genannte weiße Substanz des Gehirns. Die Wissenschaftler wählten annähernd 1000 Kortexregionen aus und kartierten sämtliche Faserstränge zwischen ihnen.

Dann bildeten sie diese 1000 Regionen mit all ihren Verbindungen im Computer nach und begannen damit zu experimentieren, um zu sehen, welche Aktivitätsmuster entstanden. Jedes Areal erzeugte Signale, die sich in Regionen fortpflanzten, die mit ihm verknüpft waren, so dass die Neurone dort ebenfalls feuerten. Das virtuelle Modell zeigte, wenn man es länger laufen ließ, eine wellenförmig fluktuierende Aktivität, die den Mustern glich, welche Raichle und andere Forscher bei ruhenden Menschen beobachtet hatten.

Ein mathematisches Modell des Aktienmarkts taugt auch zur Simulation der Aktivitäten im Gehirn

Was Sporns und seine Kollegen im kompletten Gehirn kartierten, ähnelt in seiner Konfiguration dem Kleinen-Welt-Netzwerk, das Plenz in seinen Gewebestückchen entdeckt hatte. Es entspricht aber auch der schon seit Langem bekannten Organisation des menschlichen Kortex, die in der berühmten Homunkulus-Darstellung zum Ausdruck kommt. Demnach ist die Hirnrinde in Regionen unterteilt, die jeweils die Verarbeitung von Reizen aus einem bestimmten Körperteil oder Sinnesorgan übernehmen. Ihre Neurone müssen dazu intensiv miteinander kommunizieren, wobei räumliche Nähe ein großer Vorteil ist: Sie sorgt für einen raschen, reibungslosen Informationsfluss über kurze, direkte Verbindungen. Das Ergebnis der Verarbeitung gelangt dann über lange Leitungen, die für eine hohe Übertragungsgeschwindigkeit entsprechend dicker sein müssen, an andere Regionen zur Weiterverarbeitung.

Insofern verhilft die Architektur mit wenigen stark vernetzten Hauptknotenpunkten unserem Gehirn also zu größtmöglicher Effizienz, das heißt maximaler Arbeitsgeschwindigkeit bei geringstem Aufwand. Das gilt gleichermaßen für den Platz- wie den Energiebedarf. Wären alle Neurone auch über weite Entfernungen direkt miteinander vernetzt, würde das Gehirn ein viel größeres Volumen beanspruchen. Außerdem verbrauchen Aufbau und Erhalt der Axonverbindungen eine Menge Energie. Für die Konfiguration mit wenigen hochvernetzten Verteilerzentren wird dagegen nicht allzu viel weiße Substanz benötigt. Und da die Signale bei der Übermittlung von einer Hirnregion zur anderen nur wenige Zwischenstationen durchlaufen müssen, ist die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung zugleich sehr hoch.

Das mit 30 Millionen Dollar dotierte Human Connectome Project, welches die National Institutes of Health 2010 ins Leben riefen, dürfte Neurowissenschaftlern dabei helfen, die zerebralen Netzwerke noch viel besser zu verstehen. Das Ziel besteht darin, eine Karte sämtlicher Verbindungen im Gehirn eines erwachsenen Menschen zu entwickeln. Doch selbst dieses ehrgeizige Vorhaben wird die Komplexität unseres Denkkorgans nicht in vollem Umfang erfassen. Denn die Neurone im Gehirn nutzen zur Kommunikation miteinander zu einem gegebenen Zeitpunkt immer nur einen Teil der verfügbaren Verbindungen. Von einem Moment zum nächsten ändert das Netzwerk also seine Konfiguration, weil das Muster der Verbindungen ständig wechselt.

Um diese dynamische Architektur zu modellieren, haben Daniel N. Rockmore und Scott D. Pauls, zwei Mathematiker vom Dartmouth College in Hanover (New Hampshire), das Gehirn mit Aktienmärkten verglichen. Beide Systeme bestehen schließlich aus kleinen aktiven Einheiten – Neuronen beziehungsweise Wertpapierhändlern –, die in riesige Netzwerke eingebunden sind. Die Trader beeinflussen sich gegenseitig durch ihre Kauf- und Verkaufsentscheidungen. Diese zunächst kleinräumigen Wechselwirkungen können sich aufschaukeln und das Gesamtsystem erfassen, so dass die

Aktienpreise steigen oder fallen. Umgekehrt wirkt sich der Zustand des Netzwerks auch auf die untersten Hierarchieebenen aus: Wenn die Aktienpreise steigen, springen viele Händler auf den fahrenden Zug auf und verstärken so den bestehenden Trend.

Rockmore, Pauls und ihre Kollegen entwickelten eine Reihe von mathematischen Werkzeugen zur Analyse der Struktur des Netzwerks, das der New Yorker Börse zu Grunde liegt. Sie trugen die Schlusskurse von 2547 Aktien an 1251 Tagen zusammen und suchten nach Ähnlichkeiten in der Preisentwicklung verschiedener Papiere – etwa der Tendenz, zu ähnlichen Zeitpunkten zu fallen oder zu steigen.

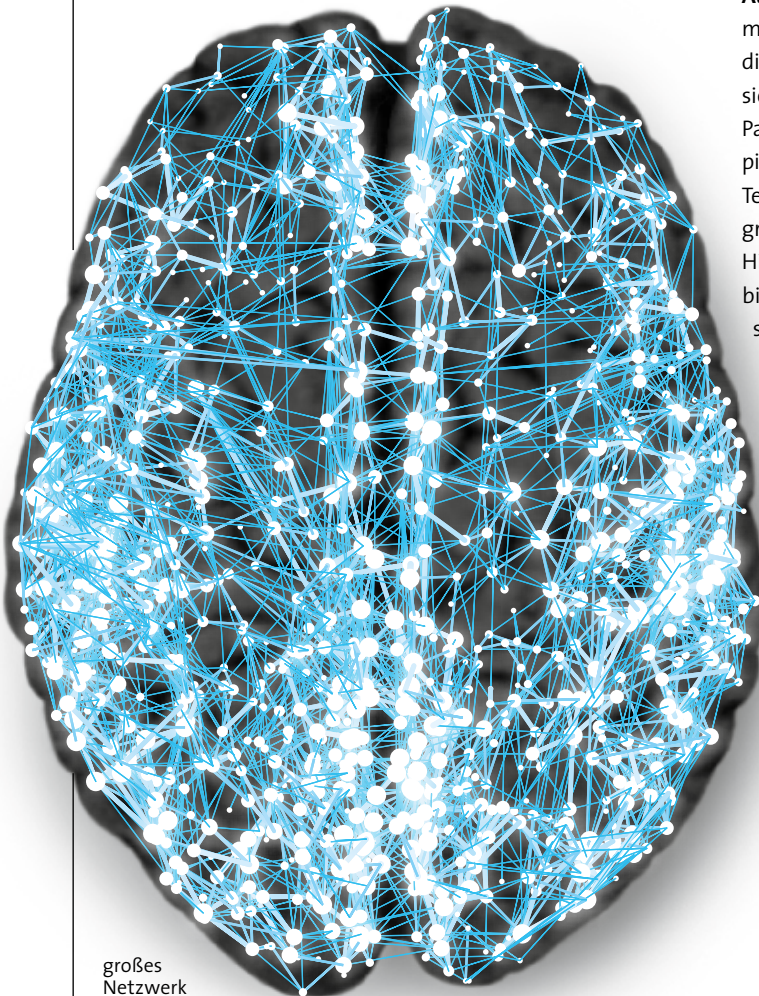
Die Untersuchung ergab 49 Cluster von Aktien mit jeweils ähnlichem Verhalten. Größtenteils gehörten sie zum selben Wirtschaftszweig (etwa Softwarehersteller oder Restaurantketten) oder stammten alle aus einer bestimmten geografischen Region (wie Lateinamerika oder Indien). Dass diese Kategorien allein aus der Analyse der Kurse hervorgingen, werten die Wissenschaftler als Zeichen für die Aussagekraft ihrer

Methode. Schließlich ist es ja plausibel, dass die Kursverläufe der Aktien aus einer Branche deutliche Parallelen zeigen; denn die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind für sie alle gleich.

Wie Rockmore und Pauls außerdem feststellten, lassen sich die 49 Aktiencluster zu sieben Superclustern gruppieren. Die meisten davon umfassen voneinander abhängige Industriezweige. So bewegen sich die Aktienkurse von Einzelhandelsketten und Bauunternehmen tendenziell in die gleiche Richtung. Schließlich erkannten die beiden Forscher, dass die Kursentwicklung der sieben Supercluster einem schleifenartigen Hyperzyklus folgt, was vermutlich auf die Praxis der Sektorrotation im Investmentbanking zurückzuführen ist. Dabei verlagern die Investoren den Schwerpunkt ihrer Anlagen im Verlauf einiger Jahre zyklisch von einem Wirtschaftszweig zum anderen.

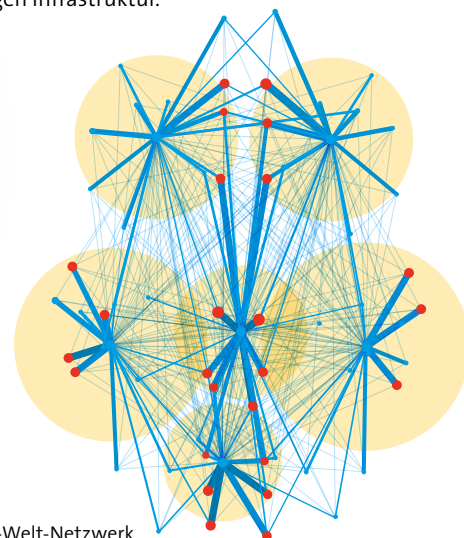
Inzwischen nutzen Rockmore und Pauls die gleiche Methodik, um ein mathematisches Modell des Gehirns zu entwerfen. Statt Geldanlagen, die von einem Wirtschaftszweig

Maximale Effizienz durch Kleine-Welt-Netzwerke



großes Netzwerk

Auch wenn wir ruhen, bleibt das Gehirn aktiv. Die Erregungsmuster der Neurone in diesem Zustand könnten Hinweise auf die Funktionsweise unseres Denkkorgans geben. Deshalb stehen sie im Brennpunkt des Interesses einiger Neurowissenschaftler. Patric Hagmann, inzwischen am Massachusetts General Hospital in Boston, und Olaf Sporns haben mit Hilfe der Diffusions-Tensor-Bildgebung, einer Variante der Magnetresonanztomografie, neuronale Verknüpfungen innerhalb der menschlichen Hirnrinde kartiert. Dabei zeigte sich, dass das Dickicht der Verbindungen (links) nicht gleichmäßig ist. Es gibt darin einige besonders stark vernetzte Relaisstationen (rote Punkte), über die ein Großteil der Signale läuft (unten). Solche Kleine-Welt-Netzwerke sorgen für eine schnelle Informationsverarbeitung bei relativ geringem Aufwand für Aufbau und Betrieb der nötigen Infrastruktur.



Kleine-Welt-Netzwerk

BRIDE-CARFENI, JENG-CHRISTIANSEN, NACH-HACKMANN, P. SPORNS, O. ET AL.: MAPPING THE STRUCTURAL CORE OF HUMAN CEREBRAL CORTEX. IN: PLOS BIOLOGY 6, S. 1479–1493, 2008. FIG. 5C, MITTE (CROSSES NETZWERK) UND FIG. 6 (KLEINES NETZWERK)

zum anderen wandern, betrachten sie nun Signale, die sich aus einem Hirnareal in ein anderes fortpflanzen. Und so wie sich das Netzwerk der Finanzmärkte stetig wandelt, konfiguriert auch das Gehirn sein Neuronennetz beständig um.

Um ihr Modell zu testen, analysierten Rockmore und Pauls kürzlich Serien von Hirnscans, die Raichle mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT) bei einem ruhenden Probanden aufgenommen hatte. Dabei ermittelten sie für jedes Voxel – das etwa pfefferkorngroße Volumenelement, das die fMRT gerade noch auflösen kann – den Anstieg oder Abfall der neuronalen Aktivität und suchten nach Korrelationen zwischen den beobachteten zeitlichen Mustern. Ähnlich wie die Aktien an den Finanzmärkten ließen sich auch die Voxel in verschiedene Cluster – in diesem Fall waren es 23 – mit gemeinsamen Aktivitätsmustern unterteilen, die vier Supercluster bildeten. Und zum Erstaunen der Forscher zeigten letztere sogar eine neuronale Entsprechung der Sektorrotation auf den Aktienmärkten: Sie sind zu einer Schleife verbunden, durch die Aktivitätswellen kreisen.

Gestörtes Neuronennetz bei psychischen Erkrankungen

Nach dem ruhenden Gehirn wollen Rockmore und Pauls nun auch das denkende analysieren, um herauszufinden, wie kognitive Vorgänge die Konfiguration des Neuronennetzes beeinflussen. Dazu untersuchen sie Hirnscans von Probanden, denen während der Aufnahme nacheinander verschiedene Objekte gezeigt werden. Wenn das Modell der beiden Mathematiker auch hier anwendbar ist, könnten sie schließlich vielleicht aus den Aufnahmen ablesen, was die Versuchsperson gesehen hat – etwa das Foto eines alten Freundes.

Angeichts der Komplexität des menschlichen Gehirns scheint dies jedoch eher utopisch. So leicht lässt sich unser Denkgorgan nicht enträtseln. Die Geschichte der Erforschung des Nervensystems von *C. elegans* liefert ein warnendes Beispiel. Obwohl schon seit 20 Jahren sämtliche Verknüpfungen seiner 302 Neurone kartiert sind, hat noch immer niemand eine klare Vorstellung davon, wie dieses relativ einfache Netzwerk genau funktioniert und die Körperfunktionen sowie das Verhalten des Wurms steuert.

Doch möglicherweise müssen die Neurowissenschaftler gar nicht alle Verschaltungen des menschlichen Gehirns kennen, um praktisch verwertbare Erkenntnisse zu gewinnen. Verschiedene Untersuchungen ergaben nämlich, dass geistige Störungen oft nicht auf Defekten in einzelnen Hirnarealen beruhen, sondern auf einer Fehlfunktion des Neuronennetzes insgesamt. Sporns und seine Kollegen untersuchten, wie ihr Kleine-Welt-Netzwerk den Ausfall einzelner Knotenpunkte verkraftet. Wenn sie eine Region des Hirnmodells mit wenigen Verbindungen zu anderen Arealen ausschalteten, hatte das kaum Auswirkungen. Legten sie jedoch einen Knotenpunkt mit zahlreichen Verknüpfungen lahm, veränderte sich die Aktivität im Gesamtnetzwerk drastisch.

Das könnte erklären, weshalb die Auswirkungen von Hirnschäden so schwer vorhersagbar sind. Ein Schlaganfall oder ein Tumor kann manchmal verheerende Schäden anrichten,

obwohl nur ein kleines Areal mit wenigen Hirnzellen betroffen ist. In anderen Fällen beeinträchtigen selbst ausgedehnte Läsionen die Hirnfunktion nur minimal.

Eine Reihe von psychischen Erkrankungen beruht möglicherweise sogar ausschließlich auf Netzwerkstörungen. Der Neurowissenschaftler Ed Bullmore von der University of Cambridge (England) und seine Kollegen machten in einer kürzlich durchgeführten Studie fMRT-Aufnahmen der Gehirne von je 40 Schizophreniepatienten und gesunden Probanden im Liegen mit geöffneten Augen. Anschließend suchten sie nach Korrelationen zwischen den Regionen, die auch im Ruhezustand aktiv sind. Dabei zeigte sich, dass die Aktivität einiger Bereiche des Ruhenetzwerks bei den psychisch Kranken stärker synchronisiert ist als bei den Gesunden.

Noch ist unklar, wie diese Abweichungen in der Hirnfunktion bei Schizophrenen mit den typischen Symptomen zusammenhängen. Zumindest könnten die Erkenntnisse aber eine neue objektive Methode zur Diagnose der Schizophrenie und womöglich auch anderer neuropsychiatrischer Störungen wie Autismus oder ADHS (Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätssyndrom) ermöglichen, die ebenfalls von Fehlfunktionen des Neuronennetzes im Gehirn herzurühren scheinen. Desgleichen lässt sich die Netzwerkdagnostik vielleicht nutzen, um den Krankheitsverlauf zu beobachten und die Wirksamkeit von Therapien einzuschätzen. Dies wären immerhin kleine Fortschritte, auch wenn wir auf tiefere Einsichten in die Komplexität des Gehirns noch länger warten müssen. ∞

DER AUTOR



Carl Zimmer ist amerikanischer Wissenschaftsjournalist, der häufig für Zeitschriften wie »New York Times«, »National Geographic«, »Discover« und »Scientific American« schreibt.

QUELLEN

Pajevic, S., Plenz, D.: Efficient Network Reconstruction from Dynamical Cascades Identifies Small-World Topology of Neuronal Avalanches. In: PLoS Computational Biology 5, e1000271, Januar 2009

Sporns, O. et al.: Theoretical Neuroanatomy: Relating Anatomical and Functional Connectivity in Graphs and Cortical Connection Matrices. In: Cerebral Cortex 10, S. 127 – 141, Februar 2000

Sporns, O. et al.: Mapping the Structural Core of Human Cerebral Cortex. In: PLoS Biology 6, e159, Juli 2008

Sporns, O.: Networks of the Brain. MIT Press, Cambridge (USA) 2010

WEBLINKS

www.spektrumdirekt.de/artikel/1066187&_z=859070

Der Schaltplan der Denkmaschine

www.spektrum.de/konnektom

Konnektom – die Verkabelung des Gehirns

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121034

Die Pioniere des Sex

Der Zeitpunkt des »ersten Mals« interessiert nicht nur Teenager, sondern auch manche Evolutionsbiologen. Die wollen herausfinden, wann die innere Befruchtung in der Stammesentwicklung entstand. Jetzt deuten Fossilien auf die längst ausgestorbenen Panzerfische als Erfinder dieses Verhaltens hin. Von ihm gingen weitere einschneidende Veränderungen in der Wirbeltierevolution aus, etwa ein Maul, das zubeißen kann.

Von John A. Long

August 2005, ein heißer Tag im Nordwesten Australiens. Inmitten der von hohen Felsen umgebenen Graslandschaft von Gogo Station, einer riesigen Rinderfarm im Landesinnern, suchen meine Mitarbeiter und ich Steine mit Fischfossilien. Heute könnten in der trockenen Gegend keine Wasserbewohner existieren. Doch vor 375 Millionen Jahren, im späten Devon, lag hier in einem flachen Meer ein gewaltiges tropisches Riff, in dem es von Leben wimmelte. Urtümliche Fische tummelten sich darin in großer Fülle.

Ihre Fossilien verstecken sich in manchen der gut faustgroßen Kalksteinknollen, die wir vorsichtig aus den landschaftstypischen hohen Dornpolstergräsern hervorklauben. Diese scharfen, spitzen Igel- oder *Spinifex*-Gräser sind schon unangenehm genug – doch in den Horsten dösen zudem Todesottern, hochgiftige Nattern. In Jahrmillionen hat die

Erosion solche Steine aus dem Schiefer gewaschen. Einen nach dem anderen schlagen wir sie auf, jedes Mal gespannt, ob sich darin vielleicht ein fossiler Schatz verbirgt.

Die Fische, die einst das Gogoriff besiedelten, waren großteils Vertreter der Plakodermen: so genannte Plattenhäuter oder Panzerfische, die einen mit Knochenplatten gepanzerten Vorderkörper besaßen. Heute sind die Panzerfische längst ausgestorben, doch zu ihrer Zeit stellten sie die erfolgreichste Wirbeltiergruppe dar. Fast 70 Millionen Jahre lang beherrschten sie die Erde.

Die Plakodermen gehörten zu den ersten Wirbeltieren überhaupt, die bereits ein Maul mit Kiefern besaßen – weshalb sie zu den »Kiefermündern« zählen. Die ganz frühen Wirbeltiere hatten dagegen noch kein Kieferskelett und werden darum als Kieferlose bezeichnet, wie heute noch die Neunaugen. Die genauen Evolutionsbeziehungen der Plattenhäuter zu anderen Wirbeltieren versuchen Zoologen seit langem aufzudecken. Dabei interessiert sie insbesondere die Verwandtschaft mit den Knorpel- und Knochenfischen und schließlich mit den landlebenden Wirbeltieren. Gerade von der Gogo-Formation mit ihrem Reichtum an Fischfossilien erhoffen sich die Paläontologen grundlegende Erkenntnisse zu solchen Evolutionsfragen.

An jenem Augusttag fanden wir zu unserer Freude eine Knolle mit einem anscheinend fast vollständigen fossilen Skelett. Zunächst fiel mir daran nichts Sensationelles auf, außer dass es sich um einen Panzerfisch handelte. Später lösten wir das Fossil im Labor sorgsam aus dem Kalkstein heraus und untersuchten es genauer. Und da erst erkannten wir seinen wahren Wert: Es zeigt, dass diese Fische schon damals Junge im Mutterleib austrugen, dass es also bereits Kopulation mit innerer Befruchtung gab.

AUF EINEN BLICK

ALS FISCHER DIE KOPULATION ERFANDEN

1 Nach bisheriger Auffassung entstand **innere Befruchtung** bei den Wirbeltieren zum ersten Mal vor 350 Millionen Jahren – bei Knorpelfischen wie Haien und Rochen.

2 Fossilien von den urtümlichen, längst ausgestorbenen **Panzerfischen oder Plakodermen** beweisen jedoch, dass **Kopulation** schon vor 375 Millionen Jahren auftrat. Die Weibchen dieser Fische trugen einige wenige **Junge im Bauch** und brachten sie recht groß zur Welt.

3 Wir selbst stammen nach neuen Untersuchungen von Plakodermen ab – und **wir tragen ihr Erbe** bis heute in uns. Sogar **unsere Fortpflanzungsorgane** entwickelten sich auf Basis von Strukturen, mit denen sich diese Fische paarten.



Sexuelle Fortpflanzung mit zwei verschiedenen Geschlechtern entstand schon sehr früh. Aber die Kopulation erfanden erst Panzerfische im späten Devon.

OWEN GILDERSEVE

Bisher glaubten Biologen, diese Fortpflanzungsweise sei im Stamm der Wirbeltiere erstmals vor ungefähr 350 Millionen Jahren aufgetreten, also deutlich später. Sie hielten das für eine spezielle Anpassung innerhalb der Knorpelfische, deren erste Vertreter schon 70 Millionen Jahre zuvor erschienen. Zu den Knorpelfischen gehören heute die Chimären, Haie und Rochen. Viele ihrer Arten sind lebend gebärend. Vorher, so war die Meinung der Forscher, begnügten sich die Fische damit, ihre Eier und Samen schlicht ins Wasser abzugeben, wo sich auch die Embryos entwickelten.

Haie und Rochen waren keineswegs die Ersten

Der Panzerfisch, den wir 2005 entdeckten, erzählt eine andere Geschichte. Weitere Plakodermenfossilien von Gogo und anderen Fundstätten vervollständigen das Bild. Daher wissen wir jetzt: Kopulation und Lebendgeburt traten bei den Wirbeltieren viele Jahrtausende früher auf als lange angenommen – vor allem aber bei deutlich urtümlicheren Fischen als den Knorpelfischen.

Schon diese Erkenntnis ist aufregend genug, aber mit ihr gehen noch wesentlich bedeutendere Einsichten einher. Denn wie es nun nach anatomischen Vergleichsstudien aussieht, befinden sich die Panzerfische dicht an genau jener Evolutionslinie, die zu den Tetrapoden führt, also zu den landlebenden – vierbeinigen – Wirbeltieren. Somit zählen die Plakodermen zur engen Verwandtschaft unserer direkten Vorfahren.

Und das wiederum bedeutet: Die Fortpflanzungsstrukturen jener frühen Fische stellen wahrscheinlich die Anfangsgründe dar, aus denen sich später unser eigenes Reproduktionssystem entwickelte. Auch andere Neuerungen bei den Panzerfischen scheinen markante anatomische Eigenschaften

der Landwirbeltiere vorzugeben. Somit liefern uns die Fischfossilien aus dem Devon neue, genauere Einsichten darüber, wie und auf welcher Grundlage sich die Wirbeltiere im Lauf ihrer weiteren Evolution gewandelt haben – anders gesagt: woher die heutigen anatomischen Strukturen ursprünglich stammen.

Offensichtlich gingen sowohl die Genitalien der Tetrapoden wie auch ihre Hinterbeine aus den paarigen Bauchflossen der Plakodermen hervor. Bei deren Männchen waren diese Flossen zu Begattungsorganen umgestaltet, mit denen sie ihren Samen in die Weibchen beförderten. Sogar ihr Kieferskelett – das die ersten Wirbeltiere noch nicht besaßen – könnte als Kopulationshilfe entstanden sein. Einiges spricht dafür, dass Kiefer zu Anfang dazu dienten, das Weibchen zu packen und in der passenden Position festzuhalten. Ihre Bedeutung beim Fressen gewannen sie demnach erst später. Fortpflanzung ist schließlich oft Dreh- und Angelpunkt der Evolution.

Berühmt sind die Fossilien der Gogo-Formation allein schon wegen ihres hervorragenden Erhaltungszustands. Während man von Fischen sonst in der Regel platt gedrückte Überreste findet, handelt es sich bei diesen australischen Funden häufig um makellose Versteinerungen, welche die ursprüngliche Position der Knochen zueinander bewahrten.

Allerdings braucht es viel Zeit, solch ein Skelett komplett frei zu legen. Wir lösen den umgebenden Kalkstein sorgsam schrittweise in verdünnter Essigsäure auf. Jenes Fossil vom August 2005 konnte ich mir erst im November 2007 vornehmen. Während dieser Arbeit untersuchte ich es wiederholt zusammen mit der Paläontologin Kate Trinajstić, die jetzt an der Curtin University in Perth (Australien) arbeitet. Der etwa makrelengroße Fisch hatte kräftige Kiefern und Zähne besessen, womit er sicherlich Nahrung zerquetschen oder zer-

malmen konnte. Wir hielten ihn für einen Angehörigen der Ptyctodontiden, einer Familie der Panzerfische. Darüber freuten wir uns, denn über diese Fischfamilie wissen die Forscher noch sehr wenig. Außerdem schien es sich um eine bisher unbekannte Art zu handeln.

Als langsam immer mehr Einzelheiten des Skeletts zum Vorschein kamen, bemerkte ich nahe der Schwanzwurzel einige ungewöhnliche sehr kleine Gebilde. Unter dem Mikroskop erwiesen sie sich als zarte Kiefer und weitere winzige Knochen. Plötzlich begriff ich: Hier hatte ich nicht etwa einen Nahrungsrest vor mir, sondern einen Embryo. Denn die Miniaturkiefer glichen bis ins Einzelne denen des großen Fossils. Sie waren ganz heil und teils noch in den Gelenken verbunden. Außerdem schlang sich um das kleine Skelett etwas gewundenes lang Gezogenes. Dieses Band bestimmten wir mit einem Rasterelektronenmikroskop als mineralisierte Nabelschnur, über die der Embryo von einem Dottersack Nährstoffe bezog.

Somit stammte das 375 Millionen Jahre alte Fossil von einem trächtigen Fischweibchen, das den bisher ältesten Embryo eines Wirbeltiers enthielt. Die neue Panzerfischart nannten wir *Materpiscis attenboroughi* (Attenboroughs Mutterfisch) – nach dem britischen Natur- und Tierfilmer David Attenborough, der 1979 die Gogo-Fossilien weltbekannt machte.

Unser Befund klärte endlich ein früheres Rätsel. In den späten 1930er Jahren hatte der britische Anatom David M.S. Watson (1886–1973) beschrieben, dass die Männchen einer in Schottland gefundenen Ptyctodontiden-Art am knöchernen Beckengürtel, der ihre Bauchflossen stützte, lange, knorpelige Auswüchse trugen. Beim lebenden Tier waren diese Strukturen wohl in Fleisch und Haut eingehüllt gewesen. Sie erinnern an die Kopulationshilfsorgane – Klaspert genannt – von

Knorpelfischen, die damit das Sperma in die weibliche Geschlechtsöffnung überführen.

Doch merkwürdigerweise waren die Klaspert bei den schottischen Fossilien von Knochenplatten ummantelt, was sie vermutlich recht starr machte. Und die Klaspert von Knorpelfischen tragen zwar ebenfalls schuppenartige Haken, die sie während der Paarung in der richtigen Position halten – aber an den mutmaßlichen Hilfsorganen jener Panzerfischmännchen saßen derart ausgeprägte Hakengebilde, dass dies bei der Sache eher hinderlich gewesen sein dürfte.

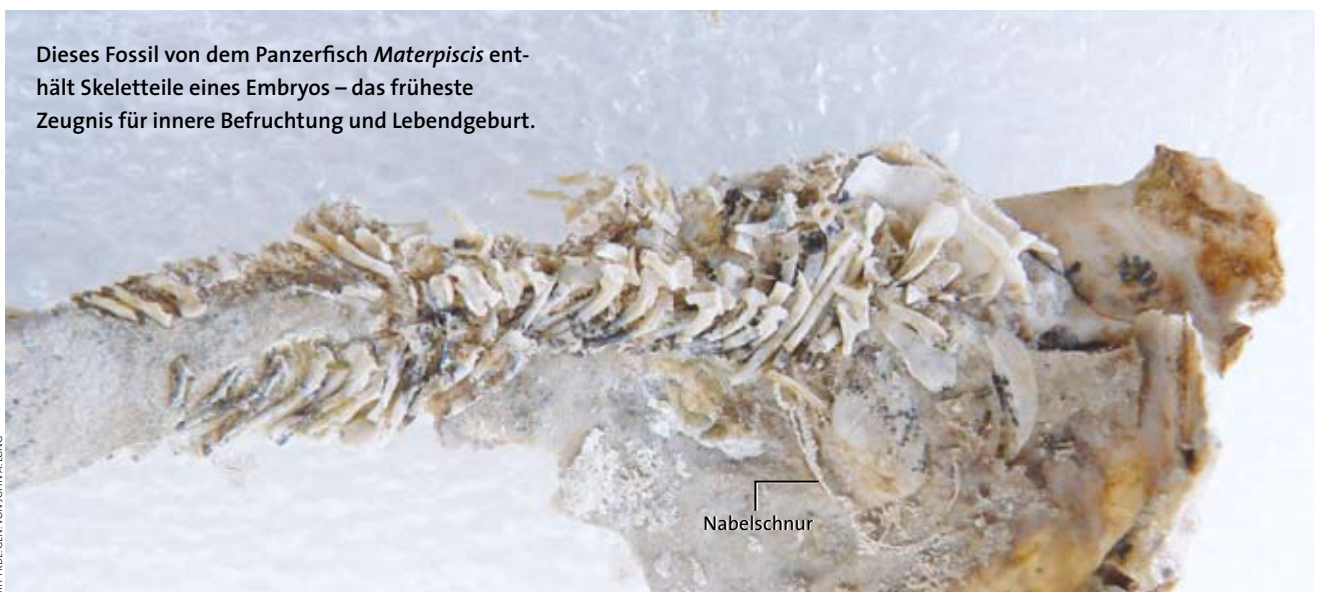
Als Paläontologen später mehr Fossilien von Ptyctodontiden mit der gleichen bizarren Ausstattung fanden, wurden sie unsicher, ob das wirklich Kopulationsorgane gewesen waren. Vielleicht griffen die Männchen ihre Partnerin damit einfach nur, während beide Eier und Samen ins Wasser abgaben. Oder handelte es sich sogar um ein demonstratives Schmuckelement im Dienst der Balz? Erst unser Fund erwies nun zweifelsfrei, dass zumindest einige Ptyctodontiden ihre Jungen lebend zur Welt brachten, dass sie folglich innere Befruchtung hatten.

Die unerwartete Entdeckung machte uns neugierig, ob früher gefundene Ptyctodontiden-Fossilien nicht ebenfalls Embryos enthielten, deren Überreste wir früher falsch gedeutet hatten. Und wirklich wurde ich fündig, als ich mir eine Versteinerung vornahm, die ich 20 Jahre zuvor präpariert hatte – ein Fossil einer anderen Gattung, *Austroptyctodus*. Einige Strukturen im Innern des Fisches, die ich vorher für verlagerte Schuppen gehalten hatte, erwiesen sich bei einer genauen mikroskopischen Untersuchung tatsächlich als winzige Knochen von drei Embryos.

Jetzt wollten wir es genauer wissen. Dass verschiedene Ptyctodontiden zur Fortpflanzung miteinander kopulierten und dann lebende Junge gebaren, war nun klar. Doch hatten

Das Fossil stammte von einem trächtigen Fischweibchen

Dieses Fossil von dem Panzerfisch *Materpiscis* enthält Skeletteile eines Embryos – das früheste Zeugnis für innere Befruchtung und Lebendgeburt.



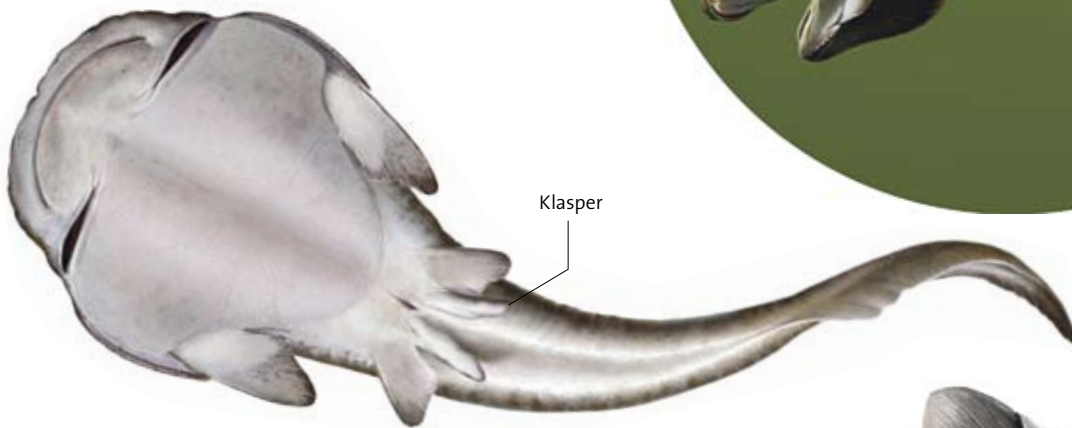
MIT FRIEDRICH VON JOHNH. LONG

Ursprünge des Geschlechtsakts

Als erste Wirbeltiere kopulierten Männchen und Weibchen der Panzerfische (Plakodermen) vor 375 Millionen Jahren. Die Männchen benutzten zur Samenübertragung Klaspern, spezielle Strukturen der Bauchflossen. Nach der Befruchtung entwickelten sich die Jungen zunächst im Mutterleib.



OBERE ZWEI ILLUSTRATIONEN: PETER TROUSLER; UNTERE: JEN CHRISTIANSEN



Die Männchen von *Austrophyllolepis*, deren Fossilien in Australien auftauchten, trugen zwei Klaspern, fleischbedeckte Fortsätze des Beckengürtels. Jeweils einen davon führten sie beim Koitus ins Weibchen ein.



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

sich andere Panzerfische genauso verhalten – zumindest einige von ihnen? Paläontologen unterscheiden sechs weitere Gruppen von Plakodermen. In unserem Gogo-Sortiment befand sich ein Exemplar der Gattung *Incisoscutum* mit Knochen kleiner Fische im Innern – Resten der letzten Mahlzeit im Magen, wie wir bisher geglaubt hatten. Die neue Inspektion ergab: In Wahrheit handelte es sich wiederum um Embryos. Das Gleiche erlebten wir mit einem weiteren *Incisoscutum*-Fossil.

Mit mehr als 300 Arten zählt diese Gattung zur umfangreichsten Gruppe der Plakodermen: den Arthrodiren. Hierzu gehörten die größten Panzerfische überhaupt, wie der sechs Meter lange *Dunkleosteus*, ein geradezu Furcht einflößendes Tier. Noch vor wenigen Jahren wussten die Forscher jedoch nichts über die Fortpflanzungsweise der Arthrodiren. Sie besaßen auch keine Anhaltspunkte für irgendwelche äußeren anatomischen Unterschiede der Geschlechter. Erst unsere Entdeckungen brachten Licht in diese Fragen.

Nach den Embryos im Mutterleib spürten wir schließlich auch die äußeren Geschlechtsorgane der Männchen auf: Wie die Ptyctodontiden besaßen sie offensichtlich Klaspern zur Befruchtung der Weibchen. Die Hilfsorgane lassen sich an Fossilien von Gogo wie auch von anderen Fundorten erkennen. Somit kam bei zumindest zwei der sieben Plakodermen-Gruppen schon eine echte Kopulation mit innerer Befruchtung vor – wenigstens 25 Millionen Jahre früher als bei Knorpelfischen. Wie es aussieht, waren die Panzerfische unter den Wirbeltieren die Pioniere auf diesem Gebiet.

Mehr Klarheit herrscht jetzt ebenfalls über die Stellung der Plakodermen in der Fischsystematik und damit über ihre Beziehung zu den höheren Wirbeltieren. Nach der früher verbreiteten Ansicht sollten unter den beiden heutigen Fischhauptgruppen mit Kiefern allein die Knorpelfische von Panzerfischen abstammen – die Knochenfische und somit die Urahnen der Landwirbeltiere nicht. Ein völlig anderes Bild zeichnen jedoch Studien an diesen Fossilien zusammen

mit Analysen der Evolutionsbeziehungen von frühen Wirbeltieren, die Martin Brazeau (jetzt am Museum für Naturkunde in Berlin) 2009 durchführte. Wir vermuten nun, dass Plakodermen nicht nur die Knorpelfische hervorbrachten, sondern auch die ausgestorbenen Acanthoden. Letztere heißen wegen ihrer Körperform auf Deutsch zwar Stachelhaie, haben aber nichts mit den Knorpelfischen und folglich den wirklichen Haien zu tun. Vielmehr gelten einige von ihnen

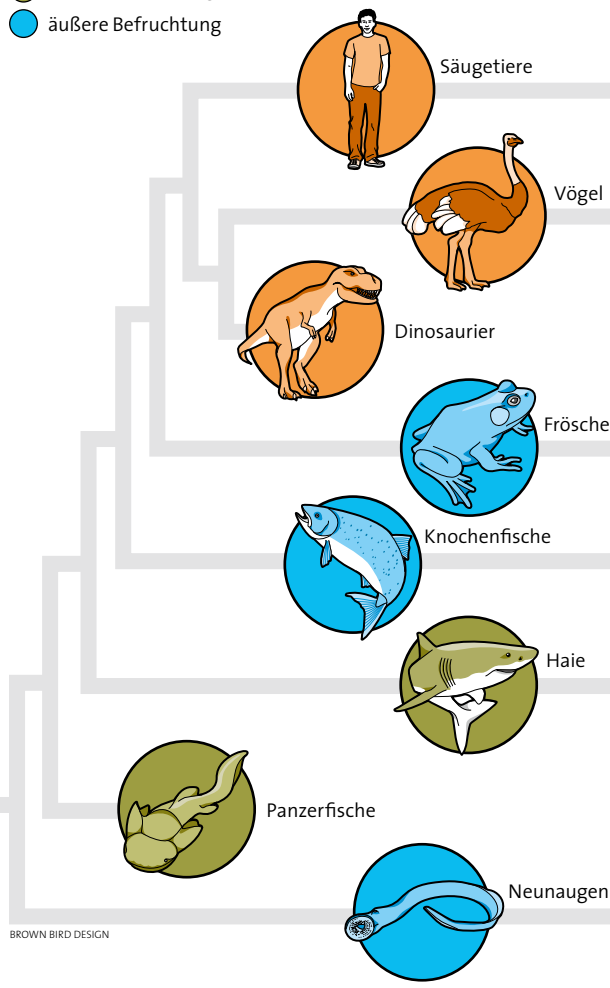
als Ahnen der ersten Knochenfische. Die Stachelhaie würden also zu unseren Vorfahren zählen und damit nach diesen Befunden auch die Panzerfische.

Dieses Szenario warf allerdings ganz neue Fragen auf. Meine Kollegen und ich überlegten, ob und inwiefern die Erfindung der Kopulation bei den Plakodermen wohl die weitere Wirbeltierevolution beeinflusste. Schon vorher hatten anatomische Vergleichsstudien anderer Paläontologen und unseres Teams den Verdacht geweckt, dass sich die Hinterbeine und Genitalien der Landwirbeltiere vom Beckengürtel – inklusive der Klaspert – früher Fische herleiten. Ein starkes Argument hierfür liefern zudem vergleichende Entwicklungs- und Evolutionsforschungen, die der Molekulargenetiker Martin J. Cohn von der University of Florida in Gainesville mit seinen Kollegen durchführte. Bekannt war, dass bei den heutigen Knochen- und Knorpelfischen das *Hoxd13*-Gen für die Entwicklung von Brust- und Bauchflossen eine Rolle spielt. Dieses Regulatorgen, so wiesen Cohn und sein Team 2004 nach, ist gleichfalls bei Säugerembryos in den sich ausbildenden Gliedmaßen und Genitalien aktiv.

Die neue Verwandtschaft

Die Panzerfische befinden sich direkt an der Abstammungslinie, aus der die vierbeinigen, landlebenden Wirbeltiere (Tetrapoden) hervorgingen. Zwar entstand schon bei ihnen innere Befruchtung; allerdings kehrten die von ihnen abstammenden Knochenfische größtenteils zum Laichen zurück. Erst die Tetrapoden griffen die innere Befruchtung wieder auf. Ihre Hüften, Hinterbeine und Genitalien entstanden aus anatomischen Vorgaben des Beckengürtels (einschließlich den Klaspert) der Panzerfische. Das Schema zeigt die jeweils vorherrschende Reproduktionsform einer Tiergruppe.

- innere Befruchtung mit Penis oder Hemipenis
- innere Befruchtung mit Klaspert
- äußere Befruchtung



Vermächtnisse der Panzerfische

Wenn wir wirklich von Plakodermen abstammen, wenn sich somit im Grunde unsere Hinterbeine und äußeren Sexualorgane letztlich aus dem Beckengürtel dieser frühen Fische entwickelten – dann besteht meines Erachtens obendrein ein evolutionärer Bezug von den besonderen Flossenstrukturen jener urtümlichen Fische zu den betreffenden Organen der Landwirbeltiere. Das hieße, unsere Genitalien und Extremitäten hätten dort schon ihre ersten Wurzeln.

Existieren vielleicht sogar noch mehr anatomische Vermächtnisse aus der Zeit der Panzerfische? Gut möglich. Die Männchen moderner Haie müssen Weibchen vor der Paarung erst umwerben. Bei manchen Arten, etwa dem Weißspitzenriffhai, beißt das Männchen das Weibchen zunächst in den Rücken, dann in den Hals und schließlich in die Brustflosse. So bringt es sich in die passende Position, in der es sich festhält. Uns kam deshalb die Idee, dass die Kiefer der Wirbeltiere ursprünglich gar nicht zwecks besserer Nahrungsaufnahme entstanden, was die Forscher bisher annahmen, sondern als Hilfsmittel der Fortpflanzung. Erst nachträglich mag daraus ein Beiß- oder Kauapparat geworden sein.

Die meisten heutigen Knochenfische setzen Eier und Spermien wieder ins Wasser frei, und das Männchen muss das Weibchen beim Sex nicht fest packen. Das Erbe der Panzerfische – Kiefer zum Beißen – bewahrten sie dennoch. Und sie gaben es an die Landwirbeltiere weiter. Letztere erfanden zwar später innere Befruchtung aufs Neue und emanzipierten sich so vom Wasser als Medium der Fortpflanzung. Jedoch nutzten sie zu dem Zweck letztlich anatomische Vorgaben, quasi Ausgangsmaterialien, von den Panzerfischen. Ohne deren Beckengürtel-Bauchflossen-Konstruktionen würden die modernen Sexualorgane vielleicht anders aussehen.

Noch sind die hier entworfenen Zusammenhänge eher spekulativ. Immerhin ist aber auffällig, dass die Arthropoden



gerade zu der Zeit aufblühten, als nach unseren Erkenntnissen die Kopulation aufkam. In ihrer Ordnung erschienen plötzlich sehr viele neue Arten, was Biologen als Radiation bezeichnen. Nach den Fossilfunden zu urteilen, geschah dies bei den Kiefer tragenden Wirbeltieren damals zum ersten Mal in größerem Ausmaß. Steckte dahinter etwa die revolutionäre neue Fortpflanzungsweise?

In der wissenschaftlichen Literatur zur Geschichte heutiger Fischgruppen fanden wir hierzu ein paar möglicherweise aufschlussreiche Beobachtungen. Wie Shane Webb und seine Kollegen von der University of St Andrews (Schottland) 2004 beschrieben, haben sich die Hochlandkärpflinge (Goodeiden) vor etwa 16,8 Millionen Jahren in zwei Linien aufgetrennt. Die heutigen Arten dieser Familie der Kärpflinge leben in Flüssen Nevadas und Mexikos. Eine der beiden Gruppen laicht weiterhin ins Wasser ab – sie spaltete sich in nur vier Arten auf. Die andere Linie ging zu innerer Befruchtung über, und sie umfasst heute 36 Spezies. Ähnliches gilt für die Bythitoiden, die zu den Eingeweidefischen zählen. Nur bei einer von ihren drei Gruppen entstand innere Befruchtung: Zu ihr gehören 107 Arten. Die anderen beiden Gruppen enthalten lediglich 22 beziehungsweise drei Arten.

Vielleicht ist der Vorteil innerer Befruchtung für eine schnelle Evolution neuer Spezies nicht gleich einsichtig. Zum Ablachen produziert ein Fischweibchen oft zehntausende Eier, hätte somit theoretisch eine Riesenanzahl Nachkommen. Bei Kopulation hingegen, zumal mit Austragen der Embryos, steckt die Mutter viel Energie in sehr wenige Kinder. Man könnte nun folgern, dass unter einer großen Nachkommenschar statistisch viel häufiger Exemplare mit neuen günstigen Genkombinationen auftreten, die zu neuen Arten führen. Allerdings ernährten sich im Devon die meisten Fische hauptsächlich von – Fischen. Gerade frisch aus dem Ei geschlüpfte Winzlinge waren vermutlich eine leichte und begehrte Beute. Die schon deutlich mehr herangewachsenen lebend geborenen Jungfische hatten unter Umständen so viel größere Überlebenschancen, dass dies den Arthrodiren zum Vorteil gereichte.

Zum Ursprung der inneren Befruchtung bei den frühen Wirbeltieren bleibt allerdings vieles unklar. Wir wissen beispielsweise noch immer nicht genau, wie sich der Wandel bei

den Plakodermen vollzog. Vielleicht rückten sich Männchen und Weibchen zunächst beim Ablachen immer näher. Diese Anpassung verstärkte sich dann mit der Zeit, da nun mehr Eier befruchtet wurden oder möglicherweise auch, weil ein Elternteil oder beide die Eier behüteten. Denkbar wäre ebenfalls ein Übergangsstadium, in dem einer der Eltern die Embryos bis zum Schlüpfen mit sich herumtrug, wie es etwa Seepferdchenmännchen machen, die ihre Eier in einer Bauchtasche »ausbrüten«. Ein weiterer Schritt könnte gewesen sein, dass sich die Bauchflossen der Panzerfische umgestalteten und zu Hilfe genommen wurden, um das Spermium direkt auf die Eier zu geben. Auch solch eine Anpassung hätte die Geschlechter – und die Geschlechtsöffnungen – näher zusammengebracht. Selektionskräfte hätten schließlich für verlängerte Flossenanhänge gesorgt, die sich nun zu Klaspfern entwickelten.

Mit der geschlechtlichen Annäherung musste aber auch die Motivation zu solchem Verhalten entstehen. Möglicherweise wirkte hier ein Selektionsdruck für Männchen darauf, die Eier früher als die Konkurrenz zu befruchten. Als frühestmöglicher Zeitpunkt ergab sich schließlich die Kopulation. Vergleichsstudien zum Paarungsverhalten von Haien und anderen Fischen könnten in dieser Frage Aufschluss geben. Davon, wie sie ihr Sexualverhalten neuronal und mit chemischen Auslösern steuern, ließe sich wohl auch manches über die ersten Schritte der sexuellen Vereinigung bei den frühen Wirbeltieren lernen. ~

DER AUTOR



John A. Long ist derzeit Vizepräsident für Forschung und Sammlungen am Natural History Museum von Los Angeles County. Vorher war der Australier wissenschaftlicher Leiter am Museum Victoria in Melbourne. Über Fossilien hat er zahlreiche – auch populäre – Bücher geschrieben.

QUELLEN

- Ahlberg, P. et al.:** Pelvic Claspers Confirm Chondrichthyan-like Internal Fertilization in Arthroires. In: *Nature* 460, S. 888–889, 13. August 2009
- Cohn, M.J.:** Developmental Genetics of the External Genitalia. In: *Advances in Experimental Medicine and Biology* 545, S. 149–157, 31. März 2004
- Long, J.:** *Swimming in Stone*. Freemantle Press, Freemantle (Australien) 2006
- Long, J.A. et al.:** Live Birth in the Devonian Period. In: *Nature* 453, S. 650–652, 29. Mai 2008
- Long, J.A. et al.:** Devonian Arthrodire Embryos and the Origin of Internal Fertilization in Vertebrates. In: *Nature* 457, S. 1124–1127, 26. Februar 2009

WEBLINKS

www.spektrum.de/youtube
Video von der »Fischmutter« und der Forschungsarbeit

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121033

Echte Gefahr durch falsches Botox

Der boomende Markt für gefälschte Lifestyle-Medikamente birgt eine Gefahr: Tödliche biologische Wirkstoffe könnten in die Hände von Terroristen geraten.

Von Kenneth D. Coleman und Raymond A. Zilinskas

Anfang 2006 stand Chad Livdahl in Arizona vor Gericht. Der selbst ernannte »naturopathische«, das heißt naturheilkundliche Arzt wurde des Postbetrugs und der Verschwörung schuldig gesprochen, genauer: des Post- und Überweisungs Betrugs, des Markenbetrugs sowie des Betrugs zum Nachteil des amerikanischen Staats. Das Urteil lautete auf neun Jahre Gefängnis. Auch Zarah Karim, Livdahls Frau und Geschäftspartnerin im Unternehmen Toxin Research International, Inc. in Tucson (US-Bundesstaat Arizona), wurde mitangeklagt und zu sechs Jahren Haft verurteilt. Beide mussten zudem hohe Geldstrafen und Entschädigungen zahlen. Laut Anklage hatte das Ehepaar mit dem Verkauf von Ampullen mit gefälschtem Botox (Botulinumtoxin) an Ärzte in ganz Nordamerika in gut einem Jahr 1,7 Millionen Dollar eingenommen.

Botox wird in kleinsten Mengen injiziert, um mimische Falten zu glätten oder Muskelzuckungen zu unterbinden. Es ist nicht das einzige Medizinprodukt, das zu illegalem Handel und kriminellen Herstellungsmethoden verleitet. Mit dem Verkauf gefälschter Pharmazeutika werden auf dem Weltmarkt jährlich mindestens 75 Milliarden Dollar Umsatz

erzielt. Doch die Wirksubstanz von Botox und verwandten Produkten unterscheidet sich ganz wesentlich von den Inhaltsstoffen anderer Pharmazeutika: Es handelt sich nämlich um das stärkste bekannte Gift überhaupt. Botulinum-Neurotoxin gehört zu den weltweit gefährlichsten waffenfähigen Stoffen. Botulinumtoxin steht daher – wie die Erreger von Pocken, Milzbrand und Pest – auf der roten Liste der US-amerikanischen National Select Agent Registry. Dass sich Botulinumtoxin potenziell als Massenvernichtungswaffe eignet, lässt die Existenz illegaler Labors, die das Toxin in größeren Mengen herstellen und über unklare Kanäle im Internet vertreiben, wesentlich bedrohlicher erscheinen als den Handel mit anderen gefälschten Pharmaka.

Leicht zu beschaffendes Toxin

Als Sicherheitsanalytiker übernahmen wir vor zwei Jahren die Aufgabe, Ausmaß und Strukturen des illegalen weltweiten Handels mit Botulinumtoxin zu untersuchen. Besonders beunruhigend erschien uns, dass ein früher relativ schwer zugängliches Massenvernichtungsmittel inzwischen so leicht zu beschaffen und herzustellen ist wie Explosivstoffe für selbst gebastelte Bomben. Wir glauben aber auch, dass konkrete, kostengünstige und risikofreie Maßnahmen ausreichen, um diese Bedrohung einzudämmen, und deshalb so bald wie möglich ergriffen werden sollten.

1989 erteilte die U.S. Food and Drug Administration (FDA) dem Unternehmen Allergan in Irvine, Kalifornien, die Zulassung, Botulinumtoxin zur medizinischen Anwendung zu vertreiben. Seitdem ist diese Firma Marktführer auf dem legalen Markt für Botoxpräparate, der im Jahr 2009 ein Gesamtvolumen von etwa zwei Milliarden Dollar erreichte. Andere Hersteller für zugelassene Botoxpräparate, darunter Ipsen in Frankreich, Merz Pharma in Deutschland oder das Lanzhou Institute of Biological Products in China erzielen in einigen Ländern noch höhere Umsätze.

AUF EINEN BLICK

FATALES SCHÖNHEITSMITTEL

- 1 Botox ist ein beliebtes Präparat der **Schönheitsindustrie**, das zum Glätten von Falten dient.
- 2 Sein Wirkstoff Botulinumtoxin stellt jedoch ein **tödliches Gift** dar und eignet sich zur Herstellung **biologischer Waffen**. Illegale Hersteller könnten es an Terroristen verkaufen oder selbst Anschläge verüben.
- 3 Um die Gefahr des **Bioterrorismus** zu bekämpfen, sollten Wissenschaftler und Ermittlungsbehörden in einer gemeinsamen Kampagne das Problem untersuchen, um im nächsten Schritt effektiver gegen die Vielzahl illegaler Anbieter vorzugehen.



THE HEADS OF STATE

Wenn illegale Pharmaproduzenten das tödliche Gift Botox über das Internet leicht zugänglich machen, könnte dies sogar mittelbar die öffentliche Sicherheit gefährden.

Im Jahr 2002 erteilte die FDA die Zulassung zur kosmetischen Anwendung von Botulinumtoxin. Bis heute haben weltweit nur sieben Unternehmen eine Lizenz zum Vertrieb des Wirkstoffs, der den pharmazeutischen Anforderungen für den Einsatz beim Menschen genügt. Viele andere Firmen, fünf davon in den USA, stellen Botulinumtoxin für Laborzwecke her. Das ist jedoch für die Anwendung beim Menschen nicht zugelassen. Es wird in Industrie und Wissenschaft genutzt, etwa für die Impfstoffforschung.

Verpackung und Etiketten der gefälschten Produkte imitieren oft die Merkmale des Originals, häufiger jedoch tragen die Fälschungen ähnlich klingende Namen wie »Butox« oder »Beauteous«. Manche dieser Mittel sind reine Attrappen ohne jede Spur von Botulinumtoxin. Etwa 80 Prozent der manipulierten Botoxpräparate enthalten jedoch wirksames Toxin, allerdings in stark variierenden Mengen. Dies belegt eine Studie aus dem Jahr 2009, in der Andy Pickett und Martin Mewies,

Wissenschaftler der Firma Ipsen, solche illegalen Produkte untersuchten.

Hauptabnehmer des verbotenen Botulinumtoxins, das üblicherweise weniger kostet als die zugelassenen Präparate, sind skrupellose Ärzte und Kosmetiker. Sie kaufen häufig via Internet bei illegalen Herstellern oder deren Mittelsmännern ein und profitieren von der Preisdifferenz zu den Originalpräparaten.

Menschen, denen gefälschte Botoxpräparate verabreicht werden, sind einem hohen gesundheitlichen Risiko ausgesetzt, wie ein Zwischenfall aus dem Jahr 2004 in Florida belegt. Vier Personen war zu kosmetischen Zwecken ein gefälschtes

Botoxpräparat mit tausendfach überhöhtem Wirkstoffgehalt verabreicht worden. Sie erkrankten schwer an Botulismus, der sonst nur als Lebensmittelvergiftung auftritt, mussten künstlich beatmet und mehrere Monate im Krankenhaus behandelt werden. Ein Arzt, dem die Approbation entzogen worden war, hatte das Toxin von einem lizenzierten Hersteller für laborgereignetes Botulinumtoxin bezogen, es neu verpackt und es in Ampullen mit gefälschten Etiketten verkauft. Er injizierte drei Personen und sich selbst massiv überdosiertes Toxin. Es ist unklar, welche Giftmengen die Betroffenen erhielten. Bei der Etikettierung der Ampullen hatte der Arzt jedoch einen groben Fehler begangen und bei den Toxineinheiten Nanogramm (ng) mit Mikrogramm (µg, dem 1000-Fachen) verwechselt. (Eine Einheit Botulinumtoxin entspricht 4,8 Nanogramm.)

Auch in weiteren dokumentierten Fällen wurde Laborware zur illegalen Anwendung beim Menschen umgepackt und weiterverkauft. Es gibt einzelne Hinweise darauf, dass legales Toxin in Medikamentenqualität gestohlen und auf dem Schwarzmarkt angeboten wurde. Die große Mehrheit gefälschter Produkte entstammt jedoch unklaren Quellen, hauptsächlich aus Asien. Es wird von Händlern vertrieben, die teils eigene Ingredienzien zufügen.

Allein in China fanden wir 20 Anbieter – sie stellen sich selbst als Firmen dar –, die auf ihren Websites behaupten, »zertifizierte« Anbieter von Botulinumtoxin zu sein und kosmetische Produkte zum Kauf anbieten. Die angegebenen Adressen existierten oft gar nicht oder entpuppten sich als Minibüros, die als Scheinfirmen fungierten. Wer auch immer hinter diesen Internetangeboten steckt, die Lieferanten haben, wie die Recherchen der Firma Ipsen ergaben, immerhin Zugang zum echten Wirkstoff.

Gemäß unseren Nachforschungen hat sich die Herstellung illegaler Botoxprodukte auch auf dem Gebiet der ehemaligen Sowjetunion etabliert, wobei offenbar kriminelle Organisationen beteiligt sind. Gefälschte Arzneimittel sind in Russland schon seit längerem ein Problem. Daher hat es uns nicht überrascht, dass etwa 90 Prozent der Schönheitskliniken in Russland zumindest teilweise verbotene Botoxpräparate einsetzen.

Es ist nur ein kleiner Schritt vom Verkauf gefälschter Präparate zur Lieferung des Toxins im Großmaßstab

Ein starkes Gift

Botulinum-Neurotoxin, der Wirkstoff in Botox und verwandten Präparaten, ist die giftigste Substanz, die wir kennen. Ein einziges Toxinmolekül kann eine Nervenzelle lahmlegen, ein milliardstel Gramm tötet eine Maus.

TÖDLICHE DOSIS FÜR EINE MAUS

1,2 ng

TÖDLICHE DOSIS FÜR EINEN MENSCHEN MIT 70 KG KÖRPERGEWICHT

0,09–0,15 µg (Injektion)

0,7–0,9 µg (Inhalation)

70 µg (oral)

Die Größen der Kugeln repräsentieren die Mengenverhältnisse.

1 GRAMM REICHT ZUR TÖTUNG VON

- 8,3 Millionen Menschen (Injektion)
- 1,25 Millionen Menschen (Inhalation)
- 14 285 Menschen (oral)

GEWICHTSEINHEITEN

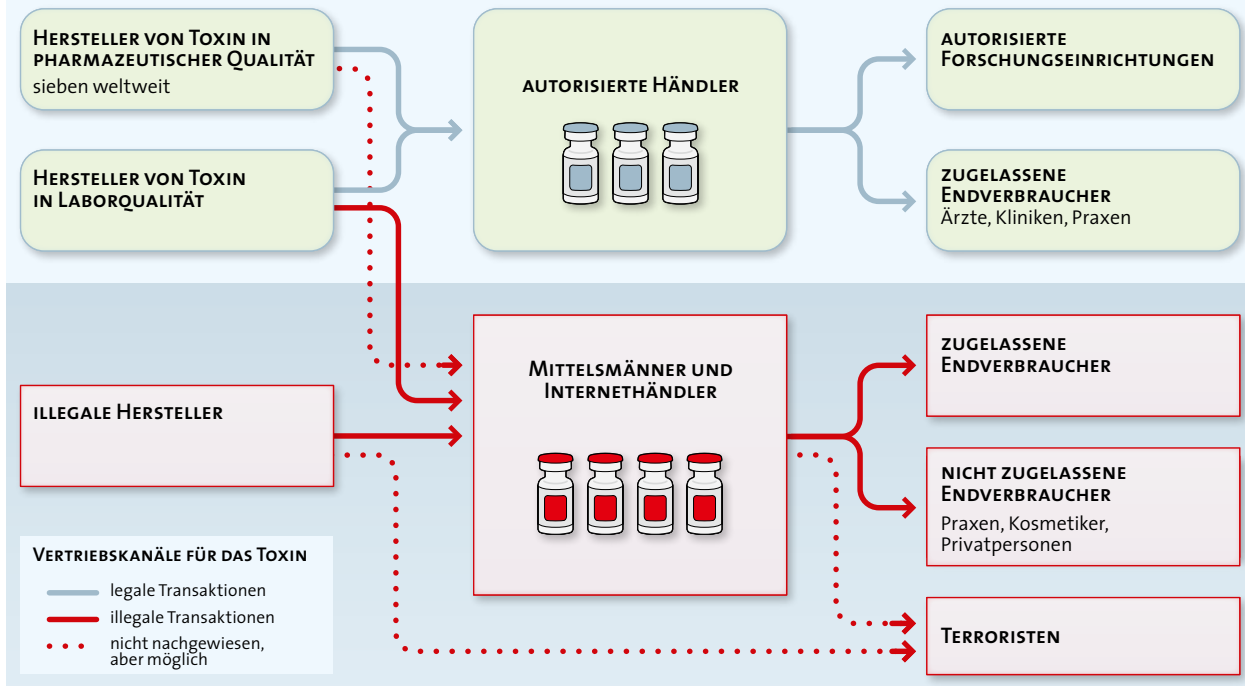
Nanogramm (ng) = 1 milliardstel Gramm
 Mikrogramm (µg) = 1 millionstel Gramm
 Milligramm (mg) = 1 tausendstel Gramm

13PT

Offener Markt für eine waffenfähige Substanz

Die intensive Nachfrage nach kosmetischen Botoxpräparaten beflügelt einen weltweiten Markt für Fälschungen. Die Anzahl der illegalen Produzenten ist unbekannt, wächst jedoch vermutlich immer mehr.

Geheime Labs, skrupellose Mittelsmänner und die Anonymität des Internethandels ermöglichen es potenziellen Terroristen, sich erhebliche Mengen des Toxins zu beschaffen.



Auch in Indien dürfte sich ein Handel mit illegalen Botoxprodukten etablieren. Die im Jahr 2007 gegründete Firma BOTOGenie östlich von Neu-Delhi ist der einzige legale Produzent auf dem Subkontinent, dessen Markt für kosmetische und therapeutische Botoxpräparate rasch wächst. Die indische Branche, die ausländische Behandlungswillige auf der Suche nach kostengünstigen Eingriffen bedient, expandiert enorm und dürfte Hersteller gefälschter Produkte anziehen.

Das Toxin ist so giftig, dass jedes einzelne Molekül eine Nervenzelle lähmen kann

Vom Sicherheitsaspekt her ist der Boom dieses Marktes beunruhigend – denn es ist nur ein kleiner Schritt vom Verkauf gefälschter Botoxpräparate für kosmetische Zwecke zum direkten Handel mit großen Mengen an Toxin, die sich für terroristische Anschläge eignen. Es ist auch kaum zu verhindern, dass Fälscher und Kriminelle Labs einrichten, da sich das Toxin ohne aufwändige Ausrüstung und besonderes Expertenwissen herstellen lässt.

Das Bakterium *Clostridium botulinum*, das Botulinumtoxin produziert, lebt im Boden und bevorzugt anaerobe Bedingungen, das heißt, es vermehrt sich nur in sauerstofffreiem Milieu. In der Vergangenheit war die häufigste Ur-

sache des Botulismus, also der Vergiftung mit Botulinumtoxin, der Genuss verdorbener Lebensmittel, etwa aus undichten oder unzureichend sterilisierten Konserven. Heute ist die häufigste Form der Wundbotulismus, in der Regel bei Drogenabhängigen, die sich bei Injektionen mit *C. botulinum* infizieren. Botulinumtoxin ist das wirksamste bekannte Gift. Um die winzigen Mengen herzustellen, die für Menschen tödlich wirken, genügt ein Labor mit einfachem Ausrüstungsstandard. Jeder Diplombiologe könnte binnen einer Woche genügend Toxin herstellen, um Tausende von Menschen zu töten.

Ein einzelnes Molekül des hochgiftigen Botulinumtoxins reicht aus, um eine Nervenzelle zu inaktivieren. Die Toxinmoleküle blockieren Rezeptoren an den Nervenenden, setzen die Signalübertragung von Nerv zu Muskel außer Kraft und lähmen so die entsprechende Muskulatur. Schon die Injektion von 0,09 bis 0,15 Mikrogramm reinen Botulinumtoxins reicht aus, um einen 70 Kilogramm schweren Menschen zu töten. Obwohl das Toxin nach Inhalation nicht mit der gleichen Effizienz bis an die Nervenenden gelangt, genügen doch schon 0,7 bis 0,9 Mikrogramm eingeatmeten Botulinumtoxins für die letale Wirkung. Die orale Einnahme ist die am wenigsten effiziente Vergiftungsmethode, erst etwa

70 Mikrogramm wirken auf diesem Weg tödlich. Man kann es auch so ausdrücken: 1 Gramm Botulinumtoxin entspricht 14 000 tödlichen oralen Dosen und reicht aus, um 1,25 Millionen Menschen durch Inhalation umzubringen.

Alle frei lebenden Stämme von *C. botulinum* produzieren das Toxin, wobei die von den legalen Herstellern verwendeten Bakterien natürlich vorkommende, besonders produktive Stämme sind. Vor allem der so genannte Hall-Stamm findet auch in Forschungslabors Verwendung und wird in nationalen Zellkulturbanken vorgehalten. Ein Toxinhersteller in spe, der sich das Bakterium beschaffen kann, hätte keine Probleme herauszufinden, wie er es einsetzen muss, denn in den letzten 50 Jahren erschienen in der wissenschaftlichen Literatur zahlreiche Anleitungen zur Toxinproduktion.

Der relativ schnelle Zerfall des Toxins bei Kontakt mit Sauerstoff war bei früheren Versuchen ein größeres Hindernis, um Botulinumtoxin für Waffen zu verwenden. Den USA und der ehemaligen Sowjetunion gelang es dennoch, Kampfmittel zu produzieren, die Botulinumtoxin als Aerosol freisetzen. Der Irak stellte ebenfalls Botulinumtoxinbomben her, die aber wahrscheinlich wirkungslos gewesen wären. Der einzige gut dokumentierte Versuch einer nichtstaatlichen Gruppe, Botulinumtoxin als Waffe einzusetzen, fand in den frühen 1990er Jahren statt. Die Weltuntergangssekte Aum Shinrikyo, der auch Ärzte und Wissenschaftler angehörten, versuchte mehrmals, Botulinumtoxin-Aerosole mit Sprüheräten zu verteilen, die sie in Koffern versteckt hatten. Die Anschläge scheiterten zwar, doch nur, weil der verwendete

C.-botulinum-Stamm relativ wenig Toxin produzierte, die Sprühdüsen verstopften oder zögerliche Täter die Geräte nicht aktivierten.

Die Bemühungen internationaler Sicherheitsinstitutionen zur Eindämmung biologischer und chemischer Waffen richten sich vor allem darauf, die Nachfrage zu begrenzen, indem man versucht, bestimmte Länder von der Entwicklung solcher Waffen abzuhalten. Zudem wird das Angebot an Ausrüstungen und das Know-how zur Herstellung solcher Waffen durch strenge Ausfuhrbeschränkungen knapp gehalten. Exportkontrollen und Verträge wie die Biowaffenkonvention aus dem Jahr 1972 wurden allerdings zwischen Staaten, ausgehandelt. Die internationale Verbreitung von illegal hergestelltem

Botulinumtoxin schafft hier eine völlig neue, unübersichtliche Lage, da nicht Staaten, sondern Privatpersonen die Produktionsmittel für Toxine beschaffen und nicht Regierungen, sondern Verbraucher die Nachfrage generieren.

Das Internet spielt dabei eine Schlüsselrolle, weil es sowohl den Einkauf erleichtert als auch die Nachfrage nach Botulinumtoxin schürt. Deshalb stellt dieses Gift eine viel unmittelbarere Bedrohung dar als andere waffenfähige biologische oder chemische Agenzien. In unserer Studie dokumentierten wir eine erhebliche Zunahme von Anbietern im Internet. Die Möglichkeit, dass sich dahinter ein entsprechender Anstieg der illegalen Produktionskapazitäten für Botulinumtoxin verbergen könnte, hat bei Behörden, die sich mit der Prävention von Bioterrorismus und der Eindämmung des Handels mit manipulierten Arzneimitteln

Das Internet verstärkt die Bedrohung, da es sowohl die Beschaffung von Botulinumtoxin erleichtert als auch die Nachfrage schürt

Ein Weg, um das Problem in den Griff zu bekommen

Um die illegale Produktion von Botulinumtoxin zu bekämpfen, überlegen Ermittlungsbehörden und Wissenschaftler, wie sie Herstellern auf die Spur kommen. Denkbar wäre, dass sie getarnt als Betreiber von Praxen, bei möglichst vielen Internethändlern Botoxpräparate bestellen (1). Laboranalysen würden dann jedem Produzenten eine

unverwechselbare chemische Produktsignatur zuordnen (2). Diese dürfte Rückschlüsse auf die geografische Lage der Produktionslabors sowie auf die Herkunft der verwendeten Ausgangsmaterialien zulassen (3). Die Vielfalt der Signaturen würde außerdem anzeigen, wie viele Hersteller es gibt.



1 BOTOXPRÄPARATE ONLINE BESTELLEN



Ermittlungsbehörden



Präparate

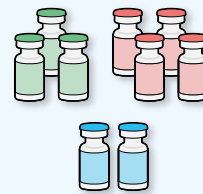
2 PRODUKTSIGNATUREN ANALYSIEREN



Analyse erfasst:
DNA – Spuren bakterieller DNA



chemische Substanzen – Metalle und Spurenelemente im Wasser sowie andere bei der Herstellung benutzte Chemikalien



Produktsignaturen

3 GEWONNENE INFORMATIONEN

- Anzahl der Hersteller
- Identität der eingesetzten Bakterienstämme
- Hinweise auf die geografische Herkunft anhand von Rückständen aus Wasser und Umweltchemikalien
- mögliche Lieferanten für chemische Ausgangsmaterialien

Bekämpfung von Fälschungen

Hologramme im Etikett eines legalen Botoxpräparats sind schwer zu fälschen und zeigen dem Endverbraucher, dass das Medikament rechtmäßig hergestellt wurde. Lizenzierte Hersteller von Botoxpräparaten nutzen auch andere Etikettierungstechniken, um die Fälschungssicherheit ihrer Produkte zu erhöhen. Sie starteten Informationskampagnen, um die Öffentlichkeit vor gefälschten Präparaten zu warnen. Ihnen fehlen jedoch die Ressourcen und die Legitimation, die Fälscher und ihre Mittelsmänner zu verfolgen.



befassen, bisher noch zu wenig Aufmerksamkeit erregt. Einige traditionelle Strategien zur Waffenkontrolle sind gegen diese neue Bedrohung wahrscheinlich wirkungslos. Die Begrenzung des Zugangs zu Laborgeräten oder Informationen dürfte künftige Botoxproduzenten kaum davon abhalten, da die nötigen Standardutensilien leicht erhältlich sind und das Bakterium praktisch überall in der Welt vorkommt.

Moderne Etiketten erschweren den Schwindel

Eher Erfolg versprechend erscheint es hingegen, die Nachfrage nach illegalem Botulinumtoxin zu behindern. Hersteller von legalem, arzneimitteltauglichem Botulinumtoxin setzen modernste Etikettierungstechniken ein: Hologramme oder verifizierbare Seriennummern auf den Packungen. So können sich Ärzte und Kosmetiker vergewissern, dass sie es mit Originalprodukten zu tun haben. Auch eine andere Erfahrung könnte den Weg zu einem effektiveren Bekämpfungsansatz weisen: Erst vor wenigen Jahren entwickelte sich ein größerer Markt für gefälschtes Artesunat, ein halb synthetisches Mittel zur Behandlung von Malaria.

Im Jahr 2007 waren ein Drittel bis die Hälfte der in Südostasien vertriebenen Artesunatpräparate gefälscht, die meist keine therapeutische Wirkung besaßen. Die Hersteller der zugelassenen Präparate verloren dabei viel Geld, und zahlreiche Malariapatienten starben. Die Tropenkrankheit konnte sich weiter verbreiten, weil zahlreiche Betroffene nicht wirksam behandelt wurden. Im gleichen Jahr startete eine aufwändige internationale Kampagne unter dem Kodennamen »Operation Jupiter«. Sie hatte das Ziel, den Handel mit gefälschten Artesunatpräparaten zu stoppen. Unter anderem waren der Wellcome Trust, Interpol, die Royal Canadian Mounted Police, die australische Therapeutic Goods Administration, das chinesische Ministerium für öffentliche Si-

cherheit, die WHO und die US Centers for Disease Control and Prevention beteiligt.

Aus der »Operation Jupiter« lassen sich zahlreiche Lehren ziehen. Eine der wirksamsten Maßnahmen war, Hunderte von gefälschten Artesunatpräparaten aus Kambodscha, Laos, Myanmar, Thailand und Vietnam zu sammeln. In mehreren Referenzlabors wurden dann chemische Signaturen jedes Präparats erstellt. Mit diesen Daten konnten Ermittler die Zahl illegaler Produktionsstätten aufspüren, die Produkte der Zwischenhändler den Herstellern zuordnen und ein Bild der Vertriebsnetze erstellen. Die Herkunft einiger der gefälschten Produkte ließ sich in Südchina verorten und ermöglichte es Behörden, die kriminelle Organisation zu zerschlagen.

Wir nehmen nicht an, dass es einfach wäre, Regierungen zur Teilnahme an einem ähnlichen Programm gegen Hersteller von illegalem Botulinumtoxin zu bewegen. Doch die »Operation Jupiter« könnte als Vorbild dienen, da sie einen wissenschaftlichen Ansatz zur Einschätzung der Größenordnung des Problems lieferte. Wenn die Strafverfolgungsbehörden den ersten Schritt täten und Scheinpraxen gründeten, um gefälschte Botoxpräparate zu beschaffen, könnten solche Labors herausfinden, wie viele illegale Hersteller es tatsächlich gibt. Diese Daten könnten dann zur Strafverfolgung verwendet werden und die Quelle verraten, wenn es zu einem terroristischen Angriff käme. ~

DIE AUTOREN



Kenneth D. Coleman (links) und **Raymond A. Zilinskas** arbeiten am James Martin Center for Nonproliferation Studies des Monterey Institute of International Studies in Kalifornien. Der Mikrobiologe Coleman ist zudem Inhaber eines Biotechnologieunternehmens. Zilinskas, ebenfalls Mikrobiologe, leitet das Programm des Instituts zur Eindämmung chemischer und biologischer Waffen. Er berät seit Jahren die amerikanische Regierung und war 1994 als UN-Inspektor im Irak.

QUELLEN

- Arnon, S. S. et al.:** Botulinum Toxin as a Biological Weapon: Medical and Public Health Management. In: Journal of the American Medical Association 285, S. 1059–1070, 28. Februar 2001
- Kennedy, D.:** Beauty and the Beast. In: Science 295, S. 1601, 1. März 2002
- Pickett, A., Mewies, M.:** Serious Issues Relating to the Clinical Use of Unlicensed Botulinum Toxin Products. In: Journal of the American Academy of Dermatology 61, S. 149–150, Juli 2009
- Pilch, R. F., Zilinskas, R. A. (Hg.):** Encyclopedia of Bioterrorism Defense. Wiley, Hoboken 2005

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121035

Die verschwundenen Galaxien

Nach neuesten Schätzungen enthält das Universum 200 Milliarden Galaxien – doch das sind nur zehn Prozent der im Kosmos vorhandenen Materie. Wo verbirgt sich der große Rest?

Von James E. Geach

AUF EINEN BLICK

DAS INTERGALAKTISCHE MEDIUM

1 Die vermeintlich »normale« **Materie des Universums** steckt voller Rätsel. Eines der größten lautet: Warum bildet nur ein Bruchteil des kosmischen Materials Galaxien? Wohin ist der Rest verschwunden?

2 Vermutlich verbirgt sich die **normale Materie** größtenteils in riesigen **gasförmigen Filamenten**. Dieses **warm-heiße intergalaktische Medium (WHIM)** lässt sich nur schwer direkt nachweisen.

3 Die **Galaxienbildung** ist offenbar ein ziemlich ineffizienter Vorgang. Während Material in die Galaxie hineinstürzt, schießt es teilweise gleich wieder aus ihr heraus – Astrophysiker nennen diesen Vorgang **galaktische Rückkopplung**. Darum sind Galaxien nur **leuchtende Inseln** in einem lebhaft zirkulierenden Meer aus gasförmiger Materie.

Auf den Bildern, die das Hubble-Weltraumteleskop liefert, wimmelt das All nur so von Galaxien. Die feinste je gefertigte Teilaufnahme des Nachthimmels, das Hubble Ultra Deep Field, zeigt ungefähr 10 000 dieser Sternenwirbel in einem Gebiet, das einem Hundertstel der Vollmondfläche entspricht. Auf den ganzen Himmel hochgerechnet ergibt das 200 Milliarden.

Demnach scheint der Kosmos geradezu von Galaxien überzuquellen. Doch dieser Schein trügt. Wenn man die sichtbare Materie aller heutigen Galaxien summiert, kommt

man nur auf ein Zehntel des beim Urknall erzeugten Materials. Wo ist der Rest, und warum hat er sich nicht zu Galaxien entwickelt? Das ist eines der größten Rätsel der modernen Astronomie.

Der Fehlbetrag hat nichts mit Dunkler Materie oder Dunkler Energie zu tun, das heißt mit den unbekanntesten Substanzen, die zusammen 96 Prozent der Gesamtmasse des Kosmos ausmachen. Das Problem betrifft die 4 Prozent normaler Materie, aus der unsere Körper und unsere alltägliche Umgebung bestehen – hauptsächlich Baryonen, also die Teil-

Während sich eine Galaxie vom Typ unserer Milchstraße bildet, zieht sie dichtes, kaltes Gas (rote Ströme) an und stößt zugleich heißes Gas (blaue Ströme) in den intergalaktischen Raum zurück. Am Ende enthält sie nur einen kleinen Bruchteil des Rohmaterials. Der Autor erzeugte dieses Bild mit Hilfe eines kosmologischen Simulationsprogramms, das neue Erkenntnisse berücksichtigt.

chensorte, zu der Protonen und Neutronen gehören. Somit stehen die Kosmologen vor einem doppelten Rätsel: Nicht genug damit, dass das Universum größtenteils aus rätselhaften »dunklen« Komponenten besteht, sogar von der normalen Materie ist nur ein Bruchteil auffindbar!

Das bedeutet, der Prozess der Galaxienbildung muss sehr ineffizient sein – so als würde nur jeder zehnte Samen einer Saat aufgehen. Nachdem Astronomen jahrelang nach einer Erklärung gesucht haben, müssen wir jetzt offenbar nicht nur unser Bild der Galaxienentstehung revidieren, sondern sogar den Begriff Galaxie selbst.

Wo sind all die Baryonen geblieben?

Woher wissen wir, dass das Universum zu Beginn mehr Baryonen enthielt, als wir heute direkt nachzuweisen vermögen? Die anfängliche Menge baryonischer Materie lässt sich ziemlich leicht abschätzen. Die Information steckt in der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, einem Überbleibsel des Urknalls. Raumsonden wie die Wilkinson Microwave Anisotropy Probe und das Planck-Weltraumteleskop messen kleinste Schwankungen in der Temperatur dieser Strahlung, und die Verteilung dieser Fluktuationen offenbart die Baryonendichte des Universums zu einer Zeit, als es noch keine Galaxien gab. Eine zweite, davon unabhängige Schätzung beruht auf der Häufigkeit von Helium, Deuterium und Lithium. Diese Elemente wurden in den ersten Minuten des Universums in einem Mengenverhältnis synthetisiert, das von der Gesamtmenge an baryonischer Materie abhing. Beiden Methoden zufolge machen Baryonen vier Prozent der Masse des heutigen Universums aus.

Zu Beginn bildeten alle Baryonen ein heißes Gas, das den Raum erfüllte. In Gebieten hoher Dichte zog es sich auf Grund der Schwerkraft zu immer dichteren Wolken zusammen, von denen die Galaxienentstehung ausging. Astronomen entdecken dieses Gasreservoir des frühen Universums, indem sie das intensive Licht weit entfernter Quasare analy-

sieren, das auf dem Weg zu uns das urtümliche intergalaktische Gas durchquert. Da der kalte, neutrale Wasserstoff einer Gaswolke Photonen einer ganz bestimmten Energie absorbiert, erzeugt er im Quasarspektrum eine charakteristische Absorptionslinie – eine Helligkeitslücke bei einer genau definierten Wellenlänge.

Ein vom Quasar ausgehender Lichtstrahl mag unterwegs Hunderte solcher Wolken durchqueren, und jede hinterlässt eine Absorptionslinie, die je nach ihrer Entfernung vom Beobachter auf Grund der kosmischen Rotverschiebung bei etwas unterschiedlicher Wellenlänge liegt. Indem wir die Lücken im Spektrum summieren, können wir die Anzahl der Baryonen in diesen Wolken berechnen. Demnach gab es noch fünf Milliarden Jahre nach dem Urknall, das heißt vor rund neun Milliarden Jahren, so viele Baryonen wie ganz zu Anfang. Die meisten trieben im intergalaktischen Raum umher und waren noch nicht zu leuchtenden Galaxien kollabiert (siehe »Die Macht der kosmischen Leere« von Evan Scannapieco et al., Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 36).

In den neun Milliarden Jahren seither bildete sich aus dem riesigen Reservoir urtümlichen Wasserstoffs der Großteil der heutigen Galaxien. In deren Innerem fügten sich die Baryonen zu unterschiedlichsten Gestalten; so entstanden Sterne und Sternreste, neutrales und ionisiertes Gas aus Atomen und Molekülen, Staub, Planeten – und Menschen.

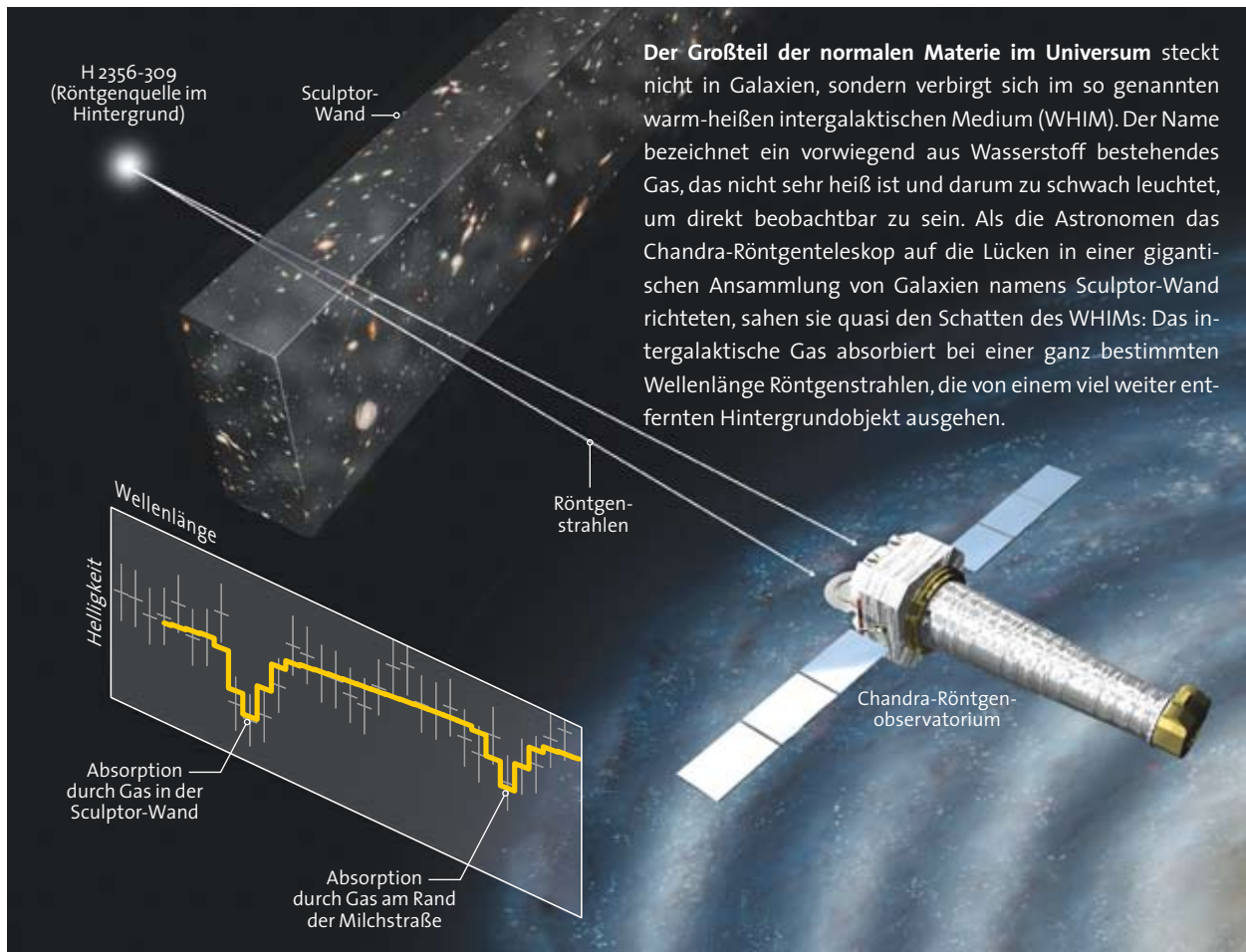
Wir können die Masse der Baryonen in diesen unterschiedlichen Formen abschätzen, indem wir das elektromagnetische Spektrum ihrer Strahlung messen. Sichtbares Licht und nahes Infrarot geben Auskunft über die Masse von Sternen; eine deutliche Radioemissionslinie signalisiert die Menge an neutralem atomarem Wasserstoff; Infrarotstrahlung zeigt interstellaren Staub an. Auf diese Weise zählen Astronomen alle unterschiedlichen Formen baryonischer Materie in allen uns umgebenden Galaxien zusammen – und dabei offenbart sich die große Diskrepanz: Die Gesamtsumme macht nur zehn Prozent der ursprünglich im frühen Universum vorhandenen Baryonen aus. Vermutlich sind die meisten nicht einfach verschwunden, sondern halten sich in den riesigen Räumen zwischen den Galaxien auf. Aber warum können wir sie nicht sehen?

Spurensuche in Zwischenräumen

Immerhin einige dieser intergalaktischen Baryonen können die Astronomen aufspüren. Dichte Schwärme von Galaxien, so genannte Cluster, sind von Plasma erfüllt – ionisiertem Gas. Die intensive Gravitation eines Clusters verleiht den Ionen hohe Geschwindigkeit und erhitzt das Plasma auf hunderte Millionen Grad; dadurch sendet es Röntgenstrahlung aus. Weltraumteleskope wie XMM-Newton und Chandra können Galaxiencluster ohne Weiteres anhand dieser Strahlung entdecken. Doch da Cluster selten sind, kommt das darin enthaltene Gas nur für zusätzliche vier Prozent der Baryonen auf. Wenn wir alle Baryonen zusammenzählen, die wir in Galaxien, Clustern und andernorts im intergalaktischen Raum sehen können, macht das erst die Hälfte des Gesamt-



Der fehlenden Materie auf der Spur



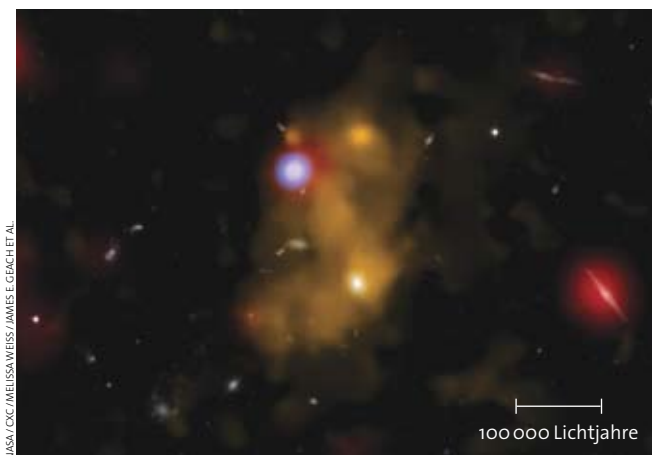
betrags aus. Das bedeutet: Material für mindestens 500 Milliarden Galaxien bleibt unauffindbar.

Um den Fehlbetrag zu erklären, vermuteten Renyue Cen und Jeremiah P. Ostriker von der Princeton University sowie Romeel Davé von der University of Arizona vor zehn Jahren, die fehlenden Baryonen seien zwar vorhanden, hätten aber einen schwer zu entdeckenden Zustand angenommen, der mit den großräumigen kosmischen Strukturen zusammenhängt: Unter dem Einfluss der Gravitation hat sich die Dunkle Materie zu einem riesigen Netz zusammengezogen und bildet eine Art universelles Skelett. Die Cluster sind eigentlich nur besonders dichte Knoten dieses kosmischen Gewebes. Außerhalb der Cluster sammeln sich die meisten Galaxien in weniger dichten Gruppen oder in langen Filamenten. Das intergalaktische Gas wird von der Schwerkraft der Filamente angezogen und erhitzt sich dabei durch Stoßwellen auf Temperaturen von 100 000 bis zu einigen zehn Millionen Grad. Das mutet sehr heiß an, ist aber für Gas zwischen Clustern eher lauwarm. Die Wärme reicht zwar aus, um die Gasteilchen stark zu ionisieren, aber nicht, um zur Röntgenstrahlung anzuregen.

Cen, Ostriker und Davé taufte dieses Material das warm-heiße intergalaktische Medium oder kurz WHIM. Wenn wir seine Existenz und seine Ausmaße empirisch bestätigen könnten, wären wir im Stande, die fehlenden Baryonen zu identifizieren.

Um das WHIM zu entdecken, suchen Astronomen nach kleinen Beimengungen von ionisiertem Sauerstoff oder Stickstoff, weil sie charakteristische Wellenlängen im Ultraviolett- oder Röntgenbereich absorbieren. Das ist dieselbe Absorptionslinienmethode wie für die kalten Wasserstoffwolken im frühen Universum: Man sucht nach Lücken im Spektrum von Quasaren, die das WHIM von hinten beleuchten. Tatsächlich haben das Hubble-Weltraumteleskop und der inzwischen aufgegebenen Far Ultraviolett Spectroscopic Explorer (FUSE) mehrmals Absorptionslinien von stark ionisiertem Sauerstoff in Quasarspektren entdeckt. Allerdings zeigt dieses Ion nur den relativ kühlen Teil des WHIMs an. Um das häufigere, heißere Gas aufzuspüren, müssen wir nach den Absorptionslinien noch stärker ionisierter Gaspartikel suchen.

Das Team um Taotao Fang von der University of California in Irvine hat mit den Röntgenteleskopen Chandra und XMM-



Der gigantische Klumpen aus Wasserstoffgas (gelb) ist offenbar bei der Bildung einer massereichen Galaxie übrig geblieben.

Newton die so genannte Sculptor-Wand erforscht, eine riesige Ansammlung von Galaxien, die mit 400 Millionen Lichtjahren Entfernung noch im lokalen Universum liegt. Die dort gefundenen Absorptionslinien weisen auf fast vollständige Ionisation – Verlust der Elektronenhülle – des Sauerstoffs hin. Das Team schloss daraus auf die gesamte Baryondichte in diesem WHIM und kam zu dem Schluss, sie stimme mit kosmologischen Simulationen überein.

Allerdings kratzen solche Beobachtungen, so erfreulich sie sind, nur an der Oberfläche. Das WHIM-Signal ist schwach und liegt an der Nachweisgrenze der Instrumente. Außerdem beruht die Absorptionslinienmethode auf seltenen und zufällig verteilten Quasaren; das macht die WHIM-Suche zum Glücksspiel. Und selbst wenn man trotz alledem Absorption entdeckt, muss man zahlreiche Annahmen über die Beschaffenheit des Gases machen, um auf weitere WHIM-Eigenschaften schließen zu können.

Galaxienbildung einst und jetzt

Die Existenz des WHIMs erklärt einigermaßen, warum die Galaxienformung so wenig effektiv ist: Durch die Entwicklung großräumiger Strukturen wurde das intergalaktische Gas zu dünn und zu heiß, um kühle, dichte Galaxienkeime zu bilden. Doch offensichtlich haben trotzdem einige Baryonen Galaxien hervorgebracht, sonst gäbe es uns nicht.

Also muss die Galaxienbildung früher viel effektiver gewesen sein. Vor rund acht Milliarden Jahren lag die durchschnittliche Entstehungsrate von Sternen 10- bis 20-mal höher als heute. Damals nahmen die meisten Galaxien, die wir heute sehen, Gestalt an. Wodurch verlangsamte sich die Galaxienbildung später so drastisch? Wie entstehen die Sternwirbel überhaupt?

Im Prinzip ist das Rezept ganz einfach. Nach einem Modell, das Simon D. M. White vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und Carlos S. Frenk von der Durham University (England) aufstellten, wachsen Galaxien in massereichen Klumpen Dunkler Materie, so genannten Halos, deren Schwer-

kraft das Gas der Umgebung ansaugt. Während es den Halo durchquert, wird es teilweise durch Stoßwellen erhitzt, emittiert Strahlung, kühlt dadurch wieder ab und zieht sich zu einem kompakten Gebilde zusammen. In dessen Innerem kann das Gas noch kühler werden und zu Wolken aus molekularem Wasserstoff kollabieren, die sich auf Grund ihrer Gravitation weiter zusammenziehen und schließlich die für Sterne erforderliche Dichte erreichen. Größere Galaxien können aus der Verschmelzung kleinerer Systeme hervorgehen.

White und Frenk erkannten schon in den 1990er Jahren, dass ihr Modell Lücken aufweist. Zum Beispiel wird nicht das gesamte in Galaxien einströmende Gas durch Stoßwellen auf hohe Temperaturen gebracht. Doch seither wurde das ursprüngliche Modell verfeinert. Neuen thermodynamischen Simulationsrechnungen zufolge bildete das Gas, das im frühen Universum in die entstehenden galaktischen Scheiben hineinströmte, zum Teil Stränge, die mit 10 000 bis 100 000 Grad relativ kalt waren und nur wenige tausend Lichtjahre Durchmesser hatten. Die kalten Strömungen durchstießen anscheinend das heißere Gas im Halo und gelangten direkt in die Galaxien.

Diesen Vorgang hat allerdings noch niemand direkt beobachtet. Die detaillierte Physik der Akkretion von Gas zu Galaxien ist kompliziert, und verschiedene Simulationen machen etwas unterschiedliche Vorhersagen. Immerhin scheint unstrittig, dass alle Galaxien durch die schwerkraftbedingte Akkumulation von urtümlichem Gas entstehen, das entweder erhitzt und abgekühlt wird oder sich niemals erwärmt.

Das Modell vermag aber nicht zu erklären, wodurch der Zustrom von Gas letztlich zum Erliegen kommt; sonst würden die Galaxien monströse Formen annehmen. Frühere Modelle gaben die beobachteten Größenverhältnisse zwar recht gut wieder – aber nur, weil die Astronomen den Wert der mittleren Baryondichte damals halb so hoch ansetzten wie heute. Als die Zahl auf Grund neuer Messungen nach oben korrigiert werden musste, lieferten die Modelle ein unrealistisches Übermaß an massereichen Galaxien.

Außerdem ergeben die Modelle eine Unmenge von ziemlich kleinen Klumpen Dunkler Materie, die sich erst nachträglich zu immer größeren Gebilden zusammenballen – doch das trifft auf wirkliche Galaxien nicht zu. Man beobachtet längst nicht so viele kleine Galaxien, wie die Modelle vorhersagen, und die massereichsten Galaxien haben sich anscheinend nicht durch graduelle Ansammlung kleinerer Teile gebildet, sondern rasch und unmittelbar.

Offenbar fehlt den Modellen ein entscheidender Bestandteil, der die Gaskühlung und die Sternbildung so regelt, dass kleine Galaxien schlecht Sterne bilden und massereiche Galaxien nicht unbegrenzt wachsen. Darum führten Theoretiker zusätzliche Regulierungsprozesse ein, die unter dem Namen galaktische Rückkopplung zusammengefasst werden. Sie wirken dem Gravitationskollaps von Gas zu Galaxien entgegen und begrenzen die Anzahl der gebildeten Sterne. Zu solchen Vorgängen gehören Supernova-Explosionen, Ultraviolettstrahlen und Materieströme aus Sternen sowie die enor-

me Energie, die beim Wachstum der gigantischen Schwarzen Löcher in den Kernen massereicher Galaxien frei wird (siehe »Gegenwind aus dem Schwarzen Loch« von Wallace Tucker et al., Spektrum der Wissenschaft 5/2007, S. 34). In den größten Galaxien sorgen wahrscheinlich vor allem Schwarze Löcher für die Rückkopplung; in kleineren Systemen sind Supernovae und Sternwinde wichtiger.

All diesen Prozessen ist gemeinsam, dass sie Energie in das umgebende Medium abgeben. Dadurch können Galaxien den Zustrom von Materie stoppen, bereits akkumuliertes Gas an der Sternbildung hindern oder sogar Baryonen in den intergalaktischen Raum zurückwerfen. Modelle mit Rückkopplung entsprechen der tatsächlich beobachteten Galaxienverteilung viel besser. Zudem sorgt das galaktische Feedback dafür, dass das WHIM wieder aufgefüllt und erwärmt wird. Durch kontinuierliches Kühlen und Erwärmen zirkulieren die Baryonen zwischen dem intergalaktischen Raum und dem Galaxieninneren. Das Galaxienwachstum wird durch ein empfindliches Gleichgewicht bestimmt, das im Lauf der kosmischen Geschichte hin- und herschwankt. Heute wissen wir: Die Galaxienentstehung hängt vom Kampf um Baryonen ab.

Die Lyman-Alpha-Klumpen

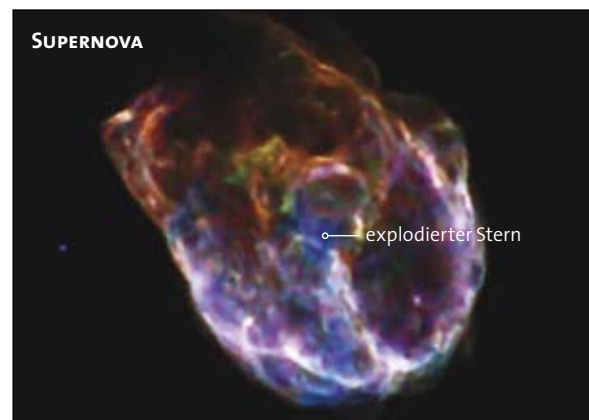
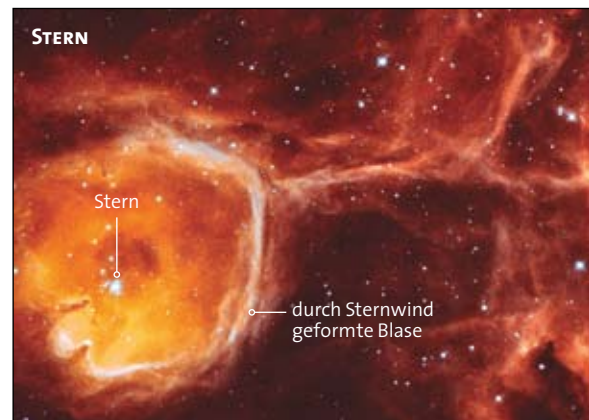
Doch wie funktionieren Gaskühlung und Rückkopplung genau? Wir brauchen empirische Daten, um die Modelle zu prüfen. Die kalte Materie, die einst in Galaxien einströmte, sollte sich durch die diffuse Strahlung verraten, die der Wasserstoff während der Abkühlung aussendet. Indizien für Rückkopplung sind intensive Infrarotemissionen bei der Sternbildung sowie Röntgen- oder Radiostrahlung aus der Umgebung eines massereichen Schwarzen Lochs. Mittlerweile ist es gelungen, beiden Prozessen auf die Spur zu kommen.

Vor rund zehn Jahren entdeckte Charles Steidel vom California Institute of Technology in Pasadena Himmelsobjekte, die anscheinend den Nachweis der Kühlung erlauben: die Lyman-Alpha-Klumpen. Lyman-Alpha bezeichnet eine typische Strahlungsfrequenz von Wasserstoffgas. Die »Klumpen« (*blobs*) zählen zu den größten leuchtenden Objekten im frühen Universum – helle Wolken, die mit 300 000 Lichtjahren Durchmesser viel größer sind als unsere Milchstraße. Ihre Strahlung stimmt frappierend mit theoretischen Vorhersagen für kaltes Gas überein, das in junge Galaxien strömt.

Allerdings erzeugen auch viele andere astrophysikalische Prozesse Lyman-Alpha-Emissionen. So könnten Ultraviolettstrahlen oder ein kosmischer Wind von galaktischem Ausmaß Energie in die Klumpen pumpen und sie erglühen lassen. Mit dem Chandra-Teleskop haben meine Kollegen und ich festgestellt, dass viele Klumpen Galaxien mit wachsenden Schwarzen Löchern enthalten, die intensive Röntgenstrahlung aussenden. Oft ist diese Aktivität von intensiver Sternbildung begleitet; sie macht sich durch Infrarotemissionen bemerkbar, die aus den umgebenden Staubschichten dringt. Nach unseren Berechnungen reicht die dabei freigesetzte Energie völlig aus, um die Lyman-Alpha-Emission zu erzeugen.

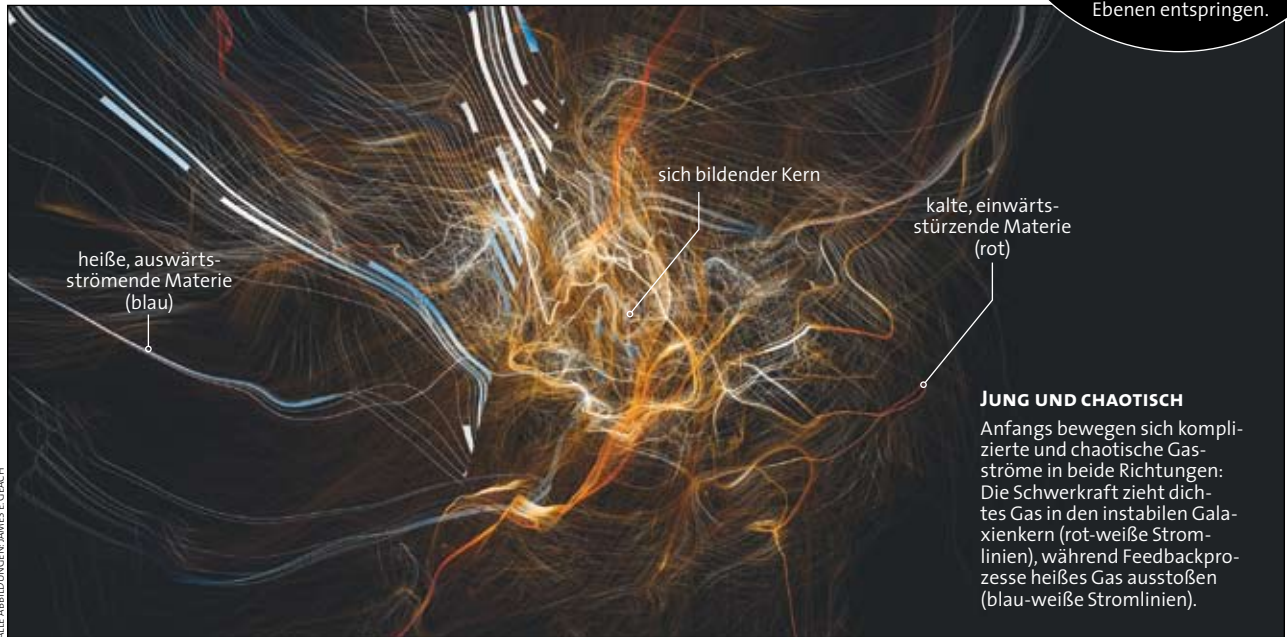
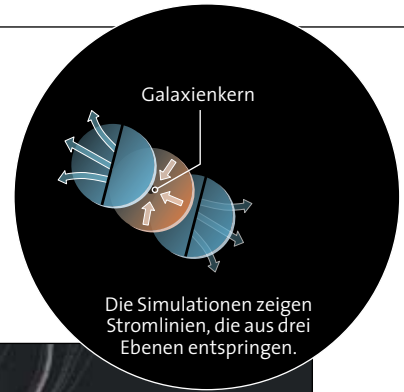
Wie gewonnen, so zerronnen

Warum kommen die Galaxien nur für einen derart kleinen Bruchteil der kosmischen Materie auf? Zum einen landet der Großteil der Materie im WHIM, zum anderen wachsen Galaxien nicht unbegrenzt weiter. Das intergalaktische Gas, das durch die Gravitation eingesaugt wird, kollabiert schließlich zu Sternen und Schwarzen Löchern. Diese Objekte strahlen aber wiederum Energie in das interstellare und intergalaktische Medium zurück; das wirkt dem Zustrom entgegen. Zu solchen Rückkopplungsprozessen gehören Sternwinde, Supernova-Explosionen sowie die von Schwarzen Löchern ausgehenden Jets.



Ein turbulenter Wirbel

Früher stellte man sich Galaxien als recht behäbige Gebilde vor: majestätische Scheiben aus unzähligen Sternen, die in der Leere des Weltraums treiben. Jetzt erweisen sie sich als offene dynamische Systeme, die aktiv mit der Umgebung wechselwirken. Fortwährend zirkuliert normale Materie zwischen den Galaxien. Der größte Teil davon hält sich zu jedem Zeitpunkt im intergalaktischen Raum auf. Die Simulation zeigt eine unserer Milchstraße ähnliche Galaxie vor zehn Milliarden Jahren und heute.



Vielleicht wird das Leuchten der Klumpen also gar nicht durch Kühlung hervorgerufen, wie viele meinen, sondern durch Erwärmung. Wie dem auch sei: Jedenfalls versprechen wir uns von den Klumpen Antworten auf weiterhin offene Fragen der Galaxienentstehung. Beispielsweise besagen detaillierte Simulationen der Dunklen Materie, dass um große Galaxien vom Milchstraßentyp Tausende von Zwerggalaxien schwirren sollten wie Bienen um den Bienenstock. Nun wird die Milchstraße zwar von einigen Zwergsystemen begleitet, doch die Simulationen sagen viel größere Mengen voraus.

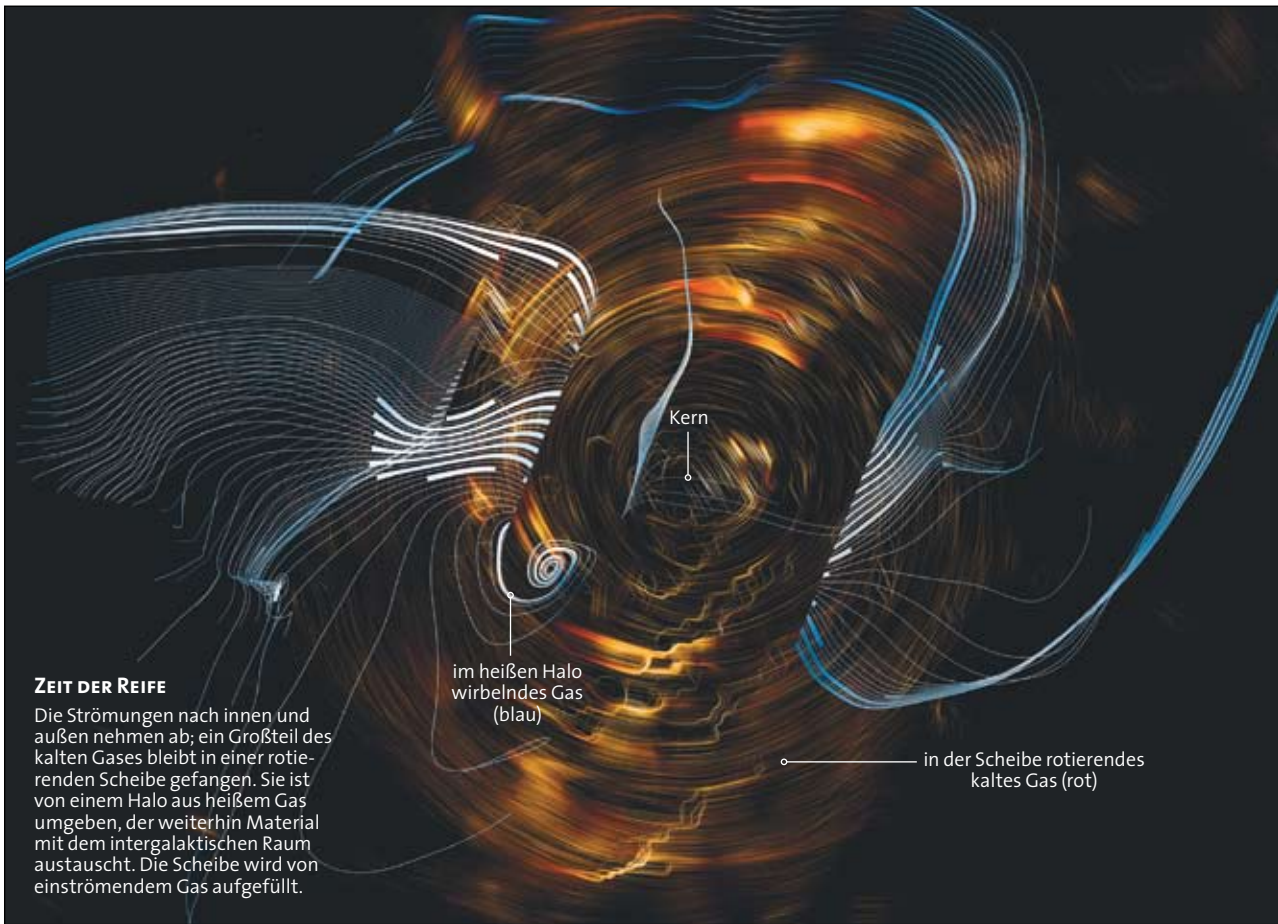
Was ist eine Galaxie?

Eine Erklärung wäre, dass Zwerggalaxien zwar tatsächlich im frühen Universum in großer Zahl entstanden, jedoch von ihrer Muttergalaxie mit Strahlung und Wind förmlich bombardiert wurden. Das Trommelfeuer fegte alle von den Zwergen akkumulierten Baryonen hinweg und ließ nur nackte Klumpen Dunkler Materie übrig, die sich seither in der Umgebung der Muttergalaxie verstecken. Demnach gelingt großen Galaxien im Kampf um Baryonen ein Waffenstillstand, während kleinere eine komplette Niederlage erleiden.

Seit der deutsche Philosoph Immanuel Kant (1724–1804) in den Spiralnebeln ferne »Welteninseln« vermutete, stellen wir uns Galaxien als isolierte Gebilde vor. Doch diese Inseln

sind nur leuchtende Spitzen in einem schier unermesslichen Meer baryonischer Materie. Sie erfüllt das Universum, wird von einer unsichtbaren »dunklen« Architektur geformt und entwickelt sich nach den Gesetzen der Gravitation.

Alle Baryonen waren zu Beginn im selben Zustand: heißes, ertümlisches Gas, das schnell die Grundelemente Wasserstoff und Helium sowie kleine Beimengungen von Deuterium und Lithium bildete. Was wir unter Galaxien verstehen, entstand aus diesem Rohmaterial, als es durch die Schwerkraft stark verdichtet wurde. Doch Galaxien bestehen nicht aus konstanten Baryonenmengen; seit dem Urknall bewegt sich die Materie in einem riesigen Kreislauf zwischen ihnen hin und her. Durch die widerstreitenden Einflüsse von Gravitation und Rückkopplung wird kaltes Gas zu Galaxien kontrahiert und erwärmt wieder ausgestoßen. Neuen Computersimulationen zufolge, die Rob Crain von der Swinburne University of Technology in Melbourne (Australien) und Benjamin Oppenheimer von der Universität Leiden (Niederlande) durchführten, zirkulierte fast die Hälfte der Baryonen, die gegenwärtig Galaxien bilden, früher einmal – oft sogar viele Male – durch das intergalaktische Medium. Die Baryonen, aus denen unser Körper besteht, haben seit fast 14 Milliarden Jahren an diesem Zyklus teilgenommen; die Materie Ihres Fingernagels entstammt vielleicht den Sternen frem-



der Galaxien und verbrachte Milliarden Jahre im intergalaktischen Raum, bevor sie in unserem Sonnensystem zur Ruhe kam. Wir sind bloß ein kurzlebiger Wirt der vergleichsweise sehr seltenen Substanz, die wir normale Materie nennen.

Das neue Bild der Galaxienentwicklung beruht auf dem Baryonenkreislauf. Galaxien entpuppen sich als kleine Details in der großräumigen Entwicklung des intergalaktischen Mediums. Das baryonische Universum ist überwiegend gasförmig. Galaxien sind nur Zwischenstadien in einem Zyklus, der fortwährend Partikel von einem Zustand in den anderen versetzt; zu jedem Zeitpunkt halten sich die meisten Baryonen nicht in Galaxien auf.

Für uns bleiben die leuchtenden Welteninseln dennoch etwas Besonderes: Die Milchstraße ist unsere Heimat – ein riesiges, komplexes Gebilde inmitten kosmischer Finsternis. Nach dem anthropischen Prinzip haben wir das unwahrscheinliche Glück, in einer Zeit zu leben, in der die Baryonen, aus denen die Erde besteht, eine kalte, stabile Form angenommen haben. Doch das kann nicht immer so bleiben. In rund fünf Milliarden Jahren wird die sterbende Sonne die inneren Planeten verbrennen, die äußeren verdampfen und den Abfall aus schweren Elementen allmählich zurück in das interstellare Medium verstreuen. Und so setzt sich der Kreislauf fort. ∞

DER AUTOR



Der Astronom **James E. Geach** stammt aus Cornwall (England). An der McGill University in Montreal (Kanada) untersucht er die Entwicklung der Galaxien, insbesondere die Entstehung der Sterne und das Verhalten des kalten Gases.

QUELLEN

- Bregman, J.N.:** The Search for the Missing Baryons at Low Redshift. In: Annual Review of Astronomy and Astrophysics 45, S. 221 – 259, 2007
- Davé, R. et al.:** The Intergalactic Medium over the Last 10 Billion Years. Ly-Alpha Absorption and Physical Conditions. In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 408, S. 2051 – 2070, 2010
- Geach, J.E. et al.:** The Chandra Deep Protocluster Survey: Ly-Alpha Blobs Are Powered by Heating, Not Cooling. In: Astrophysical Journal 700, S. 1 – 9, 2009

WEBLINKS

www.scientificamerican.com/may2011/geach
Dreidimensionale Ansicht einer Galaxienentstehung

www.physics.mcgill.ca/~jimgeach
Webseite des Autors mit Bildern und Weblinks

Den vollständigen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121036

Aufgewühlte See im Bermudadreieck

Vom Ozeanboden aufsteigende Gasblasen verringern den Auftrieb. Möglicherweise lassen sie so ganze Schiffe sinken.

Von H. Joachim Schlichting

Das Geheimnisvolle zieht die Menschen mit Macht an. Seit Jahrzehnten fesselt daher ein Seegebiet nördlich der Karibik zwischen Florida, Puerto Rico und den Bermudainseln unsere Fantasie. Immer wieder geriet das so genannte Bermudadreieck in die Schlagzeilen, weil darin angeblich Schiffe und Flugzeuge unter ungeklärten Umständen spurlos verschwanden. Dies bot natürlich Stoff für wilde Spekulationen, die von Roman- und Drehbuchautoren längst variantenreich verarbeitet wurden.

Noch immer erscheinen manche der Berichte von Unglücken im Bermudadreieck durchaus rätselhaft. Entsprechend zahlreich sind die Theorien, die zur Aufklärung beitragen wollen. An mindestens einer davon dürften Physiklehrer ihr Vergnügen haben. Sie fügt nicht nur einem der traditionellen The-

men des Physikunterrichts, dem Auftrieb, einen originellen Aspekt hinzu, sie lässt sich auch mit einfachen Mitteln experimentell überprüfen.

Das Verschwinden der Schiffe, so besagt die Theorie, sei die Folge von im Wasser aufsteigenden Gasblasen. Dadurch bekommt ein Schiff ein Wasser-Luft-Gemisch unter seinen »Kiel«, dessen mittlere Dichte kleiner ist als die von Wasser allein. Weil die Auftriebskraft zu diesem Wert proportional ist, sinkt sie so stark, dass sie nicht mehr ausreicht, um das Schiff zu tragen. Denselben Sachverhalt beschreibt das archimedische Prinzip. Ihm zufolge ist die Auftriebskraft eines Körpers in einem Medium genauso groß wie die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Mediums. Die Auftriebskraft wird also kleiner, weil die Gewichtskraft des verdrängten Mediums sinkt.

Der US-amerikanische Geochemiker Richard D. McIver griff Anfang der 1980er Jahre als Erster diese Argumentation in einer wissenschaftlichen Publikation auf: »Ausbrüche aus Gasansammlungen, die mit Hydraten in Zusammenhang stehen, ... könnten einige der vielen Ereignisse erklären, bei denen Schiffe und Flugzeuge auf rätselhafte Weise verschwanden – insbesondere in Gebieten, wo Tiefseesedimente große Gasmengen in Hydratform enthalten. Dies könnte vor der südöstlichen Küste der Vereinigten Staaten der Fall sein.« Darüber hinaus spekulierte McIver über große Gasfahnen, die aus dem Ozean aufsteigen und die Motoren niedrig fliegender Flugzeuge infolge der verringerten Luftdichte versagen lassen.

»Wissen möchte ich...«, sagte die Prinzessin, »warum ein Schiff eigentlich schwimmt. Es wiegt so viel: Es müsste doch untergehn. Wie ist das!«

Kurt Tucholsky (1890–1935)

Nehmen wir also ein Experiment vor. Wir benötigen ein Wasserglas, in das wir von unten Luftblasen einströmen lassen. Außerdem ein unsinkbares Objekt, das anders als ein normales Schiff nicht schon allein dadurch untergeht, dass es bei aufgewühlter See vollläuft. Dann wissen wir, dass es mit dem verminderten Auftrieb zusammenhängen muss, falls es im Experiment tatsächlich sinkt. Eine verschlossene Filmdose eignet sich gut dafür. Wir befüllen sie zuvor so, dass sie ähnlich wie ein Schiff auf dem Wasser liegt.

Indem wir mit einem Strohhalm in einen durchlöchernten Luftballon am Boden des Wasserglases blasen, lassen wir nun Gasblasen aufsteigen. Das Ergebnis scheint eindeutig: Die Dose sinkt im Strudel der Blasen unter die aufgewühlte Wasseroberfläche.

Chaotischer Tanz der Plastikfische

Doch mancher wird den Befund nicht verallgemeinern wollen. Denn andere Beispiele zeigen den gegenteiligen Effekt, etwa die beleuchteten »Wassersäulen«, wie sie in Möbelhäusern als Zimmerdekoration angeboten werden. Das sind wassergefüllte hohe Plexiglaszylinder, an deren Boden eine Pumpe einen Strom von Luftblasen aufsteigen lässt. Komplettiert werden die Designobjekte durch bunte Kunststofffische, deren Dichte etwas größer ist als die von Wasser. Ist die Pumpe abgeschaltet, sinken die Fische zum Boden des Zylinders. Ihren chaotischen Tanz beginnen sie erst, wenn der Blasenstrom einsetzt. Dann werden sie von der Strömung in die Höhe getrieben. Sie sinken zwar wieder ab, wenn sie aus der Strömung



Ein »Schiff«, hier eine halb mit Wasser gefüllte Filmdose, sinkt im Sprudelbad aus aufsteigenden Gasblasen. Diese stammen aus einem durchlöchernten Luftballon am Glasboden, in den der Experimentator durch einen Strohhalm Luft bläst.



Ein sinkendes Schiff hinterlässt keine Spuren. Kein Zufall also, dass Legenden wie jene um das Bermudadreieck im Westatlantik so viele Menschen in ihren Bann ziehen.

herausgeraten, werden aber bald erneut mitgerissen. Der Auftrieb, der ein Schiff im Gleichgewichtszustand ruhig schwimmen lässt, verringert sich in diesem Szenario nicht, sondern wird durch Energiezufuhr sogar dynamisch verstärkt.

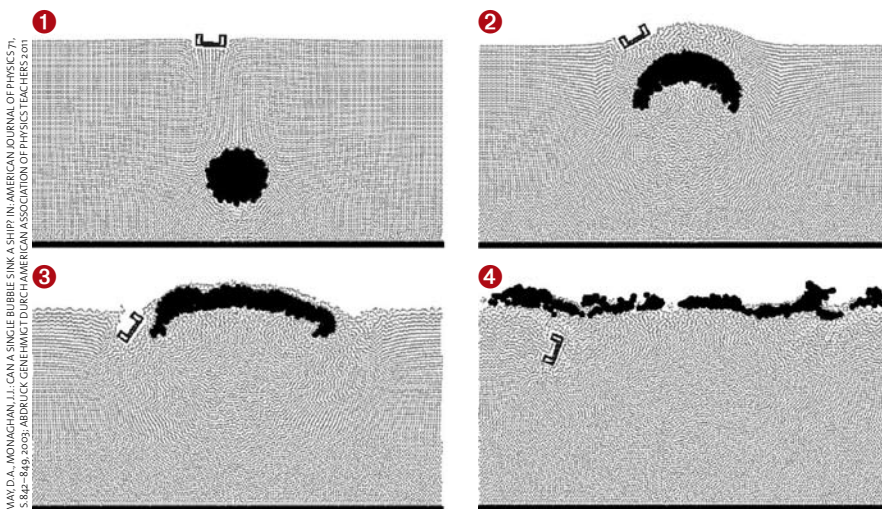
Die Gasblasen können also ganz unterschiedliche Wirkungen erzeugen. Einer der Gründe dafür liegt in der Konvektion, die im langen Plexiglaszylinder zumindest abschnittsweise zu erkennen ist und die Plastikfische hochwirbelt. In unserem Wasserglasversuch hingegen fehlt der Wasserstrom weitgehend, wie die Beobachtung von ein paar ins Wasser geworfenen Reiskörnern demonstriert: Sie sinken und bleiben liegen. Im Glas vermischt sich das Wasser über den gesamten Querschnitt des Glases mit Blasen. Wasserportionen, die durch diese möglicherweise etwas angehoben

wurden, sinken gleich danach wieder ab. Vielleicht erreichen die Blasen auf einer so kurzen Strecke zu geringe Aufstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeiten und ist auch ihre Anzahl pro Wasservolumen zu gering, als dass es zu nennenswertem Wassertransport kommen könnte.

Im freien Ozean ist die Situation natürlich völlig anders als in Wassergläsern und -zylindern. Beispielsweise fehlen Gefäßwände, die das Strömungsverhalten des Wassers oder sein Konvektionsverhalten beeinflussen. Zudem erzeugen die unterseeischen Hydratvorkommen Methanblasen ganz unterschiedlicher Größe. Mal »tröpfeln« lediglich viele kleine Blasen ins Meer, mal werden mit einem Schlag große Gas-mengen frei. Dann können die Riesenblasen theoretisch auch die Größenordnung eines Schiffs erreichen. Diesen Fall untersuchten die australischen

Forscher David A. May und Joseph J. Monaghan mit Computersimulationen und Experimenten (Abbildungen unten). Sie belegten, dass eine riesige Blase, die unterhalb eines Schiffs die Oberfläche des Wassers erreicht, einen mächtigen Wasserberg entstehen lassen kann. Ein solcher Berg ist zwangsläufig von einer tiefen Wasserrinne umgeben, in die das hochgehobene Schiff nun gegebenenfalls rutscht. Entscheidend ist dann nicht mehr die Verminderung des Auftriebs; vielmehr läuft das Schiff voll Wasser und sinkt anschließend.

Selbst wenn also katastrophenträchtige Gasblasen dem Phänomen Bermudadreieck zu Grunde liegen sollten, ist noch keineswegs klar, auf welche Weise sie sich im Einzelfall auswirken würden. Halten wir es daher lieber mit Einstein, der einst sagte: »Das Schönste, was wir erleben können, ist das Geheimnisvolle.« Noch liegen ohnehin keine sicheren Erkenntnisse darüber vor, ob sich im Bermudadreieck tatsächlich ozeanische »Whirlpools« beobachten lassen, die durch Methangasblasen angetrieben werden. ☞



MAY, D.A., MONAGHAN, J.J.: CAN A SINGLE BUBBLE SINK A SHIP? IN: AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS 71, S. 842-849, 2003. ABDRUCK GEFÜHRT DURCH DIE AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICS TEACHERS 2010

In Simulationen wiesen die Australier David A. May und Joseph J. Monaghan nach, dass auch aufsteigende Riesengasblasen Schiffe untergehen lassen können. Sie schlagen voll Wasser, wenn sie in die rund um den Wasserberg entstehende Rinne geraten.

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.

QUELLEN

May, D.A., Monaghan, J.J.: Can a Single Bubble Sink a Ship? In: American Journal of Physics 71, S. 842-849, September 2003
McIver, R.D.: Role of Naturally Occurring Gas Hydrates in Sediment Transport. In: American Association of Petroleum Geologists Bulletin 66, S. 789-792, Juni 1982

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : A \otimes A \rightarrow \mathbb{R}$$

$$\langle ab, \bar{a}b \rangle = \langle a, \bar{a} \rangle$$

$$h_2(\mathbb{D}) = \left\{ \begin{pmatrix} \alpha & x \\ \bar{x} & \beta \end{pmatrix} : \beta \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{D} \right\}$$

$$h_2(\mathbb{D}) \cong \mathbb{R}^{9,1} \text{ with metric}$$

$$-\det \begin{pmatrix} \alpha & x \\ \bar{x} & \beta \end{pmatrix} = x\bar{x} - \alpha\beta$$

$$= |x|^2 - \alpha\beta$$

If $\alpha = t + x_8$, $\beta = t - x_8$ &

$$x = x_0 + x_1 e_1 + x_2 e_2 + \dots + x_7 e_7$$

then

$$-\det \begin{pmatrix} \alpha & x \\ \bar{x} & \beta \end{pmatrix} =$$

$$x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 + x_6^2 + x_7^2 + x_8^2 - t^2$$

$\mathbb{H} \in$
but

MATHEMATIK

Exotische Zahlen und die Stringtheorie

Ein im 19. Jahrhundert entdecktes und in Vergessenheit geratenes Zahlensystem hält vielleicht die einfachste Erklärung dafür bereit, dass unser Universum zehndimensional sein könnte.

Von John C. Baez und John Huerta

In unserem Alltagsverständnis sind Zahlen nichts Besonderes. Als Kinder haben wir erst zu zählen gelernt und dann zu rechnen: addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren. Für die Mathematiker jedoch ist das vertraute Zahlensystem nur eines unter vielen möglichen. Die merkwürdigsten Zahlen sind die Oktonionen. Nach ihrer Entdeckung im Jahr 1843 lange Zeit weitgehend unbeachtet, gewannen sie in den letzten Jahrzehnten eine völlig unerwartete Bedeutung für die Stringtheorie. Und da Letztere – trotz unbestreitbarer Schwächen – ein aussichtsreicher Kandidat für eine physikalische »Theorie von Allem« ist, könnten am Ende die Oktonionen eine Erklärung dafür liefern, warum das Universum genau die Anzahl von Dimensionen hat, die wir kennen.

Von der mathematischen Kuriosität zum zentralen Hilfsmittel einer Theorie: Das wäre ein traumhafter Aufstieg. Aber so etwas kommt in der Mathematik im Allgemeinen und unter Zahlensystemen im Besonderen häufiger vor. Das klassische Beispiel sind die komplexen Zahlen – kom-

plizierter als die gewohnten reellen Zahlen, aber geradezu langweilig einfach gegenüber den Oktonionen.

Das Imaginäre – nicht reell, aber real

Aber fangen wir mit dem einfachsten Zahlensystem an: dem, das uns in der Schule beigebracht wird. Die Mathematiker nennen es die reellen Zahlen. man kann sie gut als Punkte einer Gerade darstellen (Kasten S. 57).

Das war dann auch schon der Stand der Dinge bis zum 16. Jahrhundert. Während der Renaissance jedoch entbrannte unter den Mathematikern ein Wettstreit darüber, wer die kompliziertesten Gleichungen lösen könne. Der italienische Mathematiker, Arzt, Spieler und Astrologe Gerolamo Cardano (1501–1576) setzte bei seinen Berechnungen die Quadratwurzel aus -1 oft als eine Art Geheimwaffe ein. Wo andere vor einem solchen Monster zurückschreckten, rechnete er unbekümmert mit dieser geheimnisvollen Zahl, bekam am Ende aber stets gewöhnliche reelle Zahlen als Lösung heraus. Warum er mit diesem

Um Entfernungen in der zehndimensionalen Raumzeit zu bestimmen, muss man etwas mehr rechnen als gewohnt. Aber die Rechenvorschrift ist wie üblich (letzte Zeile auf der linken Seite): Addiere die Quadrate der räumlichen Koordinaten e_0 bis e_7 (für die Oktonionen) und e_8 (für den String) und subtrahiere das Quadrat der Zeit.

Trick die – nachprüfbar – richtigen Lösungen erhielt, war ihm dabei keineswegs klar.

Mit der Veröffentlichung seiner Ideen 1545 löste Cardano eine jahrhundertelange Kontroverse aus: Gibt es die Wurzel aus -1 tatsächlich, oder handelt es sich nur um ein Rechenhilfsmittel ohne Realitätsgehalt? Kein Geringerer als René Descartes (1596–1650), der Schöpfer des klassischen Koordinatensystems, votierte knapp 100 Jahre später für Letzteres, indem er dieser »Zahl« das abfällige Attribut »imaginär« (»nur vorgestellt«) gab.

Der Name und die zugehörige Kurzbezeichnung i haben sich bis heute gehalten, aber mit der Existenz der imaginären Einheit haben die Mathematiker kein Problem mehr. Sie arbeiten wie selbstverständlich mit komplexen Zahlen, also Zahlen der Form $a + bi$, wobei a und b gewöhnliche reelle Zahlen sind.

Dabei ist deren geometrische Interpretation äußerst hilfreich. Um 1806 publizierte Jean-Robert Argand (1768–1822) die überraschende Idee, die komplexen Zahlen mit den Punkten der Ebene zu identifizieren. Carl Friedrich Gauß (1777–1855) tat das mit so nachhaltigem Erfolg, dass man heute allgemein von der gaußschen Zahlenebene spricht.

Wie kann die komplexe Zahl $a + bi$ einen Punkt in der Ebene darstellen? Ganz einfach: Man fasst die reellen Zahlen a und b als gewöhnliche (kartesische) Koordinaten des Punkts auf. Also liegt der Punkt $a + bi$ genau a Einheiten rechts und b Einheiten oberhalb vom Nullpunkt, und wenn a oder b negativ ist, links beziehungsweise unterhalb.

Argand ging noch einen großen Schritt weiter: Er zeigte, dass die Rechenoperationen mit komplexen Zahlen – Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division – geometrischen Transformationen entsprechen (Kasten rechts, unten).

Für die reellen Zahlen sind solche Transformationen etwas sehr Gewöhnliches. Man vollzieht sie bereits, wenn man beim Ausmessen eine lange Strecke, den Zollstock mehrfach anlegend, in kürzere Teilstücke zerlegt oder einen Fotokopierer

mit Vergrößerung oder Verkleinerung betreibt: Eine reelle Zahl zu addieren ist dasselbe, wie die ganze Zahlengerade ein entsprechendes Stück nach rechts oder links zu verschieben, je nachdem ob die zu addierende Zahl positiv oder negativ ist. Subtrahieren ist Addieren derselben Zahl mit umgekehrtem

Vorzeichen. Multiplikation oder Division mit einer positiven reellen Zahl entspricht einer Streckung oder Stauchung der kompletten Gerade. Multipliziert man zum Beispiel jede reelle Zahl mit 2, dann wird die Zahlengerade um den Faktor 2 gestreckt, während die Division durch 2 sie um denselben Faktor staucht. Im ersten Fall rücken alle Punkte doppelt so weit auseinander, im zweiten halbieren sich

ihre Abstände. Bei Multiplikation mit -1 wird die gesamte Gerade umgeklappt, sie wird am Punkt 0 gespiegelt.

Mit wenigen Modifikationen lässt sich diese Prozedur auf die komplexen Zahlen übertragen. Addiert man die komplexe Zahl $a + bi$ zu einem Punkt in der Ebene, dann gibt a an, um wie viel er nach links oder rechts wandert, und b , wie weit nach oben oder unten. Bei Multiplikation mit einer komplexen Zahl wird die komplexe Ebene gestreckt oder gestaucht, dabei zusätzlich aber noch gedreht. Insbesondere entspricht die Multiplikation mit i einer Vierteldrehung gegen den Uhrzeigersinn. Multipliziert man demnach 1 mit i und anschließend ein weiteres Mal mit i , dann erfährt die Ebene insgesamt eine halbe Drehung. Der Startpunkt 1 landet also bei -1 , wie es sein muss, denn $i^2 = -1$. Da die Division die Umkehroperation der Multiplikation ist, erscheint sie als Stauchung, wenn bei der Multiplikation gestreckt wurde, kombiniert mit einer Drehung in die entgegengesetzte Richtung.

Die Quaternionen – noch imaginärer

Nahezu alles, was man mit den reellen Zahlen tun kann, geht auch mit den komplexen – das meiste sogar besser, wie bereits Cardano wusste, denn in den komplexen Zahlen hat anders als in den reellen nicht nur die berühmte Gleichung $x^2 = -1$ eine Lösung, sondern jede quadratische Gleichung und sogar jede Gleichung höheren Grades. Nur eine Eigenschaft geht verloren, die Anordnung: Während man von zwei reellen Zahlen stets sagen kann, welche die größere ist, gilt das für komplexe Zahlen im Allgemeinen nicht.

Reelle Zahlen sind eindimensional, denn sie bilden eine Gerade; komplexe sind zweidimensional, denn sie füllen eine ganze Ebene. Eine Dimension ist gut, zwei sind besser – jedenfalls, was Zahlen angeht. Da liegt die Vermutung nahe, dass noch mehr Dimensionen noch besser wären.

Leider liegen die Dinge nicht so einfach. Erst Jahrzehnte nach Argand und Gauß fand der irische Mathematiker und Physiker Sir William Rowan Hamilton (1805–1865) den Schlüssel zu höherdimensionalen Zahlensystemen. Und erst heute, nochmals zwei Jahrhunderte später, beginnen wir ihr Potenzial zu verstehen.

Der erste Schritt zu höheren Dimensionen ist geradezu trivial. Hamilton bemerkte 1835, dass eine komplexe Zahl

Imaginäre Zahlen gibt es nicht, Macht nichts, man kann mit ihnen rechnen

AUF EINEN BLICK

DIE FAMILIE DER ZAHLENSYSTEME

1 Die vertrauten **reellen Zahlen** sind nur das einfachste von vier Systemen, in denen man stets zwei beliebige Elemente (»Zahlen«) addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren kann (mit Ausnahme der Division durch null).

2 Die **komplexen Zahlen** haben eine reelle und eine imaginäre Komponente. Mit ihnen lassen sich Gleichungen lösen, die unter den reellen Zahlen unlösbar sind, insbesondere $x^2 = -1$.

3 Weitere Zahlensysteme sind die vierdimensionalen **Quaternionen** und die achtdimensionalen **Oktonionen**. Für sie gelten gewisse Rechenregeln allerdings nicht mehr.

4 Nach ihrer Entdeckung in den 1840er Jahren verfielen die Oktonionen in einen Dornröschenschlaf, aus dem sie erst jüngst die Physik mit **Supersymmetrie** und **Stringtheorie** wachgeküsst hat.

$a + bi$ im Grunde nichts anderes ist als ein Paar reeller Zahlen. Das kann man als (a, b) schreiben; heute sind uns diese Paare als »Vektoren« in der Ebene geläufig.

Addition und Subtraktion komplexer Zahlen sind in der Vektorschreibweise sehr einfach. Man addiert und subtrahiert komponentenweise: $(a, b) + (c, d) = (a+c, b+d)$. Hamilton gelang es, die Multiplikation und Division komplexer Zahlen in – deutlich komplizierteren – Rechenregeln für Paare auszudrücken; auch für sie gelten die von Argand entdeckten geometrischen Interpretationen.

Der Übergang von Punkten in der zweidimensionalen Ebene zu solchen im dreidimensionalen Raum ist ebenfalls nicht schwer. Ein Punkt oder auch Vektor im Raum ist ein Tripel (a, b, c) reeller Zahlen; wieder addiert und subtrahiert man Vektoren komponentenweise. Aber an der Multiplikation und vor allem der Division biss sich Hamilton die Zähne aus.

Jahre später schrieb er an seinen Sohn: »Jeden Morgen, ... wenn ich zum Frühstück herunterkam, fragten mich dein kleiner Bruder William Edwin und du: ›Na, Papa, kannst du schon Tripel multiplizieren?‹ Worauf ich jedes Mal mit einem traurigen Kopfschütteln antworten musste: ›Nein, ich kann sie nur addieren und subtrahieren.‹« Heute ist klar, was er damals nicht wissen konnte: Die Aufgabe, die er sich selbst gestellt hatte, ist unlösbar.

Ja, man kann Vektoren im Raum miteinander so multiplizieren, dass wieder ein Vektor herauskommt. Das »Kreuzprodukt« zweier Vektoren erfreut sich großer Beliebtheit bei den Anwendern; so lassen sich mit seiner Hilfe die Gleichungen der Elektrodynamik in unnachahmlicher Eleganz ausdrücken. Nur gibt es zu dieser Multiplikation keine Umkehrung. Das Kreuzprodukt eines Vektors mit sich selbst ist stets der Nullvektor; wie soll man unter diesen Umständen eine Division oder gar eine Quadratwurzel definieren?

Wenn die Multiplikation nicht umkehrbar sein muss, hat man viele Freiheiten, sie sich nach Bedarf zurechtzudefinieren; davon machen die Computergrafiker fantasievollen Gebrauch, wenn es um dreidimensionale Mandelbrot-Mengen geht (Spektrum der Wissenschaft 4/2010, S. 56). Das eigentlich Schwierige ist immer die Division; daher nennt man ein Zahlensystem, in dem dividiert werden kann, eine Divisionsalgebra. Erst 1958 gelang John Milnor (Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 18), Raoul Bott und Michel Kervaire der Beweis einer erstaunlichen, über Jahrzehnte vermuteten Tatsache: Divisionsalgebren gibt es nur in den Dimensionen eins (die reellen Zahlen), zwei (die komplexen Zahlen), vier und acht. Um erfolgreich zu sein, musste Hamilton daher erst seine Regeln ändern.

Als er am 16. Oktober 1843 mit seiner Frau am Royal Canal in Dublin entlang zu einer Sitzung der Royal Irish Academy ging, kam ihm die entscheidende Eingebung. So wie in der komplexen Ebene sollte eine Multiplikation mit seinen neuen Zahlen einer Drehstreckung entsprechen, diesmal aber im dreidimensionalen Raum. Zur Beschreibung einer beliebigen Drehstreckung in drei Dimensionen reichen drei reelle Zahlen nicht aus; Hamilton brauchte eine vierte. Also gab er

Rechnen in der komplexen Zahlenebene

In der Grundschule haben wir gelernt, dass man so etwas Abstraktes wie die Addition durch eine konkrete Aktion veranschaulichen kann: Man wandert die entsprechende Zahl von Schritten auf der Zahlengeraden. Diese Verbindung von Algebra und Geometrie erweist sich als außerordentlich leistungsfähig. Insbesondere ist sie von den (eindimensionalen) reellen auf die (zweidimensionalen) komplexen Zahlen erweiterbar.

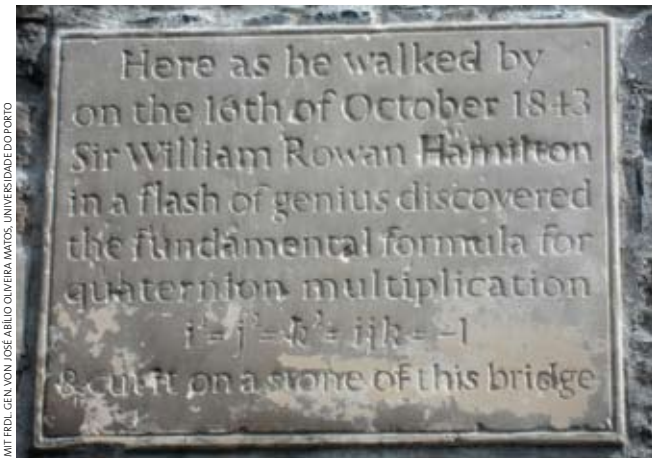
REELLE ZAHLEN

Addition	Subtraktion	Multiplikation	Division
$0 + 2 = 2$	$0 - 2 = -2$	$2 \cdot 2 = 4$	$2 : 2 = 1$
Addieren auf der Zahlengeraden ist einfach: Verschiebe die eine Zahl um so viel nach rechts, wie die andere Zahl angibt.	Subtrahieren geht genau so, nur verschiebt man nach links statt nach rechts.	Strecke die Zahlengerade mit dem angegebenen Faktor so, dass die Null an ihrem Platz bleibt. Ist der Faktor kleiner als 1, wird aus der Streckung eine Stauchung; ist er negativ, werden zusätzlich rechts und links vertauscht.	Division durch eine Zahl ist dasselbe wie Multiplikation mit dem Kehrwert dieser Zahl; Division durch 2 ist eine Stauchung auf die Hälfte.

KOMPLEXE ZAHLEN

Addition	Subtraktion	Multiplikation	Division
$i + (2 + i) = 2 + 2i$	$i - (2 + i) = -2 + 0i$	$i \cdot (2i) = -2$	$2i : (2i) = 1$
Jede komplexe Zahl hat zwei Komponenten: den Realteil, der vom Nullpunkt aus nach rechts, und den Imaginärteil (mit dem Symbol i), der nach oben abgetragen wird. Um die komplexe Zahl $c + di$ zu $a + bi$ zu addieren, verschiebt man $a + bi$ um c Einheiten nach rechts und um d Einheiten nach oben.	Subtrahieren geht genauso, nur verschiebt man nach links und unten statt nach rechts und oben.	Jetzt fängt der Spaß richtig an. Die ganze Zahlenebene – nicht nur die reelle Zahlengerade – wird mit einem Faktor gestreckt; zusätzlich rotiert der Faktor i die Ebene noch mit 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn um den Nullpunkt.	Wieder wird mit dem Kehrwert multipliziert, und die Drehung findet in Gegenrichtung statt, also bei Division durch i im Uhrzeigersinn.

BROWN BIRD DESIGN



Eine Tafel an der Broom Bridge in Dublin erinnert an die Gleichungen für die Quaternionen, die Sir William Rowan Hamilton just dort in einem Geistesblitz am 16. Oktober 1843 fand:
 $i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$

seinen neuen Zahlen, den »Quaternionen«, vier Komponenten, eine reelle und drei imaginäre. Eine Quaternion schreibt sich als $a + bi + cj + dk$; dabei sind i, j und k drei verschiedene Quadratwurzeln aus -1 (mehr dazu unten).

Hamilton schrieb später: »Damals und dort spürte ich, wie sich der Stromkreis meiner Gedanken schloss und die grundlegenden Gleichungen für i, j und k wie Funken hervorsprühten – genau die, welche ich seither beständig nutze.« In einem berühmt gewordenen Akt von mathematischem Vandalismus ritzte er diese Gleichungen in den Stein der Broom Bridge (früher Brougham Bridge). Heute sind sie zwar unter Graffiti verborgen, aber eine Tafel erinnert an diesen Geistesblitz (Bild oben).

Es mag seltsam erscheinen, dass wir Punkte eines vierdimensionalen Raums brauchen, um Transformationen des dreidimensionalen zu beschreiben, aber so ist es. Bereits eine

Drehung im Raum erfordert drei reelle Zahlen, eine für die Drehung um jede der drei Raumachsen. Beim Flugzeug kennt man diese drei ausgezeichneten Drehungen, aus denen sich jede Drehung im Raum zusammensetzen lässt, als »Gieren« (Drehung um die vertikale Achse), »Rollen« (um die Achse in Flugrichtung) und »Nicken« (um die horizontale Achse quer zur Flugrichtung). Hinzu kommt eine vierte Zahl für eine Streckung oder Stauchung.

Mit den Quaternionen hatte Hamilton seine große wissenschaftliche Liebe gefunden. Den Rest seines Forscherlebens verbrachte er damit, ihre Theorie auszuarbeiten und viele Anwendungen für sie zu finden. Die Nachwelt ist ihm im Wesentlichen nicht gefolgt. Was Hamilton mit Quaternionen ausdrückte, formuliert man heute, kaum weniger elegant, mit einer reellen Zahl für die Komponente a von $a + bi + cj + dk$ und einem Dreiervektor (b, c, d) für die restlichen Komponenten. Wo aber ein Computer mit dreidimensionalen Drehungen umgehen muss – von der Ansteuerung eines Raumflugkörpers bis zum Grafikprozessor eines Videospiele –, haben die Quaternionen bis heute ihre Nische.

Imaginäres ohne Ende

Aber die Anwendungen beiseite: Es gibt doch schon eine Wurzel aus -1 , nämlich i . Was sollen dann j und k sein? Kann man etwa nach Belieben immer neue Wurzeln aus -1 aus dem Hut zaubern?

Diese Frage stellte auch Hamiltons Studienfreund, der Anwalt John Graves, dessen Interesse an Algebra Hamilton überhaupt erst veranlasst hatte, sich mit komplexen Zahlen und Tripeln zu beschäftigen. Am Tag nach seinem schicksalhaften Spaziergang im Herbst 1843 beschrieb Hamilton seinen Durchbruch in einem Brief an Graves. Der antwortete neun Tage später und beglückwünschte ihn zur Kühnheit seiner Idee, fügte aber an: »Es gibt da etwas in diesem System, das mich verwirrt. Ich habe noch keine klare Vorstellung davon, wie frei wir sind, nach Belieben imaginäre Zahlen zu

Nichtkommutativität

Eine Quaternion beschreibt eine Drehung im Raum (und zusätzlich eine Streckung, von der wir hier absehen wollen). Zwei Quaternionen miteinander zu multiplizieren, bedeutet die entsprechenden Drehungen hintereinander auszuführen. Dabei kommt es auf die Reihenfolge an.

Unsere erste Drehung sei die um 180° Grad um die horizontale Rechts-links-Achse. Wenn wir vorher von dem Buch die Vorderseite sahen, zeigt es uns danach die kopfstehende Rückseite (oben). Die zweite Drehung ist eine Vierteldrehung um die vertikale Achse im Uhrzeigersinn (von oben gesehen). Statt auf die Rückseite des Buchs schauen wir nun auf die rechten Kanten der einzelnen Buchseiten. Führen wir beide Drehungen in umgekehrter Reihenfolge aus, sehen wir stattdessen am Ende den Buchrücken (unten).



BROWN BIRD DESIGN

erschaffen und sie mit übernatürlichen Eigenschaften auszustatten.« Und er fragt weiter: »Wenn du mit deiner Alchemie im Stande bist, drei Pfund Gold zu erschaffen, warum solltest du dich damit begnügen?«

Wie Cardano vor ihm stellte Graves seine Skrupel jedoch erst einmal zurück und zauberte selbst ein wenig Gold herbei. Am 26. Dezember schrieb er wieder an Hamilton und erläuterte ihm ein neues, achtdimensionales Zahlensystem, die »Oktaven«, die heute »Oktonionen« genannt werden. Hamilton konnte sich nicht wirklich dafür erwärmen. Er versprach zwar, über Graves' Oktaven vor der Royal Irish Society zu berichten – damals einer der üblichen Wege, mathematische Resultate zu veröffentlichen –, schob seinen Vortrag aber immer wieder hinaus, bis 1845 der junge Arthur Cayley (1821–1895) die Oktonionen erneut entdeckte und Graves mit der Veröffentlichung zuvorkam. Deshalb sind die Oktonionen heute auch als Cayley-Zahlen bekannt.

Warum mochte Hamilton die Oktonionen nicht? Einerseits war er mit seinen Quaternionen bereits ausreichend beschäftigt. Er hatte aber auch einen rein mathematischen Grund: Die Oktonionen verletzen eine der bedeutendsten Rechenregeln – das Assoziativgesetz.

Schon die Quaternionen sind ein wenig eigenartig. Multipliziert man zwei reelle Zahlen, dann spielt die Reihenfolge der Faktoren keine Rolle: 2 mal 3 ist dasselbe wie 3 mal 2. In der Fachsprache formuliert: Die Multiplikation unter den reellen Zahlen ist kommutativ, ebenso unter den komplexen – nicht aber unter den Quaternionen. Bei ihnen hat die Reihenfolge der Faktoren Einfluss auf das Produkt. Auf den zweiten Blick leuchtet das ein. Quaternionen beschreiben ja Drehungen im dreidimensionalen Raum, und bei ihnen kommt es auf die Reihenfolge an (Kasten links unten).

Stellen wir uns die Zahlensysteme als traditionsbewusste Familie vor. Die reellen Zahlen sind der anerkannte Patriarch, die komplexen der jüngere Bruder: etwas wild, da ihm die Eigenschaft der Anordnung fehlt, aber gleichwohl ein respektiertes Familienmitglied. Die Quaternionen sind das schwarze Schaf, dem man bei Familienfesten unauffällig aus dem Weg geht; es gehört sich eben nicht, unkommutativ zu sein. Aber die Oktonionen! Die sind der verrückte Onkel, den die standesbewusste Familie auf dem Dachboden wegsperret. Ihre Multiplikation ist nicht nur nicht kommutativ, sondern verstößt gegen eine weitere hochgeschätzte Rechenregel, eben das Assoziativgesetz $(xy)z = x(yz)$.

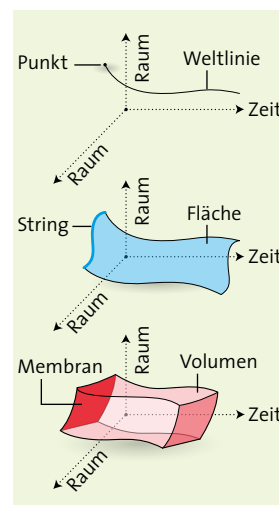
Für eine Multiplikation ist das höchst ungewöhnlich. Die Mathematiker haben mit zahlreichen nichtkommutativen Strukturen zu leben gelernt; aber Assoziativität zählen sie eigentlich zu den Selbstverständlichkeiten. Die Hintereinanderausführung von Drehungen – und überhaupt von irgendwelchen Abbildungen – ist assoziativ, und diese Eigenschaft wird auch in der Gruppentheorie stets vorausgesetzt.

Der Hauptgrund für Hamiltons Abneigungen gegen die Oktonionen war jedoch vermutlich, dass er sie zu nichts gebrauchen konnte. Sie beschreiben in sehr eleganter Weise Drehungen in sieben- und achtdimensionalen Räumen; aber

Ein paar Dimensionen mehr

Die Raumzeit der Physiker

hat eine Zeitdimension und mehrere Raumdimensionen. Ein Punkt, der eine gewisse Zeit lang existiert und sich möglicherweise bewegt, stellt sich in diesem System als eindimensionale »Weltlinie« dar. Ein eindimensionaler String wird dementsprechend zu einer zweidimensionalen Fläche und eine Membran der M-Theorie zu einem dreidimensionalen Volumen.



für diese abstrakten Strukturen konnten die Mathematiker mehr als ein Jahrhundert lang kein ernsthaftes Interesse aufbringen. Das änderte sich erst mit der modernen Teilchenphysik und im Besonderen mit der Stringtheorie.

Symmetrie und Strings

In den 1970er und 1980er Jahren entwickelten theoretische Physiker eine außerordentlich ansprechende Idee namens Supersymmetrie. Vereinfacht ausgedrückt besagt sie, dass auf der Ebene der Elementarteilchen zwischen Materie und Naturkräften eine Symmetrie besteht. Jedes Materieteilchen (etwa ein Elektron) hat ein Partnerteilchen, das eine Wechselwirkung vermittelt; umgekehrt hat jedes Kraftteilchen (zum Beispiel das Photon, der Träger der elektromagnetischen Kraft) einen Zwilling unter den Materieteilchen. Und wenn man jedes Teilchen durch seinen Partner ersetzt, bleiben die Naturgesetze unverändert. Es gibt also so etwas wie einen Spiegel, der nicht rechts und links vertauscht, sondern Materie- und Kraftteilchen. Was sich im Spiegelbild des Universums abspielt, gehorcht ebenso den Gesetzen der Physik wie das echte Universum.

Noch gibt es keinerlei konkreten experimentellen Beleg für die Supersymmetrie. Aber in den Augen vieler Physiker ist diese Theorie einfach zu schön und mathematisch ergiebig, um falsch zu sein. So hoffen sie auf ihre experimentelle Bestätigung, ja erwarten sie sogar.

Im Gegensatz dazu ist die Quantenmechanik experimentell hervorragend abgesichert. In der modernen, täglich genutzten Form der Quantenmechanik in drei Dimensionen beschreiben spezielle mathematische Objekte, die »Spinoren«, die Wellenbewegung von Materieteilchen, andere, die »Vektoren«, die Wellenbewegung der Kraftteilchen. (In der Quantenmechanik sind alle Teilchen zugleich auch Wellen.) Eine Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen entspricht einer Kombination der zugehörigen Zahlen, die mit einer

Multiplikation gewisse Eigenschaften gemeinsam hat. Das funktioniert zwar, ist jedoch alles andere als elegant.

Stellen wir uns nun ein sehr merkwürdiges Universum vor, in dem es keine Zeit gibt und das die Dimension 1, 2, 4 oder 8 hat. Es stellt sich heraus, dass in einem solchen System Vektoren und Spinoren Elemente einer Divisionsalgebra wären und ihre Wechselwirkung nichts weiter als die Multiplikation. Vektoren und Spinoren wären ein und dasselbe, nämlich – je nach Dimension – reelle Zahlen, komplexe Zahlen, Quaternionen oder Oktonionen. Supersymmetrie wäre eine natürliche Konsequenz und würde zugleich eine einheitliche Beschreibung für Materie- und Kraftteilchen liefern.

Merkwürdige Koinzidenzen

Aber unser Spielzeuguniversum kann mit der Realität nichts zu tun haben, weil wir die Zeit außer Acht gelassen haben. Hier kommt die Stringtheorie ins Spiel – die ihrerseits die Supersymmetrie als Grundlage benötigt. Ein String ist zu jedem Zeitpunkt ein eindimensionales Objekt, wie eine Kurve oder eine Gerade. Im Verlauf der Zeit spannt der String dann eine zweidimensionale Fläche auf (Bild S. 59). Damit erhöht sich die Anzahl der Dimensionen, in denen Supersymmetrie auf natürliche Weise auftritt, um zwei: eine für die Zeit und eine weitere für den String selbst. Nicht die Dimensionen 1, 2, 4 und 8 sind der natürliche Lebensraum der Supersymmetrie, sondern 3, 4, 6 und 10.

Wie das Leben so spielt, erklären die Stringtheoretiker bereits seit Jahren, dass ihre Theorie unter so genannten Anomalien leidet: Es kommt vor, dass zwei unterschiedliche Wege zur Berechnung einer Größe nicht zum selben Ergebnis führen – mit Ausnahme der Dimension 10. Diese ist aber nun just das Revier der Oktonionen. Sollte also die Stringtheorie zutreffen, dann sind die Oktonionen keine nutzlose Kuriosität. Vielmehr liefern sie den tieferen Grund dafür, dass das Universum zehn Dimensionen haben muss.

Das ist aber noch nicht das Ende der Geschichte. Vor einigen Jahren sind die Physiker von den eindimensionalen Strings zu höherdimensionalen Gebilden, so genannten Membranen, übergegangen. Eine zweidimensionale Membran, kurz 2-Bran, kann man sich zu jedem Zeitpunkt wie eine (gekrümmte) Fläche vorstellen (Spektrum der Wissenschaft 2/2008, S. 26). Im Verlauf der Zeit füllt diese Fläche dann ein dreidimensionales Volumen in der Raumzeit aus.

Demnach müssten wir zu jedem unserer Standardwerte 1, 2, 4 und 8 nicht zwei, sondern drei weitere Dimensionen hinzufügen. In der Theorie der Membranen (»M-Theorie«) müsste also Supersymmetrie auf natürliche Weise in den Dimensionen 4, 5, 7 und 11 auftreten. Und schon wieder gibt es ein merkwürdiges Zusammentreffen: Die Experten sagen uns, dass die M-Theorie elf Dimensionen benötigt – woraus sich ergibt, dass auch sie mit Oktonionen arbeitet. Allerdings ist die M-Theorie noch so unvollständig, dass wir nicht einmal ihre grundlegenden Gleichungen aufschreiben können. Niemand weiß, welche konkrete Gestalt diese Theorie in Zukunft annehmen wird.

Wohlgermerkt: Bisher haben weder die String- noch die M-Theorie irgendeine experimentell überprüfbare Vorhersage produziert. Beide sind wunderschöne Träume – aber nicht mehr. Unser Universum sieht nicht zehner- oder elfdimensional aus, und von den Paaren aus Materie- und Kraftteilchen, welche die Supersymmetrie postuliert, hat sich bislang immer nur jeweils ein Partner experimentell bemerkbar gemacht. David Gross, einer der weltweit führenden Experten für die Stringtheorie, schätzt die Chance, am Large Hadron Collider des CERN in Genf Belege für Supersymmetrie zu finden, gegenwärtig auf 50 Prozent. Es verwundert kaum, dass Skeptiker mit ihren Schätzungen weit darunter liegen.

Sind nun diese sonderbaren Oktonionen von grundlegender Bedeutung für das Verständnis der Welt? Einiges spricht dafür; aber von einer Gewissheit sind wir wegen mangelnder Entwicklung der Theorien noch meilenweit entfernt. In jedem Fall sind die Oktonionen eine Struktur von besonderer mathematischer Schönheit und schon deswegen der Bemühungen der Wissenschaftler wert. Aber noch schöner wäre es, wenn sich herausstellen sollte, dass das Buch der Natur nicht nur in der Sprache der Mathematik, sondern speziell in der Sprache der Oktonionen geschrieben ist. Wie die Geschichte der komplexen Zahlen und zahlloser anderer mathematischer Entwicklungen zeigen, wäre es nicht das erste Mal, dass eine rein mathematische Erfindung sich später als genau das Werkzeug erweist, nach dem die Physik gesucht hat. ~

DIE AUTOREN



John C. Baez (links) ist mathematischer Physiker und arbeitet zurzeit im Center for Quantum Technologies in Singapur. Vorher befasste er sich mit grundlegenden Fragen der Physik. Er ist vor allem bekannt geworden durch seine Internetkolumne

»This Week's Finds in Mathematical Physics« (<http://math.ucr.edu/home/baez/TWF.html>, seit dem letzten Jahr »This Week's Finds« genannt). **John Huerta** hat in diesem Sommer bei Baez an der University of California in Riverside promoviert. Er untersucht die Grundlagen der Supersymmetrie.

QUELLE

Nahin, P. J.: An Imaginary Tale. The Story of the Square Root of -1 . Princeton University Press, Princeton 1998

WEBLINKS

<http://math.ucr.edu/~huerta/guts>
Baez, J. C., Huerta, J.: *The Algebra of Grand Unified Theories*
<http://math.ucr.edu/home/baez/octonions>
Baez, J. C.: *The Octonions. Technical Paper and Bibliography*
www.scientificamerican.com/may2011/octonions
Baez, J. C.: *Why 5, 8 and 24 Are the Strangest Numbers in the Universe*
<http://plus.maths.org/issue33/features/baez>
Joyce, H.: *Ubiquitous Octonions*

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121037

Ein unwiderstehliches Angebot:

5 Ausgaben
für Sie nur 19,- €
+
Reise-Serie „Africa“*



Reise-Serie „Africa“, 3-tlg. Set in modischem Dunkelbraun

Rucksack mit gepolstertem Rückenteil und verstellbaren Gurten. Viele Innen- und Außenfächer. Maße: ca. 45 x 37 x 17 cm.

Schulertasche mit verstellbarem Umhängegurt und 6 Innenfächern, Überschlagklappe mit 2 Schnappverschlüssen. Maße: ca. 40 x 35 x 12 cm.

Sporttasche mit 2 Außenfächern und großem Innenfach sowie 1 Netzfach. Maße: ca. 60 x 30 x 25 cm.

Ohne Inhalt.



* Unter dem QR-Code können Sie dieses oder andere unwiderstehliche Geschenke auswählen.

Wir leben Fernweh

- Faszinierende Reportagen und Fotosessions
- Verlässliche echte Insider-Tipps
- Vor Ort überprüfte Adressen
- von Hotels und Restaurants
- Individuelle Städte-Touren, Traum-Reiseziele und Outdoor-Action
- Sie sparen über 20%



So gehts: Kostenlosen QR-Reader auf Ihr Handy laden, QR-Code abfotografieren und eines von vielen Geschenken auswählen.

Oder gleich unter dem Kennwort „Spektrum“ bestellen per:
Telefon +49 (0) 781/63 94 515
Internet www.abenteuer-reisen.de

abenteuer
und **reisen**

Evolution und Esskultur

Seit Beginn der Menschwerdung haben sich Ernährungsgewohnheiten und Gene im Wechselspiel miteinander verändert – und so zusammen die biologische und kulturelle Evolution des Menschen vorangetrieben.

Von Olli Arjamaa und Timo Vuorisalo

Bei Tieren scheint es uns selbstverständlich, dass biologische Anpassungen rund um die Ernährung ihre Überlebenschancen und ihren Evolutionserfolg mitbestimmen. Den Menschen sehen wir anders. Seine unterschiedlichen Esstraditionen halten wir für weitgehend kulturell geprägt – ohne große Bedeutung für seinen evolutionären Fortbestand und direkten Bezug zu biologischen, sprich genetischen Vorgaben. Das mag im Kleinen zutreffen: Manche regionalen und ethnischen Unterschiede in den Nahrungspräferenzen beruhen tatsächlich einfach auf Gewohnheit.

Doch im Ganzen stimmt das nicht. Denn auch die menschliche Ernährungsweise hat ihre biologische Evolutionsgeschichte, teils sogar in den einzelnen Kulturen eine eigene. Genmuster, die das Essen und seine Verträglichkeit betreffen, haben sich nicht selten im Lauf von Generationen spezifisch verändert und an neue Lebens- und Umweltsituationen angepasst – bis in jüngste Zeit. Auf dem langen Weg von ar-

chaischen Jägern und Sammlern bis zu unserer postindustriellen Gesellschaft mit ihrem Fastfood hat sich auch in genetischer Hinsicht viel getan.

Solch eine Koevolution zwischen Ernährungsweise und Genen gab es schon bei der Menschwerdung. Dass sich unsere Vorfahren in Süd- und Ostafrika allmählich aus Früchte- zu Fleischfressern entwickelten, führten die Anthropologen noch vor wenigen Jahrzehnten allein auf biologische Anpassungen an eine sich klimatisch verändernde Umwelt zurück. Seit den 1970er Jahren geriet diese Vorstellung jedoch zunehmend ins Wanken. Wie sich immer deutlicher zeigte, waren die biologische und die kulturelle Evolution von Anfang an eng miteinander verzahnt.

Mit den Wechselwirkungen zwischen Genen und Kultur in der Evolution des Menschen befassen sich heute außer den klassischen Fächern Anthropologie, Archäologie und Molekulargenetik verschiedene Spezialdisziplinen, von der Populationsgenetik bis hin zur Soziobiologie. Selbst die Mathematik liefert einen Beitrag. So zeigen mathematische Modelle, dass Kultur den Selektionsdruck verändern und sogar neue Evolutionsmechanismen hervorbringen kann – das betrifft etwa die Entwicklung der Kooperation. Mitunter sind diese Kräfte ziemlich stark, auch weil Kultur Verhalten einheitlicher macht. Die Vorstellung einer Koevolution von Kultur und Genen hilft, manche Besonderheiten in der Entwicklungsgeschichte der Menschheit besser zu verstehen. Das gilt insbesondere für Änderungen in der Ernährungsweise.

AUF EINEN BLICK

KOEVOLUTION VON ERNÄHRUNGSWEISE UND GENEN

1 Die **Geschichte der Menschheit** war von **einer Reihe kultureller Umbrüche** geprägt. In enger Verzahnung damit veränderte sich unser Erbgut. Auf diese Weise kam es zu einer Koevolution von Kultur und Genen.

2 So waren die Frühmenschen dank eines **vergrößerten Gehirns** in der Lage, **raffinierte Werkzeuge** anzufertigen. Diese wiederum ermöglichten ihnen – ebenso wie die **Nutzung des Feuers** – genügend hochwertige Nahrung für das besonders energiehungrige Organ zu beschaffen und aufzuschließen.

3 Auch die **Umstellung auf landwirtschaftliche Produkte** während der **neolithischen Revolution** gelang nur im Verein mit **genetischem Wandel**. Insbesondere vervielfachte sich das Gen für das Enzym **Amylase**, das Stärke zu Zucker abbaut und auch in den Speicheldrüsen wirkt. Desgleichen sorgten bei Bevölkerungsgruppen, die Milchwirtschaft betrieben, **Mutationen** im Umfeld des **Laktasegens** dafür, dass Milchzucker auch von Erwachsenen verdaut werden konnte.

Am Anfang war der aufrechte Gang

Die ersten Hominiden dürften vor zehn bis sieben Millionen Jahren in Afrika aufgetreten sein und stammten wahrscheinlich von einem baumlebenden Menschenaffen ab. Sie gingen allmählich zum Bodenleben und aufrechten Gang über, hatten aber noch ein kleines Gehirn. Derzeit gilt als frühester bekannter Hominide *Sahelanthropus tchadensis*, ein Vormensch, der anscheinend vor rund sieben Millionen Jahren lebte (SdW 9/2003, S. 46).

Zu jener Zeit – im späten Miozän und darauf folgenden Pliozän, das vor gut fünf Millionen Jahren begann – wurde es



Die regional unterschiedlichen Essgewohnheiten des Menschen sind kein reines Kulturphänomen, sondern hängen auch mit genetischen Anpassungen zusammen. Hier eine typische Szene vom berühmten Markt Or Tor Kor in Bangkok

DREAMSTIME / LEE SPINDER

in Afrika immer trockener. Die frühen Hominiden mussten mit den neuen, schwierigeren ökologischen Bedingungen fertigwerden. Zu den biologischen und kulturellen Anpassungen gehörte sicherlich, dass sie den aufrechten Gang weiter perfektionierten, allmählich größer wurden, neue Nahrungsquellen erschlossen, ein komplexeres Sozialverhalten erwarben und raffiniertere Werkzeuge herstellten – insbesondere Steingeräte, um damit Lebensmittel zu bearbeiten. Die ältesten Zeugnisse speziell behauener Steine sind 2,6 Millionen Jahre alt. Soziales Lernen verhalf den Frühmenschen dazu, die neuen Fertigkeiten weiterzugeben – und auch Neuerungen der Nahrungsbeschaffung und Essenzubereitung zu tradieren.

Auf die Ernährungsweise der frühen Hominiden schließen Paläontologen hauptsächlich anhand von Fossilien und archäologischen Funden. Gute Anhaltspunkte liefern die Beschaffenheit von Zähnen und Gebiss, Gebrauchsspuren an ihnen sowie die Isotopenverhältnisse mancher chemischer Elemente in den Knochen und Zähnen. Die biologischen Analysen decken allerdings eher den vorherrschenden Ernährungsmodus auf, weniger die ganze Bandbreite der Kost. Deswegen halten sich die Forscher gern an möglichst viele unterschiedliche Quellen. Dazu gehören in jedem Fall auch archäologische Erkenntnisse – etwa über Werkzeuge, Pflanzenabfälle oder die Größe des beanspruchten Gebiets.

Aus den Isotopenverhältnissen in Knochen und Zähnen lässt sich zum Beispiel die Art der Pflanzennahrung ermitteln. Das ist hilfreich, da Pflanzenfossilien selten vorkommen – weswegen der Anteil tierischer Nahrung leicht überschätzt wird. Botaniker unterscheiden C_3 - und C_4 -Pflanzen, die bei ihrer Fotosynthese Kohlenstoff (C) auf einem anderen Weg fixieren. Die beiden Formen differieren auch in der Zusammensetzung der eingebundenen Kohlenstoffisotope. C_3 -Pflanzen nehmen im Verhältnis deutlich weniger von dem schwereren ^{13}C auf, als in der Luft vorhanden ist. Darum enthalten sie ungewöhnlich viel vom leichteren ^{12}C . C_4 -Pflanzen machen keinen so großen Unterschied und bauen deshalb relativ mehr ^{13}C ein. Für die Menschwerdung interessiert dies, weil C_4 -Pflanzen besser mit Trockenheit, Hitze und einem

Stadien kulturellen und genetischen Wandels

Seit den Anfängen der Menschwerdung bedingen biologische und kulturelle Evolution einander. Entgegen einer früher verbreiteten Ansicht entstand der aufrechte Gang mindestens zwei Millionen Jahre, bevor der Mensch die ersten Steinwerkzeuge anfertigte. Beides gehört zu einem Komplex allmählicher Anpassungen der Hominiden an die zunehmend trockeneren afrikanischen Landschaften – wie auch ein immer ausgefeilteres Sozialleben, eine Zunahme der Körpergröße und nicht zuletzt Ernährungsumstellungen. Die kontrollierte Nutzung des Feuers trug sicherlich dazu bei, dass der Mensch andere Kontinente besiedeln konnte. In jüngerer Zeit bieten die Ernährungsumstellungen nach der neolithischen Revolution faszinierende Einblicke in das Wechselspiel zwischen kulturellem Wandel und biologischer Evolution. Die Zeitskala ist an den Enden logarithmisch (gestrichelte braune Balken).

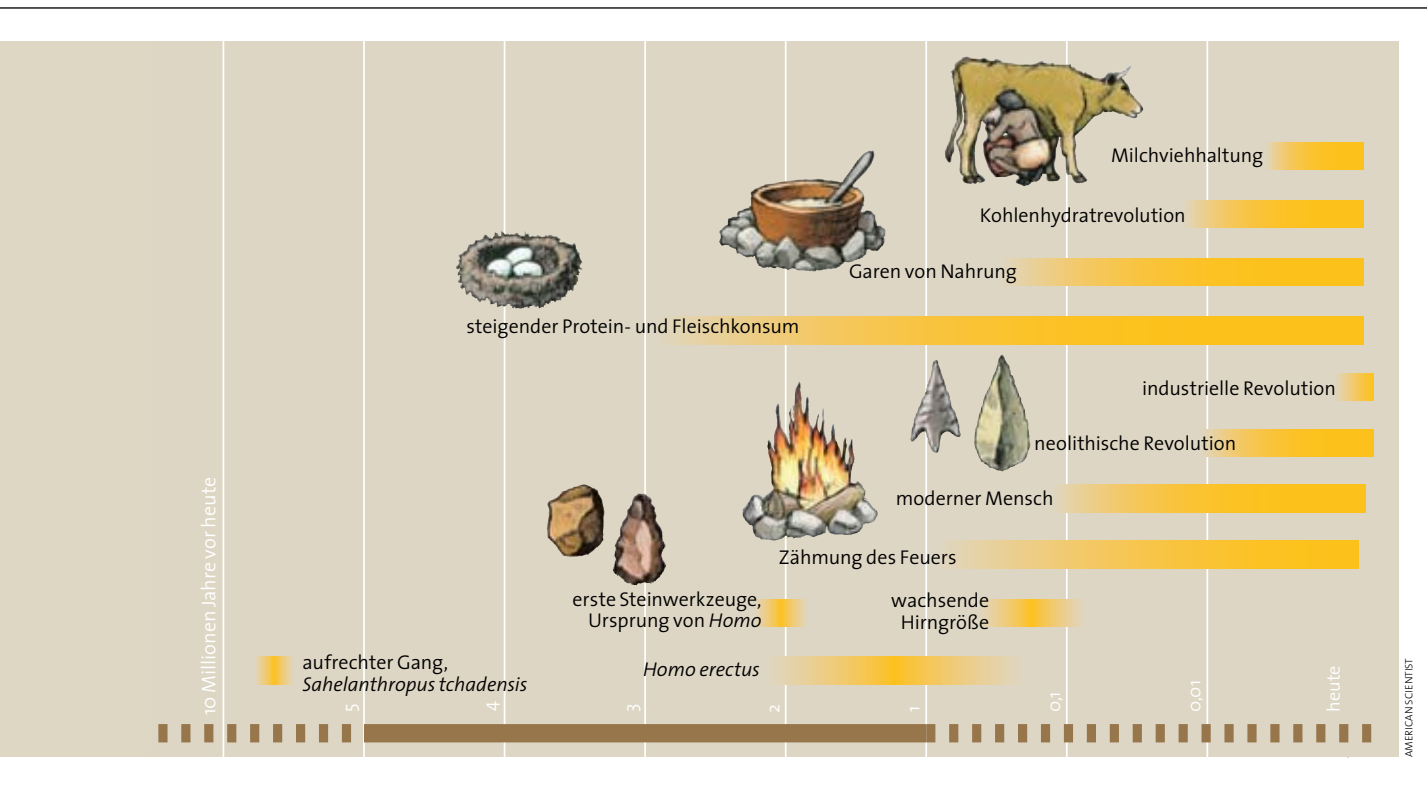
knappen Stickstoffangebot zurecht kommen. Nicht von ungefähr zählen viele Gräser arider, heißer Regionen zu dieser Gruppe. Als Afrika trockener wurde, gediehen sie vermutlich prächtig und passten sich vielfältig an, während die C_3 -Pflanzen abnahmen.

Australopithecus – Vorreiter einer neuen Ernährung

Früher hielt man die Vormenschen – also die Australopithecinen – noch für Hominiden, die ähnlich wie die waldlebenden Menschenaffen überwiegend Früchte und somit großenteils C_3 -Pflanzen verzehrten. Die Frühmenschen *Homo habilis* und *Homo erectus* ernährten sich dagegen nach der alten Auffassung vor allem vom Fleisch verendeter oder erjagter Tiere. Die neuen Analysen ergeben ein anderes Bild. Demzufolge erweiterten schon die Australopithecinen ihr Nahrungsspektrum auch um C_4 -Pflanzen. Das zusammen mit ihrem neu erworbenen aufrechten Gang bildete für sie eine wichtige Voraussetzung, um die zunehmend offenen afrikanischen Landschaften zu besiedeln, in denen sie außerdem mit wechselnden Jahreszeiten konfrontiert waren.

Dieser Unterschied in der Ernährungsweise dürfte bei der Abspaltung von den Menschenaffen eine wesentliche Rolle gespielt haben. Dass die Hominiden gleich eigene Umweltsprüche entwickelten, erscheint darum als ein wichtiger Schritt der Menschenevolution. Ob die Australopithecinen tatsächlich neben anderen C_4 -Pflanzen schon Gräser, vielleicht sogar Seggen, also Sauergräser, aßen, ist in der Fachwelt allerdings noch umstritten. Im Übrigen hinterlassen auch Fleischmahlzeiten das charakteristische Isotopenmus-





ter der C_4 -Pflanzen, wenn die verspeisten Tiere diese ihrerseits bevorzugt fraßen. Viele Forscher nehmen jetzt an, dass die Australopithecinen und der frühe *Homo* besonders in der trockenen Jahreszeit hauptsächlich tierische Nahrung zu sich nahmen – wie Termiten und andere Insekten, Vogeleier, Eidechsen, Nagetiere und junge Antilopen.

Mit der Ernährungsweise veränderte sich der Körperbau, und die Hominiden wurden größer. Das erweiterte, so Robert A. Foley von der University of Cambridge (England), ihren Aktionsradius und verbreiterte ihr Nahrungsspektrum. Wer größer ist, gelangt schneller an andere Orte, und er kühlt nicht so schnell aus. Er kann sich somit leichter an ein kälteres Klima anpassen. Außerdem kommt ein größerer Organismus eher mit minderwertiger Nahrung aus – eine Regel, die auf viele Säugetiere zutrifft. All dies haben die Hominiden ausgenutzt. Das Auftreten von *Homo erectus* vor rund 1,8 Millionen Jahren scheint dabei einen Meilenstein der Menschenevolution zu markieren. Er war größer als seine Vorläufer – und er besaß relativ zur Körpergröße mehr Gehirn als die heutigen Menschenaffen. Offenbar geschah es nun zum ersten Mal, dass ein Frühmensch Afrika verließ.

Steinwerkzeuge verbesserten die Ernährungssituation der frühen Menschen entscheidend. Mit scharfen Klingen konnten sie das Fell erlegter oder als Aas erbeuteter Tiere durchtrennen und die Kadaver ausweiden. Mit Schlagwerkzeugen aus Geröll (Choppers) ließen sich auch Schädel und andere Knochen zertrümmern, was nährstoffreiches Gewebe wie Gehirn oder Knochenmark zugänglich machte.

Das Gehirn der Hominiden begann sich wohl vor 2,5 Millionen Jahren zu vergrößern, als aus einem *Australopithecus* allmählich die Gattung *Homo* hervorging. Weil dieses Organ im Vergleich zu allen anderen sehr viel mehr Energie benötigt, waren die Frühmenschen vermutlich auf nährstoff- und kalorienreiche Kost angewiesen. Fleisch dürfte meist dazu gehört haben.

Tatsächlich lässt sich zeigen, dass die Hominiden zunächst immer mehr C_4 -Pflanzen zu sich nahmen und dann auch ihren Fleischkonsum langsam steigerten. Zu der Umstellung trugen mehrere Umstände bei. So begannen sich just vor 1,8 Millionen Jahren Savannen des heutigen Typs auszubreiten. Davon profitierten in Ostafrika die Huftiere – ihre Vielfalt und Bestandsdichte nahm zu. Das wiederum kam dem *Homo*





Die Nutzung des Feuers erschloss neue Nahrungsquellen. Diese Steinklingen aus etwa 65 000 bis 60 000 Jahre alten Schichten von Pinnacle Point in Südafrika wurden aus erhitzter Kieselkruste gefertigt. Allgemein in Gebrauch kam der kontrollierte Einsatz des Feuers vermutlich erst vor 100 000 bis 50 000 Jahren, auch wenn seine Anfänge wohl bis zu 400 000 Jahre zurückreichen.

erectus zugute, weil er mehr Aas und Jagdwild vorfand, die wahrscheinlich beide auf seinem Speisezettel standen.

Neuere Untersuchungen lassen vermuten, dass *H. erectus* mehr Fleisch verzehrte als die allerersten Vertreter seiner Gattung – wie *Homo habilis* – und auf jeden Fall mehr als *Australopithecus*. Er scheint bereits ein primitives Jäger- und Sammlerdasein geführt zu haben, wobei er vermutlich auch Aas nicht verschmähte. Zum Öffnen und Zerlegen der Tiere verwendete er scharfkantige Steinklingen. Mit Steingerät vermochte er obendrein Knochen zu zertrümmern, um an das besonders nahrhafte Knochenmark und Gehirn heranzukommen. Vermutlich konnte sich nur dank der guten Versorgung mit Fettsäuren aus der tierischen Nahrung das Gehirn so schnell vergrößern.

Mit der Zähmung des Feuers verbesserte sich die Ernährungssituation unserer Vorfahren noch einmal deutlich. Das hat der Anthropologe Richard Wrangham von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) überzeugend dargestellt. Jagdtiere lassen sich mit Feuer einschüchtern und in die Enge treiben, besonders wenn man gemeinschaftlich vorgeht. Vor allem aber erhöht Garen den Wert der Nahrung. Es tötet nicht nur gefährliche Keime ab, sondern macht Fleisch und Pflanzenkost auch verträglicher und für den Organismus besser verwertbar. Gerade bei Pflanzen schließt Erhitzen manche Inhaltsstoffe erst auf. In der Savanne wachsen verschiedenste stärkehaltige Knollen, Wurzeln, harte Früchte und dergleichen, die der menschliche Darm roh schlecht verwertet. Feuer verhalf unseren Vorfahren somit auch zu einem breiteren Nahrungsspektrum (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 30).

Es scheint, dass Hominiden schon von 1,9 Millionen Jahren vereinzelt gegarte Lebensmittel aßen. Nach archäologischen Funden verstanden sich Menschen allerdings vor frühestens 400 000 Jahren darauf, Feuer kontrolliert einzusetzen. Zur festen Einrichtung entwickelte sich sein Gebrauch sogar wohl erst irgendwann vor 100 000 bis 50 000 Jahren. Das bedeutete nun wirklich einen großen Einschnitt, denn neue Lebensmittel wurden zugänglich. Vielleicht ist es kein Zufall, dass sich der *Homo sapiens*, der anatomisch moderne Mensch, gerade zu jener Zeit von Afrika aus auf weitere Kontinente auszubreiten begann.

Kein archaischer Mensch konsumierte wohl solche Fleischmengen wie der Neandertaler, der damals schon lange Europa und das westliche Asien besiedelte. Dafür sehen Matt Sponheimer von der Rutgers University in Boulder (Colorado) und Julia A. Lee-Thorp von der University of Cape Town jede Menge Indizien. Auch wenn man an einstigen Lagerstätten von Neandertalern vorwiegend Überreste gro-

Zusammensetzung der Nahrung

	Altsteinzeit	junge erwachsene Finnen
Proteine	30 Prozent	17 Prozent
Kohlenhydrate	35 Prozent	49 Prozent
Fett	35 Prozent	32 Prozent
Alkohol	0 Prozent	2 Prozent

Mit der Domestizierung von Tieren und Pflanzen seit etwa 12 000 Jahren, also mit der Landwirtschaft, gewannen die Kohlenhydrate – etwa in Form von Mehlprodukten – in der Nahrung im Verhältnis zu anderen Energielieferanten stark an Bedeutung. Dafür sank der Anteil der Proteine an der Kalorienaufnahme. Die Umstellung erzeugte einen neuen Selektionsdruck, durch den sich der Gehalt des Stärke abbauenden Enzyms Amylase im menschlichen Speichel erhöhte.

ßer und mittelgroßer Tiere findet, dürften die eiszeitlichen Höhlenbewohner eher kleinere Tiere gejagt haben. Vielleicht spürten sie oft auch Aas auf. In nördlicheren Zonen konnten sie dank des Feuers vermutlich sogar gefrorene Tierkadaver auftauen, die Raubtiere ihnen wohl nicht streitig machten.

Einen drastischen Umbruch der menschlichen Lebens- und Ernährungsweise – und der genetischen Ausstattung dafür – markiert schließlich die neolithische Revolution, die vor rund 12 000 Jahren im Nahen Osten einsetzte. Die Menschen begannen nun, Pflanzen und Tiere zu domestizieren, sesshaft zu werden und das Jäger-und-Sammler-Dasein allmählich aufzugeben. Als Folge der kulturellen Neuerung aßen sie deutlich mehr Kohlenhydrate, die großenteils von angebautem Getreide stammten. Heutige Jäger und Sammler decken damit nur etwa 35 Prozent ihres Energiebedarfs. Bei modernen Agrargesellschaften sind es rund 50 Prozent, wie eine Untersuchung junger Erwachsener in Finnland ergab. Die ersten Viehzüchter waren unter günstigen Bedingungen aber auch mit Proteinen von Fleisch, Eiern oder anderen Tierprodukten hinreichend versorgt.

Am Speichel zu erkennen: Der moderne Mensch

Nicht nur das Feuer half dem Menschen, sich in zunehmendem Maß von stärkereichen Pflanzenteilen zu ernähren. Denn im Wechselspiel von kulturellem Wandel und biologischer Evolution änderten sich auch Gene für Enzyme zur Stärkeverwertung, die den frühen Bauern erst die gravierende Umstellung ihrer Kost erlaubten. Süß Schmeckendes, in der Vorzeit hauptsächlich in Form von Früchten, gehörte sicherlich von jeher zu den gesuchten Kalorienquellen der Hominiden. Aber erst das Enzym Amylase erlaubte ihnen, Stärke zu verwerten, weil es das Kohlenhydrat bis hin zu Zuckermolekülen zerlegt.

Außer der Bauchspeicheldrüse bilden auch unsere Speicheldrüsen im Mund das Enzym. Dabei handelt es sich allerdings um eine relativ späte Errungenschaft, die bei den Primaten und den Nagetieren unabhängig voneinander neu auftrat. Im Verlauf dieser Evolution hat sich das von der Bauchspeicheldrüse genutzte Amylasegen verdoppelt, und die Kopie ist in den Speicheldrüsen aktiv geworden. Bei den Primaten und besonders bei den Hominiden muss sich das Speichelamylasegen später weiter vervielfältigt haben. Die zusätzlichen Exemplare produzieren zusammen entsprechend mehr von dem Enzym. Menschlicher Speichel enthält im Schnitt sechs- bis achtmal so viel Amylase wie der von Schimpansen oder unseren nächsten Verwandten, den Bonobos.

Die Anzahl der Genkopien schwankt bei verschiedenen Menschengruppen jedoch stark. Tendenziell ist sie anscheinend bei solchen Populationen am größten, die seit Langem viel Stärke essen, also Agrargesellschaften. Bei Gruppen mit einem traditionell hohen Proteinkonsum, wie den Jäger- oder Fischerkulturen Sibiriens und Afrikas, finden

sich dagegen oft weniger Amylasegene. Insgesamt scheint die erhöhte Genzahl somit eine Anpassung an den Ackerbau darzustellen.

Zu den bekanntesten Beispielen für eine Koevolution von kulturellen und genetischen Merkmalen gehört die Laktosetoleranz (Milchzuckerverträglichkeit) im Erwachsenenalter. Säuglinge bilden normalerweise das Darmszym Laktase, das Milchzucker (Laktose) zerlegt, so dass der Darm ihn aufnehmen kann. Später stellt das Laktasegen oft seine Tätigkeit ein – allerdings meist nicht bei Bevölkerungsgruppen, die traditionell Milch trinken. Besonders Nordeuropäer können Milchzucker und somit Milchprodukte in der Regel noch als Erwachsene gut verdauen, Südeuropäer weniger. Auch die meisten Ostasiaten und viele Bewohner Schwarzafrikas, die kein Milchvieh halten, vertragen keine Laktose. Bei ihnen

Das Vieh der Milchbauern

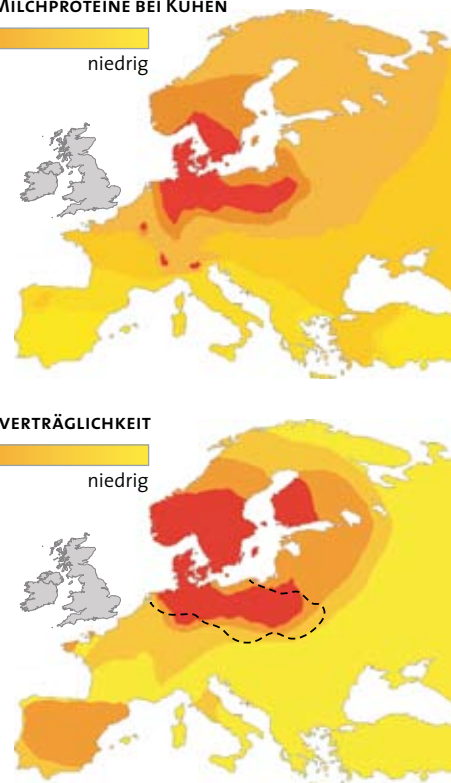
Nach einer internationalen Studie herrscht die größte Proteinviefalt in Kuhmilch noch immer dort, wo viele Menschen über die Kindheit hinaus Milch und Milchprodukte konsumieren. Das obere Bild zeigt, wo bei Kühen die meisten einzigartigen Gene und besonders viele Genvarianten für wichtige Milchproteine vorkommen (rot), etwa solche, die die Käseherstellung verbessern. Das untere Bild zeigt den Grad der Laktosetoleranz in der Bevölkerung. Die gestrichelte Linie bezeichnet die Region, in der im frühen Neolithikum Rinderzucht auftrat.

VIELFALT DER MILCHPROTEINE BEI KÜHEN

hoch niedrig

MILCHZUCKERVERTRÄGLICHKEIT

hoch niedrig



AMERICAN SCIENTIST NACH BEJA, PEREIRA, A. ET AL.: GENE-CULTURE COEVOLUTION BETWEEN CATTLE MILK PROTEIN GENES AND HUMAN LACTASE GENES. IN: NATURE GENETICS 34, S. 311–312, 2002, FIG. 1

verursacht Milchzucker oft heftige Verdauungsbeschwerden mit schweren Blähungen und Durchfällen.

Milch ist ein besonders nahrhaftes, außerdem weitgehend keimfreies Getränk, das auch viele weitere wichtige Stoffe liefert. Da wundert es nicht, dass sich bei verschiedenen Viehzüchtern schnell genetische Mutationen durchsetzten, die den Konsum von Milch- und Milchprodukten auch jenseits der Kindheit erlauben. Offenbar kam diese Anpassung in verschiedenen Bevölkerungen der Welt unabhängig auf, denn die Mutationen im Umfeld des Laktasegens, die Forscher in dem Zusammenhang aufspürten, unterscheiden sich.

Wenn das Überleben von Milch abhing

Das gilt wohl auch für den Nahen Osten und Europa. So nutzten manche Bewohner Nordeuropas in den langen, kalten Wintern wahrscheinlich schon seit Jahrtausenden Milch und deren Produkte als Hauptenergiequelle. Untersuchungen an Skeletten aus der frühen Jungsteinzeit ergaben zwar, dass noch die ersten Bauern in Europa über die Kindheit hinaus Milch wohl nur wenig vertrugen. Aber als die Viehwirtschaft aufkam, scheint sich die Laktosetoleranz dank starker Selektion sehr schnell verbreitet zu haben. Dieser Kulturwandel war somit nur möglich, weil er mit einer entsprechenden Änderung im Erbgut einherging.

Das Gen für Laktase wird recht komplex reguliert, und noch sind nicht alle Details einer Verträglichkeit oder Unverträglichkeit von Milchzucker geklärt. Doch zumindest ist klar, dass der Austausch jeweils nur eines einzigen genetischen Bausteins (Nukleotids) in einem Steuerelement des Gens mit dem Phänomen einhergeht. Das erwies eine Pionierarbeit an neun größeren finnischen Familien, die zwei solche Punktmutationen zu Tage förderte. Diese müssen schon vor Jahrtausenden aufgetreten sein, denn sie fanden sich auch in entfernt verwandten Populationen. Die eine Mutante ließ sich bis auf eine Population im Ural, die andere auf eine im Kaukasus zurückführen.

In Nordeuropa und im Nahen Osten dürfte die neue Anpassung den genetischen Daten zufolge jeweils vor 10 000

Laktosetoleranz und Milchviehzucht

In den meisten Bevölkerungsgruppen vertragen die Erwachsenen – in vielen sogar schon ältere Kinder, manchmal bereits Kleinkinder ab einem oder zwei Jahren – noch heute größtenteils keine Milch mehr, weil sie den Milchzucker (Laktose) darin nicht verdauen können.

Milchzuckerträglichkeit (Laktosetoleranz) ist teilweise geografisch auffallend eingegrenzt. Sie entstand einst im Zusammenhang mit Viehhaltung und Milchverwertung, wie heute in Afrika und Nordeuropa gut zu erkennen ist. Deswegen herrschen in Bevölkerungen, die in der Vergangenheit nie eine Milchtierhaltung entwickelten, noch heute Erbausstattungen vor, deren Träger als Erwachsene oft völlig unfähig sind, den Zucker in Milch oder Milchprodukten zu verdauen. Allerdings scheint sich eine winzige Mutation, die noch den Erwachsenen Milchkonsum erlaubt, allmählich auszubreiten.

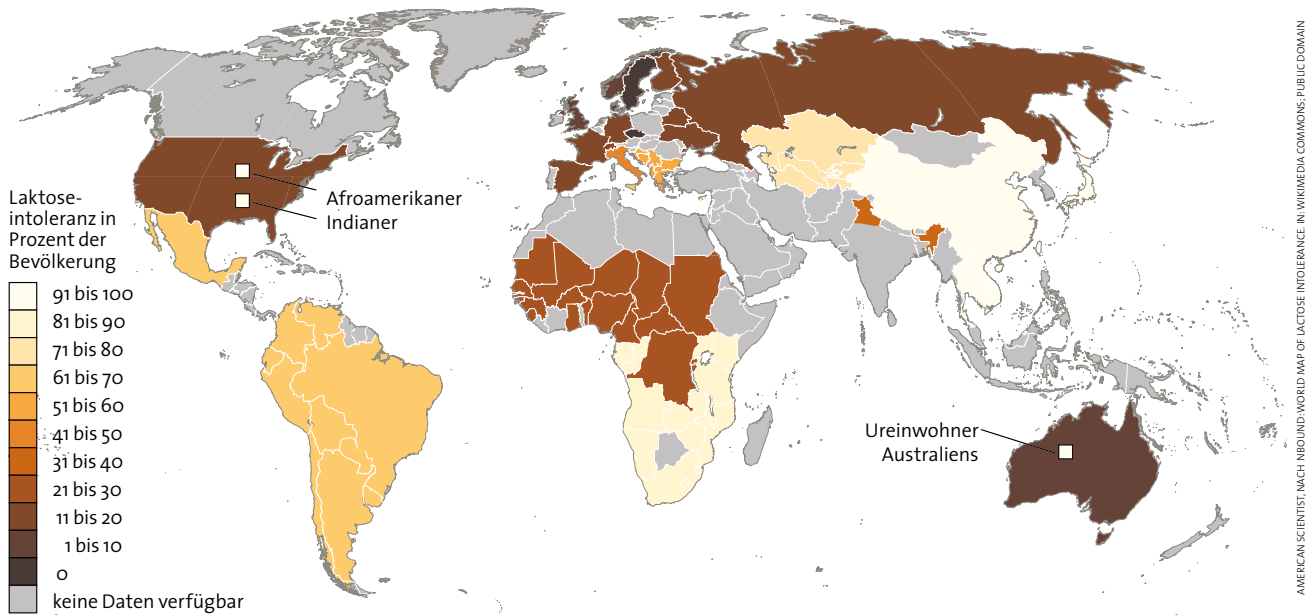
bis 6000 Jahren stattgefunden haben. Die ältesten historischen Belege für die Verwendung von Kuhmilch in Mesopotamien und im alten Ägypten stammen aus dem vierten vorchristlichen Jahrtausend. Dagegen tranken die alten Römer keine Milch, was sich noch heute in den Genen ihrer Nachfahren zeigt. In einigen Bevölkerungsgruppen in Saudi-Arabien wiederum existieren zwei eigene genetische Varianten, die vermutlich vor 6000 Jahren mit der Domestikation des Dromedars aufkamen. Noch drei andere, 7000 Jahre alte Abwandlungen im Umfeld des Laktasegens, die mit einer Milchzuckerträglichkeit einhergehen, entdeckten Forscher in Afrika, und zwar in Tansania, Kenia und im Sudan.

Offenbar setzten sich die mutierten Gene in den betreffenden Populationen sehr rasch durch. Eine dermaßen rapi-



DREAMSTIME / PATRICIA HOFMEISTER

In Nordeuropa zählt Milch samt den daraus gewonnenen Produkten zu den unverzichtbaren Nahrungsmitteln. Sie liefert neben Fett, Zucker und Proteinen weitere wertvolle Stoffe, darunter Kalzium und Vitamine. Darum können sich Menschen in Notzeiten allein davon ernähren – vorausgesetzt, sie vertragen das Lebensmittel. Anscheinend herrschte in Viehhalterkulturen früher ein hoher genetischer Selektionsdruck zu Gunsten der Verwertung von Milch und Milchprodukten, so dass sich entsprechende Erbanlagen in der Bevölkerung bald durchsetzten.



de Evolution eines neuen Merkmals finden Genetiker selten. Demnach war der Selektionsdruck für die Ernährung mit Milch offenbar ungewöhnlich hoch.

Findet auch heute noch eine Koevolution zwischen Kultur und Genen statt? Das ist anzunehmen. Moderne Beispiele sind Dispositionen für ernährungsbedingte Zivilisationskrankheiten. Vermutlich förderte ein Selektionsdruck in jüngerer Vergangenheit die betreffenden genetischen Anpassungen, weil sie Menschen unter schwierigen Ernährungsbedingungen das Überleben und somit auch die Fortpflanzung erleichterten. Erst in unserer Epoche mit ihrem Nahrungsüberangebot in den Industrieländern wirken sich diese Varianten ungünstig aus.

Wie genetische Untersuchungen nahelegen, scheint in jüngerer Zeit eine positive Auslese zu Gunsten erblicher Risikofaktoren für den so genannten Alters- oder Typ-II-Diabetes stattgefunden zu haben – dagegen nicht oder kaum für den Typ-I- oder juvenilen Diabetes, der eine Autoimmunkrankheit darstellt. Forscher stießen auf verschiedene Mutationen, die sie verdächtigen, zwei Hunger-Sättigungs-Hormone und den Body-Mass-Index (Körpergewicht im Verhältnis zur Größe) zu beeinflussen. Diese Mutationen stammen vermutlich aus der Übergangsphase vom Jäger-und-Sammler-Dasein zur Existenz als Ackerbauern und Viehzüchter.

Heutige Menschen besitzen nicht mehr durchweg die gleichen Gene wie ihre Vorfahren. Wir wurden also keineswegs mit dem Erbgut von Jägern und Sammlern auf das Fastfood-Zeitalter losgelassen. Gleichzeitig mit kulturellen Errungenschaften hat sich auch auf genetischer Ebene eine Menge getan – wie viel, werden zukünftige Forschungen erweisen. ~

DIE AUTOREN



Beide Autoren lehren und forschen in der Abteilung Biologie der Universität Turku (Finnland). Der Tierphysiologe und Mediziner **Olli Arjamaa** (links) ist außerordentlicher Professor am Exzellenzzentrum für Evolutionäre Genetik und

Physiologie. Der Zoologe und Ökologe **Timo Vuorisalo** hat eine Dozentur für Umweltforschung.

QUELLEN

Laland, K.N. et al.: How Culture Shaped the Human Genome: Bringing Genetics and the Human Sciences together. In: *Nature Reviews Genetics* 11, S. 137–148, Februar 2010

Pickrell, J.K. et al.: Signals of Recent Positive Selection in a Worldwide Sample of Human Populations. In: *Genome Research* 19, S. 826–837, 2009

LITERATURTIPPS

Pritchard, J. K.: Evolution auf der Kriechspur. In: *Spektrum der Wissenschaft* 3/2011, S. 28–36

Studien zur jüngsten Evolution des Menschen

Wrangham, R.: Feuer fangen – wie uns das Kochen zum Menschen machte. Deutsche Verlags-Anstalt, München 2009

Eine neue Theorie der Menschwerdung

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121039

Thomas Bayes und die Tücken der Statistik

Der englische Pfarrer ist erst nach seinem Tod für ein Theorem berühmt geworden, das den Grad unserer Unkenntnis zu berechnen gestattet.

VON MARC DRESSLER

Zu den Lebensdaten des Thomas Bayes gibt es ein einziges Dokument, das über jeden Zweifel erhaben ist: seinen Grabstein (Bild rechts unten). Demnach ist Bayes am 7. April 1761 im Alter von 59 Jahren gestorben. Aber wann ist er geboren?

Für das Geburtsjahr dürfte 1701 etwas wahrscheinlicher sein als 1702, denn für 1702 kommen nur die 96 Tage bis zum 6. April in Frage, während das Jahr 1701 ganze 268 Tage als mögliche Geburtstage vorhält. So könnte man argumentieren unter Berufung auf Bayes höchstselbst, der lehrte, dass jeder Tag gleich wahrscheinlich ist, wenn nichts bekannt ist, was einen Tag vor den anderen auszeichnen könnte.

Trifft das hier zu? Nicht ganz. Wir wissen, dass Bayes der Sohn sittenstrenger Eltern war. Sein Vater hatte sich von der anglikanischen Kirche losgesagt und war presbyterianischer Priester geworden. Selbst wenn man bedenkt, dass in England zu Beginn des 18. Jahrhunderts jede vierte Braut schwanger vor den Traualtar trat, ist es vernünftig anzunehmen, dass zwischen der Heirat der Eltern und der Geburt des kleinen Thomas neun Monate verstrichen.

Wann genau Joshua Bayes (1671–1746) seine Anne Carpenter ehelichte, ist ebenfalls nicht überliefert; in den Kirchenbüchern der anglikanischen Kirche ist das Datum aus einleuchtenden Gründen nicht verzeichnet. Immerhin blieb die offizielle Heiratserlaubnis (*marriage licence*) erhalten, datiert auf den 23. Oktober 1700. Vermutlich hat die Trauung wenige Tage später stattgefunden. Damit fallen die Tage bis Ende Juli des Jahres 1701 als mögliche Geburtstage weg, so dass 1702 als Geburtsjahr aufholt und fast so wahrscheinlich wird wie 1701.



Reverend Thomas Bayes (rechts) zerpflückte mit großem Sachverstand die Argumente des Bischofs George Berkeley (links) gegen Newtons Differenzialrechnung.

Argumente dieser Art sind charakteristisch für Thomas Bayes. Wie wahrscheinlich etwas ist, hängt von unserem Vorwissen ab. Auf Grund der genannten historischen Tatsachen fällt Bayes' Geburtstag also mit größerer Wahrscheinlichkeit auf die zweite Jahreshälfte 1701 als auf die erste. Nur bei vollständiger Unwissenheit können wir keinen Tag dem anderen vorziehen. Jede weitere Erkenntnis aber ordnet die Wahrscheinlichkeiten neu.

Elf Tage in einer Nacht verstrichen

Dazu gehört auch das Faktum, dass England erst 1752 vom julianischen zum gregorianischen Kalender wechselte. Durch die Reform schrumpfte das Jahr 1751 auf neun Monate zusammen: Es währte vom 25. März bis zum 31. Dezember. Während bis dahin nämlich das alte Jahr am 24. März endete, feiern die Bewohner der Insel seitdem zeitgleich mit ihren kontinentalen Nachbarn Silvester (Spektrum der Wissenschaft 8/2011, S. 50).

Zusätzlich musste auch der September 1752 Federn lassen, da in ihm die Umstellung stattfand: Die Engländer legten sich am 2. September zu Bett und wachten am 14. September wieder auf. Bayes ist also am 27. März alter Zeitrechnung gestorben (man ziehe die elf Tage vom notierten Todesdatum ab). Dann aber verbleiben für 1702 nur noch der 25. und der 26. März als mögliche Geburtstage des 59-jährigen, denn der 24. März gehörte ja noch dem Jahr 1701 an.

In der – ebenfalls verschollenen – Taufurkunde des Thomas Bayes stand also mit allergrößter Wahrscheinlichkeit die Jahreszahl 1701. (Ob man am Tag seiner Geburt auf dem Kontinent schon das Jahr 1702 schrieb, ist eine andere Frage.)

In die Londoner Wiege gelegt bekam der Neugeborene – ältestes von sieben Geschwistern – seine geistige Unabhängigkeit sowie die Mittel dazu. Die sehr wohlhabende Familie ließ den Zögling durch Privatlehrer unterrichten, zu denen möglicherweise auch der französi-

sche Wahrscheinlichkeitstheoretiker Abraham de Moivre (1667–1754) zählte.

Zunächst sah es allerdings ganz so aus, als würde Bayes in die Fußstapfen seines Vaters treten. Er schrieb sich an der Universität Edinburgh in Theologie ein und brillierte in Altgriechisch, der Sprache des Neuen Testaments. Zu den Vorlesungen in Mathematik, die Bayes ebenfalls besuchte, sind dagegen keine Glanztaten überliefert.

Als frisch geweihter Pastor der Kapelle von Tunbridge Wells, einem Kurort südlich von London, veröffentlichte der Presbyterianer eine Abhandlung über die Motive für Gottes Handeln in der Welt. Gottes Güte mache ihn zum Wahrer der größtmöglichen Glückseligkeit, zu der seine Geschöpfe fähig seien. Sie habe ihn jedoch nicht zur Schöpfung selbst bewogen. Die Frage nach den Gründen für die Existenz der Welt bleibe daher offen.

Die Leidenschaft, mit der im 18. Jahrhundert diskutiert wurde, ob das Handeln Gottes moralisch oder rein ratio-

nal zu begründen sei, machte sich in Bayes' Predigten nicht bemerkbar. Als Priester war er recht unbeliebt. Seine Stärken traten öffentlich erst hervor, als 1734 der anglikanische Bischof George Berkeley (1685–1753) zum Angriff auf Newtons Differenzialkalkül blies.

Damit zielte Berkeley mitten ins Herz der neuzeitlichen Mathematik – und der Physik obendrein. Denn schon der Begriff der Geschwindigkeit, allgemein der zeitlichen Änderung, zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt an jener Methode, die auch den Schülern mit gutem Grund Kopfzerbrechen bereitet: Man addiert zu dem Zeitpunkt t eine kleine Größe h , bestimme, wie sich dadurch eine von der Zeit abhängige Größe ändert, und führe weitere Berechnungen durch mit dem erklärten Ziel, die Größe h am Ende verschwindend klein werden zu lassen. Berkeley nahm Anstoß daran, dass h von null verschieden und zugleich doch null sein solle. Solange im Differenzialkalkül der »Geist verschwundener Grö-

ßen« umherspucke, könnten Momentangeschwindigkeiten oder stetige Änderungen nicht mehr Plausibilität für sich beanspruchen als die Glaubensartikel irgendeiner Religion.

Wackerer Streiter für die Differenzialrechnung

Bayes widersprach. Bemerkenswert daran war allerdings weniger der Inhalt als vielmehr die Form. In seiner Verteidigung Newtons stellte Bayes Postulate auf, definierte sauberlich die von ihm verwendeten Begriffe, formulierte Axiome und bewies Sätze. Das Dokument zeigte eindrucksvoll, dass hier jemand den noch jungen Differenzialkalkül meisterlich zu handhaben verstand. Da spielt es auch keine Rolle, dass er die Korrektheit von Newtons Berechnungen trotz allem nicht wirklich beweisen konnte – dazu mussten erst noch die Begriffe der Unendlichkeit und des Grenzwerts entwickelt werden.

Ganz offensichtlich hatte Bayes die beträchtlichen Freiräume genutzt, die ihm die Stellung eines Geistlichen in der Provinz bot, um seine mathematische Begabung zur Entfaltung zu bringen. Selbstbewusst trug er vor, dass einen Mathematiker nicht interessiere, ob Größenänderungen in der Wirklich-

Hier ruht Thomas Bayes zusammen mit zahlreichen Anverwandten in der Familiengruft der Bayes und Cotton in Bunhill Fields, einem Gelände im Norden Londons, das vom 17. bis zum 19. Jahrhundert den Londoner Nonkonformisten als Friedhof diente. Die Grabstätte wurde 1969 mit Spenden von Statistikern aus aller Welt restauriert.



BEIDE FOTOS MIT FREILEGEN VON PROF. ANTHONY O'HAGAN

keit eine Entsprechung hätten, sondern allein, ob sie vorstellbar seien. Seine mathematischen Ideen legte er so geschickt dar, dass ihm seine Streitschrift die Eintrittskarte in die Royal Society löste.

So kam Bayes zu Lebzeiten zu wissenschaftlichem Ansehen. Ruhm aber sollte er erst nach seinem Tod erlangen – als Statistiker. Untrennbar mit seinem Namen verbunden ist ein Theorem, das bei der Beantwortung der Frage hilft, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine Theorie zutrifft, wenn bestimmte Beobachtungen vorliegen. Damit kehrte er die Perspektive der klassischen Statistik um, in der es um die Wahrscheinlichkeit geht, etwas tatsächlich zu beobachten, sofern eine bestimmte Theorie zutrifft.

Mit seinem Theorem setzte Bayes die Idee um, dass Wahrscheinlichkeiten ein Gradmesser unseres Wissens sind und sich folglich mit diesem ändern. Wir lernen aus Erfahrung.

Ein Beispiel: Der Zufall führt uns mit einem Menschen zusammen, und wir

beobachten, dass er schüchtern, ordentlich und menschenscheu ist und sehr viel Wert auf Details legt. Ist es ein Arzt oder ein Bibliothekar? Vordergründig scheint die Antwort leicht. Doch hier erhebt Bayes' Theorem seinen mahnenenden Zeigefinger.

Subjektive Wahrscheinlichkeiten

Unterstellen wir, es sei bekannt, dass erstens acht von zehn Bibliothekaren schüchtern, ordentlich, menschenscheu und detailverliebt sind, aber nur jeder zehnte Arzt diese Eigenschaften besitzt, und dass es zweitens hundertmal so viele Ärzte gibt wie Bibliothekare. Dann beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass wir es mit einem Bibliothekar zu tun haben, nicht einmal acht Prozent (Kasten)!

In statistische Berechnungen geht bei Bayes stets eine »a-priori-Wahrscheinlichkeit« ein, also die Wahrscheinlichkeit, die man den Ereignissen zuweist, ohne zusätzliche Erkenntnisse einzubeziehen, und die im Extremfall

nur totales Unwissen widerspiegelt. Dieser Ansatz hat in der modernen Statistik kaum eine Rolle gespielt. »Das mag auch an einem damals so empfundenen Missbrauch des Theorems im 18. Jahrhundert gelegen haben«, mutmaßt Hans Fischer, Mathematiker an der Katholischen Universität Eichstätt. Damals gaben Statistiker vor, aus dem Stimmenverhältnis der Geschworenen bei Gericht ausrechnen zu können, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Angeklagte schuldig sei. Damit geriet das Theorem von Bayes etwas in Verruf.

Die moderne Statistik setzt nicht mit einer Schätzung an, sondern mit einer Festlegung, wie groß die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlentscheidung sein darf. Ergibt nun eine Serie von Beobachtungen einen Wert, der im Rahmen der zur Debatte stehenden Theorie sehr unwahrscheinlich ist, dann empfiehlt der moderne Statistiker, die Theorie zu verwerfen. Andernfalls eben nicht.

In diesem Fall mag man die Beobachtungen als Bestätigung der Theorie ansehen. Einen Rückschluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass die Theorie stimmt, gestatten sie nicht. Zitierbar ist nur die Wahrscheinlichkeit, dass die Beobachtungen die Theorie bestätigen werden, vorausgesetzt sie ist richtig. Das Resultat des Bayes-Theorems lässt sich dagegen interpretieren als Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Theorie richtig ist, vorausgesetzt die Beobachtungen liegen vor.

Darin sehen manche Mathematiker einen Vorteil des bayesschen Ansatzes gegenüber der modernen Statistik. Sie verweisen zudem darauf, dass bei Bayes die Berechnung der Wahrscheinlichkeit näher an der Realität sei, weil in diese Berechnung nur die beobachteten Werte eingehen, während die moderne Statistik alle möglichen Werte einer Verteilung einbeziehe.

Einen Streit darüber, welcher Ansatz wirklichkeitsgetreuer ist, gibt es dennoch nicht – wohl auch deshalb, weil die Unterschiede in den Ergebnissen verschwinden, wenn die Beobachtungen oft genug wiederholt werden. Problematisch wird es nur dort, wo Wiederholungen nicht möglich sind. Dann steht

Die Formel von Thomas Bayes

$$P(B|C) = \frac{P(C|B)P(B)}{P(C)}$$

P(B|C) bedeutet die Wahrscheinlichkeit, dass B zutrifft, unter der Voraussetzung, dass C vorliegt (»bedingte Wahrscheinlichkeit«).

Das im Text genannte Beispiel wäre etwa wie folgt in mathematische Gleichungen umzusetzen:

A sei das Ereignis »Der Gesprächspartner ist Arzt«;
 B sei das Ereignis »Er ist Bibliothekar«;
 C sei das Ereignis »Er ist schüchtern«.

Wir wissen bereits, dass unser Gesprächspartner entweder Arzt oder Bib-

liothekar ist. Die (»totale«) Wahrscheinlichkeit P(C), dass er schüchtern ist, berechnet sich zu

$$P(C) = P(C|A)P(A) + P(C|B)P(B).$$

Die eine Erkenntnis (»acht von zehn Bibliothekaren, aber nur einer von zehn Ärzten ...«) schreibt man als

$$P(C|B) = 0,8$$

$$P(C|A) = 0,1,$$

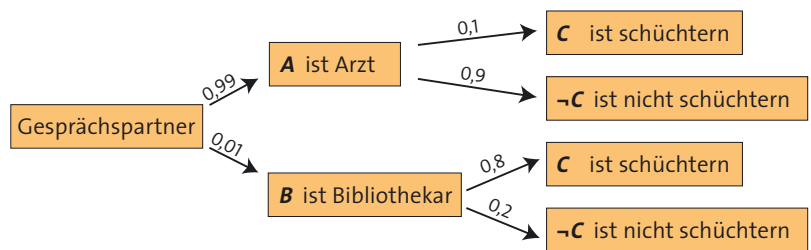
die zweite (»es gibt hundertmal so viele ...«) als

$$P(B) = 0,01$$

$$P(A) = 0,99$$

(leicht gerundet). Daraus ergibt sich

$$P(B|C) = 0,8 \cdot 0,01 / (0,1 \cdot 0,99 + 0,8 \cdot 0,01) \approx 0,0747.$$



die moderne Statistik ohne Wahrscheinlichkeitsbegriff da, während Bayesianer stets mit einer geschätzten Wahrscheinlichkeit aufwarten können.

Kauft jemand ein Gerät, das mit nagelneuer Technik ausgestattet ist, und möchte sich dagegen versichern, dass es kaputtgeht, dann haben sowohl er als auch die Versicherungsgesellschaft ein Problem: nämlich die Ausfallwahrscheinlichkeit zu schätzen, ohne dass eine Serie von Beobachtungen vorliegt. »Das ist aber eher selten«, sagt Anton Bovier. Daher sieht der Bonner Mathematiker ebenso wie die meisten seiner Kollegen die Lagerbildung in der Statistik recht entspannt – zumal der Streit eher die Interpretation des Theorems betrifft als seine Anwendung. Dass Bayes einem Subjektivismus das Wort geredet hätte, der geschätzten Wahrscheinlichkeiten jeden Bezug zur physischen Realität nimmt, ist abstrus schon wegen seiner Parteinahme gegen Berkeley, den Subjektivisten par excellence.

Auch als Gewährsmann für eine Theorie induktiven Schließens taugt Bayes nicht. Wie man von konkreten Beobachtungen zu allgemeinen Theorien gelangt, lässt sich nicht darauf reduzieren, dass mit jeder erneuten Beobachtung die Wahrscheinlichkeit zunehme, dass die sie voraussagende Theorie richtig sei. Erkenntnistheoretische Fragen sind keine wahrscheinlichkeitstheoretischen. Dagegen hat sich Bayes bewährt. Eine derartige Verallgemeine-

rung hätte er sich als Mathematiker untersagt, schließlich hatte er die Gültigkeit des nach ihm benannten Theorems nur für den Spezialfall einer bestimmten Verteilung gezeigt.

In der Mathematik gilt der »Satz von Bayes« mittlerweile als ein simples und unbestrittenes Theorem zu bedingten Wahrscheinlichkeiten. Nur weil jede Untersuchung, die von der zugehörigen Formel Gebrauch macht, für sich den Titel einer Bayes-Statistik reklamiert, entsteht der Eindruck zweier unversöhnlicher mathematischer Glaubensrichtungen. Doch sämtliche Theoreme der Statistik beruhen letzten Endes auf derselben Axiomatik.

Sowohl Bayes und seine Nachfolger als auch moderne Statistiker haben ein üppiges Reservoir an Verteilungen hervorgebracht. Aus dem können Statistiker jeglicher Couleur heute schöpfen – und tun das auf pragmatische Weise: Sie beschreiten den Weg, der am meisten Erfolg verspricht.

Ein Ansatz, der in einer Situation zu brauchbaren Ergebnissen führt, kann in einer anderen völlig unverständlich sein oder gar blanken Unsinn produzieren. »Man muss als Statistiker flexibel sein und sich zur Not empor irren«, sagt Norbert Henze, Mathematiker am Karlsruher Institut für Technologie. Bayes' Ansatz bewährt sich jedenfalls bis heute: Er wird erfolgreich eingesetzt bei der Modellierung von Biochips oder in der Bildanalyse. ~

DER AUTOR



Marc Dressler ist promovierter Philosoph und Wissenschaftsjournalist in Stuttgart (www.inspective.de).

QUELLEN

Bellhouse, D. R.: The Reverend Thomas Bayes, FRS: A Biography to Celebrate the Tercentenary of his Birth. In: *Statistical Science* 19, S. 3–43, 2004. Online unter www.york.ac.uk/depts/maths/histstat/bayesbiog.pdf

Dale, A. I.: *A History of Inverse Probability: From Thomas Bayes to Karl Pearson*. Springer, New York 1999

Redaktion des IMS Bulletin: The Reverend Thomas Bayes, F.R.S.: Who is this Gentleman? When and where was he born? In: *The IMS Bulletin* 17, S. 276–278, 1988. Online unter www.isye.gatech.edu/~brani/isyebayes/bank/whowas.ps

LITERATURTIPP

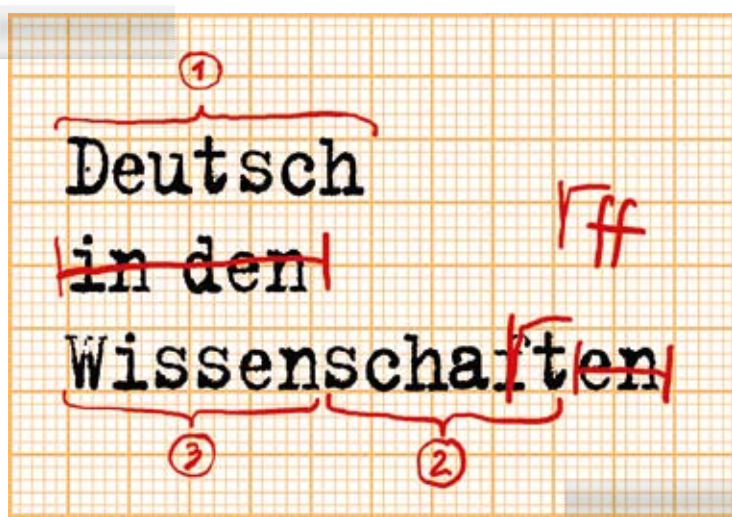
Plato, J. v.: *Creating modern Probability: Its Mathematics, Physics and Philosophy in Historical Perspective*. Cambridge University Press, Cambridge 1998
Zur Geschichte des Wahrscheinlichkeitsbegriffs und seiner verschiedenen Interpretationen

WEBLINKS

Lavine, M.: *What is Bayesian Statistics and Why Everything else is Wrong*. ISDS, Duke University, Durham (North Carolina) 2000.
www.math.umass.edu/~lavine/whatisbayes.pdf

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1121018

ANZEIGE



Konferenz 10. bis 12. November 2011
im Casino auf der Zeche Zollverein, Essen

Welche Rolle erfüllen Sprachen im Erkenntnisprozess? | Wie wird deutschsprachige Wissenschaft im internationalen Kontext wahrgenommen? | Welche Bedeutung hat die Sprache der Wissenschaft für die Gesellschaft? | Wie lässt sich Mehrsprachigkeit in Forschung und Lehre umsetzen?

Diese Fragen diskutieren u.a. Peter Colliander, Iris Danowski, Konrad Ehlich, Ludwig M. Eichinger, Peter Eisenberg, Christian Fandrych, Peter Göllitz, Karl-Heinz Göttert, Christopher Hall, Randall Hansen, Marianne Hepp, Jochen Hörisch, Stefan Hornbostel, Andreas Kelletat, Karin Kleppin, Heinz L. Kretzenbacher, Georges Lüdi, Georg Mein, Eric Merkel-Sobotta, Ralph Mociak, Sonja Neef, Angelika Redder, Klaus Reichert, Krzysztof Ruchniewicz, Paulo Astor Soethe, Pramod Talgeri, Jürgen Trabant, Klaus Waschik, Sigrid Weigel, Susanne Weigelin-Schwiedrzik. Mehr Informationen unter www.wissenschaftssprache-deutsch.de



Deutscher Akademischer Austausch Dienst
German Academic Exchange Service





Als der Urkontinent Pangäa auseinanderbrach und glutheiße Gesteinsmassen an die Erdoberfläche gelangten, setzte dies einen einschneidenden Klimawandel in Gang. Er zog die gesamte Tier- und Pflanzenwelt in Mitleidenschaft.

KLIMAWANDEL

Was lehrt uns die letzte Erderwärmung?

Vor 56 Millionen Jahren ereignete sich die rasanteste globale Erwärmung in vorgeschichtlicher Zeit. Lange galt sie als warnendes Beispiel für die Gegenwart. Doch nun fanden Forscher heraus, dass der damalige Temperaturanstieg wesentlich langsamer als gedacht vonstattenging. Der heutige Klimawandel ist viel dramatischer.

Von Lee R. Kump

Die meisten Besucher kommen wegen der Eisbären nach Spitzbergen. Mich hingegen lockten Gesteine. Mit einer Gruppe von Geologen und Klimaforschern flog ich im Sommer 2007 nach Svalbard, wie die arktische Inselgruppe von den Norwegern genannt wird. Wir wollten Genaueres über das Temperaturmaximum am Übergang vom Paläozän zum Eozän herausfinden. Bis vor Kurzem galt dieses so genannte PETM nämlich als diejenige Phase, in der sich die Erde schneller denn je aufheizte.

In einer alten Arbeiterbaracke der ehemaligen Kohlebergbausiedlung Longyearbyen kamen wir unter und brachen gleich am nächsten Morgen früh auf. Denn um die Gesteinsaufschlüsse zu erreichen, in denen wir Zeugnisse der einstigen globalen Erwärmung vermuteten, mussten wir uns erst einmal zwei Stunden lang durch unwegsames Gelände kämp-

AUF EINEN BLICK

KLIMAWANDEL IN ZEITLUPE

1 Vor 56 Millionen Jahren gelangten **gewaltige Mengen an Treibhausgasen** in die Atmosphäre. Sie ließen die globale Durchschnittstemperatur um **mehr als fünf Grad Celsius steigen**. Ähnliches ist zu erwarten, wenn die Menschheit ihren Ausstoß von Kohlendioxid nicht reduziert.

2 Neueste Befunde zeigen, dass sich der damalige Temperaturanstieg über einen unerwartet langen Zeitraum von 20 000 Jahren hinzog. **Tiere und Pflanzen passten sich an** oder migrierten polwärts. Insgesamt verkraftete das Leben den Klimawandel relativ gut.

3 Heute dagegen vollzieht sich die Erwärmung der Erde binnen weniger Jahrhunderte. Damit bleibt Pflanzen, Tieren und Menschen **viel weniger Zeit, um sich an veränderte Klimaverhältnisse anzupassen**.

fen. Während wir über rutschige Schneereste und kümmerlichen Pflanzenwuchs stapften, versuchte ich mich in die Zeit vor rund 56 Millionen Jahren zurückzusetzen. Vermutlich hausten hier damals Krokodile zwischen Palmen und Baumfarnen, und ich hätte geschwitzt, statt zu frösteln. Forschungen ergaben für jenen Zeitabschnitt einen weltweiten Temperaturanstieg um fünf Grad Celsius. Zu diesem kam es im Verlauf von nur einigen tausend Jahren – nach geologischen Maßstäben ist das ein Augenblick. Während des PETM verlagerten sich die Klimazonen polwärts, sowohl an Land als auch im Meer. Pflanzen und Tiere überlebten nur durch Migration oder Anpassung. Einige der tiefsten Ozeanregionen versauerten und verloren fast allen Sauerstoff, was für viele der dort lebenden Organismen den Tod bedeutete. Um das »Fieber« wieder zu senken, benötigten die natürlichen Wärmepuffer der Erde beinahe 200 000 Jahre.

Diese Entwicklung weist bemerkenswerte Parallelen zum heutigen, nach allen vorliegenden Hinweisen von Menschen verursachten Klimawandel auf. Das gilt vor allem für die Ursache des PETM: eine massive Freisetzung von Treibhausgasen in die Atmosphäre und in die Ozeane. Sie entsprach in ihrer Größenordnung etwa der Menge, die wir bei fortgesetzter Verbrennung fossiler Energieträger in den kommenden Jahrhunderten in die Luft blasen würden.

Ein erschütternd klares Bild

Bis vor Kurzem waren viele Fragen über das damalige Geschehen allerdings noch offen, so dass Schlussfolgerungen über das, was uns heute blüht, spekulativ blieben. Nun aber haben wir Antworten gefunden, und sie liefern ein erschütternd klares Bild. Demnach verblassen die weltweiten Folgen der letzten großen globalen Erwärmung im Vergleich zu dem, was uns erwartet. Die Erkenntnisse, die wir auf Spitzbergen gewannen, bestätigen die schlimmsten Befürchtungen.

In gewisser Weise begann das PETM wie unsere gegenwärtige Klimakrise, nämlich mit der Verbrennung fossiler Energieträger. Damals befand sich der Superkontinent Pangäa im Endstadium des Zerfalls. Zwischen dem heutigen Europa und Nordamerika brach die Erdkruste auseinander, und der Nordostatlantik entstand. Dabei stiegen unter der Landmasse, auf der Europa und Grönland noch vereint waren, enorme Mengen glutheißer Gesteinsschmelze aus dem Erdinneren empor und zersetzten (»pyrolysierten«) kohlenstoffreiche Sedimente sowie vielleicht auch Kohle und Erdöl.

Dadurch wurden große Mengen zweier stark wirkender Treibhausgase frei: Kohlendioxid (CO_2) und Methan (CH_4). Schätzungsweise gelangten so einige hundert Gigatonnen (Milliarden Tonnen) Kohlenstoff (C) in die Atmosphäre. Dadurch stieg die globale Durchschnittstemperatur bereits deutlich an. Die meisten Analysen und auch unsere eigenen Studien zeigen jedoch, dass sich das volle Ausmaß der damaligen Erwärmung damit noch nicht erklären lässt. Demnach muss es zu einer zweiten, intensiveren Aufheizphase gekom-

Immer weitere positive Rückkopplungen verschärften die Lage

men sein. Die frei gewordene Hitze brachte nämlich weitere Quellen von Treibhausgasen ins Spiel. Anscheinend gelangte durch die natürliche Umwälzung der Ozeane Wärme bis zum kalten Meeresboden hinab. Dort destabilisierte sie riesige Vorkommen von Methanhydrat, einer Verbindung aus Methan und Wasser. Als sich die eisartige Substanz zersetzte, stieg das frei werdende Gas in Blasen zur Meeresoberfläche empor und erhöhte den Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre weiter. Methan ist als Treibhausgas noch viel effektiver als CO_2 , verwandelt sich aber schnell in dieses Molekül. Doch solange es vom Meeresboden ausgast, blieb seine Konzentration in der Atmosphäre hoch. So verstärkte es den Treibhauseffekt und trieb die Temperaturen weiter in die Höhe.

Auf dem Gipfel der durch Hydrate verursachten Erwärmung gelangte durch zusätzliche positive Rückkopplungen vermutlich weiterer Kohlenstoff von den Landflächen in die Atmosphäre. Treibhausgase werden auch dann frei, wenn lebendes oder abgestorbenes biologisches Material verdorrt oder verbrennt. In vielen Teilen der aufgeheizten Erde, etwa im Westen der USA und in Westeuropa, dürfte Dürre geherrscht haben. Wälder und Moorlandschaften trockneten aus. In einigen Fällen kam es vermutlich zu ausgedehnten Flächenbränden, die zusätzliches Kohlendioxid freisetzten. Eine weitere mögliche Quelle sind Torfschichten und Kohleflöze, von denen aus historischer Zeit bekannt ist, dass sie unter Umständen jahrhundertlang schwelen.

Verschärft wurde die Lage wohl noch durch auftauenden Permafrostboden in den Polarregionen. In ständig gefrorenem Erdreich bleiben abgestorbene Pflanzen zwar für Jahrtausende konserviert. Doch sobald der Boden taut – ein Prozess, den Wissenschaftler in arktischen Regionen auch gegenwärtig mit Sorge betrachten –, machen sich Mikroben über die Überreste her und produzieren dabei eine Menge Methan. Allerdings war der damalige Permafrostboden anfälliger. Weil die globale Durchschnittstemperatur höher war, fehlte der Antarktis sogar schon vor dem PETM der Eisschild. Der dortige Permafrostboden lag gewissermaßen zum Auftauen bereit.

Zu Beginn der Freisetzung von Treibhausgasen absorbierten die Ozeane noch große Mengen des Kohlendioxids. Dadurch verzögerte sich die Erwärmung zunächst. Doch mit der Zeit gelangte immer mehr von dem Gas in die Tiefsee, wo es mit Wasser zu Kohlensäure reagierte. Dadurch begann das Meer zu versauern. Zudem sank der Sauerstoffgehalt der Tiefsee; denn wärmeres Wasser nimmt weniger von diesem Gas auf als kaltes. Beides wirkte sich verhängnisvoll auf die auf dem Meeresboden und in den Sedimenten lebenden Foraminiferen aus. Besonders anpassungsfähig waren die Mikroorganismen offenbar nicht: Analysen zufolge starben 30 bis 50 Prozent der Foraminiferenarten aus.

Dass das PETM tatsächlich durch eine spektakuläre Freisetzung von Treibhausgasen ausgelöst wurde, belegten zwei Wissenschaftler aus kalifornischen Forschungseinrichtungen 1990 anhand eines Sedimentbohrkerns vom Meeres-

boden nahe der Antarktis. Doch welche Gasmenge wurde damals freigesetzt? Um welches Gas handelte es sich vor allem? Wie lange dauerte die Freisetzung? Was hat sie verursacht?

Etliche Forscher machten sich in den Folgejahren auf die Suche nach Antworten und analysierten Hunderte von Bohrkernen aus der Tiefsee. Wenn sich Sedimente langsam Schicht für Schicht bilden, lagern sie Minerale ein, darunter auch die Skelettreste von Meerestieren. So liefern sie Hinweise auf die damals vorhandenen Lebensformen, aber auch auf die lokale Zusammensetzung von Ozean und Atmosphäre zur Zeit der Ablagerung. Diese wiederum erlaubt weitere Rückschlüsse. So lässt sich beispielsweise aus dem Verhältnis verschiedener Sauerstoffisotope in den Skelettresten die damalige Wassertemperatur ableiten.

Doch nicht jeder Sedimentbohrkern ist ein solch ausgezeichnetes Archiv der Klimageschichte. Viele der Kerne mit Schichten aus der Zeit des PETM sind nicht gut erhalten, oder es fehlen ihnen wichtige Abschnitte. Meeresbodensedimente enthalten in der Regel reichlich Kalziumkarbonat. Insbesondere aus jenen Schichten, die vom Höhepunkt der Erwärmungsphase hätten berichten können, war jedoch ein großer Teil durch die Versauerung der Ozeane herausgelöst worden.

Unverhoffter Schatz im Lagerschuppen

Für unsere Reise nach Spitzbergen hatten meine Kollegen und ich uns im Rahmen des Worldwide Universities Network mit Forschern aus England, Norwegen und den Niederlanden zusammengetan. Weil Gesteine aus diesem Teil der Arktis großenteils aus Lehm und Ton bestehen, hofften wir, dass sie mehr Informationen enthalten würden. Wir suchten Sedimente aus einem alten Ozeanbecken, das seit dem PETM durch tektonische Kräfte weit über den Meeresspiegel gehoben worden war.

Nach unserer ersten Erkundungstour schmiedeten wir Pläne für die Geländearbeit und das Ziehen der Gesteinspro-

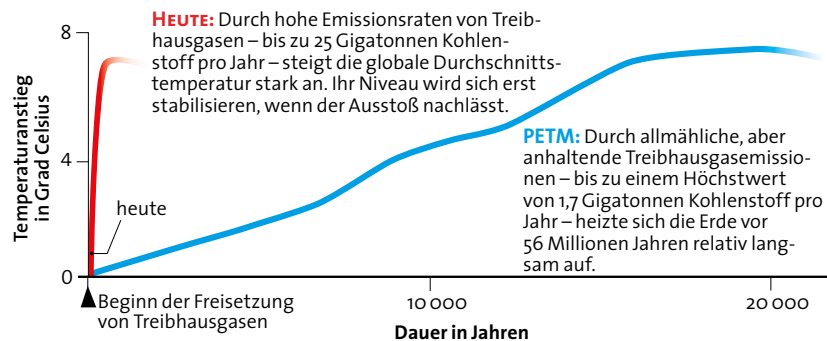
ben. Doch dann machten wir eine Entdeckung, die uns eine Menge Arbeit ersparte. Eine norwegische Bergbaufirma hatte vor Jahren Sedimentschichten durchbohrt, die auch das PETM umfassten. Einer ihrer Mitarbeiter, ein einheimischer Geologe, hatte die Gelegenheit genutzt und auf eigene Faust einen kilometerlangen Bohrkern eingelagert – nur für den hypothetischen Fall, dass ihn Wissenschaftler eines Tages gebrauchen könnten. Fein säuberlich in 1,5 Meter lange Zylinder zerschnitten, war der unverhoffte Schatz in einem großen Metallschuppen am Stadtrand in mehreren hundert flachen Holzkisten verstaut!

In jahrelanger Arbeit ermittelten wir dann die chemischen Signaturen der Proben. Spuren organischen Materials, das sich im Ton erhalten hatte, untersuchten wir auf die wechselnden Anteile der Kohlenstoffisotope und erfuhren auf diese Weise mehr über den Treibhausgasgehalt der Luft. Mehr als 200 Schichten aus dem Kern analysierten wir im Detail. So konnten wir verfolgen, wie das Verhältnis verschiedener Kohlenstoffisotope im Lauf der Zeit variierte. Erwartungsgemäß fanden sich die dramatischsten Veränderungen in jenen Schichten, die etwa 56 Millionen Jahre alt waren. Erstmals dokumentierten diese arktischen Proben die komplette Zeitspanne vom Beginn der Erwärmung über das PETM bis zur anschließenden Erholung.

Ying Cui, eine Doktorandin von mir an der Pennsylvania State University, simulierte die Klimaentwicklung schließlich mit einem ausgeklügelten Computermodell. Als Grundlage dienten die Erkenntnisse, die wir aus arktischen Kernen sowie aus Exemplaren aus dem Tiefseeboden gewonnen hatten. Sie gaben uns Aufschluss über die Variation der Verhältnisse von Kohlenstoffisotopen sowie über das Ausmaß der Herauslösung von Karbonaten aus Meeresbodensedimenten. Cui spielte verschiedene Szenarien durch. Denn manche Größen wie der relative Beitrag von Methanhydraten und Kohlendioxidquellen zum Gaseintrag in die Atmosphäre lassen sich nicht experimentell ermitteln. Cui berücksichtigte

Damals und heute

Wie schnell die Erde wärmer wird, hängt von der Geschwindigkeit ab, mit der sich Treibhausgase in der Atmosphäre anreichern. Computermodelle sagen eine Erwärmung um etwa acht Grad Celsius bis zum Jahr 2400 voraus, falls Menschen auch künftig im bisherigen Umfang fossile Energieträger verbrennen und keine neuen Kohlenstoffspeicher etwa in Form von Tropenwäldern oder unterirdischen Kavernen anlegen. Dadurch würden insgesamt rund 5000 Gigatonnen Kohlenstoff (C) in die Atmosphäre abgegeben – etwa dieselbe Menge, die vor 56 Millionen Jahren zum Paläozän/Eozän-Tem-



peraturmaximum (PETM) führte. Den Untersuchungen des Autors zufolge reicherten sich die Treibhausgase damals aber sehr viel langsamer an als heute.

JEN CHRISTIANSEN, ROTE KURVE NACH ARCHER ET AL., CLIMATIC CHANGE 90, 5, 283–297, 2008; PETM-KURVE NACH CUI, KUMPF ET AL., NATURE GEOSCIENCE 4, 5, 481–485, 2011

das, indem sie von plausiblen Werten ausging und diese variierte. Ein Programmlauf, der die komplette Geschichte des PETM erfasste, beanspruchte jeweils einen vollen Monat Rechenzeit. Mal stammte das Gas dabei vorwiegend von Methanhydraten, mal eher von CO₂-Quellen. Das Szenario, das die beste Übereinstimmung mit den Beobachtungsdaten lieferte, erforderte den Eintrag von 3000 bis 10 000 Gigatonnen Kohlenstoff in die Atmosphäre und in die Ozeane. Weil Vulkane oder Hydrate solche Mengen nicht hätten liefern können, müssen an den Ereignissen also auch tauender Permafrostboden sowie Schwelbrände in Torfschichten und Kohleflözen beteiligt gewesen sein.

Je schneller der Klimawandel, desto größer die Gefahr

Die errechneten Werte liegen am oberen Ende der Spanne früherer Abschätzungen, welche auf Isotopensignaturen aus anderen Bohrkernen und auf Computermodellen beruhen. Wichtiger war aber die überraschende Feststellung, dass der Gaseintrag über etwa 20 000 Jahre hinweg stattfand – zuvor waren Werte zwischen 1000 und 10 000 Jahren ermittelt worden. Demnach gelangten während des PETM maximal 1,7 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in die Atmosphäre; meist lag der tatsächliche Wert weit darunter. Heute hingegen pumpt die Menschheit jährlich 9 Gigatonnen des Treibhausgases in die Luft. Der Kohlendioxidgehalt steigt derzeit grob geschätzt zehnmals so schnell wie während des PETM!

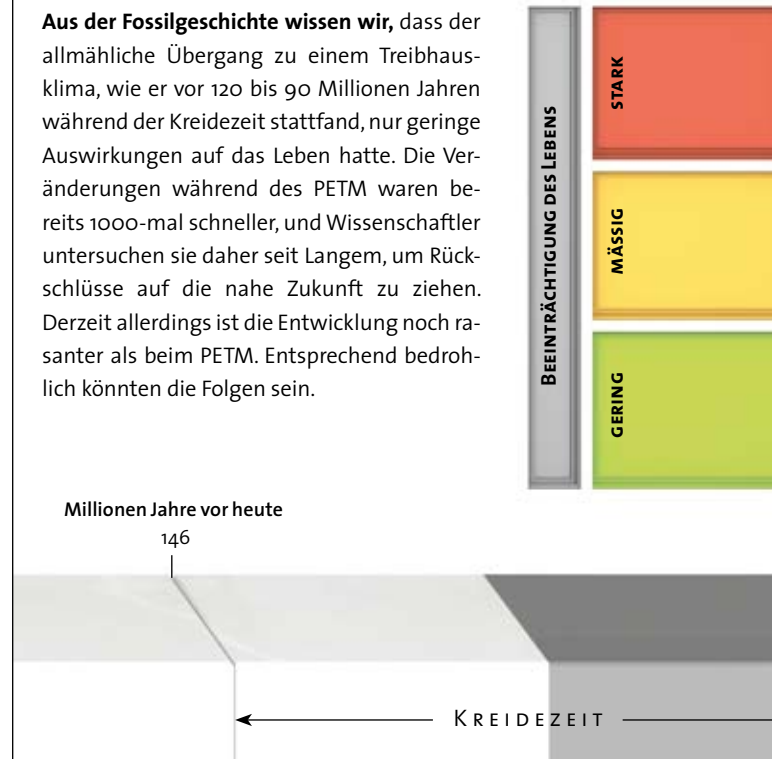
Dies ist ein folgenreicher Unterschied. Die Geschichte des Lebens belegt, dass das Schicksal von Organismen und Ökosystemen weit mehr von der Geschwindigkeit eines Klimawandels abhängt als von seinem Ausmaß. Das Leben verkräftet allmähliche Veränderungen besser als plötzliche. Ein Beispiel liefert die Kreidezeit, in der sich die Erde auf Grund eines überschießenden Treibhauseffekts ebenfalls enorm aufheizte. Insgesamt stieg die globale Durchschnittstemperatur ähnlich stark wie beim PETM. Doch weil dies im Verlauf von Jahrtausenden geschah, kam es zu keinem merklichen Artensterben. Die Erde und ihre Bewohner hatten genügend Zeit, sich anzupassen.

Das PETM betrachteten Forscher jahrelang als Paradebeispiel für das andere Extrem. Dieser schnellste je aufgetretene Klimawandel stellte selbst die düstersten heutigen Klimaprognosen in den Schatten. Daran gemessen erschienen seine Folgen aber nicht besonders dramatisch. Abgesehen von den Tiefseeforaminiferen überlebten anscheinend alle Tier- und Pflanzenarten die Hitzewelle. Viele Lebewesen retteten sich durch Wanderung in Richtung Pole. Vielfach durchliefen sie allerdings erhebliche Anpassungen. Insbesondere Säugtiere schrumpften – die Exemplare jener Zeit waren kleiner als ihre Vorfahren, aber auch kleiner als spätere Arten, die von ihnen abstammten. Evolutionsbiologisch betrachtet liegt der Grund dafür vermutlich darin, dass kleinere Körper Wärme besser abführen als große. Auch grabende Insekten und Würmer waren von der Schrumpfung betroffen.

Andere Organismen profitierten indes von vergrößerten Territorien. Der Dinoflagellat *Apectodinium*, eigentlich

Lektionen aus vergangenen Erwärmungsphasen

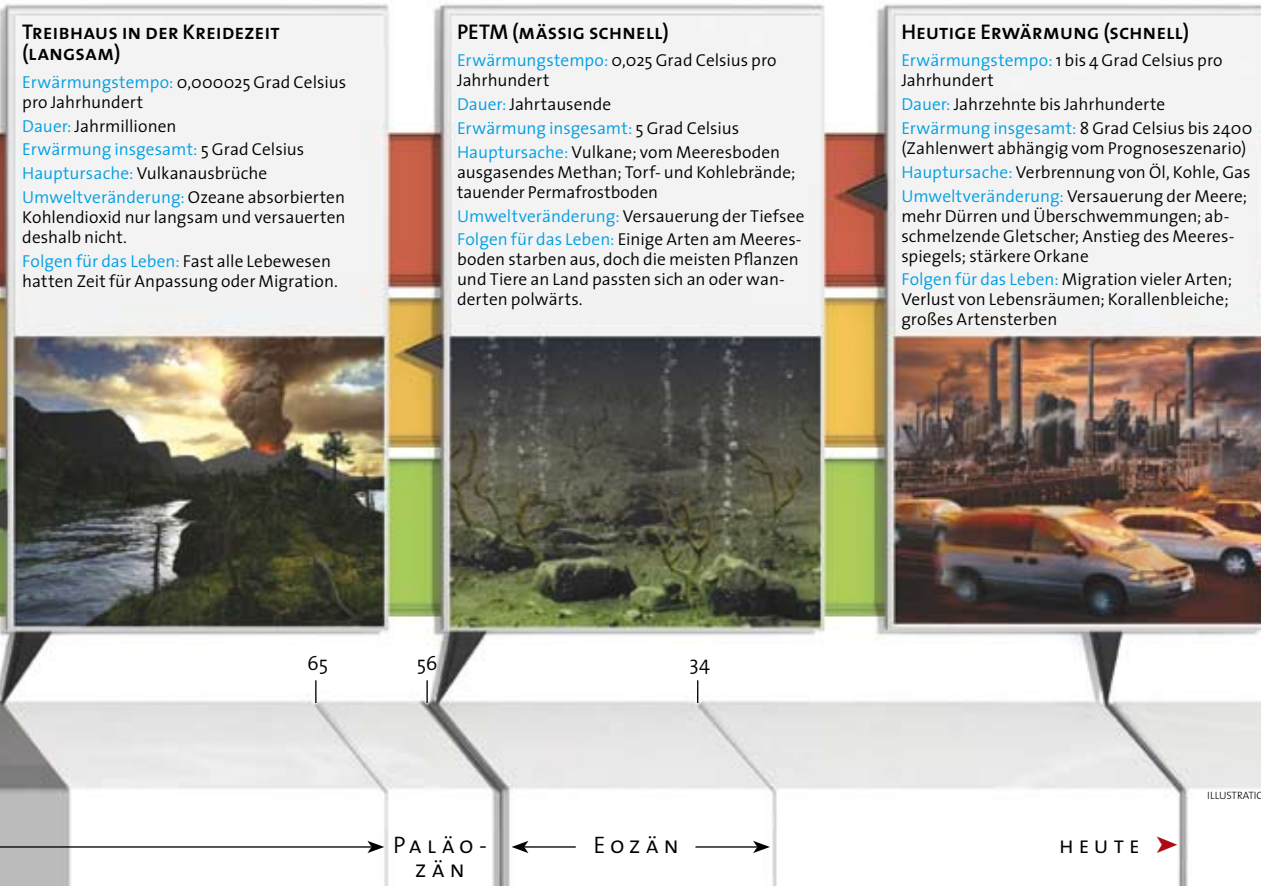
Aus der Fossilgeschichte wissen wir, dass der allmähliche Übergang zu einem Treibhausklima, wie er vor 120 bis 90 Millionen Jahren während der Kreidezeit stattfand, nur geringe Auswirkungen auf das Leben hatte. Die Veränderungen während des PETM waren bereits 1000-mal schneller, und Wissenschaftler untersuchen sie daher seit Langem, um Rückschlüsse auf die nahe Zukunft zu ziehen. Derzeit allerdings ist die Entwicklung noch rasanter als beim PETM. Entsprechend bedrohlich könnten die Folgen sein.



ein Bewohner subtropischer Ozeane, breitete sich bis ins Nordpolarmeer aus. Viele zuvor auf die Tropen beschränkte Landtiere wie Schildkröten und Huftiere drangen erstmals nach Nordamerika und Europa vor. Säugtiere erschlossen sich zahlreiche neue Lebensräume. Dabei entstanden auch die Primaten, aus denen schließlich der Mensch hervorging.

Manch einer weist angesichts unserer ungebremsten Verbrennung fossiler Energieträger darauf hin, dass die Folgen des PETM für die Tierwelt eher harmlos waren. Doch jetzt wissen wir: Im Vergleich mit damals ändert sich das Klima heute mit atemberaubender Geschwindigkeit. Binnen Jahrzehnten ist der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre um mehr als 30 Prozent angestiegen. Berücksichtigt man das weitere Bevölkerungswachstum und die zunehmende Industrialisierung der Entwicklungsländer, könnten, bis die fossilen Reserven aufgebraucht sind, die gegenwärtigen Kohlenstoffemissionen von 9 Gigatonnen auf 25 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr anwachsen.

Wissenschaftler und Politiker blicken häufig auf das mögliche Endergebnis der heutigen Entwicklung: Wie viel Eis wird schmelzen, und wie hoch wird der Meeresspiegel steigen? Wir müssen aber vor allem auch fragen: Wie schnell werden diese Veränderungen ablaufen? Werden die Erdbewohner Zeit haben, sich darauf einzustellen? Falls nicht, könnten die Folgen für das Leben und die Vielfalt an Tier- und Pflanzenarten verheerend sein.



Noch befinden wir uns im Anfangsstadium der Erwärmung, genaue Prognosen sind also schwierig. Wie der Weltklimarat in seinen jüngsten Berichten feststellt, leiden Ökosysteme aber bereits heute unter der Erwärmung. Vieles deutet auf eine Versauerung des oberflächennahen Meerwassers und entsprechende Belastungen für das Leben im Meer hin (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 82). Das Artensterben greift um sich. Schon haben sich mit den wandernden Klimazonen auch die Verbreitungsgebiete von Pflanzen und Tieren verschoben. In den neuen Lebensräumen gewinnen aber oft Schädlinge, Krankheiten und invasive Arten die Oberhand.

Anders als einst versperren zudem Straßen, Eisenbahntrassen, Dämme und Großstädte den Weg für Tiere und Pflanzen, die sonst in günstigere Klimazonen wandern könnten. Die Chancen der meisten größeren Tiere, in andere Regionen auszuweichen, sind angesichts ihrer stark geschrumpften Lebensräume ohnehin oft gleich null. Das ist noch nicht alles. Gletscher und Eisschilde schmelzen ab und lassen den Meeresspiegel ansteigen. Korallen leiden unter Hitzestress, immer häufiger sterben die winzigen Tiere auch daran. Dürren und Überschwemmungen nehmen zu. Wenn sich Niederschlagsmuster dauerhaft verschieben und Küstenlinien zurückweichen, weil der Meeresspiegel steigt, stehen auch Migrationsbewegungen von Menschen bisher nicht gekannten Ausmaßes bevor.

Die heutige globale Erwärmung schickt sich an, das PETM an Tempo weit zu übertreffen. Wollen wir die Katastrophe noch abwenden, müssen sich alle Staaten der Welt zu Sofortmaßnahmen durchringen. Noch gilt das Paläozän/Eozän-Temperaturmaximum als die letzte große globale Erwärmung. Sorgen wir dafür, dass es so bleibt. ☹

DER AUTOR



Lee R. Kump ist Professor für Geowissenschaften an der Pennsylvania State University in University Park und Koautor des Buchs »Dire Predictions: Understanding Global Warming«. Treibhausphasen in der Erdgeschichte sind sein Spezialgebiet.

QUELLEN

Cui, Y. et al.: Slow Release of Fossil Carbon during the Palaeocene-Eocene Thermal Maximum. In: Nature Geoscience 4, S. 481–485, 2011
McInerney, F.A., Wing, S.L.: The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: A Perturbation of Carbon Cycle, Climate and Biosphere with Implications for the Future. In: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 39, S. 489–516, Mai 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121040



Angriff auf das Stromnetz

Computerviren haben bereits gezielt industrielle Steuerungssysteme infiziert. Als Nächstes könnte das Stromnetz in das Fadenkreuz von Saboteuren geraten.

Von David M. Nicol

AUF EINEN BLICK

GEFÄHRDETE INFRASTRUKTUR

1 Das **Stuxnetvirus**, das bis Juni 2010 in gesicherte Anlagen zur Urananreicherung des Iran eindrang, hat deutlich gemacht: Ein von Experten für Industrieautomatisierung entwickeltes Virus kann in technischen Infrastrukturen erheblichen Schaden anrichten.

2 Unser Stromnetz besteht aus einer **Vielzahl von Netzen**, deren Komponenten von Computern oder speicherprogrammierbaren Steuerungen überwacht und geregelt werden – ein mögliches Angriffsziel für Hacker.

3 Weil ein ausgetüftelter Angriff Simulationen zufolge einen großen Teil des Stromnetzes lahmlegen könnte, werden die **Sicherheitsvorkehrungen** derzeit stark erhöht.

Eine Netzüberlastung sorgte dafür, dass Manhattan und weite Teile der USA im August 2003 stundenlang ohne Strom waren – ein Modellfall für Kriminelle und Terroristen.

Im vergangenen Sommer schlugen Experten Alarm: Ein Computervirus von bis dahin ungekannter Komplexität hatte einen Rechner im Iran infiziert – dabei gehörte der zu einer streng gesicherten industriellen Anlage und war überdies gar nicht mit dem Internet verbunden. »Stuxnet«, wie die Schadsoftware bald genannt wurde, war vermutlich über einen USB-Stick eingedrungen und hatte sich unbemerkt über Monate im gesamten System verbreitet – immer auf der Suche nach bestimmten programmierbaren Steuerungen (siehe den Beitrag S. 92), um die von diesen geregelten Prozesse zu manipulieren. In diesem Fall galt das Interesse vermutlich den Tausenden von Ultrazentrifugen, mit denen das für Atomkraftwerke, aber auch für Kernwaffen benötigte seltene Uranisotop ^{235}U aus Uranerz gewonnen wird. Normalerweise rotieren solche Zentrifugen so schnell, dass sich ihre Ränder knapp unter der Schallgeschwindigkeit bewegen. Einem Bericht des US Institute for Science and International Security vom Dezember 2010 zufolge sorgte Stuxnet aber dafür, dass sie auf Überschallgeschwindigkeit beschleunigten; gleichzeitig sandte es falsche Daten an Überwachungssysteme. So schalteten diese die Zentrifugen nicht ab, worauf deren Rotoren zerbrachen. Laut dem Bericht mussten in der Anreicherungsanlage in Natanz etwa 1000 Zentrifugen ersetzt werden.

Das Virus hat der Welt vor Augen geführt, dass industrielle Anlagen das Ziel von Hackern sein können – und wie wenig Sicherheitsexperten darauf vorbereitet sind. Tatsächlich verstehen viele unter »Cybersecurity« eher Maßnahmen, die das Eindringen von Hackern und Viren in Rechnernetze und Datenbanken typischer Büroumgebungen verhindern sollen. Besondere Sorge bereitet die Versorgungsinfrastruktur, von der moderne Staaten existenziell abhängig sind. Ohne den Teufel an die Wand malen zu wollen: Es ist sehr viel einfacher, ein Stromnetz lahmzulegen als eine Anlage zur Anreicherung von Kernbrennstoffen.

Ein Stromnetz besteht aus tausenden miteinander über Daten- und Steuerleitungen verknüpften Einheiten, die genau aufeinander abgestimmt arbeiten. Versagt eine Komponente, wirkt sich das im Allgemeinen nur auf einen Teil des Netzes aus. Ein gezielter Cyberangriff auf neuralgische Knotenpunkte könnte hingegen ein ganzes Land treffen. Historische »Blackouts« wie der am 14. August 2003, bei dem die Nordostküste der USA und Teile Kanadas ohne Strom waren, haben sehr deutlich gezeigt, dass das durchaus eine Option ist. Solch einen Schlag durchzuführen, würde zwar erhebliche Zeit und Kenntnisse erfordern, wie sie terroristische Gruppen wie El Kaida selbst nicht besitzen, doch diese könnten kriminelle Hacker anheuern. Stuxnet war bis dato das komplexeste Computervirus – mancher glaubt, Geheimdienstspezialisten hätten es entwickelt, um ein mutmaßliches iranisches Programm zur atomaren Aufrüstung zu torpedieren. Mittlerweile ist der Code im Internet frei zugänglich und könnte in modifizierter Form auf ein neues Ziel gerichtet werden.

Terroristische Gruppen könnten kriminelle Hacker anheuern

Der Zufall wollte es, dass etwa zur Zeit der Entdeckung von Stuxnet ein Experiment stattfand, das einen Cyberangriff auf das US-amerikanische Stromnetz simulierte. Vertreter von Stromversorgungsunternehmen und Regierungsbehörden sowie des Militärs nahmen daran teil – schließlich nutzen auch Militärbasen Strom aus dem allgemeinen Netz. In der Simulation drangen Hacker in die Elektronik mehrerer Umspannwerke ein. Ihr Angriffsziel waren spezielle Systeme, welche die Spannung in den Leitungen konstant halten. Diese stellten sich als Achillesferse heraus: Hätte die Attacke wirklich stattgefunden, wäre ein halbes Dutzend solcher Geräte zerstört worden – und ein ganzer Bundesstaat für mehrere Wochen ohne Elektrizität gewesen.

Elektronische Intelligenz steuert heutzutage sämtliche Abläufe im Energienetz, von den Generatoren der Kraftwerke über die verschiedenen Stufen der Stromverteilung (siehe Grafik S. 85) bis zu jenen Transformatoren, welche die Spannung auf das Niveau der zu den Häusern führenden Leitungen absenkt. Die meisten dieser Rechner verwenden gängige Betriebssysteme wie Windows oder Linux – obwohl sie spezialisiert und keine Universalcomputer wie handelsübliche PCs sind. Das macht sie angreifbar: Stuxnet schlüpfte durch Windows-Schwachstellen von einem USB-Stick auf den Rechner.

Aus diesem Grund sind Kommunikationsnetze, die Anlagen der Stromversorgung miteinander verknüpfen, nach Angaben der Unternehmen nicht mit dem Internet verbunden, sondern in sich geschlossene Systeme. Doch selbst wenn das strikt erfüllt ist – und es gibt durchaus Hinweise, dass dem nicht immer so ist –, bleiben genügend Möglichkeiten, sich Zugang zu verschaffen (siehe die Beiträge S. 88 und S. 90).

Zugang via Modem oder WLAN

Ein Angreifer könnte zum Beispiel ein Umspannwerk anvisieren. Dort befinden sich die elektronischen Schutzgeräte, die im Notfall Stromleitungen unterbrechen. In den USA sind diese Geräte mit Telefonmodems ausgerüstet, damit die Techniker sie von einem fernen Leitstand aus warten können. Es ist nicht schwer, die zugehörigen Nummern herauszubekommen. Schon vor 30 Jahren schrieben Hacker die ersten Programme, die alle Telefonnummern innerhalb eines Vermittlungsbereichs anwählen und registrieren, bei welchen ein Modem mit seinem unverkennbaren Signal antwortet. Ohne einen guten Passwortschutz könnte sich ein Angreifer Zugang verschaffen und die Schutzgeräte neu konfigurieren, so dass sie in einer Gefahrensituation nicht aktiv würden.

Auch die Verbreitung von WLANs – also Funknetzen kurzer Reichweite – zur internen Kommunikation und Steuerung in amerikanischen Umspannwerken bietet Terroristen Möglichkeiten. Zwar sollten Passwörter beziehungsweise Verschlüsselung einen Zugriff Unbefugter verhindern. Gelingt es aber, diese Sperre zu überwinden, stehen alle Optio-

Kleine Chronik des Cyberwar

Sobald industrielle Anlagen über Kommunikationsnetze verknüpft werden, wächst die Gefahr eines Cyberangriffs. Eine Trennung vom Internet bietet relative Sicherheit, ist aber vermutlich nicht immer gegeben, wie die bisherigen Erfahrungen zeigen.

APRIL 2000

Ein ehemaliger Angestellter eines Klärwerks in Queensland (Australien) nutzt gestohlene Funksysteme, um falsche Kommandos in das System einzuspeisen. Mehr als 900 000 Liter ungeklärter Abwässer gelangen in Parks und Flüsse.

JANUAR 2003

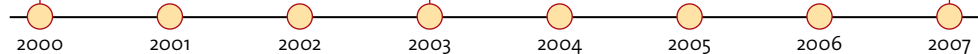
Der Computerwurm Slammer überwindet mehrere Firewalls und dringt in das Geschäftsnetzwerk des Kernkraftwerks Davis-Besse in Ohio ein. Schließlich erreicht er Computer, die den technischen Betrieb des Kraftwerks steuern, da beide Bereiche nicht ausreichend voneinander getrennt sind. Er bringt mehrere Sicherheitssysteme zum Absturz, richtet aber keinen weitergehenden Schaden an – der Reaktor ist zu diesem Zeitpunkt heruntergefahren.

März 2007

Im Idaho National Laboratory zerstört ein simulierter Cyberangriff einen Testgenerator.

JANUAR 2008

Ein hochrangiger CIA-Vertreter erklärt, dass Hacker schon häufig in die Computersysteme von Versorgungsunternehmen außerhalb der USA eingedrungen sind. Mindestens einmal sei es gelungen, die Stromversorgung ganzer Städte lahmzulegen.



IDAHO NATIONAL LABORATORY



nen zur Verfügung, die Hacker für das Internet bereits entwickelt haben. So ließe sich beispielsweise ein Man-in-the-Middle-Angriff ausführen, bei dem die Kommunikation zwischen zwei Geräten über den Computer des Hackers umgeleitet und dort von ihm manipuliert wird. Die fremde Maschine könnte sich zudem als Teil des Netzwerks ausgeben und ihrerseits falsche Befehle und Daten einspeisen. Auch ein Virus wäre auf diesem Weg leicht zu platzieren.

Und es gibt sie doch – die Schnittstelle zum Internet

Eine im Internet bei inzwischen gut 60 Prozent aller Angriffe eingesetzte Technik beruht auf Skripten genannten kurzen Programmen, die in andere Dateien eingebettet sind. PDF-Dokumente etwa enthalten dergleichen immer, beispielsweise um ihre Darstellung auf einem Bildschirm zu unterstützen. Ein Hacker könnte sich zunächst Zugang zu der Internetseite eines Softwareherstellers verschaffen und ein dort als PDF hinterlegtes Handbuch durch ein »infiziertes« ersetzen. Durch eine fingierte E-Mail dazu aufgefordert, lädt ein Kraftwerksingenieur es dann auf seinen Rechner. Wird das Skript beim Öffnen des Dokuments ausgeführt, würde es sich bei nächster Gelegenheit auf einem USB-Stick installieren und sich so weiterverbreiten.

Theoretisch könnten Hacker sogar via Internet in die gut geschützten, mit Planung und Finanzen befassten Geschäftsbereiche eindringen. Deren Aufgabe ist es unter anderem, auf Onlineauktionen die Strommengen auszuhandeln, die produziert werden sollen. Um fundierte Entscheidungen zu treffen, benötigen die Mitarbeiter Echtzeitinformationen vom technischen Bereich; umgekehrt brauchen auch die Techniker Vorgaben. Diese notwendige Verbindung macht das Unternehmen jedoch angreifbar: Ein Hacker könnte in das Geschäftsnetzwerk eindringen, dort Benutzernamen und

Passwörter ausspionieren und sich anschließend mit diesen Informationen Zugang zum technischen Bereich verschaffen – bis zu den Steuerungssystemen.

Was dann geschehen kann, demonstrierte 2007 das Department of Homeland Security unter dem Kodennamen »Aurora« im Idaho National Laboratory, einer mit dem US-Energieministerium verbundenen Forschungseinrichtung. Ein Wissenschaftler hackte sich in ein Netzwerk, das mit einem Stromgenerator verbunden war, wie es Tausende davon im Land gibt. So genannte Schutzgeräte – tatsächlich recht anspruchsvolle elektronische Schaltungen – sollen Überlastungen des Stromnetzes verhindern. Indem der Angreifer diesem in rascher Folge An-/Aus-Befehle schickte, gelang es ihm, den Generator aus dem Takt zu bringen: Der ins Netz eingespeiste Wechselstrom war dadurch zu dem bereits im Netz vorhandenen phasenverschoben. Eine Videoaufnahme zeigte, dass die schwere Maschine zitterte; Sekunden später füllten Dampf und Rauch den Raum.

Schutzgeräte verrichten auch in Umspannwerken ihren Dienst. Diese Einrichtungen empfangen den Strom aus den Kraftwerken, synchronisieren die Wechselströme, reduzieren die Spannung und verteilen den Strom auf die vielen Leitungen zur lokalen Versorgung. Dabei überwachen Schutzgeräte jedes einzelne Kabel, um die Verbindung bei einer Störung sofort zu trennen. Der Strom fließt dann durch die übrigen Leitungen. Läuft das Netz aber bereits an der Kapazitätsgrenze, kann ein Cyberangriff, der zum Ausfall einiger Leitungen führt, eine Überlastung der anderen zur Folge haben. Genau das geschah im August 2003 in den USA (siehe Bild S. 82), aber auch im November 2006 in Europa: Weil der Energieversorger E.ON eine Hochspannungsleitung in Norddeutschland zu einem Zeitpunkt abschaltete, als Windräder große Mengen Strom ins Netz speisten, wurde eine Übergabestelle zum RWE-Netz überfordert. Schutzgeräte schalteten

APRIL 2009

Das »Wall Street Journal« berichtet, Cyberspione aus China, Russland und anderen Staaten seien in das Stromnetz der USA eingedrungen und hätten dort Schadprogramme installiert, um gegebenenfalls den Betrieb zu stören.



DDP IMAGES / AP PHOTO / WAHID SALEMI

JUNI 2010

Das Stuxnetvirus attackiert industrielle Steuerungssysteme der Firma Siemens. Hauptangriffsziel sind dabei vermutlich Ultrazentrifugen, die im Rahmen des iranischen Atomprogramms zur Anreicherung von spaltbarem Uran verwendet werden.

AUGUST 2011

Auf der Black-Hat-Konferenz spüren Sicherheitsexperten über Google die Steueroberflächen eines britischen Transformators und einer Pumpanlage auf, die kaum geschützt mit dem Internet verbunden sind.

2008

2009

2010

2011

die Leitungen ab. Der Effekt pflanzte sich im europäischen Verbundnetz bis nach Spanien fort, und bis zu zehn Millionen Haushalte waren ohne Strom.

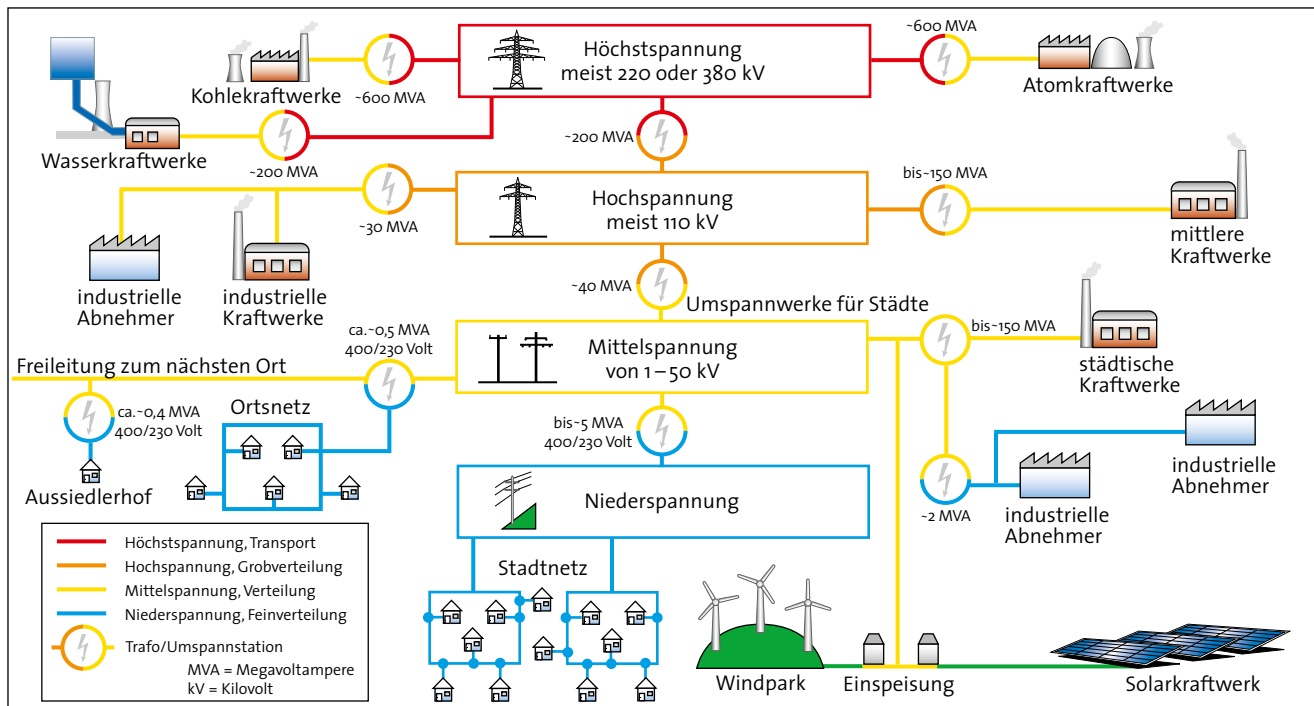
Statt eine Leitung abzuschalten, um andere zu belasten, könnte ein Angreifer auch einen Generator dazu bringen, zu viel Energie zu erzeugen. Zusätzlich könnte ein Virus manipulierte Spannungs- und Temperaturwerte an die zuständige Leitwarte senden, so dass die Techniker in Unkenntnis der Probleme bleiben. Letzteres ließe sich zudem mit einer Denial-of-Service-Attacke erreichen: Mit Hilfe eines so genannten Botnetzes, eines Netzwerks aus tausenden PCs, die ohne Wissen ihrer Besitzer von Hackern kontrolliert werden, wür-

de die Leitwarte mit einer derartigen Masse von Anfragen überflutet, dass auch der Informationsfluss zu dem eigentlichen Angriffsziel, dem Umspannwerk, zum Erliegen käme. Laut einer Studie der Pennsylvania State University und des National Renewable Energies Laboratory würde schon der Ausfall von 200 gut ausgewählten Umspannwerken – das entspricht etwa zwei Prozent – 60 Prozent der Strominfrastruktur in den USA zum Erliegen bringen.

Vertrauen ist gut, prüfen ist besser

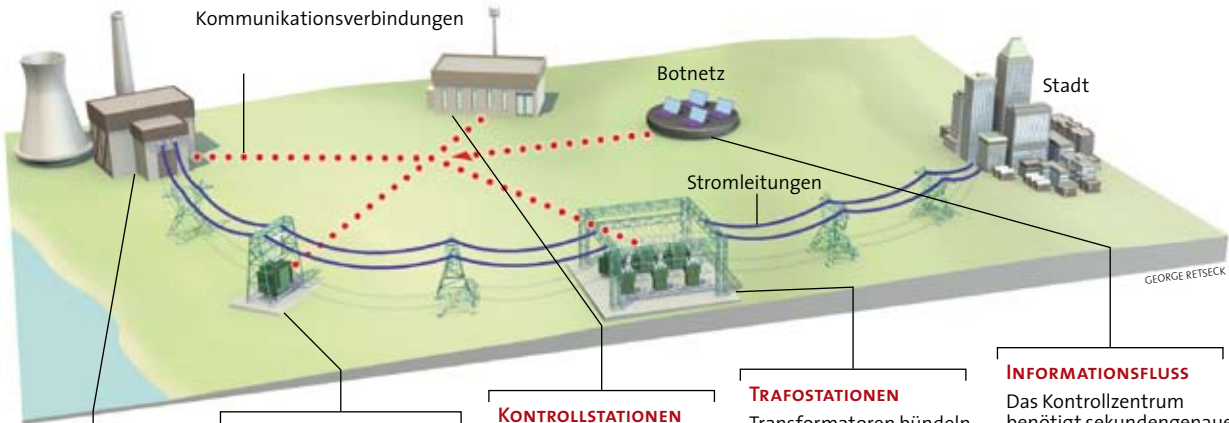
Angesichts solcher Bedrohungen hat die North American Electric Reliability Corporation (NERC), eine Dachorganisation der Netzbetreiber in den USA, eine Reihe von Standards herausgegeben, um kritische Infrastrukturen besser zu schützen. Umspannwerke müssen jetzt ihre wichtigen Anlagen bei der NERC registrieren, Inspektoren überprüfen dann deren Schutzmaßnahmen. Technische Einzelheiten werden aber meist nur stichprobenartig genauer erhoben. Das betrifft auch das wichtigste Verteidigungselement: die Firewall, die alle elektronischen Nachrichten überwacht, passieren lässt oder abblockt. Ein Gutachter überprüft daher unter anderem, ob alle Firewalls eines Umspannwerks korrekt konfiguriert sind. Typischerweise wählt er dazu einige wichtige Systemkomponenten aus und sucht nach Schlupflöchern, wie diese trotz der Firewall zu erreichen wären. Unser Team an der University of Illinois in Urbana-Champaign hat zu diesem Zweck das Network Access Policy Tool ent-

Um Verluste in den Leitungen gering zu halten, wird elektrische Energie mit hoher Spannung über weite Strecken transportiert und dann in mehreren Stufen durch Umspannwerke auf das jeweils benötigte Niveau herabgesetzt.



Hintertüren ins Netz

Die Energiemengen, welche die Gesellschaft benötigt, und jene, die von den Kraftwerken produziert werden, müssen stets ausbalanciert sein. Dutzende Anlagen wirken zusammen, um den Stromfluss über Hunderte von Kilometern zu gewährleisten, die Wechselströme abzugleichen und dafür zu sorgen, dass keine der Komponenten überlastet wird. Jeder dieser Komponenten könnte durch einen Cyberangriff Schaden nehmen.



GENERATORSTATIONEN

Egal ob aus Kohle, Uran oder Solarzellen erzeugt – der ins Stromnetz eingespeiste Wechselstrom muss mit einer bestimmten Frequenz ins Netz fließen. Steuert ein Angreifer einen Generator so an, dass er außer Takt gerät, kann das die Maschine zerstören.

UMSPANNWERKE

Die Elektrizität verlässt die Generatorstation mit einer sehr hohen Spannung, um Übertragungsverluste gering zu halten. In Umspannwerken wird sie abgesenkt. Ältere Anlagen in den USA lassen sich oft noch per Telefonmodem warten. Hacker könnten sich einwählen, das Passwort knacken und Einstellungen ändern.

KONTROLLSTATIONEN

Sie überwachen permanent den Zustand des Stromnetzes und setzen gegebenenfalls zusätzliche Kapazitäten ein, um eine aktuell hohe Nachfrage zu decken. Zwar sind die Kontrollstationen nicht mit dem Internet verbunden, der mit Planung und Verkauf befasste Geschäftsbereich aber sehr wohl – eine Schwachstelle.

TRAFOSTATIONEN

Transformatoren bündeln die Elektrizität aus verschiedenen Anlagen und speisen sie in Leitungen, die Gebäude und Straßenzüge mit Strom versorgen, ein. In den USA werden diese Stationen meist über Funksignale oder per WLAN gesteuert. Wer diese Verbindungen anzapft, kann eigene Befehle senden.

INFORMATIONSFLOSS

Das Kontrollzentrum benötigt sekundengenaue Informationen zu jedem Schritt des Prozesses. Hacker könnten diese Nachrichten verzögern, um ihren Angriff zu verschleiern. Eine Verbindung zum Internet vorausgesetzt, ließen sich mit einem »Botnetz« aus tausenden gehackten Computern so viele Anfragen senden, dass das Kontrollzentrum blockiert wäre (Denial-of-Service-Angriff).

wickelt; eine frei verfügbare Software, die anhand der Konfigurationsdateien automatisch noch unbekannte oder längst wieder vergessene Wege durch den Abwehrschirm ermittelt.

Das Department of Energy (DoE) verlangt, die Sicherheit der Stromnetze bis spätestens 2020 zu verbessern. Insbesondere soll jeder Angriffsversuch sofort erkannt werden – Stuxnet wäre blockiert worden, als es sich vom USB-Stick aus im System installierte. Aber wie lässt sich ein vertrauenswürdige Programm von anderen unterscheiden?

Viele Experten sehen so genannte Hash-Funktionen als Lösung an. Diese bilden aus einer großen Zahl eine viel kleinere. Beispielsweise besteht der Code der auf den Prozessrechnern laufenden Programme aus Millionen Nullen und Einsen. Daraus ergäbe sich eine Signatur, die allein schon wegen der Größe der Software kaum identisch mit der eines zweiten Programms sein dürfte. Was immer danach begehrt, auf einem Rechner gestartet zu werden, müsste zunächst den Test durchlaufen. Das Ergebnis der Hash-Funktion würde mit einer Liste aller legitimen Signaturen verglichen. Falls keine Übereinstimmung auftaucht, wäre der Angriff beendet, bevor er richtig anfangen konnte. ~

DER AUTOR



David M. Nicol ist Direktor des Information Trust Institute und Professor am Department of Electrical and Computer Engineering der University of Illinois in Urbana-Champaign. Er war Berater für das US Department of Homeland Security und das US Department of Energy.

QUELLEN

- Eisenhauer, J. et al.:** Roadmap to Secure Control Systems in the Energy Sector. Energetics Incorporated, Januar 2006. www.energetics.com/resourcecenter/products/roadmaps/samples/pages/secure-roadmap.aspx
- Geer, D.:** Security of Critical Control Systems Sparks Concern. In: IEEE Computer 39, S. 20–23, Januar 2006
- Nicol, D. M. et al.:** Usable Global Network Access Policy for Process Control Systems. In: IEEE Security & Privacy 7, S. 30–36, November/Dezember 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121041

»Ganzheitliche« Hackerabwehr

Wenn die Anlagen der Energiewirtschaft mit immer mehr Computerintelligenz ausgestattet werden, müssen die Betreiber sie stärker miteinander vernetzen. Das aber bietet Hackern neue Angriffspunkte.

Von Maik G. Seewald

Keine Frage: Um eine verlässliche Energieversorgung auf lange Sicht zu ermöglichen, muss die Stromverteilung noch stärker automatisiert, ihre Kraftwerke und Verbraucher sowie Schalt- und Umspannanlagen noch besser aufeinander abgestimmt werden, als es heute schon der Fall ist. Die gesamte Zahl der zu steuernden Geräte dürfte bereits in die Millionen gehen. Künftig werden es noch weit mehr sein, wenn beispielsweise Elektroautos nicht nur als Endverbraucher, sondern auch als Energiezwischenspeicher fungieren. Das erfordert »intelligere« Steuersysteme als bislang – daher die Bezeichnung »Smart Grids« für solche Netze.

Damit vollzieht sich ein Paradigmenwechsel: von isolierten Systemen hin zu hochgradig über Kommunikationsnetze verbundenen Installationen. Diese Entwicklung birgt aber auch Risiken. Gelingt es Hackern, an einem Endpunkt in das Netz einzudringen, können sie Informationen stehlen oder das Stromnetz manipulieren – mit gravierenden Folgen (siehe Beitrag S. 82). Es bedarf deshalb einer stabilen und erweiterbaren Plattform, um die Kommunikationswege sicher zu machen, zumal sich die Infrastruktur der europäischen Stromversorgung aus Teilen zusammensetzt, die verschiedenen Organisationen gehören. Und diese unterscheiden sich auch hinsichtlich der Handhabung in puncto Sicherheit. Erst dann, wenn ein Angriff auf Grund von Sicherheitslücken Verluste zur Folge hatte, lässt sich eine Rechnung aufstellen.

Gerade im ländlichen Raum liegen die Stationen oft weit auseinander und werden deshalb unbemannt betrieben. Gelingt es einem Angreifer etwa, in ein Umspannwerk einzubrechen, kann er mit entsprechenden Kenntnissen und Werkzeugen in die Systeme von Schalt- und Steuergeräten eindringen. Gerade Anlagenkomponenten, die komplexe Aufgaben erfüllen, gilt es in dieser Hinsicht besonders abzusichern. Beispielsweise müssen Schutzgeräte Bereiche des Stromnetzes bei Überspannung abschalten, wofür sie unab-

lässig Sensordaten auswerten und sich gegebenenfalls mit anderen Schutzrelais abstimmen müssen. Sicherheitsfunktionen dürfen diese hochkomplexen Funktionalitäten nicht stören oder gar unterbrechen.

Anlagen und Geräte basieren zudem oft auf Standardkomponenten. Das Gleiche gilt für Betriebssysteme und Anwendungsprogramme der Steuer- und Kommunikationsrechner. Nicht anders als in der Computerwelt von Windows oder Apple gibt es Sicherheitslücken, die im Rahmen von Updates mit so genannten Patches so schnell wie möglich geschlossen werden sollten. Das ist im Bereich der Versorgungsinfrastruktur aber mitunter gar nicht möglich, da Anlagen dazu abgeschaltet und wieder hochgefahren werden müssten. Hier hilft oft nur – teure – Redundanz: Allenfalls wenn Komponenten doppelt vorhanden sind oder andere ihre Funktionalität übernehmen können, lässt sich ein Patchmanagement in Echtzeit bewerkstelligen.

Nicht benötigte Module entfernen

All diesen Herausforderungen trägt nur ein »ganzheitlicher« Ansatz Rechnung. So müssen Programmierer und Ingenieure bei der Entwicklung neuer Komponenten Sicherheitsanforderungen von Beginn an mitdenken – und zwar für den gesamten Lebenszyklus des jeweiligen Produkts. Eine Grundregel lautet: Jede Funktion eines Softwarepakets könnte Hackern eine Angriffsfläche bieten, deshalb sollten nicht benötigte Module in bereits implementierten Programmen abgeschaltet beziehungsweise wieder entfernt werden. Bei der Konzeptionierung neuer Versionen gilt von vornherein: Weniger ist mehr!

Ganzheitliches Vorgehen bedeutet auch, dass das Personal, das mit Management, Betrieb und Wartung betraut ist, geschult wird. So ergab eine Umfrage des Sicherheitsunternehmens McAfee unter Managern von Energie- und Wasserversorgern aus 14 Ländern, dass bei 40 Prozent der Betriebe



Ein umfassendes Sicherheitskonzept beinhaltet unter anderem Zugangskontrollen durch Videokameras. Die Geräte erhalten neuerdings eigene Adressen im internen Kommunikationsnetz, um Datenströme besser zu bündeln.

das Stuxnetvirus entdeckt worden war (siehe die Beiträge S. 82 und S. 92). In den meisten Fällen dürfte die Infektion von einem USB-Stick oder einem anderen Datenträger ausgegangen sein, den ein Mitarbeiter in den geschützten Bereich brachte. Gerade solche »Social Engineering«-Angriffe, also Angriffe, welche auf die Unwissenheit oder Fahrlässigkeit des Personals setzen, bergen ein hohes Risiko – selbst der Anruf eines angeblichen Administrators, der nach einem Passwort fragt, hat erstaunlich oft Erfolg.

Experten sind sich einig, dass als technische Grundlage einer umfassenden Sicherheitsarchitektur der als Internetprotokoll (IP) bekannte Kommunikationsstandard fungieren sollte. In der Version 6 (IPv6) setzt man ihn verstärkt in Rechnernetzen wie dem Internet ein, in dem Daten zu Paketen gebündelt und verschickt werden.

IPv6 ermöglicht durchgängige Lösungen über alle Bereiche hinweg. Es bietet auch ausreichend Adressen, um die künftig in die Millionen gehende Zahl von Endgeräten, beispielsweise elektronische Stromzähler, anzusprechen. Damit lassen sich bewährte Sicherheitsprozesse integrieren: etwa das Monitoring, also die Überwachung der Endpunkte selbst, oder das Schlüsselmanagement – die Grundlage von Verschlüsselung, Authentifizierung und Datenintegrität. Deshalb sind IP-basierte Netzwerke mittlerweile in vielen Bereichen zu finden, in denen strikte Anforderungen an die Sicherheit gelten, zum Beispiel im Finanzsektor, beim Militär oder in der Industrieautomatisierung. Davon profitieren dann auch die Energieversorger. Selbst die Videoüberwachung von Eingängen sowie Zugangskontrollen lassen sich einfacher und kostengünstiger mit IP-basierten Systemen umsetzen.

Doch selbst bei optimaler Vorbeugung lassen sich komplexe Systeme nicht hundertprozentig schützen. Deshalb kommt es zudem darauf an, auf Attacken schnell und effektiv reagieren zu können. Beispielsweise muss es möglich sein, Teile des Kommunikationsnetzes abschalten und um-

gehen zu können. Auch hier bieten IP-Netzwerke Optionen, da sie von vornherein die Möglichkeit von Fehlern und Hindernissen beim Datenversand einkalkulieren. Zonenbasierte Architekturen sind bereits ein fester Bestandteil von Sicherheitskonzepten in der Energiewirtschaft. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Zonen lassen sich dabei gut überwachen und über Zugriffsregeln reglementieren. Sicherheitsfunktionalitäten wie Netzwerküberwachung und Zugriffskontrolle müssen nicht unbedingt in vollem Umfang in den Geräten des elektrischen Netzes implementiert werden. Diese Aufgaben können das Netzwerk und die dafür vorgesehenen Geräte (etwa Router und/oder Switches) übernehmen.

Das Gleiche gilt für ganz neue Anwendungsfälle wie die Virtualisierung von Komponenten. Vor allem diese Technologie wird eine sichere Integration von Geräten ermöglichen, die schon seit Jahren fester Bestandteil der Infrastruktur sind und keine oder nur geringe Sicherheitsmechanismen enthalten. Insgesamt bietet die auf offenen Standards beruhende IP-Protokollsuite eine stabile Plattform für eine umfassende Sicherheit der IT-Infrastruktur des Stromnetzes auf der Grundlage einer Ende-zu-Ende-Architektur. Natürlich gilt auch hier: Sicherheit ist ein ständiger Prozess, kein fertiges Produkt. ∞

DER AUTOR



Der Diplomingenieur **Maik G. Seewald** ist Manager und Sicherheitsexperte im Bereich Forschung und Entwicklung bei Cisco Systems.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121047

Angriffsziel Stromzähler

Elektrische Energie wird künftig an vielen Orten erzeugt, gespeichert und verbraucht. Dazu muss das Stromnetz feinmaschiger und »intelligenter« werden.

Von André Suhr

Der Griff zum Lichtschalter, das Einschalten des Herds, eines Computers – wir sehen es als selbstverständlich an, dass elektrischer Strom jederzeit verfügbar ist. Allenfalls die aktuelle Diskussion um seine Erzeugung, die nach der Reaktorkatastrophe von Fukushima in Deutschland auf eine neue Grundlage gestellt werden soll, bringt diese Gewissheit ins Wanken. Tatsächlich zählen die Energieversorgungsanlagen zu den wichtigsten und zugleich kritischsten Elementen der Infrastruktur von Staaten. Damit alle Komponenten, auch die der Verteilung, stets verlässlich funktionieren, setzte man in der Vergangenheit vor allem auf Lösungen aus der Elektrotechnik: So sorgen beispielsweise hoch entwickelte Schutzschalter in Umspannwerken im Verein mit dem Überwachungspersonal der Leitstationen für einen reibungslosen Ablauf. Strom erzeugende Generatoren werden hochgefahren oder abgeschaltet, Energie in Netzbereiche eingespeist, wenn der Bedarf da ist,

und Umwege gesucht, wenn Leitungen bereits bis an die Grenze ihrer Aufnahmekapazität Strom führen.

Im Zuge der Automatisierung setzen die Firmen nun zunehmend Computerintelligenz und speicherprogrammierbare Steuerungen ein: logische Schaltkreise, die nur zur Steuerung bestimmter Geräte und Prozesse dienen. Prozessdaten wie Schaltzustände, Spannungs- oder Temperaturwerte reisen nicht mehr über Drahtverbindungen direkt zwischen Messfühler und Logikeinheit, sondern über Kommunikationsnetze. Das Gleiche gilt für Schaltbefehle etwa einer Netzleitstelle. Beschränkte sich die Automatisierung vor einigen Jahren noch auf Kraftwerke und die zur Übertragung über große Entfernungen genutzten Hoch- und Höchstspannungsanlagen, statet man inzwischen auch Anlagen der so genannten Verteilnetze (Mittel- und Niederspannungsnetz) damit aus. Dank wachsender Stromerzeugung durch regenerative Energieträger kommen bald Smart Grids auf – also engmaschige, mit Rechnerintelligenz ausgestattete Netze, die je nach Verfügbarkeit von Wind oder Sonne und je nach lokalem Bedarf Strom anfordern, speichern oder verteilen.

Im Zuge dieser Entwicklung wächst der Datenaustausch und – nicht anders als in anderen Wirtschaftsbereichen – die Bedeutung der *cyber security*, also der Sicherheit in den Kommunikationsnetzen. Neben Bedrohungsszenarien mit terroristischem Hintergrund (siehe die Beiträge ab S. 82 und S. 92) kommt durch die Smart Grids auch die Computerkriminalität ins Spiel. So gehören »intelligente« Stromzähler zu ihren Basiskomponenten, doch die von diesen erfassten Verbrauchsdaten wie die gespeicherten Tarife könnten manipuliert werden, etwa um die Abrechnung eines Elektroautos zu Ungunsten des Stromlieferanten zu reduzieren. Ein Hacker wäre ohne entsprechende Vorkehrungen auch in der Lage, einer automatischen Ladestation, die leere Batterien gegen volle austauscht, einen billigen Nachbau unterzuschieben. Eine weitere Gefahr betrifft weniger die Betreiber, sondern





Batteriebetriebene Elektroautos können nicht nur helfen, die Kohlendioxidemissionen zu verringern – sie sollen auch als Energiewischenspeicher dienen. Dazu werden sie über intelligente Stromzähler in Smart Grids eingebunden.

vor allem die Verbraucher: Persönliche Daten wie etwa Bankverbindungen ließen sich ausspähen.

Um solche Gefahren abzuwehren, identifizieren Experten anhand des System- und Anlagendesigns sicherheitsrelevante Elemente und mögliche Zugänge, konstruieren Bedrohungsszenarien und planen entsprechende Gegenmaßnahmen. Im Umfeld der Energieversorgung betreten solche Fachleute allerdings oft Neuland. Beispielsweise hat die Korrektheit der Prozessdaten hier eine weit größere Bedeutung als in anderen Bereichen der Industrie: Eine falsche Information darüber, ob eine Leitung Spannung führt oder nicht, kann letztlich nicht nur Maschinen zerstören, sondern auch Menschen gefährden.

Schutz durch Dezentralisierung

Deshalb gilt es, einem Angreifer den Zugang unmöglich zu machen. Aus diesem Grund sollten die Kommunikationsnetzwerke keine Schnittstellen zum Internet aufweisen. Um einen Angriff via Mitarbeiter zu vermeiden, muss vertrauliches Wissen wie Passwörter und Zutrittskodes auf jenen Personenkreis beschränkt sein, der es auch tatsächlich für seine Arbeit benötigt. Idealerweise lässt sich dies durch personalisierte Zugangssysteme etwa mit elektronischen Schlüsselkarten realisieren. Auch jeder Benutzer eines Computersystems hat dann sein eigenes Benutzerkonto mit tätigkeitsbezogenen Zugangsrechten.

Außerdem machen sich Entwickler die dezentrale Struktur der Smart Grids zu Nutze und unterteilen das Stromnetz in Subnetze. Jedes davon verfügt über eine eigene Firewall, eigene Passwörter und Verschlüsselungskodes. Zugriffsrechte schränken die Kommunikation zwischen den Maschen ein – eine Systemkomponente, die zu ihrer Funktion keinen Datenaustausch mit einer bestimmten anderen benötigt, darf ihr auch keine Informationen senden. So lässt sich der von einem erfolgreichen Angriff verursachte Schaden minimie-

ren: Ist ein Hacker beispielsweise in den intelligenten Stromzähler eines Elektrofahrzeugs eingedrungen, sieht er sich rasch mit immer neuen Hürden konfrontiert, kann also nicht von dort aus direkt weiter in das Kommunikationsnetz des Betreibers vordringen.

Der Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft veröffentlichte 2008 einen Sicherheitsleitfaden sowohl für Betreiber als auch für Zulieferer. Deutsche und österreichische Vertreter der zuständigen Fachverbände erarbeiten dazu Ausführungshinweise. Dieses Dokument präzisiert die im Leitfaden dargestellten Anforderungen an das Systemdesign und enthält Vorschläge zur praktischen Umsetzung. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik entwickelt derzeit eine Architektur für intelligente Stromzähler, die auch den Schutz persönlicher Daten beinhaltet. Darüber hinaus ist die Sicherheit der Verbraucherdaten ein Thema der von der Europäischen Kommission eingesetzten Arbeitsgruppe zur europaweiten Implementierung von Smart Grids. Das Bundesinnenministerium rief schließlich in diesem Jahr ein Nationales Cyber-Abwehrzentrum ins Leben, das Maßnahmen bei Angriffen auf die Infrastruktur unseres Landes koordinieren soll. ~

DER AUTOR



Der Informatiker **André Suhr** ist Produktmanager und Sicherheitsexperte im Bereich Energieautomatisierung der Siemens AG.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121048

Stuxnet – Erstschlag im Cyberkrieg?

Seit im Juni 2010 ein Computervirus weltweit hektische Aktivität auslöste, fürchten IT-Sicherheitsexperten: Der lange befürchtete »Cyberwar« hat begonnen – oder steht uns unmittelbar bevor.

Von Sharon Weinberger

Weil ein Rechner unablässig bootete, vermutete ein iranisches Unternehmen im Juni 2010 einen Virusbefall und informierte seine russischen Vertragspartner von VirusBlokAda.

Via Internet überprüften dessen Spezialisten das betroffene System und sahen die Befürchtung rasch bestätigt. Was sie aber veranlasste, weltweiten Alarm auszulösen, war die schiefe Größe des dahin unbekanntes Programms: Die zunächst als TmpHider bezeichnete Schadsoftware umfasste ungefähr 15 000 Programmzeilen. Üblich sind hingegen um die 100 oder auch weniger. Schätzungen zufolge steckten in diesem Virus gut 10 000 Stunden Entwicklungszeit.

Wenig später bemühten sich verschiedene Unternehmen in enger Zusammenarbeit um eine Klärung der Bedrohung. So kooperierte der russische Hersteller von Sicherheitssoftware Kaspersky Lab in Moskau mit dem amerikanischen Konzern Microsoft, weil TmpHider dessen Windows-Betriebssystem befiel. Nach einer im Code verborgenen Datei taufte die Softwareentwickler aus Redmont das Virus in Stuxnet um. Streng genommen handelt es sich um einen Wurm, also um einen Typ von Schadsoftware, der auch eigenständig

funktioniert, ohne ein anderes Programm infizieren zu müssen. Allerdings hat sich inzwischen »Virus« als allgemeine Bezeichnung für sich selbst replizierende Schadsoftware durchgesetzt.

Besonders intensiv befassten sich die Fachleute von Symantec, der weltgrößten Firma für Computersicherheit mit Sitz in Mountain View (Kalifornien), mit dem Neuling. Das Unternehmen verfügt über eine Art Hochsicherheitslabor für solche »Erreger«. An der Eingangstür warnt ein Zeichen, dass Computer, USB-Speichergeräte und Smartphones draußen bleiben müssen: Jedes elektronische Gerät, das in das Labor gelangt, muss dort bleiben. Das Team schleuste Stuxnet in ein simuliertes Netzwerk ein, um ihn in einer sicheren Umgebung zu beobachten.

Der Wurm verwendete offenbar zwei gestohlene digitale Authentifizierungszertifikate, um sich zu tarnen. Außerdem nutzte er vier verschiedene, den Experten von Symantec bis dahin noch gar nicht bekannte Sicherheitslücken in Windows.

Doch damit nicht genug. »Sehr schnell fanden wir heraus, dass etwas sehr Ungewöhnliches geschah«, erinnert sich Liam O Murchu, einer der Chefs von Symantec. Insbesondere versuchte Stuxnet, mit so genannten speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) in Kontakt zu treten, also mit elektronischen Geräten, die Industrieanlagen überwachen. Dabei war der Angreifer sehr wählerisch und wurde erst dann aktiv, wenn außer dem Betriebssystem Windows auch die Prozesssteuerungssoftware Siemens Step7 implementiert war.

Im Unterschied zu üblicher Schadsoftware, die allein in Computern und Netzwerken Unheil anrichtet, griff Stuxnet also offenbar nach der Welt der Maschinen und demonstrierte, dass lebenswichtige Infrastruktur, die unsere Gesellschaft mit Wasser und Energie versorgt, angreifbar ist. Mikko Hyp-

AUF EINEN BLICK

DAS DESIGNERVIRUS

- 1 Das im Juni 2010 im Iran entdeckte **Virus Stuxnet** war weit komplexer als alle zuvor bekannten **Schadprogramme**.
- 2 In speziellen Testlaboren zeigte sich, dass dieses Virus von Experten entwickelt worden war, um **industrielle Produktionsprozesse zu sabotieren**.
- 3 Da Stuxnet sich auch auf einem USB-Stick installieren kann, **benötigt** er zur Infektion **keinen Internetzugang**.



Die großteils unterirdische Uranaufbereitungsanlage im iranischen Natanz ist der Internationalen Atomenergiebehörde seit 2002 bekannt. Sie steht im Verdacht, Teil eines Kernwaffenprogramms zu sein.

ponen, Forschungsleiter bei F-Secure, einer Antivirus-Firma in Helsinki, befürchtet: »Die Ära des Wettrüstens im Cyberspace hat wahrscheinlich gerade begonnen.«

Und noch etwas machte Stuxnet zu etwas Besonderem: Viele industrielle Steuerungssysteme sind zum Schutz vor Hackern erst gar nicht mit dem Internet verbunden, doch der Wurm gelangte vermutlich über einen USB-Speicherstick in das Netzwerk des iranischen Unternehmens.

Freie Bahn für Stuxnet – doch nur in der Simulation

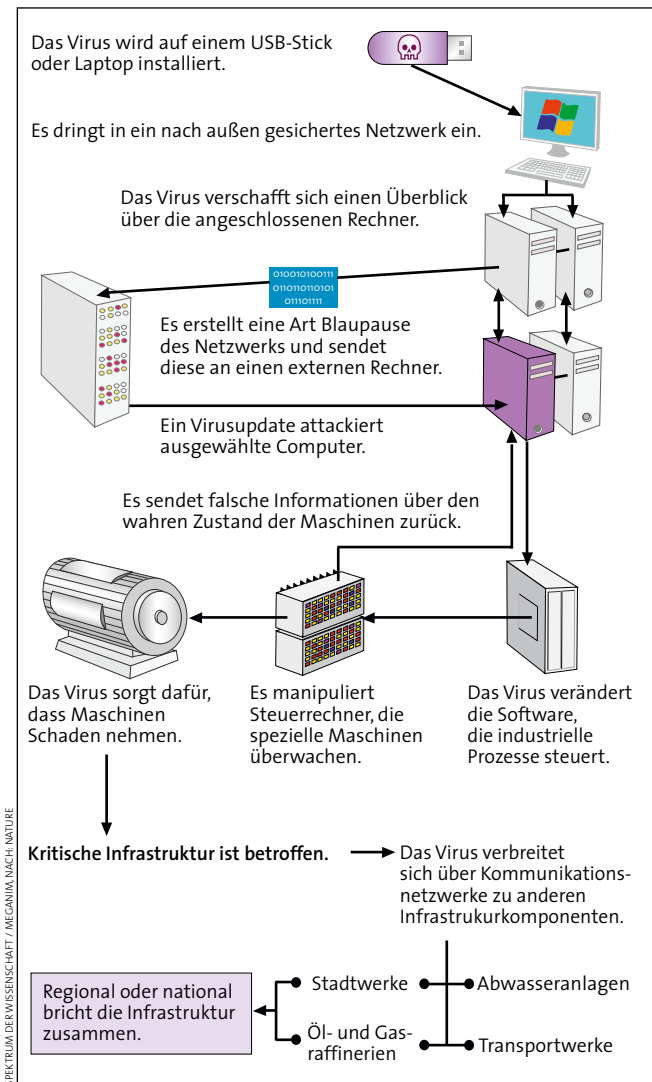
Noch immer war zu diesem Zeitpunkt nicht klar, was das Virus mit der Siemens-Software anstellen wollte. Dann bemerkte das Symantec-Team, dass es Informationen über die befallenen Wirtsrechner sammelte und an Server in Malaysia und Dänemark zu senden versuchte (siehe Grafik S. 94). Die Forscher überzeugten deren Betreiber, die Adressaten vom Netz abzuhängen und die an sie gerichteten Nachrichten zu Symantec umzuleiten. Ergebnis: Etwa 60 Prozent der infizierten Computer standen im Iran. Nachträglich ließ sich rekonstruieren, dass dort seit 2009 wohl schon mehrere Infektionswellen stattgefunden hatten. Das legte den Verdacht nahe, das Virus sei bewusst gegen das Land eingesetzt worden. Doch von wem und zu welchem Zweck?

Allein kamen die Symantec-Forscher nicht weiter, dafür hatten sie zu wenig Erfahrung mit industriellen Steuerungssystemen. Und ihr Netzwerk bot Stuxnet offenkundig nicht die Bedingungen, die es brauchte, um sich zu entfalten. Ralph Langner, Berater für die Sicherheit von Steuerungssystemen in Hamburg, übernahm es mit seinem Team, das Virus in einer simulierten Industrieumgebung walten zu lassen. Mitte September 2010 verkündete Langner in seinem Blog, Stuxnet könnte eine gegen den Iran gerichtete Waffe sein. Das wahr-

scheinlichste Ziel, glaubte er, sei das Kernkraftwerk Bushehr. In den folgenden Monaten verdichteten sich dann Hinweise darauf, der Angriff habe tatsächlich dem Iran gegolten – aber nicht Bushehr, sondern der Urananreicherungsanlage in Natanz (siehe Bilder oben). Dort trennen tausende Gaszentrifugen das seltene spaltbare Uranisotop ^{235}U vom schwereren ^{238}U , offiziell zur Brennstoffgewinnung für Kernkraftwerke. Es gibt allerdings auch Befürchtungen, die Zentrifugen dienten der Herstellung von Kernwaffen. Langner und andere meinen, die Schadsoftware sollte die Drehzahl der Geräte so ändern, dass sie sich zerstören.

Diese Interpretation wird durch Berichte der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) in Wien gestützt, denen zufolge 2009 die Zahl iranischer Zentrifugen drastisch abnahm. Doch die bulgarische Physikerin Ivanka Barszashka, die sich mit diesen Geräten befasste, mahnt: »Wir wissen nicht, was mit den Maschinen los war. Vielleicht standen sie auch einfach nur still.« Die iranische Regierung jedenfalls hat dementiert, dass Stuxnet diese Wirkung gehabt habe, und gestand lediglich dessen weite Verbreitung im Land ein. Ohnehin zeigen Berichte einer IAEO-Inspektion Ende 2010, dass der fragliche Cyberangriff allenfalls einen zeitweisen Rückschlag bedeutet hätte: Irans Anreicherungs-kapazität ist größer als je zuvor.

Allerdings nährte die Theorie über das Angriffsziel Spekulationen über den Angreifer. Stuxnet ist ein derart ausgetüftelter Wurm, dass die meisten Forscher einen Geheimdienst als Urheber vermuten. Es wäre nicht das erste Mal gewesen, dass Regierungen versuchten, ausländische Nuklearprogramme zu sabotieren, erklärte Olli Heinonen, früher stellvertretender Direktor der IAEO. In den 1980er und 1990er Jahren etwa versuchten westliche Spione, defekte Nuklear-technologie in jenes Liefernetzwerk einzuspeisen, über das



sich der Iran und Nordkorea versorgten. »Stuxnet ist nur ein anderer Weg, dasselbe zu erreichen.«

Ob die von Bloggern verdächtigten USA oder Israel hinter dem Virus stecken, wird man vermutlich nie erfahren. Indizien aus dem Verhalten des amerikanischen Department of Homeland Security herauszulesen – deren Computerspezialisten hätten angeblich zu zögerlich auf den Wurm reagiert –, ist Spekulation.

Die aktive Erforschung von Stuxnet seitens Symantec wurde im Februar 2011 eingestellt, Microsoft hatte da schon längst die Sicherheitslücken gestopft und alle Antivirusprodukte waren entsprechend aufgerüstet. Neue Infektionen sind jetzt selten geworden – obwohl sie noch auftreten und es Jahre dauern wird, bevor alle Rechner mit Siemens-SPS sauber sind.

Doch Stuxnet hat ein Muster aufgezeigt, aus dem künftige Angreifer lernen und das sie eventuell verbessern können. Wer immer den Wurm entwickelt hat, öffnete damit vielleicht die Büchse der Pandora. Das Problem ist, dass Experten für Cybersicherheit industrielle Steuerungssysteme nicht verstehen. »Es sind tatsächlich zwei sehr verschiedene Welten, die traditionell nicht allzu viel miteinander kommunizieren«,

Experten für Schadsoftware und für Industriesteuerungen mussten eng zusammenarbeiten, bis die Vorgehensweise des Stuxnetvirus vollständig klar war. Sein Ziel waren offenbar Rechner, die Produktionsprozesse regeln.

kommentiert Eric Byres, Mitbegründer und Cheftechnologe bei Tofino Industrial Security in Lantzville (Kanada). Diese Trennung reiche bis in die Informatikfakultäten der Hochschulen, wo man Sicherheit für industrielle Steuerungssysteme als eher technisches Problem ansehe und nicht als etwas, was wissenschaftliche Aufmerksamkeit lohne. Falls sich aber Akademiker mit Cybersicherheit befassen wollen, legt man ihnen Steine in den Weg: »Wer gefährliche biologische Wirkstoffe untersucht, gibt diese normalerweise nicht weiter; dasselbe gilt für Schadsoftware«, meint Anup Ghosh, Chefwissenschaftler am Center for Secure Information Systems an der George Mason University in Fairfax (Virginia). »Um auf diesem Gebiet voranzukommen, benötigen Forscher aber Zugang zu solchen Datensätzen.«

Riskante Geheimniskrämerei

Im vergangenen Jahr publizierte JASON, eine unabhängige Forschergruppe, die die US-Regierung berät, eine Studie zur Cybersicherheit. Die vielleicht wichtigste Schlussfolgerung lautet: Das gesamte Gebiet ist unterentwickelt, nicht zuletzt weil die Ergebnisse von Experimenten viel zu wenig weiterverbreitet werden.

Doch inzwischen scheinen Regierungen das Thema ernst zu nehmen. Einige der Universitäten und Hochschulen Chinas etwa haben Berichten zufolge enge Beziehungen zum Militär geknüpft, um auf dem Gebiet der Cybersicherheit zusammenzuarbeiten. Auch Israel scheint seine Expertise auf dem Gebiet der Informatik für die nationale Sicherheit einzusetzen. Schon einige Monate vor der Entdeckung von Stuxnet warnte Yuval Elovici, Direktor der Deutsche Telekom Laboratories@Ben-Gurion University in Beersheba (Israel), die nächste Welle von Cyberangriffen würde sich gegen die technische Infrastruktur eines Landes richten. »Ich denke, es könnte schlimmer werden als der Abwurf mehrerer Atombomben auf wichtige Städte.«

DIE AUTORIN



Sharon Weinberger ist Stipendiatin der Alicia Patterson Foundation, einer Förderinstitution für kritischen Journalismus in Washington D. C.

© Nature Publishing Group
www.nature.com
 Nature 472, S. 303–304, 21. April 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1121043



Lewis Smith

Warum die Gepardin fremdgeht

Erstaunliche neue Erkenntnisse
der Wissenschaft

Aus dem Englischen

von Andreas und Manuela Held.

Jacoby & Stuart, Berlin 2010. 240 S., € 24,95

BIOLOGIE

Unglaubliches aus der Tier- und Pflanzenwelt

Lewis Smith berichtet von promiskuitiven Raubkatzen, Elefanten, die Rot sehen, und Dattelpalmen aus der Zeitkapsel.

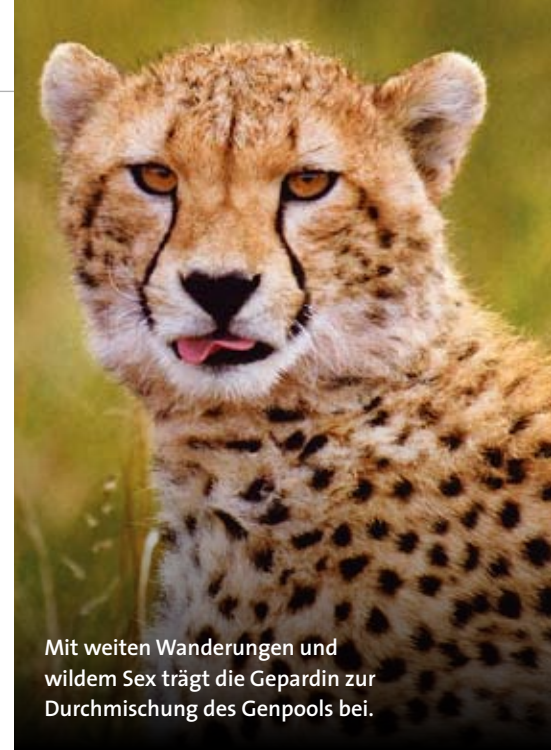
Die Gepardin gilt als die treuloseste aller Großkatzen. Sie paart sich nicht nur mit einem, sondern gleich mit zwei bis fünf verschiedenen Partnern. Dafür nimmt sie weite Wege und große Risiken in Kauf: Während die Herren ihr Revier von durchschnittlich 36 Quadratkilometern nicht zu verlassen pflegen, durchstreift sie mehr als die zwanzigfache Fläche, um ihre Männer aufzusuchen. Das erfordert nicht nur eine erhebliche sportliche Leistung, sondern birgt auch Gefahren durch Begegnungen mit Löwen und Hyänen oder Infektionen mit Geschlechtskrankheiten oder Parasiten.

Dennoch führt ihr Weg zum Erfolg und trägt letztlich zur Erhaltung der schwindenden Art bei. Wissenschaftler haben bei einer Studie im Serengeti-Nationalpark in Tansania festgestellt, dass bei 43 Prozent von 47 untersuchten Würfen mindestens zwei verschiedene Erzeuger beteiligt waren. In einem Fall hatte sogar jedes von fünf Jungtieren einer Gepardenmutter einen anderen Vater. Das ist günstig für den Nachwuchs, denn der ansonsten verbreitete Brauch, die mitgebrachten Kinder der Partnerin zu töten, macht für den Gepardenmann keinen Sinn: Es könnte ja das eigene Baby sein. Gleichzeitig sorgt die Vielmännerei für eine intensive Durchmischung des Genpools und trägt so zur Arterhaltung bei.

Aber man lasse sich durch den Titel (der im englischen Original »Why the Cheetah Cheats« noch ein schönes Wortspiel enthält) nicht irreführen: Es geht in diesem Buch nicht nur um Sex. Der britische Wissenschaftsjournalist und Buchautor Lewis Smith erzählt auch Wissenswertes über urtümliche Lebensformen, über vom Aussterben bedrohte, wieder aufgetauchte und sogar neu entdeckte Arten, über den Artenschutz und über Verhaltens- und Klimaforschung.

Herausgekommen ist ein bunter Bilderbogen mit faszinierenden Kurzgeschichten aus der Welt der Biologie, illustriert mit prachtvollen Naturfotografien. Jede einzelne Story – kaum eine ist mehr als zwei Seiten lang – ist in sich abgeschlossen und bietet so ein wunderbares Lesehäppchen für zwischendurch. Am besten schlägt man das Buch an einer beliebigen Stelle auf und gibt sich dem Genuss der naturwissenschaftlichen Schmankerln hin.

Eine Kostprobe: Eigentlich sind Elefanten farbenblind; aber sie reagieren auf rote Kleidung ängstlicher als auf weiße. Der Grund liegt in ihren Erfahrungen mit den Menschen. Massakrierer, die traditionell ihre Speere auf die Dickhäuter schleudern, bevorzugen Rot als Kleidungsfarbe, während die Ackerbauern vom Kamba-Stamm, die mit Elefantenjagd nichts am Hut haben,



Mit weiten Wanderungen und wildem Sex trägt die Gepardin zur Durchmischung des Genpools bei.

sich in weiße Textilien hüllen. Offensichtlich haben die Tiere gelernt, zwischen den beiden Bevölkerungsgruppen und der von ihnen ausgehenden Gefahr zu unterscheiden – und zwar nicht nur anhand ihres ausgeprägten Geruchssinns, sondern auch mit Hilfe von Farben, obgleich sie diese nur als wenig ausgeprägte Schattierungen erkennen können.

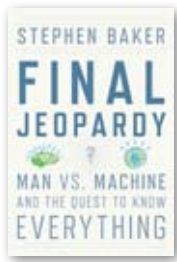
Nicht weniger spannend ist die Geschichte einer ausgestorbenen Dattelpalmenart, die Forscher wieder zum Leben erweckten, indem sie 2000 Jahre alte Samen aus einer Ausgrabungsstätte am Toten Meer zum Keimen brachten. Oder der Bericht über ein Forschungsprojekt, bei dem ferngesteuerte Modellhubschrauber Proben aus der Atemwolke von Walen sammeln, um Informationen über deren Gesundheitszustand zu erhalten.

Wussten Sie, dass nicht nur die Haushunde von Wölfen abstammen, sondern vermutlich die wilden Wölfe Kanadas vom Erbgut des besten Menschenfreundes profitieren? Und dass die Furcht erregenden Säbelzahn tiger zwar keine Kuscheltiere, aber dennoch soziale Wesen waren?

Schmökern und staunen Sie selbst!

Stefanie Reinberger

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.



Stephen Baker
Final Jeopardy
Man vs. Machine
and the Quest to Know Everything
Houghton Mifflin Harcourt, Boston 2011.
269 S., \$ 24,-

INFORMATIK

Der allwissende Watson

Hat der Computer wieder einen Sieg über den Menschen errungen? Irgendwie schon, aber nicht so richtig.

Ein Computer besiegt menschliche Gegner in einer Quizshow! Die Schlagzeile ging Mitte Februar dieses Jahres durch die Medien. Die Maschine hieß Watson, was man sowohl auf den stets wohlinformierten Assistenten von Sherlock Holmes als auch auf den Gründer der Herstellerfirma IBM, Thomas J. Watson, beziehen darf. Manche gingen sogar so weit, den Erfolg auf eine Stufe mit dem Sieg des IBM-Produkts »Deep Blue« im Schachspiel 1997 über den damaligen Weltmeister Garri Kasparow zu stellen.

Neben den Konstrukteuren von Watson hat auch sein Beschreiber einen Geschwindigkeitsrekord erzielt: Nur wenige Tage nach dem entscheidenden Spiel war bereits das vorliegende Buch auf dem Markt. Es war ja auch eine Sensation mit Ansage – IBM einerseits und der Veranstalter Sony Entertainment andererseits hatten das große Ereignis jahrelang vorbereitet. Der Technikjournalist Stephen Baker war von Anfang an dabei, hatte Gelegenheit, mit allen Beteiligten zu sprechen, und musste nur noch wenige Seiten zum Wettkampf nachtragen, bevor das ganze Werk in den Druck ging.

Baker beschreibt denn auch ausgiebig, was er vorab in Erfahrung bringen konnte, zum Beispiel die Personen des Dramas, allen voran David Ferrucci, den Chef des IBM-Projekts. Die Verhandlungen zwischen den ungleichen Partnern sind zäh: IBM will vor allem einen mit dem Schachturnier vergleichbaren Publicity-Erfolg einfahren, wofür Watson eine atemberaubende Leistung liefern muss. Sony dagegen will seinen Fernsehzuschauern eine ungewöhnliche, spannende Show liefern, und dafür darf Watson nicht so gut sein, dass seine menschlichen Gegner keine Chance gegen ihn haben.

Zum Spiel selbst kann Baker sich relativ kurz fassen. »Jeopardy!« (vom Veranstalter stets mit Ausrufezeichen geschrieben) gehört in den USA zur Allgemeinbildung. Im Jahr 1964 erstmals ausgestrahlt, findet die Quizshow täglich neun Millionen Zuschauer. (Eine deutsche Version namens »Gefahr!« wurde von 1990 bis 2000 gesendet.) Eine im Verborgenen arbeitende Redaktion denkt sich die Aufgaben aus; um sie zu lösen, braucht man eine breite Allgemeinbildung. Jede richtige Antwort erhöht das Guthaben des Kandidaten, das dieser ganz oder teilweise für die nächste Aufgabe wieder aufs Spiel setzt. Im Verlauf der Show werden die Aufgaben schwieriger und die Prämien für die richtige Lösung höher.

Aber damit sind die Gemeinsamkeiten mit »Wer wird Millionär?« be-

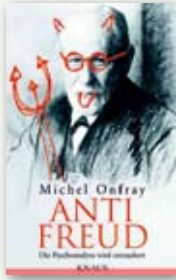
reits erschöpft. Bei Jeopardy treten mehrere Kandidaten gegeneinander an; wer zuerst die Lösung einer Aufgabe gefunden zu haben glaubt, drückt einen Knopf (den *buzzer*) und hat damit das Recht auf den ersten Versuch. Den Kandidaten wird nicht eine Frage, sondern eine Antwort vorgelegt, und sie sollen die zugehörige Frage finden. Die Antworten (*clues*) sind häufig kryptisch formuliert, so dass sich der Kandidat auch noch entscheiden muss, ob er diese oder jene Wendung wörtlich oder als eine Anspielung nimmt. Obendrein kommen taktische Elemente ins Spiel: Kandidaten dürfen entscheiden, welchen Anteil ihres Kapitals sie für den nächsten Spielzug einsetzen wollen, und an gewissen Stellen das Themengebiet der nächsten Aufgabe wählen.

Für einen Softwareentwickler ist das eine völlig neuartige Herausforderung. Gilt es doch, den Sinn eines natürlichsprachigen Satzes zu erfassen und dann mit Hilfe von sehr viel Weltwissen zu erschließen, welche Frage zu diesem *clue* passt. Watson musste also irgendwie die Regeln der englischen Sprache beherrschen. Und die in ein formales System zu fassen? Dagegen ist dieselbe Aufgabe für die Regeln des Schachspiels ein Kinderpiel.

Weltwissen in eine für einen Computer nutzbare Form zu bringen ist schon etwas vom Schwersten (Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 94). An dieser Stelle hat Baker nicht viel zu berichten, aus einem einfachen Grund: Watson hat keine Datenbank für Weltwissen, und mit der grammatischen Analyse von Sätzen ist es bei ihm erst recht nicht weit her. Watson arbeitet vielmehr nach dem Google-Prinzip: Lies eine unglaubliche Menge an Texten. Wenn in diesem Korpus zwei Wörter ungewöhnlich häufig gemeinschaftlich vorkommen, werden sie wohl etwas miteinander zu tun haben. Solcherart etablierte Beziehungen zwischen jeweils zwei Wörtern kann die Software zu den größten Assoziationsnetzen zusammenknüpfen. So wie Google aus der schieren Verknüpfungsstruktur des World Wide Web und ohne Rückgriff

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



Michel Onfray

Anti Freud. Die Psychoanalyse wird entzaubert

Aus dem Französischen von Stephanie Singh. Knaus, München 2011. 544 S., € 24,99

Michel Onfray ist Philosoph – und zwar einer von der streitbaren Sorte. In dieser »Psychobiografie« argumentiert er, Freud habe der Nachwelt zwei große Märchen hinterlassen – das der pseudowissenschaftlichen Heilssaga namens Psychoanalyse und die Legende seiner selbst. Der Wiener Seelenkundler erscheint als ehebrecherischer, geltungssüchtiger Scharlatan. Onfray reiht sich ein in die Tradition des Psychoanalyse-Bashing und schlägt dabei immer wieder lustvoll unter die Gürtellinie. Seit 2005 das »Livre noir de la psychanalyse«, das »Schwarzbuch der Psychoanalyse«, erschien, tobt unter Frankreichs Intellektuellen ein erbitterter Kampf darum, was von der Psychoanalyse zu halten sei. Hier zu Lande dagegen wirkt die Empörung reichlich antiquiert. Weniger Aufgeregtheit und mehr Fakten hätten dem Buch gutgetan.

STEVE AYAN



Günter Aumann

Geometrie! Mit Farben statt Formeln auf den Spuren Euklids

Primus, Darmstadt 2011. 152 S., € 29,90

Formeln schrecken ab – das ist wohl so. Kann man denn Mathematik ohne Formeln treiben? Allerdings; es gibt sogar ein leuchtendes Vorbild: die »Elemente« des Euklid (um 300 v. Chr.). Noch heute kann man die Geometrie der Ebene nach jenem Klassiker lernen, und er ist in der Tat formelfrei – aber deswegen nicht unbedingt leicht verdaulich. Die axiomatische Methode – alle Sätze werden streng logisch aus einer sehr geringen Zahl von »Axiomen« hergeleitet – fordert ihren Preis. Günter Aumann, Professor für Geometrie und Computergeometrie in Karlsruhe, rückt keinen Zentimeter von diesem Prinzip ab, unterwirft ihm sogar Begriffe, für die Euklid noch versehentlich und gegen seine Absicht auf die Anschauung zurückgegriffen hatte. Dafür erleichtert er dem Leser die Mühe mit modernen Mitteln: viele Bilder mit vielen Farben, die zumindest einen Teil von Euklids zahlreichen Bezeichnungen erübrigen. Ein ungewohnter Blick auf ein vertrautes Thema.

CHRISTOPH PÖPPE



Alan Walker und Pat Shipman

Turkana-Junge. Auf der Suche nach dem ersten Menschen

Aus dem Englischen von Franz Dürnbach. Galila, Etsdorf am Kamp 2011. 364 S., € 23,90

Wie in den letzten gut 120 Jahren die frühe Evolution der Menschen ans Tageslicht kam, ist eine aufregende Geschichte. Das Forscherehepaar Walker/Shipman war daran beteiligt und weiß allerlei zu erzählen, von bahnbrechenden Momenten der Feld- und Laborarbeit mit Fossilien bis hin zu sehr Persönlichem von prominenten Anthropologenkollegen. Im Zentrum des Buchs steht der Turkana-Junge: das sensationell vollständige Skelett eines etwa achtjährigen *Homo erectus*, der vor fast 1,8 Millionen Jahren in Ostafrika lebte. Aus jahrelangen akribischen Analysen dieser Knochen ziehen die Autoren die spitzfindigsten Schlüsse – zum Beispiel, dass dieses große Kind mit seinem recht kleinen Gehirn wohl eher noch ein tumbes Tier mit einem Menschenkörper war. Einigen langatmigen biologischen Ausführungen zum Trotz liest sich dieser Band spannend.

ADELHEID STAHNKE



Eckart Roloff

Göttliche Geistesblitze. Pfarrer und Priester als Erfinder und Entdecker

Wiley-VCH, Weinheim 2010. 357 S., € 24,90

Zu den wertvollsten Erbstücken der kirchlichen Tradition zählen die Entdeckung und die Vollendung der Bierbraukunst. Aber das sind längst nicht alle. Der Publizist Eckart Roloff erzählt von Prominenten wie dem »Gesundheitsapostel« Sebastian Kneipp (1821–1897) und dem »Erbsenzähler« Gregor Mendel (1822–1884) ebenso wie von dem Geistlichen Christian Schäffer (1718–1790), der neue Rohstoffe zur Papierherstellung entdeckte und eine handbetriebene Waschmaschine erfand, oder von August Musger (1868–1929), der die technischen Voraussetzungen für das Filmen in Zeitlupe schuf. Wissenschaftliche Erklärungen sucht man vergebens; Roloff lädt die Leser aber am Ende jedes Kapitels zur »eigenen Spurensuche« ein, mit Literaturempfehlungen und Reisetipps zu Lebens- und Wirkungsstätten seiner Helden. Wer die etwas langatmigen ersten vier Kapitel durchhält, wird mit spannenden Anekdoten aus Wissenschaft und Kirche belohnt.

JANINA FISCHER

auf irgendwelche Bedeutungen einen Relevanzwert (den *page rank*) für jede Webseite berechnet, weist Watson jeder Verknüpfung in seinem Netz einen Glaubwürdigkeitswert zu. Und wenn viele glaubwürdige Wege von A nach B führen, ist vielleicht B die Antwort auf die Frage A – oder eben die Frage zu Antwort A, wenn es um Jeopardy geht.

Dieses Grundprinzip lässt sich auf verschiedene Weisen ausbauen und verfeinern. Entsprechend viele Suchalgorithmen laufen parallel ab und liefern ihre Vermutungen mitsamt Glaubwürdigkeitswerten. Aus ihnen wählt ein Bewertungsprogramm die plausibelste aus und drückt den Knopf – wenn es eine hinreichend plausible gibt.

In dem entscheidenden Wettkampf erringt Watson einen klaren Sieg gegen die beiden größten Jeopardy-Meister Ken Jennings und Brad Rutter. Aber der übliche Spruch, der Computer habe mal wieder den Menschen auf seinem ureigensten Gebiet, dem Denken, ge-

schlagen, will diesmal nicht passen. Watson macht es eben so völlig anders als ein Mensch.

Das wird nirgends so deutlich wie bei seinen Fehlern. Während der Testphase ist ein deutsches *four-letter word* aus der Kategorie »Just say no« zu finden, und Watson antwortet aus unerfindlichen Gründen mit der Frage »What is Fuck?« (»What is ›nein‹?« wäre richtig gewesen.) Da bauen die Softwareentwickler hastig eine Sperre gegen gewisse Wörter ein – nicht auszudenken, was dem amerikanischen Publikum im Gedächtnis geblieben wäre, wenn Watson so etwas auf offener Bühne geäußert hätte. Und das Aussprachemodul für fremdsprachliche Wörter bessern sie auch ganz schnell nach; es soll gesittet klingen, wenn Watson den Namen des niederländischen Flugzeugkonstruktors Anton Fokker aussprechen muss.

Bei einer anderen Gelegenheit gibt ein Mensch eine falsche Antwort. Da-

raufhin kommt Watson an die Reihe – und gibt dieselbe falsche Antwort! Er kann ja nicht hören.

Das Schicksal von Watson nach seinem Sieg ist der jüngeren Akademikergeneration nicht ungeläufig: nach glanzvoll bestandener Prüfung ab in die Arbeitslosigkeit. Für das Bündel von Fähigkeiten, auf das Watson programmiert ist, gibt es keine kommerzielle Verwendung. Selbst für Teile daraus muss eine solche erst noch gefunden werden. Man stelle sich nur vor, am anderen Ende der Telefonleitung sitzt eine Maschine, die von nichts eine Ahnung hat, aber nach Watsons Algorithmen aus den Äußerungen des Kunden zu erschließen versucht, was dieser will. Wenn wir Pech haben, ist das noch um Klassen schlimmer als das Callcenter der Deutschen Telekom.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



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

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

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

▶ Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis

▶ Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus



Gottfried Schatz

Feuersucher

Die Jagd nach dem Geheimnis

der Lebensenergie

Wiley-VCH, Weinheim

und NZZ Libro, Zürich 2011. 229 S., € 24,90

MOLEKULARBIOLOGIE

Die Energie der Mitochondrien und ein bewegtes Forscherleben

Gottfried Schatz tischt uns Wissenschaftliches und Privates in einer besonders ausgewogenen und schmackhaften Mischung auf.

Die Kraftwerke aller lebenden Zellen, die Mitochondrien, gewinnen Energie durch kalte Verbrennung von Nährstoffen und speichern sie dann in Form von ATP. An der Frage, wie dieser grundlegende Vorgang im Einzelnen abläuft, knobelten die Wissenschaftler ein halbes Jahrhundert lang herum, von der Entdeckung der Mitochondrien Anfang der 1940er Jahre bis zur Strukturaufklärung des Schlüsselenzyms ATPase in den 1990er Jahren.

Der österreichische Chemiker Gottfried Schatz hat jahrzehntelang mitgeknoelt, vornehmlich in den USA und dann am Biozentrum in Basel. Er war an der Entdeckung beteiligt, dass Mitochondrien eigene DNA enthalten, und konzentrierte sich in seiner späteren Laufbahn auf die Frage, wie diese Organellen jene Biomoleküle importieren, die sie mit ihrem eigenen, stark reduzierten Genom nicht herstellen können.

Nach dem Zweiten Weltkrieg beschäftigte die Mitochondrienforscher vor allem die Frage, woher das ATP-produzierende Enzym (die ATP-Synthase) die Energie nimmt, die nach der Synthese im ATP steckt. Als Postdoc im New York der 1950er Jahre setzte Schatz, wie die meisten seiner Kollegen zu jener Zeit, auf die falsche Karte. Fast alle glaubten, eine andere chemische Verbindung stel-

le die benötigte Energie bereit, und suchten vergeblich nach ihr. Dagegen postulierte der britische Einzelgänger Peter Mitchell Anfang der 1960er Jahre, ein Konzentrationsunterschied von Wasserstoffionen beiderseits der Membran sei die Energiequelle. Obwohl ihn die Expertenwelt zunächst nicht ernst nahm, behielt Mitchell Recht und erhielt 1978 den Nobelpreis für Chemie.

Autobiografie, Wissenschaft und Philosophie – in Maßen

Die zweite große Erkenntnis der Mitochondrienforschung betraf das Enzym, das aus dem Konzentrationsgefälle chemische Energie gewinnt. Die F_1-F_0 -ATPase (verwirrenderweise sind die Indizes die Ziffer 1 und der Buchstabe o) führt eine dreistufige Rotation durch, wie zuerst von Paul Boyer postuliert und 1994 röntgenkristallografisch von John Walker nachgewiesen wurde. Beide teilten sich den Nobelpreis für Chemie im Jahr 1997 (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 18).

Schatz war an diesen beiden großen Entdeckungen nicht beteiligt. Dennoch (oder vielleicht deswegen) ist sein Werk interessanter als Mitchells Biografie (John Prebble, Bruce Webber: Wanderings in the Garden of the Mind, Oxford University Press 2003). In einer gelungenen Mischung aus etwa gleichen Tei-

len Autobiografie, Populärwissenschaft und Philosophie verknüpft Schatz seine Suche nach dem »Feuer« der Zelle mit seinen Erfahrungen als Kriegskind und als heimatloser Wanderer in der Nachkriegszeit.

Für den Leser hat das den Vorteil, dass er mit keinem der drei Bestandteile überfüttert wird. Die Beschreibung der wissenschaftlichen Entwicklung beschränkt sich auf die Wege und Irrwege zur Beantwortung der »großen Fragen«, die auch für Laien zur Allgemeinbildung gehören sollten; seine durchaus fruchtbare Arbeit zum oben genannten Import in der Baseler Zeit erwähnt er nur ganz am Rand.

Auch in den autobiografischen Ausführungen belässt es Schatz bei wichtigen, prägenden Erfahrungen, die geschickt mit der wissenschaftlichen Entwicklung verwoben sind. Seine dänische Ehefrau tritt nur marginal in Erscheinung. Immerhin erinnert die Verwendung des dänischen Umlauts å bei der Wiedergabe von Zitaten in österreichischer Mundart an die internationale Zusammensetzung der Familie Schatz.

Abgerundet wird das Ganze mit Lebensphilosophie und Altersweisheit. Auch hier weiß der Autor, wann er mit dem Philosophieren aufhören muss, um uns nicht auf die Nerven zu gehen.

Illustriert ist der Band mit zahlreichen Porträtskizzen und einigen wenigen wissenschaftlichen Zeichnungen des Biophysikers Leslie Dutton, der sich laut Klappentext bei wissenschaftlichen Kongressen die Zeit damit vertreibt, die Kollegen zu zeichnen. Auch dies eine geniale Lösung für ein uraltes Problem der Wissenschaft!

Kurzum, das Buch ist als Lektüre für Wissenschaftler und Laien gleichermaßen zu empfehlen. Es mag auch anderen Emeriti als Vorbild dienen, indem es aufzeigt, wie man ein Leben, eine Weltanschauung und eine Forschungsdisziplin zu einem lesenswerten Buch verquirlen kann.

Michael Groß

Der Rezensent ist promovierter Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford.

Gegen den Strom

»Nachdem vor einigen Jahren im Pazifischen Ozean eine starke Unterströmung entdeckt worden ist, konnte nun auch im Atlantischen Ozean unter dem nach Westen fließenden Südäquatorialstrom eine nach Osten gerichtete Gegenströmung nachgewiesen werden. Diese Strömung ist schon früher vermutet worden. Der Nachweis gelang von Bord des Forschungsschiffes ›Chain‹ mit Hilfe von Strömungsmessungen in 15 und 105 m Tiefe.« *Kosmos 10, S. 403, 1961*

Radioaktivität verdünnen

»Bei der Auswahl des Platzes für eine Reaktoranlage besteht das Problem darin, die zerstreuen Eigenschaften der Atmosphäre auszunützen, um die radioaktiven Ausscheidungen auf unschädliche Mengen zu verdünnen. Die Erfahrung lehrt, daß beim Betrieb von Atomreaktoren Zwischenfälle eintreten können. Es ist daher notwendig, die Untersuchungen für Reaktorplanungen über einen Radius bis zu 100 km um den Zentralpunkt der Anlage auszudehnen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau 10, S. 394, 1961*



Selbstreinigende Gewässer

»Das eklatanteste Beispiel bieten jene Flüsse, welche beim Durchfließen grosser Städte alle Abwässer der menschlichen Haushalte und Fabrikationsbetriebe aufnehmen. Aber schon 10 bis 15 Kilometer unterhalb des Austrittes sehen wir den Fluss appetitlicher werden. Nun wissen wir, wie es bei der Selbstreinigung zugeht. Mikroskopische Pflanzen und Tiere sind dabei beteiligt, nachdem eine Sedimentation der gröberen Verschmutzungsstoffe stattgefunden hat. Zunächst bemächtigen sich Bakterien der organischen Nahrung; es treten Fäulnisprozesse ein. Die Fäulnisprodukte werden

von Schwebalgen und Uferpflanzen assimiliert. Nur wenn der Fluss mit Abfällen überladen ist, hat die Selbstreinigung desselben mit Schwierigkeiten zu kämpfen oder ist überhaupt unmöglich.« *Gesundheit 20, S. 626, 1911*



Voll ausgerüsteter Polarforscher

Fährten aus der Urzeit

»Im Februar 1961 führte die Aufmerksamkeit eines Grubensteigers der Grube Dechen zur erstmaligen Beobachtung von Wirbeltierfährten des Saarkarbons. Sie dürften etwa 280 Millionen Jahre



alt sein. Etwas besonders Seltenes ließ sich im unteren Horizont feststellen: zwei Lagermulden eines Tieres. Da Schwanzende, Hals und Kopf keinen Eindruck hinterlassen haben, ergibt sich eine Gesamtkörperlänge von 2,0 m bis 2,2 m. Zur Lagermulde führt eine weitere Fährte, die von einem zweiten Tier derselben Art stammt.« *Umschau 19, S. 587, 1961*

Fährte und Lagermulde eines Tieres (Konturen nachgezeichnet)

Orientierung dank Kreisel

»Welche Naturkraft veranlaßt den magnetlosen Kompaß, die Nord-Südlinie aufzusuchen und darin zu beharren? Es ist die Drehung der Erde um ihre Achse, welche auf den Kreisel derart einwirkt, daß dieser seine Achse der Erdachse parallel zu stellen sucht. Hier sei gesagt, daß beim Kreiselkompaß die Achse horizontal liegt. Dreht sich die Erde unter ihm weg, so kommt der Kreisel in eine schräge Lage zur Erdoberfläche. Sofort beginnt die Schwerkraft zu drücken, und bald merkt der Kreisel, daß er nur in einer Stellung dauernd seine Achsenrichtung festhalten kann, wenn er nämlich der Erdachse parallel ist.« *Umschau 43, S. 888, 1911*

Aufbruch in die Antarktis

»Der Beginn der Südpolarexpedition unter der Leitung des Oberleutnant Dr. Filchner steht unmittelbar bevor. Die Abfahrt der ›Deutschland‹ wird Anfang Oktober erfolgen, so daß das Schiff im November die Eisgrenze erreichen wird. Die Polarkleidung ist von einer deutschen Firma geliefert worden. Sie besteht aus Pelzbekleidung, die das Eindringen von Kälte verhindert. Als Schutz für Kopf und Augen dienen schwere gestrickte Wollmützen und eine Brille. Es werden 5 m lange Eschenholzschlitten benutzt, die abwechselnd von Mitgliedern oder Hunden gezogen werden.« *(Bei dieser 2. Deutschen Antarktisexpedition entdeckte der Forscher Wilhelm Filchner dort die nach dem Ross-Schelfeis zweitgrößte permanente Eisdecke. Die Red.) Umschau 41, S. 848–849, 1911*

Saugen und Drücken – die Geschichte des maschinellen Melkens

Über Jahrtausende hinweg wurden Kühe von Hand gemolken. Erste Versuche, den Vorgang zu mechanisieren, unternahm 1836 der Engländer William Blurton. Um die Milch herauszupressen, führte er ein metallenes Röhrchen in die Zitzen ein, doch dadurch entzündeten sich diese. Seine Landsleute Hoodges und Brockenden versuchten 1851, mit einer Pumpe Unterdruck zu erzeugen, um das Saugen eines Kalbs zu imitieren. Während sie dabei das Euter mit einem Sack vollständig umschlossen, präsentierten die Amerikaner Kershaw und Colvin auf der Londoner Weltausstellung 1862 einen Melkapparat, bei dem Becher auf die Zitzen aufgesetzt wurden. Doch beide Verfahren fügten den Tieren Schmerzen oder sogar Verletzungen zu, da sie mit einem konstanten Unterdruck arbeiteten – ein Kalb aber trinkt rhythmisch.

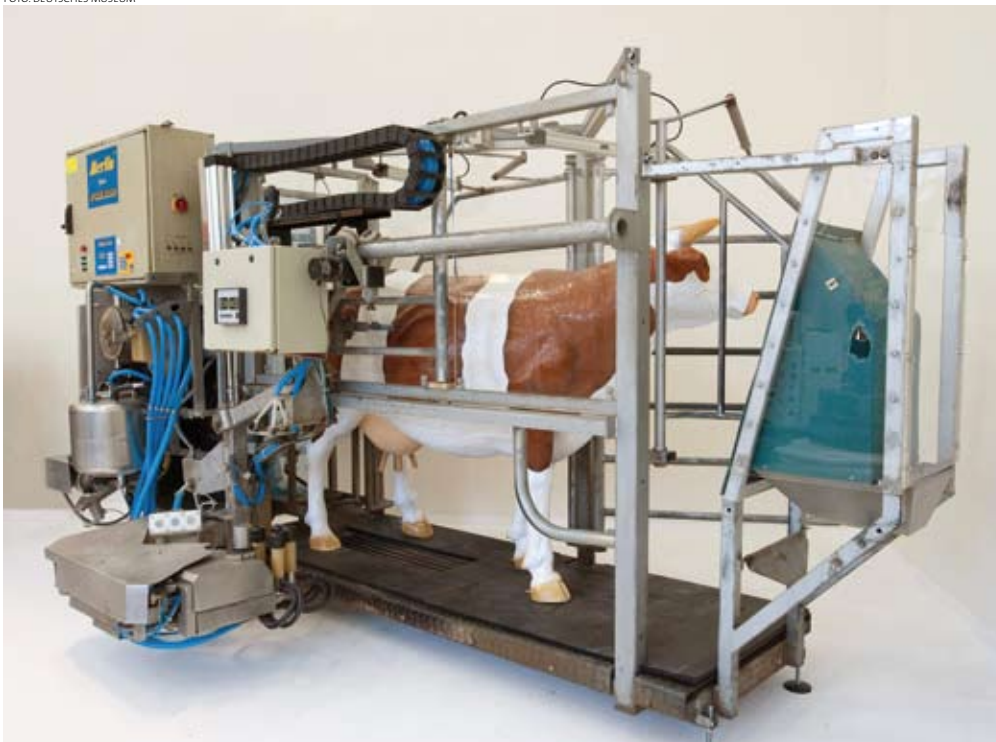
Von den Rückschlägen ließen sich die Tüftler jedoch nicht abschrecken. Vor allem in Nordamerika, wo es an qualifizierten Melkern mangelte, wurden zwischen 1870 und 1890 fast 100 Patente erteilt, darunter auch etliche, die mechanisch, pneumatisch oder hydraulisch die Zitzen walkten und drückten. Keine Erfindung bestand letztlich den Praxistest. Erst dem Schotten Alexander Shields gelang 1895 der Durchbruch mit seinem Pulsator, der den Unterdruck auf die Zitzen im Melkbecher regelmäßig unterbrach.

Auch wenn Melkmaschinen in Deutschland ab etwa 1900 angeboten wurden, setzten sie sich erst in den 1930er Jahren durch. In jener Zeit erkannten Veterinärmediziner zudem, dass etwa 2/3 der Milchmenge erst während des Säugens entsteht. Dieser Vorgang wird durch ein Hormon gesteuert, das infolge der mechanischen und thermischen Reize freigesetzt wird, die das Kalb auf das Euter ausübt. Damit wird verständlich: Ideen von Maschinen, die Milch aus dem Euter saugen oder drücken wie aus einem Gefäß, mussten also zwangsläufig scheitern.

Mitte der 1980er Jahre begann die Entwicklung der heutigen Melkroboter: Von Futter angelockt, gehen die Kühe freiwillig hinein und werden dort anhand eines Chips am Halsband erkannt, der sich per Funk abfragen lässt. Wurde das Tier innerhalb der letzten zwei Stunden nicht gemolken, erhält es Kraftfutter, andernfalls wird es wieder aus der Station gedrängt. Während es frisst, sucht der Roboter mit einem Laserscanner die Zitzen, reinigt sie und setzt die Melkbecher an. Danach kontrolliert er die Milch, führt das Melkzeug zurück und reinigt es vor dem nächsten Einsatz.

Der Ingenieur und promovierte Technikhistoriker **Frank Dittmann** ist Kurator der Abteilung Energie-, Starkstrom- und Automatisierungstechnik.

FOTO: DEUTSCHES MUSEUM



»Merlin« war einer der ersten Melkroboter des britischen Herstellers Fullwood. Von 1998 bis 2009 führte er im Versuchsbetrieb Grub der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft selbstständig etwa 500 000 Melkungen aus und ist in der Ausstellung zur Robotik im Deutschen Museum zu sehen.



Gibt es das Multiversum wirklich?

Manche Kosmologen sind der Ansicht, neben unserem Universum müssten alle möglichen Parallelwelten existieren. Kritiker halten das für abwegig und bezweifeln den Wert dieser Hypothese. Wer hat Recht?

LEW BROWN

Biodemografie des Alterns

Die Menschen leben heute länger als noch vor wenigen Jahrzehnten – nicht etwa weil die Phase der Hinfälligkeit sich verlängert, sondern weil sie später einsetzt. Wir gewinnen also nicht nur einfach Lebenszeit, sondern sogar einigermaßen gesunde Lebensjahre

Supercomputing für die Wissenschaft

Hochleistungsrechner sind die Universalwerkzeuge der modernen Wissenschaft, von der Astrophysik über das Ingenieurwesen bis zur Hirnforschung. Schon in naher Zukunft werden sie sogar Theorieentwicklung und Modellbildung maßgeblich beeinflussen



S.C. BRUEL

Friedliche Berserker

Ausgerechnet den als mordgierig verschrienen Wikingern überließ der westfränkische König Karl III. im 10. Jahrhundert das Seinetal zum Lehen. Archäologen und Linguisten bestätigen nun: Es war kluge Diplomatie; die Krieger integrierten sich in die fränkische Gesellschaft und begründeten so das Herzogtum Normandie



DREAMSTIME / ARENA CREATIVE

Der neue Sinn im Auge

In der Netzhaut stecken bisher unbekannte Sinneszellen, die nicht nur den Tag-Nacht-Rhythmus regulieren helfen, sondern auch Helligkeitsempfindungen vermitteln. Manche Blinden »sehen« mit ihnen Licht

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