

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ESSAY

Leben zum Selbermachen

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

MEDIZIN

Neue Strategien gegen multiresistente Bakterien

PLANETEN

Was der Roboter Phoenix vom Mars lernte

NANOTECHNOLOGIE

Motoren für Nanoroboter

# Räumliche Fraktale

Aufstieg der Mandelbrot-Menge in die dritte Dimension



7,40 € (D/A) · 8,- € (L) · 14,- sFr.  
D6179E







Reinhard Breuer  
Chefredakteur

## Prognosen sind schwierig, vor allem wenn sie die Zukunft betreffen

**Der Spötter Mark Twain hat es geahnt:** Von allzu gewagten Vorhersagen lasse man besser die Finger – siehe Überschrift. Wer sie dennoch riskiert, läuft Gefahr, sich zu blamieren und entsprechend korrigieren zu müssen. Und so ist die moderne Geschichte von Forschung und Technik gepflastert mit gescheiterten Verheißungen.

Die Überschätzung des Machbaren muss nicht immer ein Schaden sein. Die Begeisterung, mit der manche Utopie in die Welt posaunt wurde, mag ja immerhin die Stimmung gehoben und Fördergelder freigesetzt haben.

Es sind vor allem Entwicklungen in der Medizin oder Technologie, die regelmäßig mit Heilserwartungen ebenso überfrachtet werden wie mit Befürchtungen: ob Genome, Stammzellen oder Hochtemperatursupraleiter. Über ein Beispiel berichten wir in dieser Ausgabe – die Nanotechnik.

Aber der Reihe nach. Es war der Physiker Richard Feynman, der 1959 in einem Vortrag die Technologie auf Nanometerskalen prophezeite, unter anderem mit Chirurgierobotern zum Einnehmen oder mit Nanofabriken, in denen sie produziert werden. Feynman nannte seinen legendären Vortrag »There's plenty of Room at the Bottom« (auf Deutsch etwa: reichlich Platz nach unten hin). Jahrzehnte später legte Eric Drexler mit seiner Vision molekularer Maschinen nach (»Engines of Creation«, 1986). Zugleich schockierte der Amerikaner aber auch mit Untergangsfantasien von molekularem »grauem Schleim« (*grey goo*). Da geraten Mikroroboter (*Nanobots*), die sich selbst reproduzieren können, prompt außer Kontrolle. Spektakulärer war vielleicht Drexlers

Vorstellung, dass Nanobots bei fast allen Problemen der Welt helfen könnten: Energie, Armut, Umweltverschmutzung, Krankheit.

Wie so oft ist die Zeit ein harter Lehrmeister für alle Zukunftsbeschwörer dieser Welt – in der Nanotechnologie sind bisher weder Drexlers Dämonien absehbar noch seine Welterlösungsutopien. Heute, ein halbes Jahrhundert nach Feynman, gelingt es Forschern zwar schon, bestimmte Molekulargeräte herzustellen, vor allem für die Computertechnik oder Nanoelektronik. Aber für einen Einsatz in der Robotik mangelt es noch an vielem, zum Beispiel an Antrieben. Das liegt unter anderem an der Physik im atomaren Maßstab, wo Luft und Wasser zäher und klebriger werden. Wenn es bei Nanomotoren erst jetzt erste Fortschritte gibt, bestätigt das einmal mehr, dass manche Utopien eben etwas länger brauchen (S. 90).

**Schneller, als alle Fachleute je erwarteten,** verwirklichten sich dagegen sämtliche Visionen in der Genetik. Die Fertigkeiten der Forscher entwickeln sich mit so atemberaubender Geschwindigkeit, dass manchem längst angst und bange wird. Kein Wunder, wenn nun auch die synthetische Biologie, mit der Forscher wie der Genomikpionier J. Craig Venter gleich völlig neuartige Einzeller produzieren wollen, für Diskussionen sorgt. Schlägt hier abermals die Stunde der Apokalyptiker? Zwei junge Medizinethiker aus Freiburg, Joachim Boldt und Oliver Müller, haben sich mit dieser neuen Dimension der Gestaltung von Lebewesen auseinandergesetzt (S. 42).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



MIT FRIEDL. GEN. VON JOACHIM BOLDT UND OLIVER MÜLLER

Die Medizinethiker Joachim Boldt (rechts) und Oliver Müller von der Universität Freiburg analysieren die synthetische Biologie.

### Ihr Wunschartikel

Auf Platz 1 der 14. Runde unserer Wunschartikel-Angebote landeten die »Glücksfallalgorithmen« (ab S. 82).



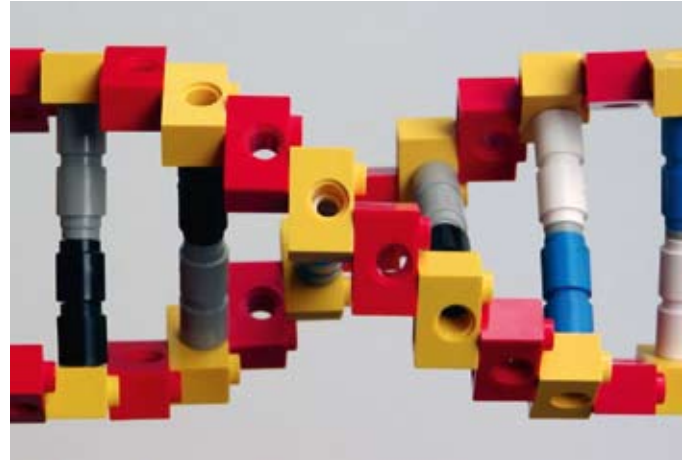
24

ASTRONOMIE & PHYSIK  
Was »Phoenix« über den Mars herausfand



MEDIZIN & BIOLOGIE  
Katzen als frühe Hausgenossen

34



MEDIZIN & BIOLOGIE  
Neues Leben nach dem Legoprinzip?

42

## AKTUELL

### 12 Spektrogramm

Geschlechtsumwandlung durch Pestizid · Bakteriellies Stromnetz · Methannachweis auf Exoplanet · Die Farbe der Saurier · Hefeheizung für Winterblume u. a.

### 15 Bild des Monats

Würmer auf grüner Kugel

### 16 Im Schutz des Ozonlochs

Jüngste Bestandsaufnahme des Klimawandels am Südpol

### 18 Erzwungenes Leuchten

Wie sich nicht fluoreszierende Farbstoffe zum Aussenden von Licht bringen lassen

### 20 Spielen ohne Grenzen

Neueste Konsolen für Videospiele sollen natürliche Gesten verstehen

### 21 Wird multiple Sklerose epigenetisch vererbt?

Überraschende Erklärung verwirrender Befunde zu dem tückischen Leiden

### 22 Springers Einwüfe

Leben in immer gleichen Bahnen

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### 24 ► Phoenix auf dem Mars

Was die Mars-Landesonde Phoenix über Wetter, Boden und Wasser auf dem Roten Planeten herausfand, sorgte für Überraschungen

SCHLICHTING!

### 32 Fährtsensuche am Himmel

Von Kondensstreifen, Nebelfäden und Wirbelschleppen: warum nicht nur heiße Abgase kalte Spuren hinterlassen

Titelmotiv: Krzysztof Marczak

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

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### 34 Woher stammen Hauskatzen?

Nicht erst im alten Ägypten, sondern schon viel früher haben sich Katzen im Gebiet des fruchtbaren Halbmonds dem Menschen angeschlossen

ESSAY

### 42 ► Leben zum Selbermachen

Mit der synthetischen Biologie produzierten Forscher demnächst Organismen, die es bisher so in der Natur nicht gab. Das wirft Fragen auf zur Rolle der Wissenschaft und ihrer Verantwortung

### 46 ► Multiresistente Keime

Selbst das wichtigste Reserve-Antibiotikum versagt inzwischen bei manchen bakteriellen Krankheitserregern. Wie kann innovative Forschung der Medizin wieder einen Vorsprung verschaffen?

TITEL

## Räumliche Fraktale

56




### MENSCH & GEIST

TITEL


MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

- 56 ► **Mandelbrot, dreidimensional**  
Der Aufstieg des berühmtesten aller Fraktale in höhere Dimensionen

- 64 **Rätselhafte Zwergmenschen**   
Der indonesische *Homo floresiensis* passt nicht ins Bild der menschlichen Evolution. Verliep die Menschwerdung also ganz anders als gedacht?

### ERDE & UMWELT



- 72 **Gewächshaus im Wolkenkratzer**   
Landwirtschaft in speziellen Hochhäusern spart Wasser und fossile Energien. Die Umwelt bleibt von Schadstoffen verschont, zugleich finden Stadtbewohner vor der Haustür stets frisches Obst und Gemüse

### WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Prognosen sind schwierig  
6 Onlineangebote  
8 Leserbrief/Impressum  
96 Im Rückblick  
106 Vorschau
- 98 Rezensionen:  
Paul Murdin *Geheimnisse des Universums*  
Matthias Untermann *Handbuch der mittelalterlichen Architektur*  
Pierre Basieux *Die Welt als Spiel*



64

MENSCH & GEIST  
Neues von den Flores-Zwergen



72

ERDE & UMWELT  
Landwirtschaft im Hochhaus

### TECHNIK & COMPUTER

- 82 **Glücksfall-Algorithmen**  
Für die Lösung bestimmter Berechnungsprobleme gibt es geradezu wunder-same Abkürzungen

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

- 88 **Stents: gestützt, geschützt**  
Metallgeflechte beugen bei Arteriosklerose Herzinfarkt und Schlaganfall vor

- 90 ► **Antrieb von Nanorobotern**  
Die Konstruktion von Motoren für molekulare Maschinen stellt völlig neuartige Anforderungen

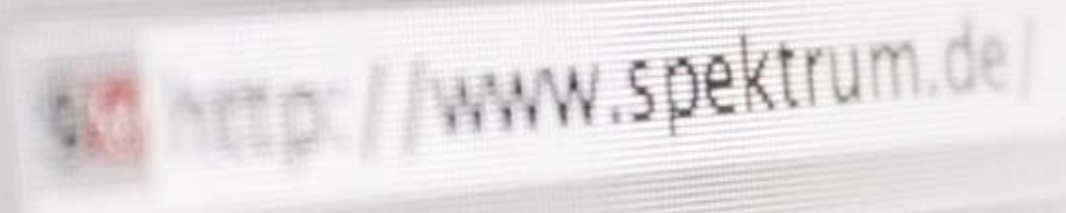
WISSENSCHAFT & KARRIERE

- 102 **»LichtBlick« für Ökostrom**  
Firmengründer Heiko von Tschischwitz über Perspektiven im Strommarkt

Seite 104

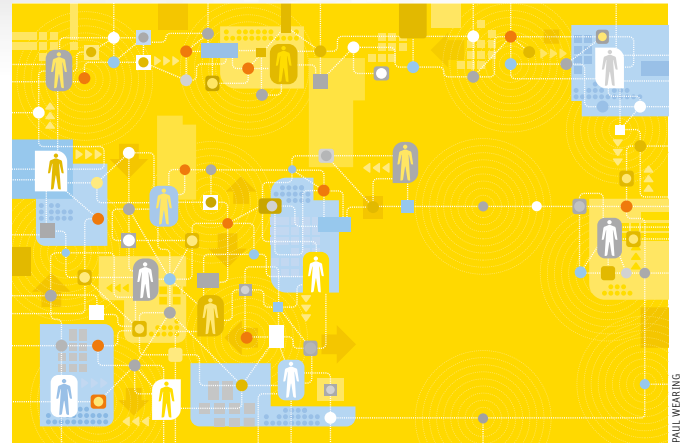
**naturejobs**

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de). Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!



WISSENSLOGS »Fischblog« gewinnt SciLogs-Preis

[www.spektrum.com/scilog2010](http://www.spektrum.com/scilog2010)



INTERAKTIV 15. Wunschartikelrunde

[www.spektrum.de/artikel/1023796](http://www.spektrum.de/artikel/1023796)

## spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

### Industrie bald ohne Rohstoffe?

Die Ölförderung wird eines Tages nicht mehr mit der weltweiten Nachfrage mithalten können, aber auch zahlreiche weitere Rohstoffe könnten uns ausgehen. Dieses Dossier zeigt unter anderem, welche Gegenmaßnahmen wir ergreifen müssen

[www.spektrumdirekt.de/rohstoffe](http://www.spektrumdirekt.de/rohstoffe)

### Die Riesen aus dem Erdmittelalter

Die ersten Vorfahren der Dinosaurier, so zeigten jüngste Forschungen, könnten bereits vor 245 Millionen Jahren entstanden sein. Den evolutionären Werdegang der Riesenechsen erhellte jüngst aber auch der »Unbekannte aus der Trias«, und selbst die Gefiederfarbe des *Sinosauropteryx* ist kein Rätsel mehr. All dies und mehr können Sie jetzt in einem **spektrumdirekt**-Dossier nachlesen

[www.spektrumdirekt.de/dinosaurier](http://www.spektrumdirekt.de/dinosaurier)

## TIPPS

Nur einen Klick entfernt

### Das Versprechen der synthetischen Biologie

Immer näher rückt die Möglichkeit, dass Wissenschaftler synthetisches Leben schaffen, sagt der Kosmologe Lawrence M. Krauss – und fordert, wir sollen uns mit den möglichen Konsequenzen solcher Forschungsarbeiten beschäftigen. Die nämlich können auch in eine Katastrophe münden

[www.spektrum.de/artikel/1024413](http://www.spektrum.de/artikel/1024413)

### Von Lemuren und »Supernasen«

Seit mehr als zwei Jahren berichtet der Göttinger Lemurenforscher Lennart Pyritz regelmäßig von seiner Feldarbeit auf Madagaskar: von Land und Leuten, Klima und Umwelt, vor allem aber von Begegnungen im Tierreich, etwa mit dem Miniaturchamäleon *Brookesia brygooi* und einer »Supernase«, der Schlange *Langaha madagascariensis*

[www.spektrumdirekt.de/madagaskar](http://www.spektrumdirekt.de/madagaskar)

## INTERAKTIV

Machen Sie mit!

### 15. Wunschartikelrunde: Mitmachen und gewinnen

Vom »Handynetz ohne Sendemasten« über »Das Rad der Zeit« bis hin zu »Bionischen Ohren«: In der neuen Wunschartikelrunde stellt Ihnen Chefredakteur Reinhard Breuer erneut fünf Themen zur Auswahl – und wir verlosen wie immer ein Wochenende in Heidelberg mit anschließendem Besuch der Redaktion

[www.spektrum.de/artikel/1023796](http://www.spektrum.de/artikel/1023796)

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



FÜR ABONNENTEN »Genetisches Gehirntuning«

[www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de)

## FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel  
zum Download

### »Genetisches Gehirntuning«

Forscher haben bereits mehr als 30 Stämme von Mäusen gezüchtet, die mit verbesserten kognitiven Fähigkeiten aufwarten. Von solchen Nagern erhoffen sie sich wichtige Erkenntnisse darüber, wie sich auch das menschliche Gehirn auf Trab bringen lässt. Doch möglicherweise hätte derlei IQ-Tuning einen hohen Preis

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN  
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

[www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de)

[www.spektrum.com](http://www.spektrum.com)  
[service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
Telefon 06221 9126-743

## FREIGESCHALTET

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

### »Kontaktstellen im Rampenlicht«

Im menschlichen Gehirn kommunizieren rund 100 Milliarden Nervenzellen über schätzungsweise 100 Billionen Synapsen miteinander. Der Neurobiologe Nils Brose vom Max-Planck-Institut für Experimentelle Medizin in Göttingen erläutert, wie die Signalübertragung an diesen entscheidenden Schaltstellen abläuft – und was geschieht, wenn sie gestört wird

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

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1022523](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1022523)

### »Die Geburt des Terrors«

Die Angst vor politisch motivierten Gewalttaten ist so alt wie der moderne Staat: Seit dem späten Mittelalter mussten sich Herrscher und Behörden gegen Mörder, Brandstifter und Verschwörer wappnen

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

[www.epoc.de/artikel/1024650](http://www.epoc.de/artikel/1024650)



FREIGESCHALTET

»Die Geburt des Terrors«

[www.epoc.de/artikel/1024650](http://www.epoc.de/artikel/1024650)

Spektrum in den sozialen Netzwerken



[www.spektrum.de/studivz](http://www.spektrum.de/studivz)

facebook

[www.spektrum.de/facebook](http://www.spektrum.de/facebook)

twitter

[www.spektrum.de/twitter](http://www.spektrum.de/twitter)

## WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

### »Fischblog« gewinnt SciLogs-Preis

Auch dieses Jahr trafen sich Wissenschaftsblogger im beschaulichen Deidesheim, um im Schatten der Weinberge den alljährlichen SciLogs-Preis für den besten Blogger zu vergeben. Nachdem er 2008 an Helmut Wicht von den BrainLogs und 2009 an Michael Blume von den ChronoLogs gegangen war, ist der diesjährige Preisträger ein WissensLogger. Unter den von prominenten Gästen vorgeschlagenen Kandidaten setzte sich Lars Fischer vom »Fischblog« gegen den Islam-Blogger Hussein Hamdan und den Forschungsverbund »Interactive Science« durch. Auf der Sonderseite zum Deidesheimer Bloggertreffen finden Sie neben der Laudatio auf den Sieger und den Fotos von der Preisverleihung auch eine Bilderstrecke zur Veranstaltung

[www.wissenslogs.de](http://www.wissenslogs.de)  
[www.spektrum.com/scilog2010](http://www.spektrum.com/scilog2010)

## Deutscher Pionier

Das Zeitalter der elektrischen Raketen  
Januar 2010

Vielen Dank für den Artikel über elektrische Raketenantriebe, den ich sehr informativ finde. Es wäre schön gewesen, wenn die deutsche Redaktion »unseren« deutschen Pionier auf diesem Gebiet, Prof. Horst Löb, in diesem Artikel gewürdigt hätte. So erhielt er die Medaille der »Electric Rocket Propulsion Society« im Jahr 2005. Horst Löb ist in Gießen als Emeritus weiterhin tätig, und die Arbeit an seinen Triebwerken wird weiter vorangetrieben.

Joachim Sieben, Buseck

## Signifikant und kausal

Haben schöne Eltern mehr Töchter?  
Februar 2010

Die Signifikanzgrenze ist ein vollkommen willkürlich gewählter Wert; mitnichten steckt dahinter eine tiefere wissenschaftliche Begründung.

Meist wird dafür ein Wert von 95 Prozent genommen, so dass die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers erster Art bei kleiner gleich fünf Prozent liegt. Somit kann durchaus auch bei »signifikanter« Korrelation zweier experimenteller Wertereihen kein kausaler Zusammenhang zwischen den beobachteten Phänomenen

vorliegen. Umgekehrt ist bei fehlender Signifikanz eine ursächliche Beziehung nicht unbedingt auszuschließen.

Wertekorrelationen und andere statistische Ergebnisse können niemals als Beweis für wissenschaftliche Thesen dienen, höchstens als Hinweis auf mögliche Beziehungen zwischen den Beobachtungen. Lediglich eine Aufklärung der Kausalkette stellt einen genügenden Beweis dar. Leider haben viele Wissenschaftler dieses vergessen.

Dr. Wolfgang Priebsch, Kiel

## Fehlender Nachweis der Wirksamkeit

Impfverstärker für Impfstoffe  
Februar 2010

Zu begrüßen wäre bei diesem Artikel, dass zumindest einer der beiden Autoren indirekt einen *conflict of interest* zugibt, was auf der einen Seite einen hohen wissenschaftlichen Anspruch des Artikels unterstreicht; auf der anderen Seite aber verleiht das dem Artikel eine gewisse Einseitigkeit und Subjektivität, was dem Thema Wirkverstärker und Impfung im Allgemeinen leider nicht zugutekommt.

Zu bemängeln wäre aber vor allem die Darstellung des Anstiegs von den neutralisierenden Antikörpern als Nachweis für die Wirksamkeit der Impfung. Dieser Surrogatparameter allein ist we-

nig geeignet, um Aussagen über die Effektivität und Sicherheit einer Impfung zu treffen. Ein international anerkannter Standard in der klinischen Forschung für die Beurteilung der Wirksamkeit eines Arzneistoffs ist eine statistisch signifikante Aussage über die Verhinderung der Erkrankung oder Tod.

Außerdem werden in der Arbeit die potenziellen und identifizierten Risiken ausgehend von den Wirkverstärkern für Kinder und Schwangere gar nicht erwähnt. Das aktuelle Thema Schweinegrippe hat leider die deutsche Bevölkerung in Befürworter und Gegner geteilt, was sich jetzt auch in einer gewissen Impfmüdigkeit bei Impfungen niederschlägt, die sinnvoll und lebenswichtig sind.

Dr. Jacek Bulicz, Frankfurt am Main

## Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe) oder direkt beim Artikel: Klicken Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) auf das aktuelle Heft oder auf »Magazin«, »Magazinarchiv«, das Heft und dann auf den Artikel.

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft

Redaktion Leserbriefe

Postfach 104840

69038 Heidelberg

E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

## Spektrum

DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)  
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hofer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser  
**Redaktion:** Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: [redaktion@spektrum.com](mailto:redaktion@spektrum.com)  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Redaktionsassistent:** Britta Feuerstein, Petra Mers  
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729  
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114  
**Verlagsleiter:** Dr. Carsten Könniker, Richard Zinken (Online)  
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733  
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Werner Gans, Dr. Rainer Kayser, Ursula Loos, Andreas Nestke, Sebastian Vogel.  
**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.com](mailto: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](mailto:spektrum@zenit-presse.de), Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.  
**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenvertretung:** Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 61696-145; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1/6, 06, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24  
**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 31 vom 01.01.2010.  
**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: © 2010 (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 Brandon



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





# Wie stichhaltig sind die Warnungen vor einer Klimakatastrophe?

Spurenleser im Klimalabyrinth, März 2010

Professor Gerald Haug schießt mit seinen Aussagen zum aktuellen Klimawandel weit über das Ziel hinaus.

**1.** Er behauptet, die atmosphärischen Bedingungen hätten sich in der Vergangenheit noch nie so schnell verändert wie heute. In der langen Erdgeschichte hat es jedoch eine Vielzahl von Klimaänderungen gegeben, darunter einige schneller als der aktuelle Klimawandel. Betrachtet man nur die Nacheiszeit, muss man während des holozänen Klimaoptimums sowie während der Römischen und Mittelalterlichen Wärmephase von ähnlichen Erwärmungsraten ausgehen.

**2.** Herr Haug schimpft, die Menschen hätten das Klima mit ihrem Verhalten bereits um ein Grad erwärmt. Hierbei vergisst er den Beitrag der Sonne. Auf Grund der guten Korrelation mit der Sonnenaktivität muss man heute davon ausgehen, dass sowohl die Mittelalterliche Wärmephase als auch die Kleine Eiszeit durch Schwankungen in der solaren Aktivität verursacht worden sind (etwa Archer und Rahmstorf: »The Climate Crisis«, 2010, S. 38). Auch die Erderwärmung der letzten 150 Jahre im Anschluss an die Kleine Eiszeit ist zumindest teilweise der Sonne zuzuschreiben und kann als logische Fortsetzung eines solargesteuerten Dansgaard-Oeschger-Zyklus interpretiert werden. Laut diesem Buch (S. 43) hat die Sonne das Klimageschehen bis 1970 maßgeblich mitgeprägt. Das anthropogene Kohlendioxid ist daher nur für einen Teil der aktuellen Erderwärmung von bisher einem Grad verantwortlich.

**3.** Er behauptet, dass die Pole niemals vereist gewesen seien, wenn der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft 360 ppm überstieg. Während der spätordovizischen Vereisung vor 445 Millionen Jahren war der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre mit etwa 3000 ppm aber rund 15-mal höher als heute.

**4.** Schließlich wird gesagt, der Zusammenhang zwischen Kohlendioxid und Temperatur sei in den geologischen Daten eindeutig. Doch erhöhte Kohlendioxidgehalte während der pleistozänen Warmphasen sind Folge und nicht Ursache des Temperaturanstiegs, da der CO<sub>2</sub>-Anstieg der Erwärmung um etwa 800 Jahre hinterherhinkt.

Ich bin ebenfalls Geologe, zur gleichen Zeit habilitiert wie Prof. Haug und habe mich auch mit paläoökonomischen Rekonstruktionen beschäftigt. Ich kann mir nicht erklären, warum unsere beiden Interpretationen so weit auseinanderklaffen.

Dr. Sebastian Lüning, Bremen

## Prof. Dr. Gerald Haug, ETH Zürich, antwortet:

**Zu 1:** Herr Dr. Lüning verwechselt lokale Klimateffekte mit der globalen Klimaänderung. Zwar sind an einigen Klimaübergängen seit der letzten Eiszeit regionale Temperaturschwankungen von mehreren Grad Celsius in weniger als zehn Jahren gut dokumentiert. Sie traten jedoch vor allem in Europa und Nordamerika auf und beruhten auf einer Reorganisation des nordatlantischen Strömungssystems. Die erdgeschichtlich größten globalen Klimaschwankungen der letzten Jahrmillionen sind die Übergänge von Eis- zu Warmzeiten. Die Erde erwärmte sich dabei um etwa vier Grad Celsius, was aber mehr als 3000 Jahre dauerte. Die Veränderungsrate (0,0013 °C/Jahr) waren also nur rund ein Zehntel so groß wie beim anthropogenen globalen Temperaturanstieg um 0,6 Grad Celsius in der letzten 50 Jahren (0,012 °C/Jahr).

Es stimmt zwar, dass in einigen Regionen Europas während der Mittelalterlichen Wärmephase sogar höhere Temperaturen als heute rekonstruiert wurden. Doch das sind Lokaleffekte, die nichts mit globalen Temperaturen zu tun haben.

**Zu 2:** Die Veränderung der Sonnenaktivität spielt eine wichtige Rolle in der Klimaentwicklung, ihr Beitrag zur Erwärmung während der letzten 50 Jahre ist aber im Vergleich zum Treibhauseffekt klein. Außerdem hat die Sonnenaktivität seit den 1970er Jahren abgenommen, während die globale Temperatur weiter stark angestiegen ist. Archer und Rahmstorf kommen deshalb auch keineswegs zu dem Schluss, den Herr Lüning suggeriert – im Gegenteil: Sie betonen, dass die globale Temperaturentwicklung und die Sonnenaktivität seit den 1970er Jahren gegenläufig sind.

Die erwähnten Dansgaard-Oeschger-Zyklen sind ein Klimaphänomen aus dem Glazial, das es im Holozän, das heißt den letzten 10 000 Jahren, nicht gab. Die Kleine Eiszeit hat also definitiv nichts mit solchen rapiden glazialen Klimawechseln zu tun.

**Zu 3:** Die 360 ppm CO<sub>2</sub> bezogen sich auf die Vereisung beider Pole während der letzten 2,7 Millionen Jahre, was erdgeschichtlich eine große Ausnahme darstellt. Eine unipolare Vereisung gab es häufiger. So hat sich der Südpol schon vor 36 Millionen Jahren bei deutlich höheren atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalten mit einer Eisdecke überzogen.

Für die kurze Phase im späten Ordovizium, in der ebenfalls nur der Südpol vereist war, wurde im Kohlenstoffisotopensignal von Brachiopodenschalen eine starke Anomalie von etwa sechs Promille gemessen, die auf ein Wegspeichern großer Mengen an Kohlenstoff im Ozean zurückgeführt wird. Es zeigt sich also, dass eine Vereisung auch damals nicht ohne einen bedeutenden Einfluss des Kohlenstoffkreislaufs und damit der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erklären ist. Zu jener Zeit lag der Superkontinent Gondwanaland ziemlich lange auf dem Südpol; die Vereisungsspuren sind aber nur während der gemessenen Kohlenstoffanomalie beschrieben. Weil im Ordovizium die Anordnung der Kontinente völlig anders war als heute und noch keine wirkliche Vegetation auf dem Festland existierte, eignet sich diese erdgeschichtliche Epoche generell nicht als geologisch sinnvolles Analogon für den menschengemachten Klimawandel. Es ist reine Spekulation, dass die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration vor 445 Millionen Jahren 3000 ppm betrug, da solche Rekonstruktionen sehr unsicher sind.

**Zu 4:** Daten aus antarktischen Eisbohrkernen zeigen in der Tat, dass während der Erwärmung am Ende von Eiszeiten die antarktische Temperatur einige hundert Jahre vor der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu steigen begann. Diese Temperaturzunahme in der Südhemisphäre beruht auf Veränderungen der Sonneneinstrahlung, bedingt durch periodische Verschiebungen der Erdbahn und des Wärmeflusses im Meer. Als Folge entweicht CO<sub>2</sub> vom tiefen Ozean in die Atmosphäre. Das liegt unter anderem an der salzgesteuerten Schichtung des Südozeans, die sich bei steigender Temperatur abschwächt. Das Vorausschieben der Temperatur am Ende einer Eiszeit widerspricht also nur scheinbar der Rolle von CO<sub>2</sub> als entscheidendem Antrieb für Klimaänderungen. Erst der CO<sub>2</sub>-Anstieg verstärkt zusammen mit dem Albedoeffekt das schwache anfängliche Klimasignal so, dass der Übergang in eine Warmzeit nicht in den Anfängen stecken bleibt.

Vielleicht würden meine Interpretationen und die von Herrn Lüning nicht auseinanderklaffen, wenn er sich außer mit den paläoökologischen Faktoren auch mit den im Ozean- und Klimasystem involvierten physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen beschäftigen und weniger selektiv mit Fakten und Zitate umgehen würde.

## UMWELT

### Wenn Froschmännchen Eier legen

Ein männlicher Krallenfrosch, der durch Atrazin weibliche Geschlechtsorgane entwickelt hat, lässt sich begatten und bekommt Nachwuchs, aber nur männlichen.



TYRONE B. HAYES, UC BERKELEY

Das weit verbreitete Herbizid Atrazin steht im Verdacht, für den weltweiten Schwund von Amphibien mitverantwortlich zu sein. Forscher um Tyrone Hayes von der University of California in Berkeley konnten diesen Verdacht nun erhärten. Demnach lässt die Chemikalie Männchen des Krallenfroschs verweiblichen.

Die Wissenschaftler setzten die Tiere vom Schlupf bis zur Geschlechtsreife Atrazinmengen aus, die unter dem Trinkwassergrenzwert der US-Umweltschutzbehörde liegen und auch in der Natur vorkommen. Zwar zeigten alle erwachsenen Männchen zunächst geschlechtsspezifische Merkmale, zehn Prozent entwickelten aber weibliche Sexualorgane und konnten sich mit anderen Männchen fortpflanzen. Auch

bei den Fröschen, die nicht vollständig ihr Geschlecht wechselten, reduzierte Atrazin die Testosteron- und Spermienproduktion sowie die Fruchtbarkeit. Auch das Paarungsverhalten unterdrückte es.

Da die verweiblichten Männchen nur männlichen Nachwuchs produzieren können, halten es die Wissenschaftler um Hayes für möglich, dass auf Grund des stark verschobenen Geschlechterverhältnisses ganze Populationen aussterben. Das gelte umso mehr, als bereits geringe Mengen der Chemikalie diese Wirkung zeigen. In den USA könne die Konzentration selbst im Regenwasser teilweise höher sein. In der Europäischen Union ist der Einsatz von Atrazin verboten.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

## KLIMATOLOGIE

### Stratosphäre kühlt

Wasserdampf beeinflusst das Erdklima viel stärker als Kohlendioxid. Bisherige Klimamodelle berücksichtigen allerdings fast ausschließlich den Wassergehalt der untersten Atmosphärenschicht: der Troposphäre. Kürzlich nahmen Forscher um Susan Solomon vom NOAA Earth System Research Laboratory in Boulder (Colorado) auch die darüberliegende Stratosphäre ins Visier. Aus Messdaten verschiedener Satelliten rekonstruierten sie deren Luftfeuchte für die vergangenen Jahrzehnte. Dabei machten sie eine ebenso unerwartete wie bislang unerklärliche Entdeckung: Während der Wasseranteil der Stratosphäre im letzten Viertel des vergangenen Jahrhunderts deutlich anstieg, ist er seither um rund zehn Prozent zurückgegangen.

Bei verringertem Gehalt an Wasserdampf erwärmt sich die Stratosphäre, weil sie weniger Infrarotstrahlung zur Erdoberfläche zurückwirft. Zum Ausgleich dafür kühlen sich die erdnahen Luftschichten ab. Dies erkläre zumindest zum Teil, warum die Erderwärmung seit der Jahrtausendwende stagniere, meinen die Forscher. Desgleichen könnte die zunehmende Luftfeuchte in der Stratosphäre zwischen 1980 und 2000 den damaligen Temperaturanstieg mit verursacht haben.

Science, Online-Vorabveröffentlichung

## ASTRONOMIE

### Bodenteleskop misst Gase auf Exoplanet

Bei der Suche nach Leben auf fernen Planeten ist die Zusammensetzung ihrer Atmosphäre ein wichtiges Kriterium. Hinweise auf die Gashülle eines Himmelskörpers birgt die Strahlung, die uns von ihm erreicht. Bisher waren allerdings nur die Weltraumteleskope Hubble und Spitzer in der Lage, im Licht eines Exoplaneten typische Spektrallinien einzelner Molekülarten aufzuspüren. Turbulenzen in der Erdatmosphäre und die Rotation des Globus verhinderten die nötigen präzisen Langzeitmessungen vom Boden aus.

Dank verbesserter Auswertungssoftware konnte ein Forscherteam um Mark Swain vom Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena (Kalifornien) nun erstmals diese Störeffekte eliminieren. Am IRTF, einem 3-Meter-Infrarotteleskop auf Hawaii,

bestimmten die Forscher die Zusammensetzung des Gasriesen HD 189733b in 63 Lichtjahren Entfernung. Von der Erde aus gesehen verschwindet der Planet regelmäßig hinter seinem Stern. Dann fehlt sein Beitrag zum Gesamtspektrum des Systems und lässt sich so herausrechnen. Dieser ist allerdings minimal und deshalb nur mit sehr präzisen Instrumenten feststellbar.

Schon 2008 hatte Hubble die Atmosphäre von HD 189733b mit der Methode vermessen und unter anderem Wasserdampf, Methan und Kohlendioxid entdeckt. Die Daten von Swains Team stimmen so gut mit denen des Weltraumteleskops überein, dass die Forscher sehr optimistisch sind, in Zukunft viele weitere Exoplaneten vom Boden aus untersuchen zu können.

PNAS, Bd. 107, S. 2515



ILLUSTRATION: ESA/NASA/ GIOVANNA TINETTI, UNIVERSITY COLLEGE LONDON

Die Atmosphäre des 63 Lichtjahre entfernten jupitergroßen Planeten HD 189733b – hier eine künstlerische Darstellung – konnte vom Erdboden aus analysiert werden.

## Saurier mit braun-weißem Federkleid

■ Federn sind keine Erfindung der Vögel. Auch viele Saurier trugen sie schon. Ob Zierde, Tarnung oder Schutz gegen Kälte dabei im Vordergrund stand, ist unklar. Einen wichtigen Hinweis könnte die Färbung des Gefieders geben. Die lässt sich aus den Versteinerungen allerdings nicht ersehen. Nun konnten Forscher um Fucheng Zhang von der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking jedoch zumindest indirekte Rückschlüsse auf das Aussehen der ersten Federn ziehen: Im versteinerten Flaumkleid des ältesten bekannten Federsauriers *Sinosauropteryx* stießen sie auf Überreste von Pigmenten.

Wie auch bei heutigen Vogelfedern lagern die Farbstoffe in kleinen Kapseln, den Melanosomen, die beim Versteinungsprozess ihre Form behalten. Schon 2008 hatte ein anderes Forscherteam die Gebilde in fossilem Gefieder entdeckt und bewiesen, dass es sich nicht etwa um fossile Bakterien handelt. Bei heutigen Vögeln gibt die Form der Melanosome Aufschluss über ihre Farbe: Runde Kapseln sind bräunlich, längliche dagegen fast schwarz. Die schon mit bloßem Auge in den Versteinerungen erkennbaren Ringe am Schwanz von *Sinosauropteryx* dürften deshalb einst braun ausgesehen haben.

Zugleich bestätigt der Fund der Kapseln, dass der Flaumpelz des Sauriers tatsächlich einen frühen Vorläufer des Federkleids darstellt. Andere Paläontologen hatten zuvor vermutet, es könne sich stattdessen um modifizierte Schuppen handeln. Untersuchungen an Verwandten und Nachfahren von *Sinosauropteryx* sollten nun Aufschluss darüber geben, wie Federn sich zu ihrer heutigen Form entwickelten.

*Nature*, Bd. 463, S. 1075



So könnte *Sinosauropteryx* einst ausgesehen haben. Rücken und Schwanz des nur 30 Zentimeter hohen Fleischfressers waren mit dauernartigen Protofedern bedeckt.

## ARCHÄOLOGIE

### Auch Neandertaler schmückten sich

■ Hatten Neandertaler Sinn für Kunst? Bis vor Kurzem lautete die Antwort Nein. Ästhetisches Empfinden galt als typisches Merkmal des modernen Menschen. Doch zunehmend finden sich in Neandertalersiedlungen Objekte, die offenbar als Schmuck dienten.

Das neueste Beispiel stammt aus zwei Höhlen nahe der spanischen Mittelmeerküste. Dort stießen Archäologen um João Zilhão von der University of Bristol (England) auf eine anscheinend gezielt angelegte Sammlung von Muschelschalen, die laut Radiokarbondatierung bis zu 50 000 Jahre alt sind. Sie stammen von Arten wie der bis heute oft als Schmuck genutzten Stachelauster und tragen Reste von roten, gelben und schwarzen Farbpigmenten. Deren Verteilung lasse, so die Forscher,

darauf schließen, dass die Muscheln gezielt bemalt wurden oder als Gefäß zum Anrühren der Farben dienten. Viele besaßen zudem Löcher, waren also vermutlich einst zu einer Kette aufgefädelt.

Auch in anderen Siedlungen von Neandertalern hatten Forscher zuvor mögliche Schmuckstücke wie etwa durchbohrte Tierzähne entdeckt. Sie stammten jedoch aus der Zeit nach der Ankunft des modernen Menschen in Europa vor rund 40 000 Jahren. Eventuell hatten die Neandertaler also nur den Schmuck der neuen Einwanderer gefunden, erbeutet oder nachgeahmt. Die jüngsten Funde zeigten nun jedoch, so Zilhão, dass beide Arten von Frühmenschen bei ihrem Zusammentreffen auf vergleichbarem kulturellem Niveau standen.

*PNAS*, Bd. 107, S. 1023



Die Außenseite dieser durchbohrten Muschel aus einer Neandertalerhöhle trägt Reste von Pigmenten, die sie einst wohl ebenso orangefarben erscheinen ließen wie das Innere.

## INSEKTEN

## Bienen diskutieren über Futter

Die Tanzsprache der Bienen zählt zu den komplexesten Formen der Insektenkommunikation. Kehrt eine Arbeiterin von einer reichen Futterquelle zurück, informiert sie ihre Kolleginnen über deren genaue Richtung und Entfernung, indem sie unterschiedlich geformte Achten tanzt. Wie James Nieh von der University of California in San Diego nun herausfand, können andere Bienen der Tänzerin jedoch »ins Wort fallen« und signalisieren, dass sie mit der beschriebenen Futterquelle schlechte Erfahrungen gemacht haben – etwa weil dort zu großer Andrang herrschte oder Feinde lauerten.

Um Einspruch zu erheben, presst das betreffende Insekt seinen Kopf in die Seite der schwänzelsnden Kollegin und vibriert rund eine sechstel Sekunde lang mit einer Frequenz von knapp 400 Hertz. Mehren sich diese negativen Kommentare, bricht die Tänzerin ihre Aufführung ab.

Bisher hatten Forscher fälschlich vermutet, die aufdringlichen Zuschauer würden



**Eine tanzende Biene (rosa und gelb markiert) bricht nach dem Vibrationssignal einer Stockgenossin (mit »S« auf dem Rücken) ihre Vorführung ab.**

um Kostproben der beschriebenen Nahrungsquelle betteln. Nieh konnte das Verhalten jedoch gezielt auslösen, indem er einzelne Arbeiterinnen an der Futterquelle mit Alarmpheromonen oder mechanischem Druck störte. Unter diesen Umständen, oder wenn sich viele Bienen um den Nektar drängten, stieg die Kritik an tanzenden Rückkehrerinnen.

Für die Erforschung von Schwarmintelligenz ist das Warnsystem der Bienen von großem Interesse, denn bisher sind nur wenige Beispiele einer negativen Rückmeldung unter Insektenstaaten bekannt. Zahlreiche Anwendungen in der Computertechnik und Robotik beruhen heute schon auf Prinzipien der Insektenkommunikation.

*Current Biology, Bd. 20, S. 310*

## BOTANIK

## Winterblume wärmt sich mit Hefe

Schon früh im Jahr zu blühen ist für Pflanzen von Vorteil, weil sie dann im Wettbewerb um bestäubende Insekten weniger Konkurrenz haben. Allerdings reifen Pollen in der Kälte schlecht, und auch die fliegenden Überträger sind dann kaum aktiv. Einen bisher unbekanntes Weg, um sich und ihre Gäste künstlich aufzuwärmen, geht offenbar die Stinkende Nieswurz (*Helleborus foetidus*): Sie kultiviert Hefepilze in ihrem Nektar, um durch Zuckergärung Wärme zu gewinnen.

Carlos Herrera und María Pozo von der Estación Biológica de Doñana in Sevilla

untersuchten Nieswurz, die bei rund sieben Grad Celsius im winterlichen Südspanien blühen. Temperaturmessungen ergaben, dass der Nektar der Blumen bis vier Grad wärmer war als die umgebende Luft. Außerdem stellten die Forscher fest, dass die Temperatur umso höher lag, je mehr Hefe eine Blüte enthielt. Für Hummeln, den zu dieser Jahreszeit wichtigsten Bestäubern, kann schon diese leichte Erwärmung entscheidend sein, da die Tiere ab sechs Grad zu fliegen beginnen und mit jedem weiteren Grad aktiver werden.

Viele Winterpflanzen heizen sich auf, indem sie mittels großer Blätter Sonnenwärme einfangen. Unterholzgewächse wie die Nieswurz können das jedoch nicht. Von wenigen Arten wie dem Indischen Lotos war bereits bekannt, dass sie deshalb per Stoffwechsel Wärme produzieren. Die Symbiose mit Hefe ist dagegen neu. Tatsächlich könnte sie nach Ansicht der Forscher aber weit verbreitet sein, weil die Mikropilze fast überall vorkommen.

*Proceedings of the Royal Society, Online-Vorabpublikation*



Stinkende Nieswurz mit Blütenknospen

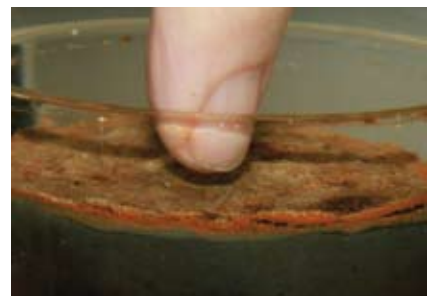
CARLOS W. HERRERA, ESTACIÓN BIOLÓGICA DE DOÑANA, SEVILLA

## BIOCHEMIE

## Bakterielles Stromnetz

Sedimente am Meeresgrund sind ein karger Lebensraum. An der Oberfläche gibt es Sauerstoff, doch dafür sind Nährstoffe oft rar. Tiefer im Boden existieren energie-reiche Substanzen; zu deren Verwertung fehlt aber der Sauerstoff. Offenbar haben einige Mikroben einen Ausweg aus diesem Dilemma gefunden: Wie bei einer Batterie koppeln sie weit entfernte Oxidations- und Reduktionsreaktionen über einen Stromkreis miteinander.

»Vereinfacht könnte man sagen, dass manche Bakterien im Untergrund für alle »essen«, während andere an der Oberfläche für alle »atmen«, erklärt Lars Peter Nielsen von der Universität Aarhus, der mit seinem Team den Vorgang entdeckte. Die Mikroben im sauerstofflosen Substrat ernähren sich von organischem Material



NILS RUSGAARD-PETERSEN, AARHUS UNIVERSITET, DÄNEMARK

**Die Bildung einer grünen, rostbraunen und grauen Schicht in Meeresbodenschlamm demonstriert, dass Bakterien über Wochen hinweg einen Stromkreis unterhalten haben.**

sowie Schwefelwasserstoff. Sie oxidieren beides und setzen dabei Elektronen frei. Diese fließen an die Oberfläche, wo andere Bakterien sie zur Reduktion von Sauerstoff nutzen. Bei Sauerstoffmangel stoppt auch die Reaktion in der Tiefe sofort, weshalb nur eine elektrische Verbindung und nicht etwa wesentlich langsamere Diffusionsvorgänge als Vermittler in Frage kommen.

Wie der Strom geleitet wird, ist noch unklar. Manche Bakterien bilden jedoch Fortsätze, die Elektronen transportieren. Eventuell stellen auch leitfähige Eisenminerale die Verbindung her. Die Ausmaße des Netzwerks sind ebenfalls unbekannt. Im Labor reichte es zwölf Millimeter weit – für Bakterien eine enorme Distanz.

*Nature, Bd. 463, S. 1071*

# Anschmiegsame Fasern

Nein, es handelt sich nicht um Würmer, die an einer Mottenkugel knabbern, auch wenn die gerillten, biegsamen Gebilde diesen Eindruck erwecken. Was die eingefärbte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt, ist vielmehr gänzlich unbelebt: Kunststofffasern aus Epoxidharz, die wie Haare auf einer Unterlage sitzen, schmiegen sich an ein zwei Mikrometer dickes Polystyrolkugelchen. Woher rührt der Kuscheleffekt? Beim Benetzen des Kunststoff-Vlieses mit Wasser, in dem die Kugelchen verteilt sind, stehen die Fasern zunächst senkrecht

ab. Sobald die Flüssigkeit verdunstet, kommt jedoch der Kapillareffekt ins Spiel, der auch nasses Haar strähnig macht: Restwasser zwischen Fasern und Kugelchen lässt sie über Adhäsionskräfte zusammenkleben. Beim jüngsten International Science and Engineering Challenge der Zeitschrift »Science« und der National Science Foundation der USA gewannen Joanna Aizenberg und ihre Mitarbeiter an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) mit dieser Aufnahme den ersten Preis in der Kategorie »Fotografie«.

ANTARKTIS  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Im Schutz des Ozonlochs

In einem interdisziplinären Bericht beleuchten über 100 Forscher die Folgen des Klimawandels für die Antarktis. Frappierende Erkenntnis: Bislang hat das Ozonloch den Kontinent am Südpol vor Erwärmung geschützt. Doch das sollte sich in den nächsten Jahrzehnten ändern.

Von Julia Eder

Vor fast drei Jahren war die arktische Nordwest-Passage erstmals eisfrei und schiffbar. Einige Klimaforscher vermuten, die Eiskappe am Nordpol könne schon in zwei Jahrzehnten vollständig geschmolzen sein. Am Südpol hat sich die Erderwärmung hingegen bislang nur wenig bemerkbar gemacht. Das dürfte sich jedoch bald ändern, wie über 100 Forscher in einem kürzlich veröffentlichten Antarktis-Bericht prognostizieren.

In dem Report sind die Ergebnisse aus unterschiedlichen Fachgebieten zur Entwicklung des Kontinents seit der Kreidezeit zusammengefasst. Der Schwerpunkt liegt auf den Veränderungen in den letzten 50 Jahren und auf Prognosen für die Zeit bis zum Ende des Jahrhunderts. Koordiniert wurde das Projekt vom Wissenschaftlichen Ausschuss für Antarktisforschung (SCAR).

Wohl am meisten überrascht an dem Bericht die Schlussfolgerung, dass das Ozonloch über der Antarktis bislang den größten Teil des Kontinents vor den Folgen der globalen Erwärmung bewahrt hat. Es handelt sich also um den seltenen Fall einer Austreibung des Teufels mit Beelzebub: Ein vom Menschen verursachter Umweltschaden hat einen anderen weit gehend neutralisiert.

Das Ozonloch erstreckt sich hauptsächlich über dem Bereich des polaren Wirbels. Dieser entsteht durch ein Tiefdruckgebiet, das sich über der vereisten, extrem kalten Antarktis bildet. Es saugt Luft von den subtropischen Hochdruckregionen an, die von der Corioliskraft auf Grund der Erddrehung abgelenkt und verwirbelt wird.

Durch den Mangel an Ozon über der Antarktis absorbiert die Stratosphäre dort weniger UV-Strahlung und kühlt weiter ab. Das lässt den Luftdruck tiefer sinken,

was den polaren Wirbel verstärkt. Dadurch haben die zirkumpolaren Westwinde auf der Südhalbkugel seit etwa 40 Jahren um bis zu 15 Prozent zugenommen. Indem diese Winde um die Antarktis kreisen, wirken sie als thermische Isolation gegenüber dem Rest der Erdoberfläche, die sich durch den vom Menschen verstärkten Treibhauseffekt erwärmt hat. Dadurch ist es in der Ostantarktis in den vergangenen Jahrzehnten nicht wärmer geworden; direkt am Südpol gab es sogar eine leichte Abkühlung.

Eine Ausnahme bildet allerdings die Antarktische Halbinsel, da sie aus der Wirbelzone herausragt und der relativ warmen Luft der Westwinde ausgesetzt ist, deren Geschwindigkeit sich in der Vergangenheit erhöht hat. An ihrer Spitze steigen die Temperaturen seit 50 Jahren um 0,53 Grad pro Jahrzehnt – fünfmal so schnell wie im globalen Durchschnitt.

Die Prognosen im Bericht beruhen auf der Annahme, dass sich der Gehalt der Atmosphäre an Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen im 21. Jahrhundert verdoppeln wird. Damit rechnet auch das IPCC, der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen, in seinem jüngsten Report. Tatsächlich könnte diese Annahme aber zu optimistisch sein, zumal die Bemühungen um eine weltweite verbindliche Reduktion der Kohlendioxidemissionen auf dem Klimagipfel in Kopenhagen vergangenen Dezember gescheitert sind.

Für die Antarktis stehen und fallen die Vorhersagen mit der Zukunft des

**Dem antarktischen Meereis konnte der Klimawandel bislang insgesamt wenig anhaben. Es hat seit 1976 sogar um etwa drei Prozent zugenommen. Regional ist es zwar teils stark geschrumpft. Dafür hat es sich an anderer Stelle jedoch ausgedehnt.**



ALLE FOTOS DIESES BEITRAGES: ALFRED-WEGENER-INSTITUT FÜR POLAR- UND MEERESFORSCHUNG



Ozonlochs. Nachdem der Ausstoß an Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) und anderen ozonschädigenden Verbindungen drastisch eingedämmt werden konnte, vergrößert es sich derzeit nicht mehr. Demnächst sollte es sogar anfangen, sich zu verkleinern, was den polaren Wirbel abschwächen wird.

Unter dieser Annahme prognostizieren die Forscher in ihrem Bericht bis 2100 eine Erwärmung der Antarktis um drei Grad. Das wäre der schnellste Temperaturanstieg, der dort seit 1000 Jahren stattgefunden hat. Besonders stark träfe er das hoch gelegene Inland der Ostantarktis, das sich nach Klimamodellen um 0,51 Grad pro Dekade erwärmen würde. Dennoch bliebe es dort noch so kühl, dass ein Schmelzen des Inlandeises nicht zu befürchten wäre.

Wärmer wird es nach den Vorhersagen der Forscher auch im Ozean. Der Antarktische Zirkumpolarstrom, welcher Pazifik, Atlantik und Indischen Ozean miteinander verbindet, hat sich in einer Tiefe von 300 bis 1000 Metern seit den 1980er Jahren schon um 0,09 Grad pro Jahrzehnt aufgeheizt, was den Durchschnittswert der Meere weltweit übertrifft. In diesem Jahrhundert wird die Temperatur dort noch schneller steigen, und zwar in allen Tiefenebenen. Nach Abschätzungen der Forscher dürfte sich das Wasser am

Grund des Südlichen Ozeans bis 2100 um 0,25 Grad und an der Oberseite des Antarktischen Zirkumpolarstroms um bis zu 1,5 Grad erwärmen.

Das aufgeheizte Wasser wird einen Teil des Schelfeises abschmelzen lassen. Das sind Eisplatten, die auf dem Meer schwimmen, aber noch an den Gletschern im Inland hängen. Stellenweise verkürzen sie sich schon jetzt um bis zu zehn Meter im Jahr. Verschwindet das Schelfeis, verlieren die Gletscher, die es speisen, ihren Hemmschuh. Sie können sich deshalb beschleunigen und mehr Eis zum Ozean hin abführen, wo es den Meeresspiegel erhöht.

### **Eisschmelze und Meeresspiegel**

Dieser Effekt zeigt sich schon heute im Bereich der Amundsensee, einem Randmeer des Südlichen Ozeans. In den letzten 50 Jahren hat sich dort – vermutlich durch beschleunigten Eisabfluss – die Mächtigkeit der Gletscher stark verringert; auch ihre Zahl ist zurückgegangen. In der Amundsensee schmelzen jährlich 50 bis 137 Gigatonnen Eis – so viel wie in ganz Grönland.

Beim Meereis, das aus gefrorenem Meerwasser besteht und nicht fest mit dem antarktischen Kontinent verbunden ist, bietet sich ein uneinheitliches Bild. Zwar ist es in der Bellingshausen- und

**An dieser Stelle am Rand der Antarktischen Halbinsel lag früher das Larsen-B-Schelfeis. Als Folge der globalen Erwärmung ist es 2002 zerbrochen und hat sich vollständig aufgelöst.**

Amundsensee westlich der Antarktischen Halbinsel seit Beginn genauer Messungen um fast sieben Prozent pro Jahrzehnt geschrumpft. Dafür hat es sich jedoch im südlich angrenzenden Rossmeer um 4,5 Prozent pro Dekade ausgedehnt. Man könnte also sagen, dass es nicht schmilzt, sondern wandert. Betrachtet man die gesamte Antarktis, hat es seit 1976 pro Dekade sogar um etwa ein Prozent zugenommen.

Rückgang oder Anwachsen des Meer- und Schelfeises wirkt sich beides nicht auf den Meeresspiegel aus. Damit dieser steigt, muss Inlandeis schmelzen. In der Westantarktis ist das tatsächlich der Fall. Das Ausmaß lässt sich aber nur sehr ungenau bestimmen. Nach heutigen Schätzungen schmilzt in der gesamten Antarktis netto so viel Inlandeis, dass der Meeresspiegel um 0,1 bis 0,22 Millimeter jährlich steigt. Sein gesamter Anstieg weltweit beträgt etwa 3 Millimeter pro Jahr. Nach Ansicht von Klimaexperten wird dieser Wert jedoch erheblich zunehmen. Allein der Beitrag vom schmel-



zenden Eis der Westantarktis könnte bis Ende des Jahrhunderts 2 Millimeter pro Jahr ausmachen.

Insgesamt erwarten die Forscher in dem genannten Bericht einen Anstieg des Meeresspiegels um 1,4 Meter bis 2100. Diese Vorhersage berücksichtigt den Umstand, dass sich die Eisschmelze über eine positive Rückkopplung selbst verstärkt. Eine weiße Eisfläche reflektiert das auftreffende Sonnenlicht fast vollständig. Flüssiges Wasser oder nackter Erdboden, die nach dem Schmelzen zurückbleiben, absorbieren es dagegen we-

**Die Kaiserpinguine gehören zu den potenziell bedrohten Tierarten in der Antarktis. Durch das großräumige Abschmelzen von Meereis würden ihr Lebensraum und auch ihre Nahrung schwinden.**

sentlich stärker und wandeln es in Wärme um, die wiederum das Abschmelzen beschleunigt.

Der prognostizierte Schwund der Eisfläche wird sich auch auf die Tierwelt auswirken. Insbesondere schrumpft der Lebensraum der Pinguine. Es ist zu befürchten, dass vor allem Kaiser- und Adeliepinguine in manchen Gebieten, wo ihnen das Eis oder der Schnee buchstäblich unter den Füßen wegschmilzt, aussterben werden.

Hinzu kommt Nahrungsmangel, unter dem außer Pinguinen weitere Tiere wie Wale oder Seehunde zu leiden haben. Sie leben vor allem von Krill, der sich wiederum von Eisalgen ernährt. Deren Lebensraum aber geht mit dem Schmelzen des Meereises verloren, das um bis zu 33 Prozent in diesem Jahrhundert schwinden könnte. Den Seeschmet-

terlingen, einer weiteren wichtigen Nahrungsquelle, dürfte zum Verhängnis werden, dass das Meer durch die vermehrte Aufnahme von Kohlendioxid aus der Luft versauert, was die Kalkschalen dieser marinen Schnecken ausdünn.

Beim Krill ist schon heute ein Schwund auf Grund des regional zurückgegangenen Meereises zu beobachten. 2004 stellten Forscher fest, dass der Bestand auf der atlantischen Seite der Antarktis in den letzten drei Jahrzehnten stellenweise um 80 Prozent abgenommen hat. Die kleinen Krebse werden zwar nicht völlig verschwinden, doch ihre Population dürfte sich auf niedrigem Niveau stabilisieren. Generell nehmen die Forscher an, dass sich alle Tiere, Mikroben, Pflanzen und Pilze in der Antarktis in gewissem Ausmaß an die steigenden Temperaturen anpassen können. Deshalb bleiben sie alles in allem eher optimistisch und glauben, dass wohl nur wenige Tiere bis 2100 wirklich aussterben werden.

**Julia Eder** ist freie Wissenschaftsjournalistin in Passau.

**MIKROSKOPIE** 🎧 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Erzwungenes Leuchten

Ein von der Laserphysik abgeschauter Trick ermöglicht eine neue Form von Mikroskopie für Zellbiologen und Biomediziner.

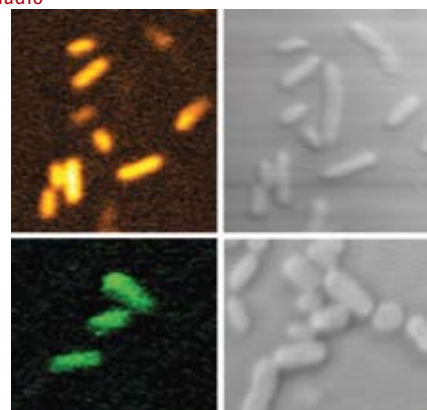
Von Stefan A. Maier

Aufnahmen von Labortieren, die in kräftigen Farben leuchten, sind inzwischen selbst in nichtwissenschaftlichen Zeitschriften zu bewundern. Was da grün, rot oder gelb erstrahlt, zeigt oft das Ergebnis eines Versuchs mit medizinischem Hintergrund. So wird etwa sichtbar gemacht, wie Moleküle eines neuen Medikaments einen bösartigen Tumor bekämpfen. Zweifellos gehört die Fluoreszenzmikroskopie zu den wichtigsten Errungenschaften der modernen Biomedizin. Davon zeugt auch die Verleihung des Chemie-Nobelpreises 2008 an die Pioniere dieses Gebiets (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 14).

Zum Einfärben dienen gewöhnlich Moleküle, die sich vom grün fluoreszierenden Protein (gfp) der Qualle *Aequo-*

*rea victoria* ableiten. Nun aber haben Sunney Xie und seine Arbeitskollegen von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) eine Möglichkeit gefunden, auf solche Farbstoffe ganz zu verzichten. Stattdessen bringen sie auch Substanzen, die normalerweise nicht leuchten, auf physikalischem Weg dazu, hell zu erstrahlen (*Nature*, Bd. 461, S. 1105). Das dürfte den Einsatzbereich der Fluoreszenzmikroskopie ganz erheblich erweitern.

Bei den leuchtschwachen Stoffen, die künstlich zum Aussenden von Licht veranlasst werden, handelt es sich keineswegs um Exoten, sondern um ganz gewöhnliche Moleküle wie etwa das bekannte Hämoglobin. Mit der neuen Methode kann man dessen räumliche Verteilung in einem Gewebe nun direkt sichtbar machen.



AUS: WEI MIN ET AL., NATURE, Bd. 461, S. 1105-1109

**Stimulierte Emission kann dazu dienen, eine Genmanipulation sichtbar zu machen. Hier wurde in Kolibakterien das Gen für das Protein gtCP oder cjBlue eingeschleust. Zellen, bei denen die Übertragung gelungen war, zeigten eine rote oder grüne Fluoreszenz, obwohl die Proteine normalerweise nicht leuchten.**

Wieso fluoresziert gfp so intensiv und Hämoglobin praktisch gar nicht? Beides sind ja Farbstoffe, die einfallendes Licht einer bestimmten Wellenlänge absorbieren. Dabei wird ein Elektron aus dem



Grundzustand auf ein höheres Energieniveau angehoben. Einen Teil der zugeführten Energie gibt das Molekül unmittelbar über Schwingungen ab, bevor es in einem angeregten Zustand vorübergehend zur Ruhe kommt (Bild rechts).

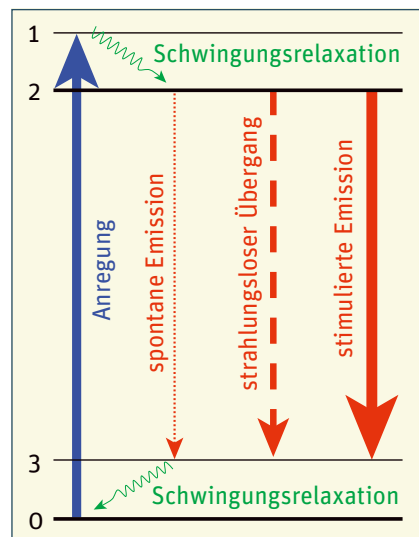
### Springen kontra Rutschen

Bei einem Fluoreszenzfarbstoff fällt das Elektron von dort spontan, also ohne äußere Einwirkung, in den Grundzustand zurück – genauer gesagt, in eine vibrierende Form dieses Zustands, deren Energie etwas höher ist. Bei diesem Zurückfallen wird ein Photon ausgesandt, und das Molekül leuchtet auf. Genau darin besteht die Fluoreszenz.

Weil ein Teil der Energie jeweils von Molekülschwingungen aufgezehrt wird, ist das emittierte Photon etwas energieärmer und damit langwelliger als das zuvor absorbierte. Zur Anregung von Fluoreszenzfarbstoffen dient deshalb meist ein blauer Laserstrahl, während die Lichtemission dann im grünen, gelben oder roten Bereich des Spektrums stattfindet – je nach dem Energieverlust durch das Vibrieren des Moleküls.

Doch wieso passiert beim Hämoglobin nicht dasselbe? Das hängt damit zusammen, dass die Rückkehr vom elektronisch angeregten Niveau in den Grundzustand auch ohne Aussendung eines Photons vonstattengehen kann – man spricht dann von einem strahlungslosen Übergang. Statt zu springen, sucht sich das Elektron in diesem Fall einen Schleichweg, auf dem es energetisch abwärtsrutschen kann. Ob es eine solche Rutschbahn gibt und wie gangbar sie ist, hängt von der Zusammensetzung des Moleküls und seinen Bindungsverhältnissen ab. Bei den meisten Farbstoffen – Biomoleküle eingeschlossen – dominiert leider der strahlungslose Übergang. Diese Substanzen, zu denen außer Hämoglobin viele Chromoproteine sowie Erb- moleküle und medizinische Wirkstoffe gehören, sind darum für die Fluoreszenzmikroskopie praktisch unsichtbar.

Um auch sie zum Leuchten zu bringen, machten sich die Forscher aus Harvard einen Vorgang zu Nutze, den schon Albert Einstein beschrieben hat und der auch die Grundlage des Lasers bildet: die stimulierte Emission. Man kann das



Ein angeregtes Elektron kann durch spontane Emission eines Lichtquants in den Grundzustand zurückkehren: Es fluoresziert. Meist erfolgt der Übergang jedoch strahlungslos. Beim Beleuchten mit einem intensiven Laser geeigneter Frequenz kommt es allerdings zu einer stimulierten Emission. Auf diese Weise lässt sich auch bei natürlicherweise nicht leuchtenden Molekülen eine Fluoreszenz hervorrufen.

## PIONIERGEIST KANN MAN NICHT BEZAHLEN, ABER BELOHNEN



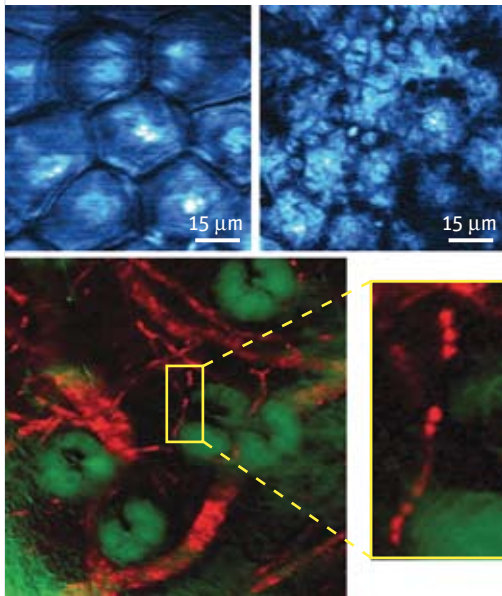
Wir gratulieren den Gewinnern des **Analytica Forschungspreis 2010**.

Prof. Petra S. Dittrich, ETH Zürich und Dr. Matthias Selbach, Max-Delbrück-Centrum, Berlin, erhielten die von Roche Diagnostics gestiftete und von der Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie (GBM) verliehene Auszeichnung für ihre Pionierleistungen zur Bioanalytik auf Mikrochips und dem Einfluss von mikroRNA auf Krebszellen. Der mit insgesamt 50.000 Euro dotierte Preis wurde am 23. März 2010 auf der analytica in München überreicht.

[www.roche.de/biotechnologie](http://www.roche.de/biotechnologie)



In Hautzellen ließ sich durch stimulierte blaue Emission die Verteilung eines Sensibilisators für die fotodynamische Therapie in einer Tiefe von drei (links oben) und 25 Mikrometern (rechts oben) darstellen. Ebenso gelang die Abbildung des feinen Adernetzes in einem Mäuseohr (unten), indem Hämoglobin dazu gebracht wurde, rot zu fluoreszieren. Talgdrüsen erscheinen grün.



AUS: WEI MIN ET AL., NATURE, 02.06.10, S. 1105-1109

Elektron nämlich von außerhalb dazu zwingen, per Sprung in den Grundzustand zurückzukehren, statt die Rutschbahn zu benutzen. Dazu muss nur ein zweiter Laserstrahl auf das Molekül treffen, dessen Photonen genau der Energiedifferenz zwischen den zwei beteiligten Niveaus entsprechen. Diese Photonen reißen dann gleichsam das Elektron mit sich nach unten, wobei es ein Lichtquant derselben Wellenlänge aussendet.

Je intensiver der zweite Laserstrahl ist, desto wahrscheinlicher findet eine solche stimulierte Emission statt. Sie kann daher selbst bei Molekülen dominieren, die im Normalfall den strahlungslosen Übergang bevorzugen. Der Laserstrahl wird dabei verstärkt. Diese Verstärkung lässt sich mit etwas zusätzlicher Elektronik feststellen. So gelingt es, auch einen dunklen Farbstoff sichtbar zu machen.

Soweit die Theorie. Doch wie sieht die Praxis aus? In ihren Experimenten beschossen die Forscher ihre nicht leuchtenden Farbstoffe mit zwei kurzen Laserpulsen. Der erste diente zur Anregung in die höheren Energiezustände. Nur etwa 0,3 milliardstel Sekunden später stimulierte der zweite dann die Aussendung von Photonen. Die Intensität

dieses Abregungspulses steigerten die Forscher so lange, bis sie Lichtverstärkung nachweisen konnten.

Auf diese Weise ließen sich in der Tat beeindruckende Bilder erzeugen, die zum Beispiel die Verteilung eines medizinischen Wirkstoffs in der Haut eines Mausohrs zeigen. Desgleichen gelang es, durch direkte An- und Abregung von Hämoglobin die Durchblutung von Gewebe darzustellen. Selbst das Ablesen von Genen in Bakterien konnten die Forscher sichtbar machen.

Um herkömmliche Fluoreszenzmikroskope, wie sie in allen Biolabors zu finden sind, auf die neue Methode zu erweitern, bedarf es nur zweier gepulster Laser in Verbindung mit etwas Elektronik. Die nötigen kurzen Pulsdauern lassen sich dank Fortschritten in der Lasertechnologie mittlerweile sogar mit einfach zu handhabenden Glasfaserlasern erzeugen. Xie und seine Kollegen glauben deshalb, dass ihre Methode schon bald Einzug in die Biomedizin finden und der Fluoreszenzmikroskopie ganz neue Horizonte eröffnen wird.

**Stefan A. Maier** ist Professor für Physik am Imperial College in London.

## INFORMATIK

☞ Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

# Spielen ohne Grenzen

Bedienungsteil ade! Neueste Konsolen für Videospiele sollen natürliche Gesten verstehen.

Von Susan Kuchinkas

Nintendos Spielkonsole Wii löste Ende 2006 eine kleine Revolution auf dem Gamesektor aus. In der Hand gehaltene Bedienungsteile – so genannte Wiimotes – registrierten die natürlichen Bewegungen des Spielers und übermittelten sie an die Steuereinheit. Erstmals konnte man so fast wie in echt Tennis, Bowling oder Golf am Fernseher spielen.

Nun hofft Microsoft seinen Konkurrenten auszusteichen, indem es auch das Bedienungsteil noch abschafft. Im Januar präsentierte der Softwareriese Details des »Project Natal«, das Benutzer der Xbox 360 in die Lage versetzen soll, Figuren auf dem Bildschirm mit gewöhnlichen Gesten zu steuern. Die Spieler

können dann mit vollem Körpereinsatz einen digitalen Fußball kicken oder einen Boxkampf gegen einen virtuellen Gegner austragen, indem sie in ihrem Wohnzimmer die entsprechenden Bewegungen ausführen.

Obwohl Microsoft seinen ehrgeizigen Plan für die nächste Version der Xbox schon im Juni 2009 bekannt gab, ist der Erscheinungstermin weiterhin offen. Viele Beobachter rechnen allerdings damit, dass »Natal« noch vor Ende des Jahres herauskommt. Es wird neben einer Videokamera, die auch Feinheiten wie den Gesichtsausdruck erfassen kann, und einem Mikrofon, das die Identifizierung und Ortung individueller Stimmen erlaubt, vor allem einen Infrarotsensor zur Tiefenwahrnehmung enthalten.

Ein Videospiel so zu programmieren, dass es die fast unbegrenzten möglichen Positionen der Gelenke im menschlichen Körper erkennt, ist ein beängstigend komplexes Problem. »Da jede einzelne Bewegung als Eingabe fungiert, müsste man eine schier unendliche Anzahl von Aktionen im Programm berücksichtigen«, erklärt Alex Kipman, der für die Innovationen bei der Xbox 360 zuständig ist.

Stattdessen entschloss sich Microsoft dazu, der Steuereinheit beizubringen, Gesten auf die gleiche Art in Echtzeit zu erkennen, wie das ein Mensch auch tut: durch Einbeziehen der Erfahrung. Jamie Shotton von Microsoft Research Cambridge (England) hat dafür einen Lernalgorithmus entworfen. Er erkennt auch Posen und stellt sie auf dem Bildschirm mit 30 Einzelbildern pro Sekunde dar, was ausreicht, um die Bewegungen flüssig erscheinen zu lassen. Natürlich wird eine Xbox mit Natal nicht wie analoge herkömmliche Systeme einen spiegelbestückten Lycra-Anzug erfordern.

Zum Trainieren des Systems musste Microsoft riesige Mengen biometrischer

Daten sammeln. Überall in der Welt ließ das Unternehmen laut Kipman grundlegende Bewegungen wie das Drehen eines Steuerrads oder das Fangen eines Balls auf Video bannen. Aus diesem Material wählten Forscher später mühsam charakteristische Einzelbilder und markierten darauf die Position jedes einzelnen Gelenks. Um Daten über akrobatischere Verrenkungen zu erhalten, gingen Kipman und sein Team auch in ein Hollywoodstudio, das auf das Erfassen von Bewegungen spezialisiert ist.

### Steuerung durch Gesten

»Während des Trainings müssen wir den Algorithmus mit zweierlei füttern: realistisch aussehenden synthetischen Bildern und für jedes Pixel den Körperteil, zu dem es gehört«, erklärt Shotton. Der Algorithmus verarbeitet die Daten und ändert die Werte einzelner Parameter, um das Ergebnis zu optimieren.

Damit die Datenmenge handhabbar bleibt, hatte das Team herauszufinden, welche Größen für das Training am wichtigsten sind. Zum Beispiel muss das System nicht die Umrisse einer Person vollständig erfassen, sondern nur die Abstände zwischen ihren Gelenken. Nach dem Abspecken der Daten auf das Nötigste bildeten die Forscher jede einzelne Pose auf zwölf Modelle ab, die verschiedene Altersstufen, Geschlechter und Konstitutionen repräsentierten.

Das Endergebnis war eine riesige Datenbank voller Einzelbilder von Personen mit markierten Gelenken. 20 Prozent der Daten dienten dazu, dem elektronischen Gehirn beizubringen, Bewegungen zu erkennen. Mit dem Rest soll die Genauigkeit von Natal getestet werden. Je besser das System Gesten erkennt, desto mehr Spaß wird es machen, damit zu spielen.

Nicht nur Microsoft arbeitet an Schnittstellen für Gesten. Im Mai 2009 stellte Sony den Prototyp einer Einheit vor, die mit Stereokamera und Tiefensensoren bestückt ist und angeblich dazu taugt, alles vom Cursor über einen Avatar bis hin zum Roboter zu steuern. Die Firma Canesta, die Hardware für sehende Computer herstellt, hat ein System vorgeführt, das allen, die notorisch vor der Glotze hocken, die Möglichkeit eröffnet, mit einer bloßen Handbewegung ihr Lieblingsgerät zu bedienen. Gemeinsam mit dem Mitbewerber GestureTek und dem Elektronikhersteller

**Microsofts Antwort auf Wii mit der Bezeichnung Natal reagiert unmittelbar auf die Gesten des Spielers, der hier ein Bombardement mit Bällen abwehren muss.**

Hitachi will das Unternehmen auch eine Steuerung von Computerprogrammen mit Gesten entwickeln.

Nach Ansicht von Hiroshi Ishii, der die Tangible Media Group am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge leitet, wird das Bedienteil aber wohl nicht ganz von der Bildfläche verschwinden. »Ich glaube fest daran, dass die Leute etwas Greifbares in der Hand halten wollen«, sagt der Computervissenschaftler. Die Wiimotes bieten dabei auch ein haptisches Feedback wie Vibrationen und einen Trägheitswiderstand, der die Aktion realistischer erscheinen lässt. Dagegen werden Spieler laut Ishii zum Beispiel bei dem fußballähnlichen Ricochet, das als Demoversion für Natal vorgeführt wurde, das Gefühl der Verbindung mit einem physikalischen Objekt vermissen, das ein Bedienteil bietet.

Peter Molyneux, Kreativdirektor der Microsoft Game Studios Europe, sieht



MICROSOFT

der neuen Generation von Computer Entertainment jedoch erwartungsvoll entgegen. Schließlich eröffnet der Verzicht auf das Bedienteil mehr schöpferische Freiheit und Vielfalt. »Natal zwingt mich als Designer, es als Bindeglied zwischen dem Spieler und einem Stück Technik zu betrachten«, sagt Molyneux. »Wir versuchen etwas zu kreieren, das sich einfach lebensecht anfühlt.«

**Susan Kuchinskas** ist Technikjournalistin im kalifornischen Berkeley.

**MEDIZIN** 🎧 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Wird multiple Sklerose epigenetisch vererbt?

Die Hinweise verdichten sich, dass die Wechselwirkung zwischen Lebensbedingungen und genetischen Faktoren ausschlaggebend für das Risiko ist, an diesem tückischen Leiden zu erkranken.

Von Michael Groß

**M**ultiple Sklerose (MS) ist eine Autoimmunkrankheit, bei der das eigene Immunsystem das Isolationsmaterial der Nervenbahnen zerstört. Erste Anzeichen treten meist im frühen bis mittleren Erwachsenenalter auf. Dann bilden sich schubweise Entzündungsherde im Nervensystem, die zum Ausfall von Nervenverbindungen führen. Dadurch gehen Bewegungs- und Wahrnehmungsfähigkeiten verloren. Bei mildem Krankheitsverlauf können die Folgen des Schubs wieder abklingen. In

schweren Fällen kommt es zu immer stärkeren Behinderungen und nach Jahren bis Jahrzehnten zum Tod.

Die Suche nach der Ursache von MS ergab über Jahrzehnte scheinbar widersprüchliche Ergebnisse. Einerseits existiert offenbar eine erbliche Komponente: Wer mit einem MS-Patienten verwandt ist, hat ein höheres Erkrankungsrisiko als der Bevölkerungsdurchschnitt. Doch selbst in Familien mit vielen betroffenen Mitgliedern verschwindet das Leiden nach einigen Generationen wieder, was mit normaler Vererbung nach den mendelschen Regeln nicht zu erklären ist.

## Springers Einwürfe

### Leben in immer gleichen Bahnen

Wir Menschen verhalten uns hochgradig vorhersehbar.

**Mein erstes Auto war ein gebrauchter Fiat 600.** Heiße, endlich konnte ich fahren, wohin ich wollte. Aufgeregt brach ich auf zur Jungfernfahrt südwärts aus der Stadt. Kuppeln und Schalten, Gasgeben und Bremsen beanspruchten meine ganze Aufmerksamkeit – bis mich eine Polizeikelle an den Straßenrand winkte. Stumm wies der Schutzmann auf den hinter uns endlos vorbeiratternden Güterzug. Ich hatte einen sowohl unbeschränkten als auch unbemerkten Bahnübergang gequert.

Mit der Zeit wurde aus mir ein routinierter Verkehrsteilnehmer, regelbewusst und staugeplagt, der selbstverständlich das Privileg des Autonutzers genoss: freie Fahrt für freie Bürger. Irgendwann schaffte ich zwar den eigenen fahrbaren Untersatz ab, stieg um auf Carsharing und Bahn – aber immer noch im Bewusstsein, das Privileg absoluter Freizügigkeit in der Wahl meiner Fahrziele zu genießen. Doch jetzt kommt Albert-László Barabási.

Dieser Erforscher komplexer Netzwerke an der Northeastern University in Boston zeigt sich selbst ganz überrascht vom Ergebnis seiner jüngsten Mobilitätsstudie (*Science*, Bd. 327, S. 1018). Mit seinem Team verfolgte er drei Monate lang die Bewegungen von 50 000 fleißigen Handynutzern anhand der unterwegs kontaktierten Mobilfunkmasten. Aus den Daten berechnete er die Entropie – quasi die Unordnung – der Bewegungsmuster: je größer ihr Wert, desto ungeordneter, spontaner, weniger vorhersagbar das Mobilitätsverhalten. Entropie als direktes Maß der Freizügigkeit.

Barabási riesiges Testensemble erfasste Arbeitstage und Wochenenden, Junge und Alte, Vielflieger und Stubenhocker. Darum war er überhaupt nicht auf das Ergebnis vorbereitet. Während die Längen der individuell zurückgelegten Strecken breit streuten, bildete die Entropie ein scharfes Maximum bei einem so kleinen Wert, dass daraus eine fast vollständige Vorhersagbarkeit des als nächstes berührten Mobilfunknotens folgte. Mit einem entsprechend ausgeheckten Algorithmus, so Barabási, ließe sich aus dem täglichen Mobilitätsmuster eines beliebigen Menschen mit 93-prozentiger Wahrscheinlichkeit sein künftiges Verhalten vorhersagen – ob er nun beruflich jeden Tag hunderte Kilometer zurücklegt oder als Heimarbeiter bloß um die Ecke geht, um Brötchen zu holen.

**Barabási zieht daraus sehr optimistische Schlüsse:** Verkehrs- und Stadtplaner hätten viel bessere Chancen für solide Prognosen als gedacht, und die Ausbreitung ansteckender Krankheiten sollte sich mit passenden Algorithmen sehr gut modellieren lassen. Er räumt aber ein, dass sein Befund auch eine arge Enttäuschung bereithält: Unsere vermeintliche Freizügigkeit ist, zumindest wenn wir sie statistisch betrachten, eine große – genauer gesagt 93-prozentige – Illusion.

Während mir die angebliche Gefährdung meines freien Willens durch die moderne Hirnforschung gar nicht zu schaffen macht, sehe ich ihn im Lichte von Barabási Arbeit wirklich eingeschränkt. Wenn ich mein Leben – und das meiner Bekannten – in den letzten Jahren bedenke, ist es doch in sehr geordneten Bahnen verlaufen. Wann habe ich mich zuletzt spontan in ein Auto oder in einen Zug gesetzt und bin ins Blaue aufgebrochen?

Aber könnte ich so den Determinanten meines Lebens entkommen? Eine literarische Parallele zu Barabási Befund hat der klassische Krimiautor Dashiell Hammett mit der Anekdote des Familienvaters vorgelegt, der abends mit den Worten »Ich geh' nur Zigaretten holen« das Haus verlässt und nie zurückkehrt. Als er Jahre später in einer anderen Stadt entdeckt wird, ist er wieder verheiratet, hat Kinder und geht dem alten Beruf nach.



Michael Springer

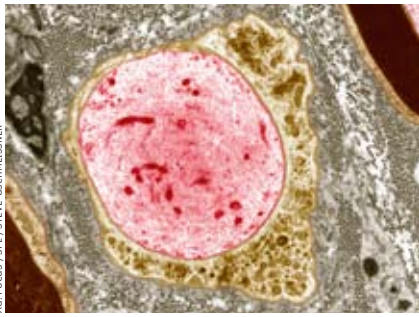
Andererseits deutet die geografische Verteilung der Krankheitsfälle auf Umwelteinflüsse hin. In höheren Breiten tritt MS viel öfter auf als in Äquatornähe. Selbst innerhalb Frankreichs ließ sich ein deutliches Nord-Süd-Gefälle nachweisen. Vergleiche zwischen den betroffenen nördlichen Ländern lieferten weitere Hinweise. Wo man wie in Lappland viel Fischöl konsumiert, ist das Risiko deutlich geringer als nach dem Breitengrad zu erwarten. In Schottland hingegen, dessen Bewohner sich weniger gesund ernähren, hat es weltweit den höchsten Wert.

Dass sowohl sonnigere Gefilde als auch Fischöl die Krankheit verhindern können, deutet auf einen Mangel an Vitamin D als Mitverursacher hin. Dieses Vitamin kann der Mensch in der Haut selbst herstellen, wenn er genügend Sonne abbekommt, andernfalls muss man es mit der Nahrung aufnehmen. Fischöl enthält besonders viel davon.

Wie weitere epidemiologische Studien ergaben, spielt auch der Geburtstag eine Rolle. Wer zum Beispiel in England im Frühling zur Welt kommt, hat ein deutlich höheres MS-Risiko als ein Herbstbaby. Astrologen würden wohl den Einfluss der Sterne bemühen, doch der ließ sich durch eine simple Gegenprobe widerlegen: Analoge Untersuchungen auf der Südhalfkugel ergaben denselben Zeitverlauf, aber um sechs Monate verschoben.

Es liegt also nicht am Kalendermonat oder Sternbild, sondern an der Jahreszeit der Geburt, ergo an der Sonnenscheindauer während der Schwangerschaft. Wer die mittleren Monate der Embryonalentwicklung in düsteren Wintermonaten durchlebt hat, erkrankt eher an MS. Das erscheint insofern logisch, als sich in dieser Phase das Immunsystem entwickelt und lernt, zwischen selbst und nicht selbst zu unterscheiden. Schließlich spielt auch die Sonnenscheindauer während der Kindheit eine Rolle. Menschen, die in jungen Jahren in ein Land mit einer höheren oder geringeren MS-Häufigkeit ziehen, nähern sich dem MS-Risiko ihrer neuen Heimat an. Bei erwachsenen Migranten hat der Ortswechsel hingegen keinen Einfluss.

Doch wie passt diese entwicklungsbiologische Erklärung mit der merkwürdigen Vererbung des MS-Risikos zusammen? George Ebers, der schon seit mehr als zwei Jahrzehnten über die Erkrankung forscht, wöhnt sich jetzt vor der Auflösung des Rätsels. Der Oxford Neurolo-



AG. FODUS / ASP / STEVE SCHREISSNER

Die Nervenfasern, die auf dieser angefärbten elektronenmikroskopischen Aufnahme im Querschnitt zu sehen ist (rot), hat ihre Myelinhülle verloren. Grund sind Attacken des Immunsystems, das sich bei multipler Sklerose gegen körpereigenes Gewebe richtet. Übrig geblieben ist nur die Schwann-Zelle (braun), die das Myelin herstellt.

gieprofessor rief 1986 in Kanada eine groß angelegte epidemiologische Studie ins Leben, die viel zu den erwähnten Befunden beigetragen hat. Seit seinem Wechsel nach England in den 1990er Jahren führt er diese Studie als internationales Großprojekt weiter und verknüpft sie zunehmend mit genetischen und molekularbiologischen Untersuchungen.

### Seltene Geschlechtsasymmetrien

Dabei zeigte sich kürzlich, dass der Jahresszeiteneffekt auch für MS-Patienten mit der Genvariante HLA-DRB1\*15 gilt, die als erblicher MS-Risikofaktor identifiziert wurde (*Neurology* 2009, Bd. 73, S. 2107). Vitamin-D-Mangel in der Embryonalentwicklung und genetische Prädisposition sind also nicht getrennte Wege, die zu MS führen können, sondern wirken offenbar zusammen.

HLA-DRB1 gehört wie alle anderen Gene, die bedeutende Risikofaktoren für MS darstellen, zum Haupthistokompatibilitätskomplex (MHC für englisch *major histocompatibility complex*). Der umfasst eine Gruppe von Erbfaktoren, die eine wichtige Rolle beim Erkennen körpereigener Gewebe durch das Immunsystem spielen. Die Steuerung der Aktivität von HLA-DRB1 in der Embryonalentwicklung hängt, so vermuten Ebers und Mitarbeiter, davon ab, wie viel Vitamin D vorhanden ist. Ein Mangel daran in dieser entscheidenden Entwicklungsphase verhindert die richtige Schulung des Immunsystems.

Die genaue Art der Wechselwirkung zwischen Vitamin D und HLA-DRB1 ist allerdings noch unklar. Nach Überzeugung von Ebers liegt die ausschlaggebende Verbindung in den epigenetischen Markierungen der MHC-Gene. Das sind Signalmoleküle, welche die Zelle an bestimmte Basen der DNA anheftet. Diese Markierungen, die meist aus Methylgruppen bestehen, dienen quasi als Gebrauchsanweisung zum Erbgut. Sie bein-

halten Hinweise, wann ein bestimmtes Gen zu aktivieren ist und wann nicht.

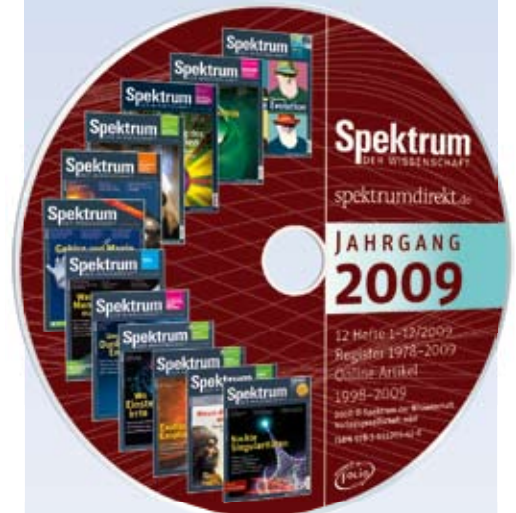
Epigenetische Marker können weitervererbt werden, bleiben aber nicht ewig erhalten. Laut der kanadischen Großstudie stirbt MS sogar in Familien mit zahlreichen Fällen in der Regel nach zwei oder drei Generationen aus – obwohl die Krankheit meist so spät auftritt, dass sie die Fortpflanzungsfähigkeit der Betroffenen nicht beeinträchtigt. Das deutet klar auf einen epigenetischen Faktor hin.

Ebers und Kollegen ermittelten überdies eigenartige Geschlechtsasymmetrien. Erkrankten zum Beispiel eine Tante und ihre Nichte an MS, dann ist das sie verbindende Familienmitglied sehr viel häufiger die Mutter als der Vater der Nichte. Bei gemischten indianisch-europäischen Paaren mit einem MS-Nachkommen liegt das Risiko eines erneuten Auftretens der Erkrankung in der nächsten Generation deutlich höher, wenn der europäische Elternteil die Mutter ist (*Neurology*, Bd. 73, S. 602). Außerdem hat bei den beobachteten MS-Fällen in den vergangenen Jahren der Anteil der Frauen stark zugenommen (*Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, Bd. 81, S. 31).

All diese Merkwürdigkeiten wären mit mendelscher Genetik nicht erklärbar. Ins Gesamtbild einer von Umweltfaktoren beeinflussten epigenetischen Steuerung könnten sie jedoch passen. Noch weiß man leider zu wenig über diese zweite Ebene der Vererbung. Bei der inzwischen schon fast zur Routinearbeit gewordenen Sequenzierung menschlicher Genome fallen epigenetische Marker bisher unter den Tisch. Nur in einem einzigen Genom wurden sie mit erfasst (*Nature*, Bd. 462, S. 315). Erst die nächste Generation von Sequenzierautomaten verspricht, diese Information mit der Genomsequenz zusammen auszulesen.

**Michael Groß** ist promovierter Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

# GEBALLTES WISSEN ...



... bietet die Jahrgangs-CD-ROM 2009 von **Spektrum der Wissenschaft**. Sie beinhaltet alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln.

**spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows (ausgenommen Windows 7). Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-941205-42-0

[www.spektrum.de/sammeln](http://www.spektrum.de/sammeln)

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

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT Wissenschaft aus erster Hand



# PHOENIX auf dem Mars

ILLUSTRATION: NASA, JPL / CALTECH / UNIVERSITY OF ARIZONA

Die jüngste Marslandemission gilt als beendet – doch die Auswertung der Daten des Mars Phoenix ist in vollem Gange und noch für manche Überraschung gut. Auch neue Fragen haben sich ergeben, und die Folge-missionen zu ihrer Beantwortung sind schon in Vorbereitung.

Von Walter Goetz

**E**s waren gerade einmal 22 Fotos, die die US-Sonde Mariner 4 im Jahr 1965 vom Mars zur Erde funkte. Doch mit den Aufnahmen aus einer Nähe von bis zu 10000 Kilometern hatte eine neue Epoche der Erforschung des Roten Planeten begonnen, der wie die Erde polare Eiskappen, Wolken am Himmel und jahreszeitliche Wetterzyklen besitzt und auf dem wir vertraute geologische Strukturen wie Vulkane und Canyons vorfinden.

Andererseits ist er – zumindest heute – eine unwirtliche Welt. Doch war dies immer so? Existierte einst vielleicht flüssiges Wasser auf dem Mars, war der Planet sogar feucht und warm? Falls ja, wie kam es zu den anschließen-

den Klimaveränderungen? Haben sich auf dem Mars je Lebensformen entwickelt? Und sollte dies der Fall sein: Ähneln sie terrestrischen Lebensformen und können wir sie als solche an der Oberfläche nachweisen? Diese Fragen beflügeln die Erforschung unseres Nachbarplaneten schon seit Mitte der 1960er Jahre.

Bislang allerdings ist die Geschichte der Marsmissionen von wechselhaftem Glück geprägt. Mitte der 1970er Jahre landeten Viking 1 und Viking 2 als erste Raumsonden funktionstüchtig auf der Oberfläche des Planeten. Von ihnen stammen auch die ersten Farbaufnahmen des Roten Planeten, und sie sendeten viel länger als erwartet, bis 1982 beziehungsweise 1980, Daten zur Erde. Doch ihre Suche nach mikroskopischen Lebensformen im Marsboden lieferte widersprüchliche Resultate und

**Die erfolgreiche Landung auf einem fremden Planeten ist auch heute noch keineswegs selbstverständlich. Doch dem Mars Phoenix (Illustration) gelang sie vor zwei Jahren. Anschließend untersuchte er mehrere Monate lang die Chemie des Marsbodens, Funde von Wassereis und das Wetter in den nordpolaren Regionen.**

ist – nach heutigem Stand – erfolglos geblieben. Ein voller Erfolg hingegen wurde, nachdem 1993 ein Mars-Orbiter gescheitert war, der 1997 in eine Umlaufbahn eingeschwenkte Mars Global Surveyor, dessen letzte Funksignale uns im Oktober 2006 erreichten. Ebenfalls im Jahr 1997 landeten Mars Pathfinder und sein Rover Sojourner sicher auf der Oberfläche des Planeten.

1999 jedoch gingen sowohl der Mars Climate Orbiter als auch der Mars Polar Lander verloren, und im Jahr 2000 wurde die Entwicklung des ursprünglich als Kombination aus Orbiter, Lander und Rover geplanten Mars-Surveyor-Programms gestoppt. Doch immerhin fand der Orbiter neue Verwendung: Unter dem Namen Mars Odyssey startete er 2001 (und diente später als Relaisstation für die 2004 gelandeten Zwillingssrover Spirit und Opportunity). 2003 feierte die europäische Weltraumbehörde ESA auch das erfolgreiche Eintreffen des Orbiters Mars Express, lediglich der Lander Beagle blieb verschollen. 2006 schließlich erreichte der Mars Reconnaissance Orbiter die Umlaufbahn um unseren Nachbarplaneten und schießt bis heute Bilder mit höchster Auflösung.

Das jüngste Projekt ist indessen Mars Phoenix. Nachdem im Jahr 2000 Katzenjammer geherrscht hatte, weil die noch unerforschten arktischen Regionen des Mars wieder außer Reichweite gerückt waren, führte Mars Odyssey die Wende herbei. 2002 entdeckte die Sonde ebendort dicht unter der Oberfläche große Mengen an Wasserstoff (siehe »Gefrorener Ozean unter dem Marsboden«, SdW 9/2002, S. 12). Forscher interpretierten die weniger als einen Meter tief gelegenen Reservoirs als Wassereis, das die lange gesuchten organischen Substanzen und damit Hinweise auf gegenwärtiges oder früheres Leben enthalten könnte.

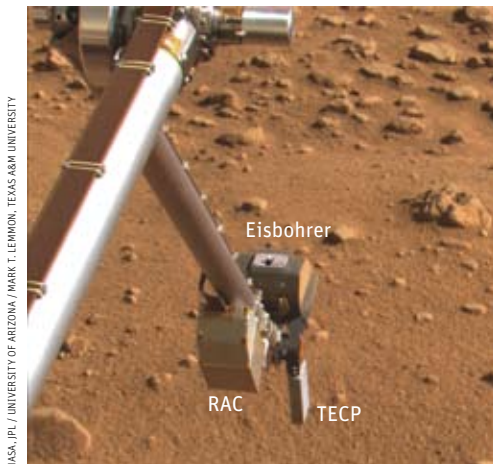
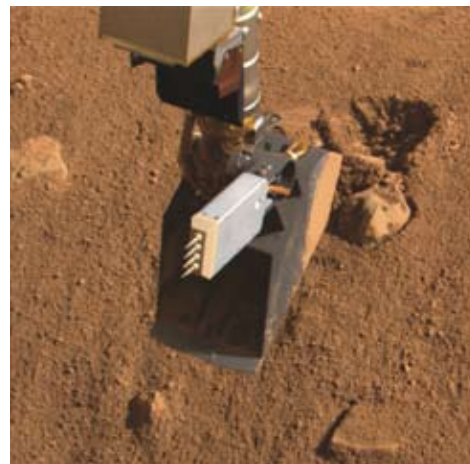
Erneut diente das Mars-Surveyor-Vorhaben als Ausgangsbasis. Sein Orbiter war im Odyssey-Projekt aufgegangen, nun diente sein Lander dem Team um Peter H. Smith von der University of Arizona in Tucson als Grundlage, um die Mission Mars Phoenix gleichsam

aus der Asche ihrer Vorgänger auferstehen zu lassen: Am 4. August 2007 startete der Phoenix, am 25. Mai des Folgejahres landete er auf dem Mars.

Seine Vor-Ort-Mission scheint zwar längst beendet. Am 2. November 2008 hörte die Bodenstation zum letzten Mal von ihm – die Sonde lieferte wohl nicht mehr genug Energie –, und die im Januar 2010 aufgenommenen Versuche, ihn nach dem Marswinter wieder aufzuwecken, erwiesen sich als vergeblich. Doch mit der Auswertung der Daten sind die Forscher bis heute beschäftigt. Phoenix lieferte optische Aufnahmen, detaillierte Analysen von Bodenproben und selbst Wetterberichte – zahllose Informationen, die nun nach und nach zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden.

Mit an Bord waren gleich mehrere abbildende Systeme: der Stereo Surface Imager (SSI) mit einer Auflösung von bis zu einem Millimeter pro Pixel, die Robotic Arm Camera (RAC) mit bis zu 24 Mikrometern pro Pixel, ein optisches Mikroskop (vier Mikrometer pro Pixel) und schließlich ein Rasterkraftmikroskop, dessen Auflösung 0,1 Mikrometer pro Pixel erreichte. Gemeinsam mit Kollegen der University of Arizona hat unsere Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung sowohl die Roboterarmkamera RAC als auch die Fokalebene-Baugruppen des optischen Mikroskops beigesteuert.

Darüber hinaus war der Lander mit dem nasschemischen WCL-Labor (Wet Chemistry Laboratory) ausgestattet. In vier separaten, je einmal nutzbaren Zellen ließen sich Bodenproben mit flüssigem Wasser vermischen. Ionenselektive Elektroden untersuchten die erzeugte Lösung und lieferten Informationen über wasserlösliche Salze und andere Bestandteile. Weitere Proben wurden in einem Thermal and Evolved Gas Analyzer (TEGA) auf bis zu 1000 Grad Celsius erhitzt. Die dabei



## In Kürze

► Mars Phoenix gilt als **extrem erfolgreiche Mission:**

Erstmals hat eine Sonde geochemische und meteorologische Daten von einem arktischen Landeplatz auf dem Mars geliefert.

► Anfang 2010 wurde versucht, das Gefährt **nach dem Marswinter wieder »aufzuwecken«** – vergeblich.

Gleichwohl ist die Datenlage über Wetter, Bodenbeschaffenheit und Wasservorkommen besser als je zuvor.

► Gleichzeitig sind neue Fragen aufgetaucht. Antworten sollen **kommende Missionen wie Curiosity und ExoMars** liefern. Nach 2020 werden dann erste Rückkehrkapseln Proben zur Erde transportieren.

**Die Schaufel am ausgefahrenen Roboterarm auf dem linken Foto dient zur Aufnahme von Bodenproben. Rechts ist auch der Eisbohrer auf der Schaufelrückseite zu sehen. Die Kamera RAC erlaubt einen Blick in die Schaufel und auf die Bodenprobe, während die Thermal and Electrical Conductivity Probe (TECP) die Leitfähigkeit der Bodenprobe untersucht.**

**DER LANDEPLATZ**

Der Phoenix ging an einem Ort nieder, der 500 Kilometer nördlich der Grenze der vulkanischen Tharsis-Region und 1800 Kilometer von deren gigantischem Schildvulkan Alba Patera entfernt liegt. Weitere rund 2000 Kilometer nördlich befinden sich die Eiskappe des Nordpols und die zirkumpolaren Dünen. Zu den Kriterien bei der Auswahl des Landeplatzes zählte die hohe Wahrscheinlichkeit, dort auf Wassereis zu stoßen; außerdem durfte das Gelände nicht zu steil abfallen und musste vergleichsweise frei von Geröll sein.

frei werdenden Gase ließen sich massenspektroskopisch identifizieren, und die Temperaturen, bei denen sie entstanden, grenzten die Identität ihrer (möglicherweise organischen) Ursprungsubstanzen ein. Zudem konnten endotherme Phasenübergänge erkannt werden, solche also, bei denen die (kontrollierte) Zufuhr von Wärmeenergie nicht zu entsprechend höheren Temperaturen führte.

Schließlich verfügte der Lander über einen 2,3 Meter langen Roboterarm mit einer Schaufel, an deren Rückseite auch ein Eisbohrer installiert war. Damit ließen sich gezielt Bodenproben aufnehmen und an verschiedene Systeme weiterreichen. So zeigte die am Arm befestigte RAC-Kamera aufgenommene Bodenproben in hoher Auflösung, und ein Sensor mit vier Nadeln maß ihre elektrische und thermische Leitfähigkeit. Weitere Sensoren erfassten den Druck des atmosphärischen Wasserdampfs und die relative Luftfeuchte.

Für die »Wetterberichte« war ein von der kanadischen Raumfahrtbehörde entwickelter meteorologischer Mast zuständig. Sein wichtigstes Instrument war ein LIDAR-Laser (Light Detection and Ranging), der die vertikale Struktur der Atmosphäre untersuchte, in-

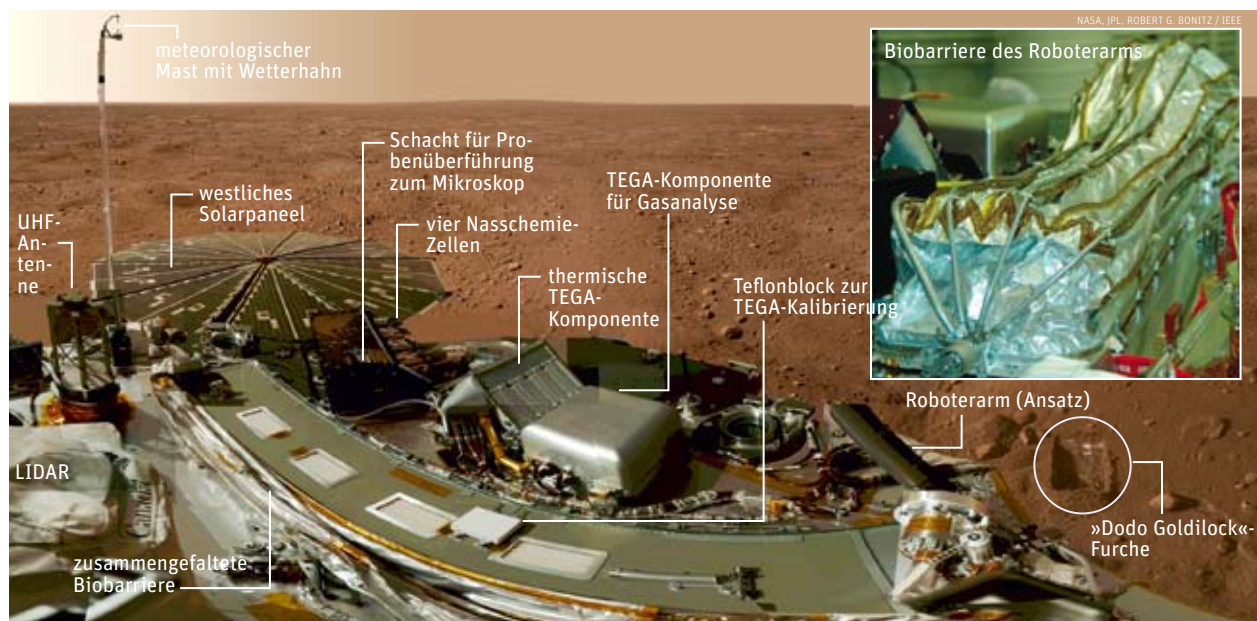
dem er die Laufzeit der Strahlung maß, die an Staub- und Eispartikeln in der Luft zurückgestreut wurde. In 25, 50 und 100 Zentimeter Höhe über dem Lander waren außerdem Druck- und Temperatursensoren am Mast montiert, und an seiner Spitze befand sich ein in Dänemark entwickeltes Windmessgerät, der »Wetterhahn«. Komplementäre Daten über atmosphärischen Staub und Wasserdampf lieferte der SSI, der die Sonnenscheibe durch optische und nahinfrarote Filter fotografierte.

Das erste Bild, das die Kamera nach der Landung schoss, zeigt eine von den Landedüsen frei gelegte helle, ebene Oberfläche, die »Holy Cow«. Die Eisfunde darin zeigen, dass sich das 2002 von der Odyssey entdeckte Eis tatsächlich nur wenige Zentimeter unter der Oberfläche befindet. Auf den meisten Bildern ist allerdings nicht reines Wassereis, sondern stark eishaltiger Regolith (eishaltiges Boden- und Gesteinsmaterial) zu sehen. In einem weiteren eishaltigen Bodenbereich in direkter Nachbarschaft, der ebenfalls durch die Bremsraketen entstandenen »Snow Queen« (die meisten Namen von Oberflächendetails wurden der Welt der Märchen und Kindergeschichten entlehnt), entwickelten sich im Verlauf von 50

**SELBSTPORTRÄT AUF EINER FERNEN WELT**

**Einer für fast alles:** Zahlreiche Instrumente des Phoenix zeigt dieses Mosaikbild, dessen Einzelfotos die Stereokamera SSI schoss. Von links nach rechts sind das LIDAR-Lasersystem und der meteorologische Mast mitsamt dem Wetterhahn zu sehen, die der Wetterbeobachtung dienen. Die Datenübertragung zu Sonden im Orbit erfolgte über eine UHF-Hochfrequenzantenne. Außerdem im Bild: eines der Solarpaneele für die Stromversorgung. Bodenproben wurden über einen Schacht zum optischen Mikroskop überführt und konnten außerdem in vier nasschemi-

schen Zellen analysiert werden. In der Instrumentengruppe TEGA (der ein von organischem Material freier Teflonblock als Kalibrationsreferenz diente) ließen sich die Proben erhitzen und die dabei freigesetzten Gase untersuchen. Rechts ist der Ansatz des Roboterarms zu erkennen (der auf den anderen Bildern des Mosaiks nicht im Blickfeld war). In der Furche »Dodo Goldilock« (Kreis) suchte der Lander nach Eis. Das kleine Bild oben rechts zeigt die faltbare »Biobarriere«, die den Roboterarm bis zur Landung auf dem Mars vor biologischer Kontamination schützte.



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / MARK T. LEMMON, TEXAS A&M UNIVERSITY



Marstagen (»Sols«) durch Sublimation zahlreiche Risse, nachdem die thermisch isolierende obere Bodenschicht verloren gegangen war.

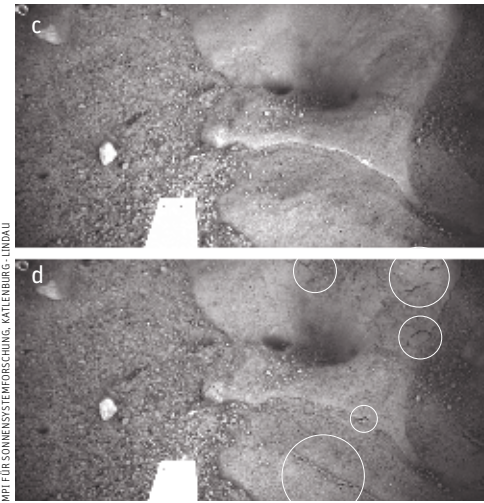
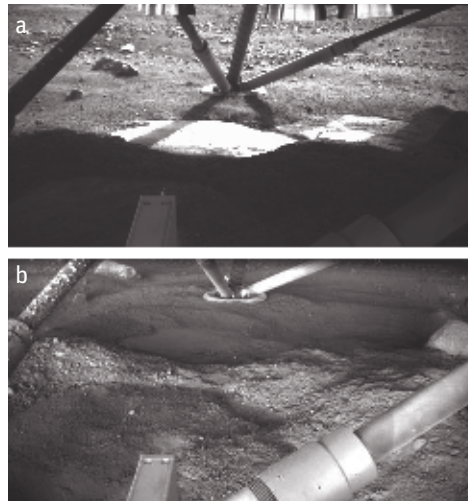
Im Verlauf der Mission grub der Roboterarm zwölf bis zu 18,3 Zentimeter tiefe Furchen. In einigen wie etwa »Dodo Goldilock« fand sich, bestätigt durch die SSI-Spektren, nahezu reines Eis, in anderen eisreicher Regolith, in manchen überhaupt kein Eis. Helle, zentimetergroße Klumpen in der »Dodo Goldilock«-Furche, die im Verlauf von vier Sols verschwanden, galten den Forschern als weiteres Indiz dafür, dass es sich bei dem hellen Material unmittelbar unter der Oberfläche tatsächlich um Wassereis handelte. Warum aber das Mischungsverhältnis von Eis und Regolith auf kurze Distanzen so stark variiert, bleibt weiterhin unklar.

### Erstaunlicher Perchloratfund

Manche Bodenauffälligkeiten lassen sich indessen durch die klimatischen Bedingungen der polaren Regionen erklären. Hier ist die Landschaft von Aufwölbungen übersät, die meist einige Meter Durchmesser aufweisen. Ein Modell für die Bildung solcher »polygoner« Strukturen hat ein Team um Ronald Sletten an der University of Washington entwickelt. Ihm zufolge führt die jahreszeitliche Kontraktion und Expansion des Bodens zur Entstehung keilförmiger Risse. Im Winter lagert sich darin feinkörniges Material ab, weshalb sie sich im nächsten Sommer nicht wieder vollständig schließen. Durch die Ausbildung von Hügeln (»Polygonen«) wird schließlich die erzeugte jahreszeitliche Spannung gemildert.

So kommt es zu einem Erosionsprozess, einem langsamen zyklischen Transport von Oberflächenmaterial, wie er auch in irdischen arktischen Regionen auftritt, wo er als Kryoturba-tion bezeichnet wird. Er erneuert auf kurzen Zeitskalen kontinuierlich die Landschaft (siehe Grafik S. 29) und hat wohl auch dazu beigetragen, dass Phoenix nicht auf Auswurfmaterial des Heimdall-Kraters gestoßen ist. Dieser vor 500 Millionen Jahren entstandene Krater – mit elf Kilometer Durchmesser und einem Kilometer Tiefe – befindet sich gerade einmal 20 Kilometer westlich vom Landeplatz.

Die große Vielfalt von Bodenpartikeln untersuchte Phoenix mittels mikroskopischer Farbaufnahmen und dreidimensionaler Darstellungen des Rasterkraftmikroskops. Unklar ist, inwieweit die untersuchten Partikel repräsentativ für den Marsstaub im Allgemeinen sind. Am Landeplatz dominieren rötlich orangefarbene Teilchen, die kleiner als zehn Mikrometer sein müssen, da sie vom Mikroskop nicht aufgelöst werden. Daneben gibt es auch



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / ROBERT LANGE, GLEN UND W. J. MARKIEWICZ, MPI FÜR SOLARSYSTEMFORSCHUNG, KATLENBURG, LINDAU

deutlich größere braune und schwarze Schluff- und Sandpartikel. Genauere Hinweise auf ihren Ursprung werden aber erst Vergleiche mit irdischen Böden liefern.

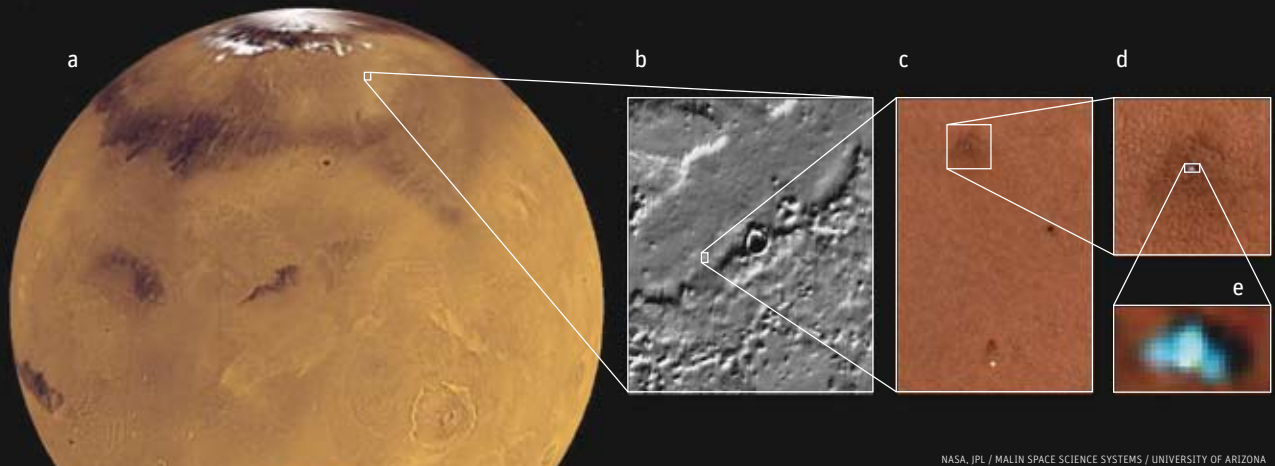
In den Zellen des WCL-Nasschemielabors entstand bei der Mischung von Bodenproben mit wässriger Lösung eine schwach alkalische Lösung, in der die Elektroden eine überraschend hohe Menge an Perchlorat entdeckten, also anionische  $\text{ClO}_4^-$ -Moleküle. (In geringeren Mengen ließen sich auch, in absteigender Reihenfolge, Kationen von Magnesium, Natrium, Kalzium und Kalium nachweisen.) Der Fund ist erstaunlich. Forscher um Michael Hecht vom kalifornischen Jet Propulsion Laboratory gehen davon aus, dass der Perchloratanteil am Marsboden bei etwa einem Gewichtsprozent liegt, was entsprechende Vorkommen in einigen irdischen Wüstenböden um mehrere Größenordnungen übersteigt. Ist  $\text{ClO}_4^-$  aber nur am Landeplatz oder tatsächlich überall auf dem Mars verbreitet, wie frühere Chlorfunde zumindest vermuten lassen? Und welche primitiven Lebensformen könnten sich angesichts einer so hohen Konzentration im Boden überhaupt entwickelt haben?

Auf die Anwesenheit von Perchlorat ließen die von WCL gemessenen Ionenkonzentrationen und weitere Parameter zwar nur indirekt schließen; dennoch gilt sie als gesichert, da

Der Blick der Roboterarmkamera unter den Lander zeigt die von den Landedüsen des Phoenix freigelegte Fläche »Holy Cow«. Der Leitfähigkeitssensor TECP ist als helles Rechteck zu sehen. Auf den meisten Bildern erscheint die »Holy Cow« hell und reflektierend (Bild a), im rötlichen Licht der Dämmerung gleicht sie sich aber dem umgebenden Marsboden an (b), woraus die Forscher schließen, dass sie hier nicht auf reines Eis gestoßen sind. Die benachbarte »Snow Queen« war zunächst glatt (c), zeigte jedoch nach etwa 50 Marstagen infolge der täglichen Temperaturzyklen Risse an der Oberfläche (d, weiße Kreise).



## ZOOM AUF DEN LANDER



NASA, JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS / UNIVERSITY OF ARIZONA

**Der Landeplatz des Phoenix** liegt nahe der nördlichen Polkappe (a). Die Schwarz-Weiß-Aufnahme des Mars Global Surveyor (b) zeigt ein 280 Meter breites Areal, in dem der Landeplatz links vom kreisförmigen Heimdall-Krater zu sehen ist. Das folgende Bild (c) nahm der Mars Reconnaissance Orbiter 22 Stunden nach der Landung auf. Hier sind der Lander selbst, aber auch der abgestoßene

Hitzeschild (schwarzer Punkt rechts von der Bildmitte) und der Fallschirm (heller Punkt unten) zu erkennen. In der Vergrößerung (d) werden Unebenheiten des Bodens und grobkörniges, von den Landedüsen frei gelegtes Material deutlich. Eine letzte Vergrößerung (e, mit einer Auflösung von etwa 33 Zentimeter pro Pixel) zeigt schließlich den Lander und die beiden Solarpaneele.

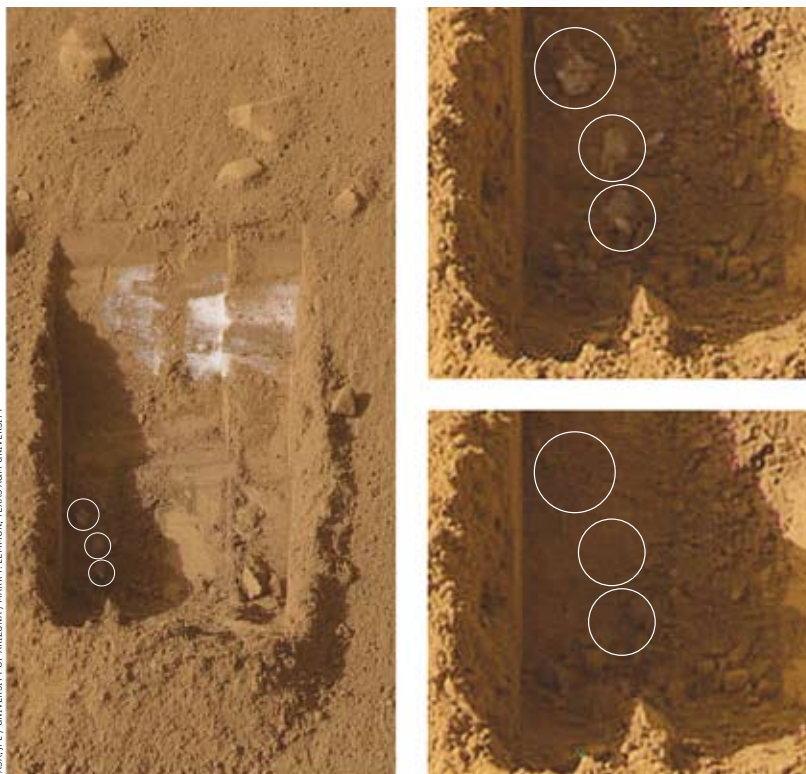
Am einen Ende der rund 20 Zentimeter breiten Furche »Dodo Goldilock« fand sich fast reines Wassereis (links). Die Kreise markieren Anhäufungen von etwa zwei Zentimeter großen Eispartikeln (Detail rechts oben), die binnen vier Sols (Marstagen) nach dem Graben vermutlich infolge von Sublimation verschwunden waren (rechts unten).

andere Interpretationen der Daten kaum möglich sind. TEGA indessen wies rätselhafterweise nur in einem einzigen Fall ein mögliches Zerfallsprodukt nach: Bei der Erhitzung einer Bodenprobe von »Baby Bear« wurde die Freisetzung von molekularem Sauerstoff beobachtet, der aus Perchlorat hervorgegangen sein könnte. Allerdings müssen die Informationen über die Konzentrationen wasserlöslicher Komponenten im Marsboden durch weitere Instrumente ohnehin noch verfeinert werden, denn jede WCL-Elektrode reagiert, auch abhängig von der tatsächlichen Konzentration,

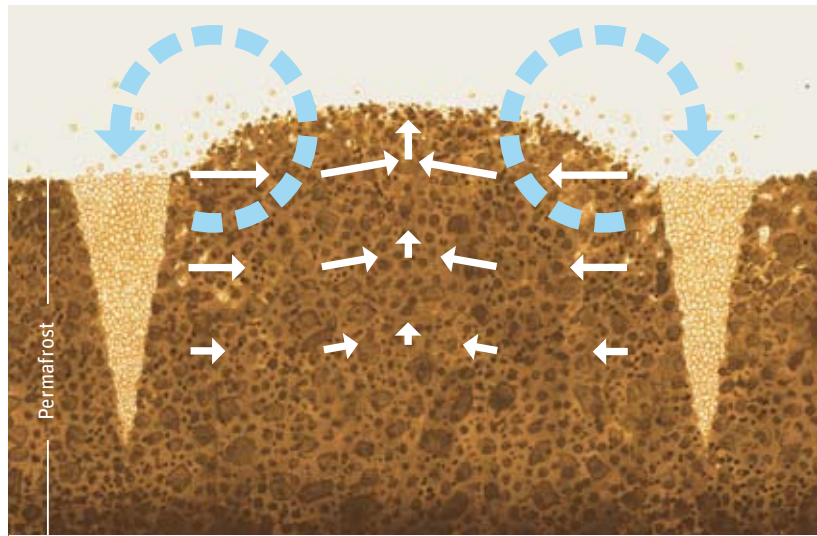
mit unterschiedlicher Empfindlichkeit auf verschiedene Ionentypen.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis der massenspektroskopischen Analysen war die Freisetzung von Kohlendioxid bei Temperaturen von 800 bis 900 Grad – ein Hinweis auf das von jeher erwartete und lange vermisste Kalziumkarbonat! Forscher um William V. Boynton von der University of Arizona gehen von einem Anteil von drei bis fünf Gewichtsprozent im Marsboden aus. Meist entstehen solche Karbonate durch Ausfällung aus wässrigen Lösungen – der Fund von Kalziumkarbonat zeigt also, dass am Phoenix-Landeplatz irgendwann einmal flüssiges Wasser existiert hat. Die Entdeckung gilt als bestätigt, weil sie auch mit den Interpretationen der WCL-Daten vereinbar ist, wie ein Team um Samuel P. Kounaves von der Tufts University in Massachusetts nachwies.

Überraschenderweise wurde über den gesamten Temperaturbereich des Thermal Analyzer von unter 0 bis 1000 Grad Celsius aber kein Schwefeldioxid frei, obwohl alle früheren Landemissionen erhebliche Schwefelmengen nachgewiesen hatten. Magnesiumsulfat wäre, bei einem atmosphärischen Druck von sieben Millibar, kurz vor Erreichen der Maximaltemperatur zerfallen, war also nicht in den Proben vorhanden. Mit dem Vorhandensein von Kalziumsulfat hingegen, das schon zuvor in großen Mengen nahe der nordpolaren Eiskappe gefunden worden war, hatten die Forscher fest gerechnet; es zerfällt allerdings erst bei etwa 1400 Grad Celsius. Nach der Analyse aller Daten kam ein Team um NASA-Forscher D.C. Golden dennoch zum Schluss, dass am Landeplatz des Phoenix – wie auch in den



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / MARK T. LEMMON, TEXAS A&M UNIVERSITY



Kryoturbation sorgt nahe der polaren Eiskappe für die Entstehung unregelmäßiger Aufwölbungen, welche dort die Marsoberfläche prägen (links). Denn im Winter bilden sich keilförmige Spalten im Boden (Grafik), in die feinkörniges Material fällt, so dass sie sich im Sommer nicht mehr vollständig schließen. Die resultierenden Spannungen im Boden lassen das Material wandern (weiße Pfeile) und so »polygone« Hügelformen entstehen. Die blauen Pfeile illustrieren den längerfristigen Materialtransport.

meisten bislang analysierten Marsböden – neben Kalziumkarbonat mit höchster Wahrscheinlichkeit auch Kalziumsulfat vorhanden ist.

Auch die meteorologischen Messverfahren des Phoenix erlaubten vielfältige Analysen, deren Ergebnisse sich durch Beobachtungsdaten aus dem Orbit weiter absichern ließen. Insbesondere untersuchte der Lander ausgeprägte Wetterphänomene, wie sie für die polaren Regionen typisch sind, vor allem die bereits von Bildern aus der Umlaufbahn bekannte Wolkenbildung. Der Wetterhahn lieferte zudem Daten über Windrichtung und -geschwindigkeit, die nun in die Entwicklung von Wettermodellen einfließen.

### **Staubtornados zogen am Landeplatz vorüber**

Der Druck des atmosphärischen Wasserdampf steigt, wie die Messungen des Feuchtigkeitssensors zeigen, zwischen 2 Uhr und 10 Uhr Ortszeit an, um bei etwa 1,8 Pascal ein Plateau zu erreichen, auf dem er für den größten Teil des Tages verbleibt, wohingegen die Temperatur der Atmosphäre bis 14 Uhr weiterhin ansteigt. Nach 10 Uhr pegelt sich dank atmosphärischer Konvektion ein konstanter Gleichgewichts-Wasserdampfdruck ein. Wie an den Landeplätzen des Mars Pathfinder und des Rovers Spirit wurden auch hier Staubteufel beobachtet, die mit Geschwindigkeiten von fünf bis zehn Meter pro Sekunde in der Nähe vorüberzogen.

Im späteren Missionsverlauf erwiesen sich die LIDAR-Daten als besonders wichtig. Ihre Auswertung durch James A. Whiteway von der kanadischen York University und seine Kolle-

gen zeigten, dass sich ab Sol 80 in jeder Nacht Bodennebel sowie Wolken aus Wassereis in einer Höhe von etwa vier Kilometern nahe der Obergrenze der atmosphärischen Grenzschicht bildeten. Viele dieser Wolken wiesen die auch auf der Erde bekannten »Fallstreifen« auf: Eiskristalle, die eine bestimmte Größe erreicht haben, so dass sie durch die Atmosphäre zu fallen beginnen und sublimieren. Tagsüber indessen wurden die vom LIDAR entsandten Lichtpulse durch atmosphärischen Staub zurückgestreut, noch bevor sie höher liegende Wolken erreichten. Der SSI wiederum entdeckte gegen Ende der Mission auch am Taghimmel viele Wolken, die in einigen Fällen binnen zehn Minuten durch Sublimation wieder verschwanden.

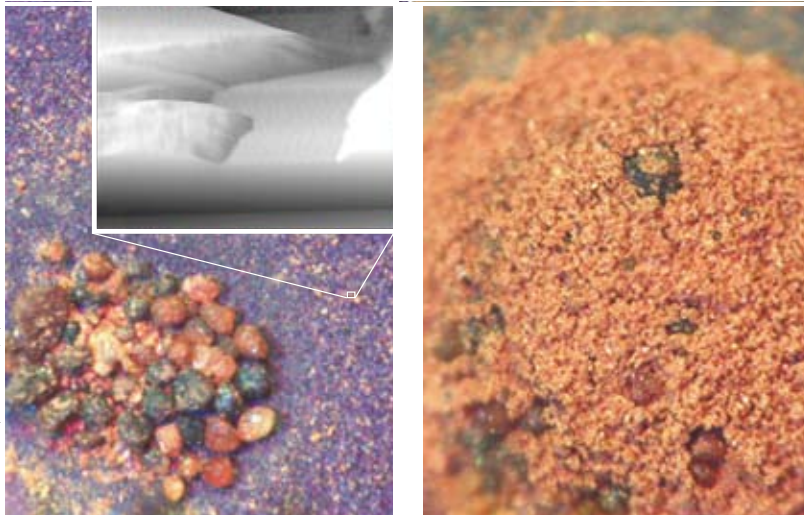
Zum Verständnis des täglichen lokalen Wasserkreislaufs hat die Phoenix-Mission wesentlich beigetragen: In den Morgenstunden gelangt Wasserdampf in die Atmosphäre, der aus dicht unter der Oberfläche liegendem Eis stammt oder auch aus Wasser, welches entweder an das körnige Material des Marsbodens gebunden ist oder als Kristallwasser in Mineralen oder Salzen (wie Magnesiumperchlorat) vorliegt. Im Verlauf der Nacht gefriert der atmosphärische Wasserdampf aus und es bilden sich Fallstreifen. In einigen Fällen kam es aber auch zu Schneefall, bei dem die Fallstreifen bis zur Oberfläche herabreichen.

Phoenix war insgesamt 152 Sols in Betrieb, vom 26. Mai bis zum 2. November 2008, also vom späten Frühling bis zum späten Sommer des rund 23 Erdmonate dauernden Marsjahrs. Vom 1. April bis zum 10. Juli 2009 herrschte am Landeplatz dann die Dunkelheit der Polarnacht. Nun ist die Sonne zwar längst wie-

### **LANDEPLATZ DURCH EINSCHLAG »GERÄUMT«?**

Ein wichtiges Kriterium für die Wahl des Landeplatzes hatte in der Tatsache bestanden, dass sich dort nur Felsen oder Steine mit Durchmessern von weniger als etwa 50 Zentimetern finden. Doch warum ist das so? Möglicherweise hat die Energie des Einschlags, der den nahe gelegenen Heimdall-Krater entstehen ließ, das unter der Oberfläche liegende Eis und andere kondensierte flüchtige Stoffe explosionsartig verdampfen lassen, wodurch die größeren Felsbrocken zerstört und weggefegt wurden.

FARBPHOTOS: NASA, JPL, MICHAEL H. HECHT / UNIVERSITY OF ARIZONA / W. THOMAS PIKE, IMPERIAL COLLEGE LONDON; KLEINES SW-FOTO: NASA, JPL / URS STAUFER, TU Delft, NIEDERLANDE



Unter dem Mikroskop zeigt sich eine Mischung aus hellen und dunklen, rund 60 Mikrometer großen Körnchen (links), eingebettet in rötlich orangefarbene, knapp zehn Mikrometer große Staubpartikel (rechts). Die Detailaufnahme eines Partikels (linkes Bild, oben) stammt vom Rasterkraftmikroskop des Phoenix. Die Mineralogie der einzelnen Teilchen ist noch nicht völlig aufgeklärt.

Aufschluss über Wolken und Bodennebel, die sich nachts bildeten, gab das vom Laserinstrument LIDAR vermessene Streulicht aus der Atmosphäre (links). Eiswolken in der atmosphärischen Grenzschicht in etwa vier Kilometer Höhe zeigen oft Fallstreifen – Eiskristalle, die zunächst frei fallen und dann sublimieren (rechts).

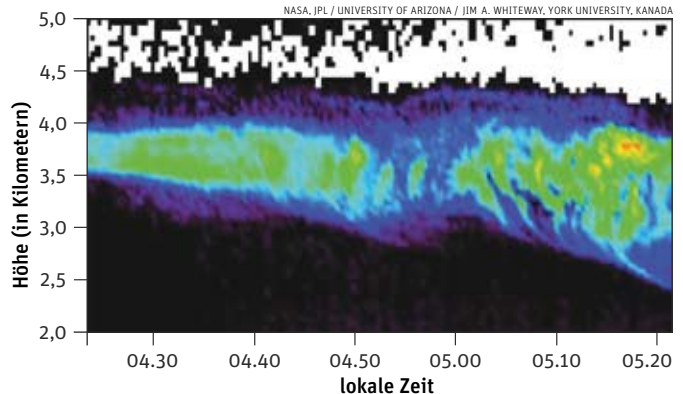
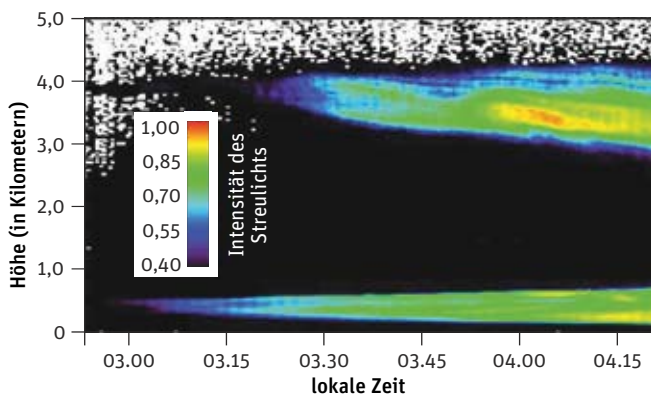
der über dem Lander aufgegangen, doch er rührt sich nicht mehr. Vergeblich hatte die Mars Odyssey am 18. Januar 2010 begonnen, nach seinen Signalen zu lauschen. Hätte Phoenix die winterlichen Temperaturen von bis zu 150 Kelvin überstanden – womit niemand ernsthaft rechnete –, hätten ihn die Forscher im »Lazarus-Modus« wiedererwecken können. Doch bei solcher Kälte werden Materialien spröde und brechen, es treten Leitfähigkeitsprobleme bei Platinen auf, und die Batterien werden tiefentladen. Vor allem aber dürfte sich bis zum Spätwinter im September 2009 eine rund 30 Zentimeter dicke Schicht von ausfrierendem atmosphärischem Kohlendioxid auf den Solarpaneelen abgelagert haben. Ihr Gewicht von mehr als einer Tonne pro Paneel hat eines oder auch beide Module wohl schlicht abbrechen lassen.

Trotzdem gilt Phoenix bereits jetzt als extrem erfolgreich: Erstmals lieferte eine Sonde geochemische und meteorologische Daten von einem arktischen Landeplatz auf dem Mars. Die Hoffnung auf den Fund von Leben ist aber drei Jahrzehnte nach den biologischen Experimenten der Viking-Landesonden erneut enttäuscht worden. Wie sollen wir nun weitersuchen?

Klar ist: Der schwierige Schritt hin zu mehrzelligen Lebewesen hat auf dem Mars sicher nie stattgefunden; auch die Erde brachte solche Organismen erstmals im Präkambrium vor knapp einer Milliarde Jahren hervor, also sehr spät in ihrer Geschichte. Doch bislang sind wir nicht einmal auf Spuren organischen Materials gestoßen. Erst wenn wir in geschützteren Regionen wie dem Inneren von Sedimentgesteinen oder tieferen Bodenschichten suchen, dürfen wir hoffen, fündig zu werden. Parallel dazu müssen wir die chemische Reaktivität des Bodens und seiner Oberfläche sowie dessen Wohnbarkeit abschätzen und terrestrische Lebensformen identifizieren, die unter diesen Bedingungen gedeihen. Geochemische und mineralogische Studien können Aufschluss auf frühere Bedingungen wie Salzgehalte, Temperaturen und Wasserkreisläufe geben, und organische Untersuchungen müssen sich den leichten Elementen der ersten und zweiten Hauptgruppe des Periodensystems widmen. Dem eventuellen Nachweis und der Identifizierung solcher Moleküle würde dann die Schlüsselfrage folgen: Wurden sie durch Meteoriten oder Kometen »importiert« oder bezeugen sie eigenständige biologische Aktivität?

Was zu tun ist, soll in den nächsten Jahren eine Reihe neuer Missionen erledigen. Ab 2012 wird der NASA-Rover Curiosity erstmals die Methode der Röntgendiffraktion zur Mineralanalyse anwenden und so eine nahezu vollständige Bestandsaufnahme der Mineralien in Böden und Gesteinen leisten. Und natürlich soll er mittels SAM, dem bereits flugbereiten NASA-Instrument Sample Analysis at Mars, auch atmosphärisches Methan aufspüren – selbst in Konzentrationen von weniger als einem Molekül pro einer Milliarde Luftmoleküle.

Ob es geochemischen Ursprungs ist oder tatsächlich von Mikroben im Untergrund stammt (weit über 90 Prozent der Methanvorkommen in der Erdatmosphäre sind biologischen Ursprungs), wird man aber auch dann noch nicht wissen. In relativ großen Mengen



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / JIM A. WHITEWAY, YORK UNIVERSITY, KANADA

## WO IST PHOENIX JETZT?

**Nach der harten Polarnacht** hat sich der Phoenix nicht wieder aus der Asche erhoben. Diese Aufnahmen der Stereokamera des Mars Reconnaissance Orbiter zeigt die Sonde im Spätfrühjahr an Sol 21 der Mission, mitten im Marswinter und im Frühjahr



NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

(von links nach rechts). Die Bilder sind näherungsweise eingeordnet, und die abgebildete Fläche misst rund 40 mal 45 Meter. Die Schatten der Solarpaneele im linken Bild verlaufen in Richtung Nordosten, was einem Aufnahmezeitpunkt am frühen Nachmittag lokaler Zeit entspricht.

Das stark verrauschte mittlere Bild wurde wenige Tage nach Ende der Polarnacht bei geringer Lichtintensität aufgenommen, als die Sonne nur ein Grad über dem Horizont stand. Im rechten Bild erscheint die Sonde asymmetrisch; mögliche Ursache könnte die Beschädigung eines Solarpaneels durch das darauf lastende Trockeneis sein.

wurde das Schlüsselmolekül bislang in der Marsregion Syrtis Major entdeckt, einer großen, dunklen Oberflächenstruktur. Messungen, die ein Team um NASA-Forscher Michael Mumma im Jahr 2009 von der Erde aus vornahm, ergaben zeitweilige Konzentrationen von bis zu 20 Molekülen pro Milliarde Luftmoleküle, die allerdings im Widerspruch zu Modellen der Marsatmosphärenchemie stehen und kontrovers diskutiert werden. Diesen Streit wird erst SAM schlichten können.

### Ab 2020 mit Rückflugticket?

Im Jahr 2013 wird dann ein Orbiter folgen: Das NASA-Projekt MAVEN soll die äußeren Regionen der Marsatmosphäre und ihre Wechselwirkung mit dem Sonnenwind untersuchen. Diese Daten können in theoretische Modelle einfließen, aus denen sich die meteorologischen Bedingungen früherer Zeiten rekonstruieren lassen. Möglicherweise war es ja auch die dünne Marsatmosphäre, welche die biologische Aktivität an der Oberfläche des Planeten nicht ausreichend förderte oder gar verhinderte. Denn schließlich lehrt uns das Beispiel Erde, dass die Atmosphäre neben den Ozeanen das entscheidende Medium für die Entwicklung von Leben war.

Zugleich ist sie ein hochsensibler Indikator für Leben: »Diagnostische Moleküle« wie Methan sind selbst in geringsten Konzentrationen aussagekräftige Marker für biologische Prozesse. Die gezielte Suche nach solchen Molekülen soll daher ab 2016 der Mars Trace Gas Orbiter der ESA aus einer Umlaufbahn heraus fortsetzen und dabei insbesondere auch ihre Quellen lokalisieren.

Dann, voraussichtlich im Jahr 2018, wird mit ExoMars erstmals ein ESA-Rover auf den Weg geschickt und mit seinem Bohrer bis in eine Bodentiefe von zwei Metern vordringen. Das Gefährt soll mit dem Mars Organic Molecule Analyser (MOMA) ausgestattet sein, den gegenwärtig das MPI für Sonnensystem-

forschung entwickelt. MOMA wird Moleküle oder ihre Bruchstücke und Derivate auf bis 1000 Grad Celsius erhitzen oder durch Laserstrahlen in die Dampfphase überführen, um sie mittels eines Massenspektrometers zu identifizieren. Organische Moleküle mittlerer Gewichtsklasse, entsprechend etwa 100 bis 600 atomaren Masseneinheiten, kann das Instrument schon in sehr geringer Konzentration nachweisen. Methoden der Ramanspektroskopie, Röntgendiffraktion und Röntgenfluoreszenz sowie der Nahinfrarotmikroskopie zur mineralogischen Untersuchung des Bodens ergänzen schließlich das Instrumentarium.

Die Zukunft von ExoMars hängt allerdings vom Erfolg des Curiosity-Rovers ab, denn beide sollen dieselbe Landetechnologie nutzen. Bewährt sie sich nicht, muss auch ExoMars neu überdacht werden, ebenso wie MAX-C, der Mars Astrobiology Explorer Cacher der NASA. MAX-C soll gemeinsam mit ExoMars in derselben Landesohle, der *aeroshell*, auf den Mars gelangen. Dank der größeren Mobilität und Reichweite des Rovers wird er einerseits ExoMars den Weg weisen und darüber hinaus einen großen Probenbehälter besitzen, den allerdings erst eine Folgemission zur Erde zurückbringen soll.

Die vielfältige Morphologie und Mineralogie der Marsoberfläche sind uns durch die Missionen in der ersten Dekade des Jahrhunderts deutlich vor Augen geführt worden. Damit ist klar: Für den Erfolg der Rover wird die Wahl ihres Landeplatzes ausschlaggebend sein. Im Erfolgsfall werden ExoMars und MAX-C aber auch das Ende einer Epoche markieren – als die letzten großen Missionen, die nicht zum Transport von Marsproben zur Erde vorgesehen sind. Das werden erst ihre Nachfolger leisten: In der dritten Dekade heben hoffentlich die ersten Sample-Return-Missionen ab, um den Roten Planeten nicht nur zu erreichen, sondern auch wieder von dort zurückzukehren.



**Walter Goetz**, der 2002 am Center for Planetary Science der Universität Kopenhagen promovierte, arbeitet als Physiker am Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS) in Katlenburg-Lindau. Im Jahr 2004 nahm er an der dreimonatigen Primärmission der Mars Exploration Rover am kalifornischen Jet Propulsion Laboratory teil. 2008 folgte die Mitwirkung an der Phoenix-Primärmission an der University of Arizona in Tucson. Derzeit wirkt er auch am Bau von Instrumenten für den geplanten europäischen Rover ExoMars mit.

© American Scientist  
[www.amsci.org](http://www.amsci.org)

**Hecht, M. H. et al.:** Detection of Perchlorate and the Soluble Chemistry of Martian Soil at the Phoenix Lander Site. In: Science 325(5936), S. 64 – 67, 3. Juli 2009.

**Smith, P. H. et al.:** H<sub>2</sub>O at the Phoenix Landing Site. In: Science 325(5936), S. 58 – 61, 3. Juli 2009.

Zahlreiche Weblinks zu diesem Thema und den ergänzenden Text »Warum Mars?« finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1022877](http://www.spektrum.de/artikel/1022877).

# Fährtenuche am Himmel

Von Kondensstreifen, Nebelfäden  
und Wirbelschleppen:  
warum nicht nur heiße Abgase  
kalte Spuren hinterlassen

Achten Sie auf die Lücke!



Zopfartig aufgewickelte Strömungs-  
fäden beim Start



Nebelfäden selbst in Reise Flughöhe



**H. Joachim Schlichting** ist Professor und Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Er erhielt 2008 den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für seine didaktischen Konzepte.

## Von H. Joachim Schlichting

**M**anchmal überziehen sie den Himmel kreuz und quer: weithin sichtbare Kondensstreifen, die noch mehr oder weniger lange, nachdem hoch fliegende Jets über unsere Köpfe hinweggezogen sind, von deren Routen zeugen. Doch was genau ist da eigentlich zu sehen? Der Blick auf das Foto oben offenbart eine physikalisch aufschlussreiche Auffälligkeit – die Lücken zwischen Triebwerk und Kondensstreifen. Was geschieht mit den heißen Verbrennungsgasen, dass sie kurz nach dem Verlassen der Düsen aus der Unsichtbarkeit heraustreten und sich als meist schneeweiße Streifen zu erkennen geben? Sie enthalten Wasserdampf, der nun ganz plötzlich Temperaturen von minus 40 bis minus 50 Grad Celsius ausgesetzt ist. Ist die Luft nur feucht genug, kondensiert der Wasserdampf an den Rußteilchen zu Tröpfchen beziehungsweise resublimiert zu Eiskristallen, an denen sich weitere Wasserteilchen anlagern. Dadurch werden die Kristalle so groß, dass sie das Licht unabhängig von dessen Wellenlänge streuen und als weiße Nebelspuren sichtbar werden – nach einer sehr kurzen, aber doch endlich langen Zeit nach dem Austritt aus den Düsen.

Den Fluggästen selbst bleibt dieses Phänomen beim Blick aus dem Fenster zwar verborgen. Was jedoch, wenn ein aufmerksamer Passagier etwas ganz Ähnliches plötzlich an den Enden einer Tragfläche bemerkt? Mit Verbrennungsgasen können diese Nebelfäden nichts zu tun haben, und eigentlich auch nichts mit der Umgebungstemperatur, denn die hellen Spuren zeigen sich nur kurz nach dem Start oder vor der Landung. Dann fährt der Jet die Landeklappen aus den Tragflächen (die korrekter als »Auftriebshilfen« bezeichnet werden), wodurch sich deren Anstellwinkel vergrößert und damit die aerodynamische Auftriebskraft auf eine größere Fläche wirkt.

So gelingt das Abheben auch bei niedrigeren Geschwindigkeiten, weil nun ein enormer Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite der Tragflächen entsteht.

Dieser wiederum führt an ihren Seiten zu Ausgleichsströmungen von unten nach oben. Weil gleichzeitig die Luft von vorn nach hinten strömt, kommt es zu einer zopfartigen Aufwicklung der Strömungsfäden. Und weil der Druck in der Luftströmung stark abnimmt, sinkt die Temperatur schlagartig, nicht anders als nahe dem gerade geöffneten Ventil eines Autoreifens. Denn für eine mit Druckabnahme verbundene Ausdehnung benötigt die Luft Energie, die sie aus dem Reservoir ihrer inneren Energie abzapft, weil sie schlicht nicht »warten« kann, bis durch Wärmeleitung genug davon aus der Umgebung herangeschafft wird. Auch hier wird nun infolge des Temperatursturzes der Taupunkt unterschritten, und es kommt – bei ausreichender Luftfeuchte – zur Nebelbildung. Von normalen Kondensstreifen unterscheiden sich die Wirbelschleppen auch noch durch einen interessanten Nebeneffekt: Sie treten immer paarweise mit gegenläufigem Drehsinn auf, so dass sich ihr Gesamtdrehimpuls zu null summiert.

Nebelfäden über den Tragflächen lassen sich bei genügender Luftfeuchte aber auch auf voller Reise Flughöhe beobachten. Sie verdanken sich ebenfalls starkem Druckabfall und führen bei den ohnehin schon sehr tiefen Temperaturen, die Kondensation überspringend, zur Resublimation des Wasserdampfs zu feinen Eiskristallen.

Kondensstreifen können die Flugpassagiere übrigens doch selbst beobachten, zumindest indirekt: Beim Blick von einem guten Fensterplatz nach draußen tauchen sie mit ein wenig Glück als Schatten auf dem Land, dem Meer oder sogar auf den Wolken auf. Aber dazu später, denn hier sind wieder ganz andere physikalische Phänomene im Spiel. <



# Die wahre Herkunft der HAUSKATZE



Ihrer Natur nach sind Hauskatzen  
unabhängige Wesen.

GETTY IMAGES / JANE BURTON



Die ersten Katzen schlossen sich von sich aus den Menschen an – jedoch nicht erst im alten Ägypten. Die Geschichte ihrer Domestikation erklärt ihr unabhängiges Wesen.

Von Carlos A. Driscoll,  
Juliet Clutton-Brock, Andrew C. Kitchener  
und Stephen J. O'Brien

**M**al anschniegbar, mal unnahbar, bald friedlich oder giftig, oft liebenswert oder ungezogen zum Verzweifeln: Trotz ihres eigenwilligen, sprunghaften Wesens ist die Katze das beliebteste Haustier. Allein in Deutschland gibt es über acht Millionen Hauskatzen – mit stark steigender Tendenz. In fast jedem sechsten Haushalt hier zu Lande lebt ein Stubentiger, in Nordamerika angeblich sogar in jedem dritten. Die Zahl der Katzen in Menschenobhut dürfte weltweit 600 Millionen übersteigen.

Allerdings war die Herkunft der Hauskatze lange ungewiss.

Noch weniger einsichtig erschien der Sinn dieser Domesti-

kation. Andere Haustiere liefern dem Menschen Fleisch, Milch, Wolle oder Arbeitskraft. Aber welchen echten Nutzen haben Katzen? Bis vor fünf Jahren hieß es, die alten Ägypter hätten vor rund 3600 Jahren damit angefangen, sie als Haustiere zu halten. Genetische Analysen sowie neue archäologische Befunde offenbaren nun aber einen völlig anderen Hergang – und auch einen anderen Ursprung.

In der Vergangenheit erschwerten mehrere Umstände die Aufklärung. Dass alle Hauskatzenvarianten allein von der so genannten Wildkatze, der Art *Felis silvestris*, abstammen, vermuteten Experten zwar schon lange, konnten es aber nicht gut belegen. Und eindeutig festzumachen, welcher der Wildkatzenpopulationen (Unterarten) die Hauskatze entstammte, erlaubten die früher verfügbaren Analysemethoden schon gar nicht. Einige Forscher glaubten, Katzen seien an mehreren Orten unabhängig voneinander domestiziert worden. Denn die weite Verbreitung der Wildkatze in der Alten Welt machte die präzise Zuordnung nicht einfacher. Ihr Lebensraum reicht von Schottland bis Südafrika, von Spanien bis in die Mongolei. Die einzelnen Wildkatzenunterarten lassen sich nur schwer auseinanderhalten, die Populationsgrenzen sind unscharf. Tiere verschiedener Populationen kreuzen sich überdies bereitwillig. Auch ist manche verwilderte Hauskatze mit der typischen streifig gemusterten grauen Fell-

## In Kürze

► Verglichen mit anderen domestizierten Tieren sind **Hauskatzen** für den Menschen **nicht von großem Nutzen**. Wie entstand die Beziehung?

► Bis vor einigen Jahren hielten Forscher **das alte Ägypten** für die **Ursprungsregion** von Hauskatzen. Sie sollten dort vor rund 3600 Jahren domestiziert worden sein.

► Doch die Anfänge reichen viel weiter zurück. Nach neueren genetischen und archäologischen Erkenntnissen setzte die **Haustierwerdung** von Katzen wohl schon vor etwa 10 000 Jahren ein – im Nahen Osten im Gebiet des Fruchtbaren Halbmonds, als dort die Landwirtschaft aufkam.

► Wahrscheinlich haben sich Katzen von allein bei den Menschen eingerichtet. Deren Siedlungen mit Vorratsspeichern und Abfallhalden boten ihnen Nahrung **in Form von Mäusen und Essensresten**.



»Aber auch die Katze hält sich an ihren Teil des Handbells. Sie tötet Mäuse, und sie ist nett zu Babys, solange sie nicht zu fest am Schwanz gezogen wird. Aber danach und zwischendurch und wenn der Mond aufsteigt und der Abend kommt, ist sie die Katze, die für sich bleibt, und ein Ort ist für sie so gut wie der andere. Dann geht sie hinaus in die weiten wilden Wälder, hinauf auf die belaubten oder blattlosen Bäume oder auf die dreckigen dunklen Dächer, wedelt wild mit dem Schwanz und wandert weiter auf ihre wilde Weise.«

Aus: »Die Katze, die für sich blieb«. Von Rudyard Kipling in: »Geschichten für den allerliebsten Liebling« (»Just So Stories«)

zeichnung leicht mit einer Wildkatze zu verwechseln. Zudem paaren sich Haus- und Wildkatzen recht problemlos.

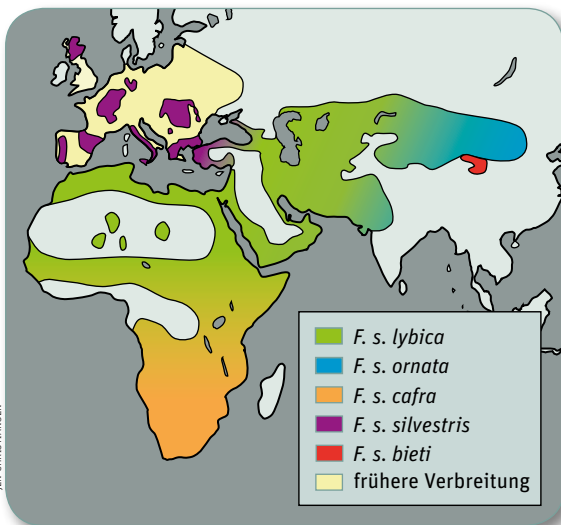
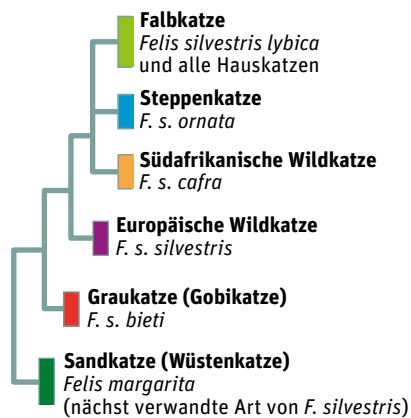
Um Klarheit in diese Fragen zu bringen, begann einer von uns (Driscoll) vor zehn Jahren mit genetischen Vergleichen. Von fast 1000 Tieren aus aller Welt sammelte er DNA-Proben: darunter auch von Haus- und Wildkatzen im südlichen Afrika, in Aserbaidschan, Kasachstan, der Mongolei und im Nahen Osten. Driscoll hoffte, dass sich die einzelnen Wildkatzenpopulationen zumindest genetisch unterscheiden würden. Denn normalerweise bleiben die Tiere einem Territorium lebenslang treu. Das sollte, so vermutete er, im Verlauf der Zeit ortstabile, von Gebiet zu Gebiet aber verschiedene genetische Muster ergeben haben. Zumindest ist Ähnliches für andere Katzenarten nachgewiesen. Eine spannende Frage wäre dann, ob die Hauskatzen genetisch einer dieser Wildkatzenpopulationen stärker gleichen als den Populationen anderer Gebiete. Wäre das der Fall, so wüssten wir, wo die Domestikation der Katze ihren Anfang nahm.

Die Ergebnisse dieser Studien haben Driscoll und ein anderer von uns (O'Brien) zusammen mit Kollegen im Jahr 2007 veröffentlicht. Zum einen hatten wir Sequenzen der Mitochondrien-DNA verglichen, zum anderen so genannte Mikrosatelliten. Beides wird bei Säugetierarten gern herangezogen, um genetische Untergruppen zu erkennen. Die Mitochondrien sind Zellorganellen mit eigener DNA, die nur die Mutter weitergibt. Als Mikrosatelliten werden kurze, repetitive DNA-Sequenzen der Chromosomen im Zellkern bezeichnet. Von jeder Katze wurde also anhand ihrer genetischen Signatur per Computeranalyse die Abstammung ermittelt. Genauer gesagt bestimmten die Forscher die Ähnlichkeit zu sämtlichen anderen Individuen und gewannen so Gruppen aus Tieren mit ähnlichen Erbsequenzen. Im letzten Schritt prüften sie, inwieweit die Angehörigen derselben Gruppe in einer bestimmten Region lebten.

Die Wildkatzen (*Felis silvestris*) sortierten sich dabei in fünf genetische Cluster – praktisch also Abstammungslinien (siehe Kasten links). Diese passten gut zu den bekannten fünf Unterarten: in Europa *Felis silvestris silvestris*, in China *F. s. bieti*, in Zentralasien *F. s. ornata*, im südlichen Afrika *F. s. cafra* – sowie im Nahen und Mittleren Osten *F. s. lybica*. Die Hauskatzen aber, rein- wie gemischtrassige, fanden sich allesamt im selben Cluster zusammen mit der Falbkatze *F. s. lybica* – egal, aus welchem Land sie stammten, ob aus Großbritannien, Nordamerika oder Japan. Bei genauerem Hinsehen waren die Hauskatzen in den verglichenen genetischen Sequenzen praktisch nicht von Wildkatzen aus abgelegenen Wüsten in Israel, den Vereinigten Arabischen Emiraten oder Saudi-Arabien zu unterschei-

## DIE VORFAHREN

DNA von fast 1000 Wild- und Hauskatzen lieferte die Verwandtschaftsbeziehungen der fünf Unterarten von *Felis silvestris*, der Wildkatze. Die Erbsequenzen ergaben fünf unterscheidbare Cluster, die sich mit den einzelnen Verbreitungsgebieten decken. Alle Hauskatzen, auch ausgefallene Rassen, stammen demnach von der Falbkatze ab. Weitere Vergleiche offenbarten sogar den genaueren Ursprung: den Nahen Osten.



KATZENGRAB AUF ZYPERN

den. Demnach entstanden die Hauskatzen offenbar in einem einzigen Gebiet, und das lag nicht in Ägypten, sondern im Nahen Osten.

Wann aber wurden Katzen domestiziert? Viele Abstammungsereignisse lassen sich auch zeitlich mit genetischen Vergleichen abschätzen. Dazu verwerten Forscher gern unschädliche Zufallmutationen, die sich in DNA-Sequenzen mit einer relativ konstanten Rate anhäufen. Leider aber tickt die so genannte molekulare Uhr für unsere Fragestellung etwas zu langsam. Für die hier vermutlich relevante Zeitspanne, die letzten 10 000 Jahre, eignet sich die Methode darum weniger. Besseren Aufschluss konnten archäologische Befunde liefern.

**Gemeinsam begraben – Mensch und Katze**

Speziell eine Entdeckung auf Zypern warf die alten Vorstellungen über den Haufen. Im Jahr 2004 gaben Jean-Denis Vigne und seine Kollegen vom Muséum national d'Histoire naturelle in Paris den Fund eines Grabs bekannt, wo vor 9500 Jahren eine junge Katze mitbestattet worden war. Eine Person unbekanntes Geschlechts war damals in einem flachen Grab mit allen möglichen Beigaben beerdigt worden: mit Steinwerkzeugen, einem Brocken Eisenerz, einer Hand voll Meeresmuscheln. Die Überraschung: 40 Zentimeter weiter erhielt eine acht Monate alte Katze ihr eigenes kleines Grab. Ihr Körper war genauso nach Westen ausgerichtet wie der des Menschen. Dieser Fund gilt jetzt als ältester Hinweis darauf, dass man sich schon damals Katzen hielt.

Auf den meisten Mittelmeerinseln lebten ursprünglich keine Wildkatzen. Nach Zypern müssen Menschen darum Katzen im Boot mitgenommen haben, wahrscheinlich von der nahen Levante her. Dass die Tiere auch noch zusammen mit Angehörigen beerdigt wurden, verweist zumindest auf eine recht enge Beziehung zu den kleinen Räufern. Und der Nahe Osten als Ort der Domestikation passt zu unseren genetischen Befunden. Der mutmaßliche Zeitraum – vor fast 10 000 Jahren – lässt somit annehmen, dass Katzen schon Menschenanschluss fanden, als im Nahen Osten Landwirtschaft und Sesshaftigkeit gerade aufkamen. Schauplatz wäre dann der so genannte Fruchtbare Halbmond gewesen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage neu, wieso Mensch und Katze überhaupt in ein engeres Verhältnis zueinander traten. Denn dafür erscheinen Katzen nicht gerade prädestiniert. Die wilden Stammeltern der meisten Haustiere bildeten Herden oder Rudel mit klaren Rangverhältnissen. Wohl eher unabsichtlich nahm bei der Domestikation



dann der Mensch die Alphaposition ein. Dadurch konnte er ganze Tiergruppen beherrschen. Außerdem war für diese Arten ein enges Zusammenleben mit anderen Individuen nichts Besonderes. Bei genügend Futter und Schutz vermochten sie sich relativ leicht an das Leben in Gefangenschaft anzupassen.

Die verschiedenen Katzenarten – auch die Wildkatze – sind dagegen im Allgemeinen Einzelgänger. Sie pflegen allein zu jagen und ihr Gebiet heftig gegen Geschlechtsgenossen zu verteidigen. Die einzige Ausnahme davon bilden Löwen, die in Rudeln leben. Hinzu kommt das stark beschränkte Nahrungsspektrum: Die meisten Haustierrassen kommen ganz gut mit allem möglichen pflanzlichen Futter zurecht, das auch fast immer verfügbar ist. Katzen hingegen benötigen unbedingt Fleisch oder Beutetiere. Andere Nahrung können sie schlecht verdauen. Süße Kohlenhydrate wie Zucker schmecken sie nicht einmal. Und ihre Brauchbarkeit für den Menschen? Mit dem Gehorsam ist es zumindest nicht weit her. Andere Haustiere haben die Menschen sich für bestimmte Zwecke herangezogen. Katzen schlossen sich uns wahrscheinlich aus eigenen Stücken an, weil sie selbst davon profitierten.

Die frühen Ansiedlungen vor 9000 bis 10 000 Jahren, am Beginn der Jungsteinzeit, boten Tieren eine ganz neuartige Umwelt, sofern sie anpassungsfähig und neugierig waren – oder Schutz suchend und hungrig. Zu denen, welche solche Voraussetzungen erfüllten, gehörte die Hausmaus, *Mus musculus*. Ursprüng-

**Auf der ursprünglich katzenfreien Insel** im östlichen Mittelmeer entdeckten Archäologen im Jahr 2004 in einem Grab das Skelett einer Katze (auf dem Foto und der Zeichnung umkreist). Das Tier wurde vor rund 9500 Jahren nahe bei einem Menschen (oben im Bild) bestattet. Damals können Katzen wohl nur per Boot nach Zypern gelangt sein, vermutlich von der nahen levantinischen Küste her (vom Nahen Osten). Das spricht für eine enge Beziehung zum Menschen.



BETHE ABBLICHTUNGEN AUS: J.-D. VIGNE, J. GUILDAINE, K. DEBIE, L. HAYE UND P. GÉRARD, "EARLY TAMING OF THE CAT IN CYPRUS", IN: SCIENCE, APRIL 2004, BD. 304, NR. 5668, S. 259

**KATZEN AN DER SPITZE**

Über 8 Millionen Katzen leben in deutschen Haushalten, in den letzten Jahren mit stark steigender Tendenz: 2006 waren es 7,8 Millionen, 2008 schon 8,2. Hunde nahmen in der gleichen Zeit von 5,3 auf 5,5 Millionen zu.

## ETAPPEN ZUM HAUSTIER

Es dauerte sicherlich einige Jahrtausende, bis aus den Falbkatzen des Nahen Ostens ein Haustier wurde.

PHOTO: BESARCHIENS / STEPHEN DALTON



#### ◀ VOR 10 500 BIS 9 500 JAHREN

Mäuseüberreste bei den frühesten Getreidespeichern in Palästina: Katzen bot die einsetzende Landwirtschaft mit dauerhaften Siedlungen Gelegenheit, in Menschennähe viele Mäuse zu fangen.

THE ISRAELI MUSEUM, JERUSALEM



#### VOR 9 500 JAHREN

Grab auf Zypern mit einem Menschen- und einem Katzenskelett: frühester Hinweis auf eine engere Beziehung zum Menschen

#### ◀ VOR 3 700 JAHREN

Elfenbeinflgure aus Palästina: Offenbar waren den Menschen Katzen in ihrem Wohnumfeld vertraut.

#### VOR 3 600 JAHREN

Bilder von Hauskatzen in Theben; ältester Beweis für wirklich domestizierte Katzen

#### ◀ VOR 2 900 JAHREN

Katzenmumien im alten Ägypten: In Bubastis, der heiligen Stadt der Göttin Bastet, wurden zigtausende Katzen geopfert und einbalsamiert – auch ein Zeichen für deren umfangreiche Zucht.

THE BRITISH MUSEUM, LONDON



#### VOR 2 300 JAHREN

Höhepunkt der Katzenverehrung im alten Ägypten: Die ptolemäischen Herrscher verhängten ein strenges Katzenexportverbot.

#### VOR WEIT ÜBER 1 000 JAHREN

Hauskatzen von Tofting auf Eiderstedt: Verbreitung im nördlichen Mitteleuropa; zunehmend Hinweise in Kunst und Literatur

#### ◀ 1 350–1 767

»Tamara Maew« (ein Buch mit Katzenpoemen): Thailändische buddhistische Mönche beschreiben einheimische Rassen wie die Siamkatze. Sie entstanden fast rein durch genetische Drift ohne Menschenzucht.

#### 19. JAHRHUNDERT

Zucht von Rassekatzen in Großbritannien: Anscheinend entstanden damals die meisten modernen Rassen.

#### ◀ 1 871

Katzenschau im Kristallpalast in London: Erstmals werden vom Menschen gezüchtete Rassen vorgeführt.

#### 2 006

Erste angeblich hypoallergene Katze, gezüchtet von Allerca

GETTY IMAGES / DANIE KING



HELMUT FELICK



lich stammt die Art wohl aus Indien. Archäologen entdeckten Knochen des Nagers in Palästina bei den ersten Getreidespeichern, die Menschen vor ungefähr 10 000 Jahren für Wildkörner anlegten. In der freien Natur konnte sich *Mus musculus* dort schwer gegen andere Mäusearten behaupten. Doch wo Menschen wohnten und sich Vorräte hielten, gediehen diese Nager prächtig.

Fast mit Sicherheit zogen jene Mäuse Katzen an. Allerdings dürften Letztere die Abfallhaufen vor den Siedlungen ebenso verlockend gefunden haben. Wenn sie sich geschickt anstellten, entdeckten sie dort zu jeder Jahreszeit Fressbares. Beide Nahrungsquellen können Katzen dazu gebracht haben, sich an den Menschen anzupassen. Anders gesagt waren solche Individuen evolutionär im Vorteil, die in Menschennähe zu leben vermochten, wo sie Zugang zu Essensresten und Mäusen erlangten.

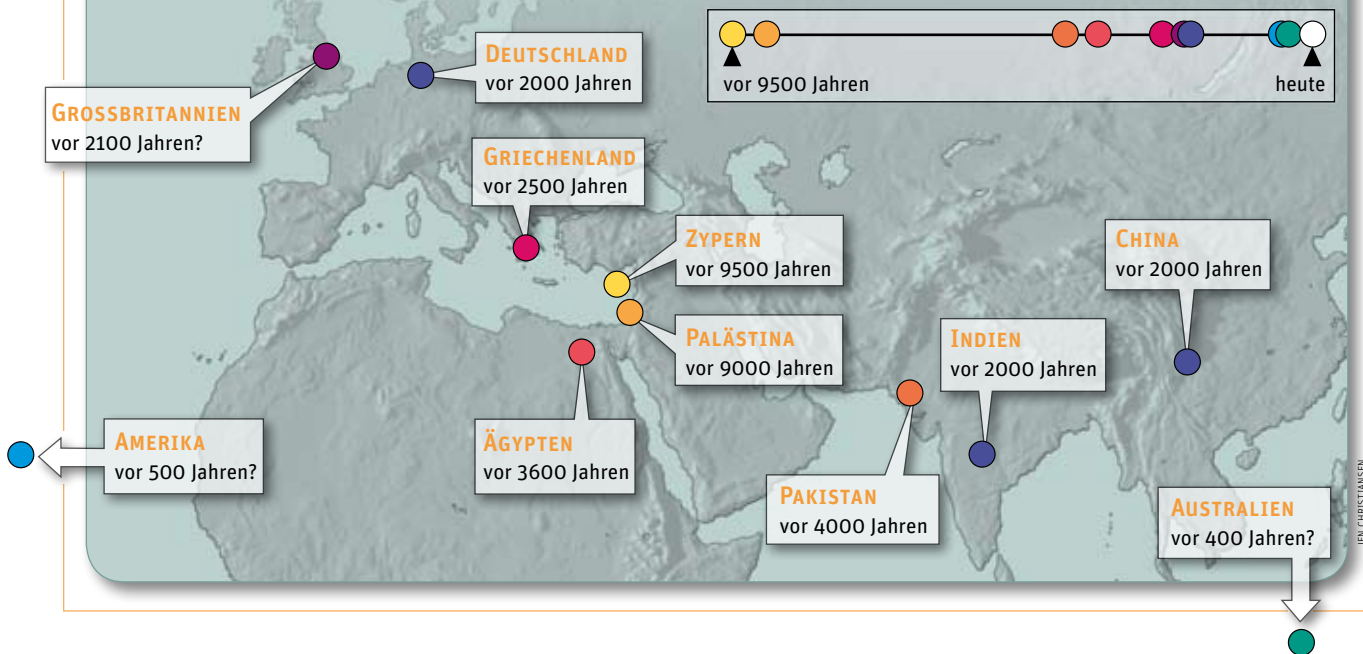
Überall in den Siedlungen im Fruchtbaren Halbmond vermehrten sich im Lauf der Zeit solche Wildkatzen, die menschliche Nähe einigermaßen ertrugen. Zwar mag damit eine Selektion auf größere Zahmheit einhergegangen sein. Allerdings mussten die Katzen sich auch weiterhin gegen Artgenossen behaupten. Allzu umgänglich durften sie nicht sein. Jene halb domestizierten Katzen schlugen sich mit Sicherheit meist selbst durch. Sie blieben perfekte Jäger und Futterbeschaffer. Auch die meisten heutigen Hauskatzen lieben ihre Freiheit. Viele können leicht auch allein überleben. Unzählige verwilderte Katzen beweisen das.

Man darf vermuten, dass Menschen die kleinen Räuber duldeten, weil sie wenig Schaden anrichteten. Vielleicht behielt man sie sogar ganz gern in der Nähe, wenn man bemerkte, dass sie Mäuse und Schlangen erbeuteten. Doch auch sonst könnten Katzen auf die Menschen anziehend gewirkt, ja sogar Betreuunginstinkte geweckt haben. Nach Ansicht mancher Fachleute entsprechen schon Wildkatzen in manchen Zügen dem »Kindchenschema« – mit ihren großen Augen, dem stupsnasigen Gesicht und der hohen, runden Stirn. Wer weiß – manches niedliche junge Kätzchen mag deshalb ins Haus genommen, versorgt und gezähmt worden sein.

Wieso aber wurde die lybische Falbkatze als einzige der Unterarten domestiziert? Einzelbeobachtungen lassen vermuten, dass die Europäische Wildkatze und die chinesische Graukatze (Gobikatze) Menschen gegenüber weniger tolerant sind. Doch die Unterarten im südlichen Afrika und in Zentralasien werden leichter zutraulich. Unter passenden Bedingungen hätten sie vermutlich zum Haustier werden können. Aber nur die Falbkatze lebte dort, wo die ersten menschlichen Siedlungen

REISE IN DIE WEITE WELT

Mit der Landwirtschaft und menschlichen Sesshaftigkeit verbreitete sich auch die Hauskatze. Die Orte bezeichnen ihr mutmaßlich erstes Erscheinen in der betreffenden Region.



aufkamen. Das verschaffte ihr offenbar den entscheidenden Vorsprung. Denn als sich die Landwirtschaft in andere Regionen ausbreitete, kamen die zahmen Katzen einfach mit. Sie besetzten quasi an jedem neuen Ort die spezielle Nische in menschlicher Nähe, schnitten somit den heimischen Wildkatzen den Zugang von vornherein ab. Sonst wären später vielleicht auch in afrikanischen oder anderen asiatischen Gegenden domestizierte Katzen entstanden.

**40 Jahre für eine Domestikation**

Niemand weiß, wie lange es dauerte, bis aus der nahöstlichen Falbkatze ein verschmuster Hausgenosse wurde. Bei gezielter Zucht kann der Domestikationsprozess recht schnell voranschreiten. Russische Forscher benötigten bei einem Experiment mit Silberfüchsen, das 1959 begann, nur vier Jahrzehnte strenger Selektion, um aus wilden, scheuen Tieren zutrauliche, umgängliche Füchse zu machen. So strikt gingen die neolithischen Bauern sicher nicht vor, selbst wenn sie Einfluss hätten nehmen mögen. Die Katzen liefen vermutlich frei umher, wählten ihre Paarungspartner selbst und trafen wohl auch manchmal wilde Artgenossen. Dadurch mag der Domestikationsprozess ein paar Jahrtausende gebraucht haben.

Etwas mehr dazu erzählen archäologische Funde. Der nächstjüngere Hinweis nach dem Katzengrab von Zypern ist ein Katzenbacken-

zahn, der an einer rund 9000 Jahre alten Stätte in Israel auftauchte und von einer engeren Beziehung zu Menschen zeugt. Auch bei 4000 Jahre alte Hinterlassenschaften in Pakistan fand sich solch ein Zahn.

Die frühesten Zeugnisse für tatsächlich erfolgte Domestikation sind viel jünger. Aus Palästina stammt die knapp 3700 Jahre alte Elfenbeinfigur einer Katze (siehe Kasten links). Es sieht so aus, als wäre den Menschen im Fruchtbaren Halbmond der Anblick von Katzen in ihrem Wohnumfeld vertraut gewesen, schon bevor die Tiere in Ägypten erschienen. So verwunderlich wäre das nicht, denn abgesehen vom Esel erhielt das Niltal all seine domestizierten Tiere und Pflanzen aus dem Fruchtbaren Halbmond. Doch erst Darstellungen aus der ägyptischen Blütezeit, die mit dem »Neuen Reich« vor fast 3600 Jahren einsetzte, zeigen untrüglich wirklich domestizierte Katzen. Auf den Abbildungen hocken die Tiere unter Stühlen. Manche tragen ein Halsband oder sind angebunden. Viele fressen aus Schüsseln oder verzehren Speisereste. So häufig, wie man damals Katzen malte, dürften sie reguläre Haushaltsmitglieder gewesen sein.

Vor allem auf Grund jener Darstellungen hatten frühere Forscher die Katzendomestikation ins Nilgebiet gelegt. Die ältesten ägyptischen Darstellungen von Wildkatzen sind aber 5000 bis 6000 Jahre jünger als das erwähnte 9500 Jahre alte Katzengrab auf Zypern. Im-

**RETTUNG FÜR DIE SCHOTTISCHE WILDKATZE**

Die nördlichste Restpopulation der Europäischen Wildkatze ist stark bedroht. Schätzungsweise nur noch 400 reinrassige Tiere leben heute, denn durch verwilderte Hauskatzen treten oft Bastarde auf. Äußerlich sind die Mischlinge, und vielfach selbst Hauskatzen, oft schwer von echten Wildkatzen unterscheidbar. Jetzt entdeckten die Autoren bei der schottischen Wildkatze eine besondere genetische Signatur. Das erleichtert es, ihren Schutz durchzusetzen.



#### Literaturhinweise

**Clutton-Brock, J.:** A Natural History of Domesticated Mammals. Cambridge University Press, Natural History Museum, 2. Auflage 1999.

**Driscoll, C. A. et al.:** The Near Eastern Origin of Cat Domestication. In: Science 317, S. 519–523, 27. Juli 2007.

**Kitchener, A.:** The Natural History of the Wild Cats. Cornell University Press, Comstock Publishing Associates, 1997.

**Menotti-Raymond, M. et al.:** Patterns of Molecular Genetic Variation among Cat Breeds. In: Genomics 91(1), S. 1–11, 2008.

merhin dürften wir es zu einem großen Teil dem alten Ägypten verdanken, wenn die Katze heute zu den beliebtesten, weltweit verbreiteten Haustieren zählt. Die Wertschätzung von Katzen gewann damals ganz neue Ausmaße. Vor rund 2900 Jahren wurde die Katzengöttin Bastet als offizielle Gottheit verehrt. Katzen waren heilig, sie wurden geopfert, mumifiziert und zahlreich in Bubastis, der heiligen Stadt dieser Göttin, bestattet. Die massenhaften Mumien lassen ahnen, dass die Ägypter nicht nur auf frei herumstreunende Katzen zugriffen, sondern die Tiere erstmals in der Geschichte absichtlich hielten und vermehrten.

Katzen auszuführen war im Ägypten jener Jahrhunderte strengstens verboten. Trotzdem gelangten sie schon vor 2500 Jahren nach Griechenland. In späterer Zeit nahmen Getreideschiffe, die von Alexandria aus das Römische Reich versorgten, sie offenbar als Ratten- und Mäusefänger mit an Bord. Das war

für die kleinen Räuber sicherlich die Gelegenheit, in vielen Hafenstädten Populationen zu gründen und von dorthier auch das Binnenland zu erobern.

Als die Römer vor 2000 Jahren ihr Reich gewaltig ausdehnten, waren wiederum Katzen mit von der Partie. So wurden sie bald in ganz Europa heimisch. Ausgrabungen bei Tofting (nahe Tönning) auf Eiderstedt in Schleswig-Holstein vom 4. bis 10. Jahrhundert erweisen ihre frühe Ausbreitung nach Norden. Auch in Kunst und Literatur erschienen Katzen zunehmend. Interessanterweise schafften sie es auf die Britischen Inseln wohl vor den Römern.

Den fernen Osten erreichten Hauskatzen vermutlich bald nach der Zeitenwende von Mittelmeerregionen her über etablierte Handelsrouten. Nach China gelangten sie über Mesopotamien, Indien besiedelten sie auf dem Land- und Seeweg. Im fernen Asien passierte etwas Interessantes: Dort lebten keine Wildformen ihrer Art, mit denen sie sich hätten mischen können. Auch wiesen sie oft nur geringe Individuenzahlen auf. So traten in manchen kleinen, isolierten Gruppen bald besondere Fellfarben und dergleichen auf, und Mutanten setzten sich durch.

So entstanden die thailändische graublau-weiße Korat-Katze oder Si-Sawat, die siamesische oder Siamkatze, die Birmakatze und andere Rassen. Thailändische buddhistische Mönche

## KATZEN KONTRA HUNDE

**An Vielfalt kann die Hauskatze** mit dem Hund nicht mithalten. Weder solch enorme Unterschiede in Körpergröße und Körperbau kommen vor noch ähnlich weit gestreute Verschiedenheiten im Naturell. Hauskatzenrassen weichen hauptsächlich im Fell voneinander ab. Hunde züchtete der Mensch seit Jahrtausenden für bestimmte Leistungen, die er steuern wollte. Sie sollten zum Beispiel Wild stellen oder Schlitten ziehen. Katzen boten sich für derartige nützliche Dienste anscheinend von Natur aus nicht an.



KATZEN: GETTY IMAGES / GANDEE VASAN; HUNDE: GETTY IMAGES / TIM FLACH

haben sie im »Tamara Maew«, wohl um 1350, in Versen verewigt. Dass diese Linien recht alt sind, erwiesen kürzlich auch DNA-Rassenvergleiche, die Marilyn Menotti-Raymond vom amerikanischen National Cancer Institute in Bethesda (Maryland) und Leslie Lyons von der University of California in Davis durchführten. Demnach entwickeln sich europäische und östliche Hauskatzen seit über 700 Jahren getrennt.

Über die Anfänge in Amerika wissen wir nichts Genaues. Christoph Kolumbus und andere Seefahrer hatten bei ihren frühen Atlantiküberquerungen seit 1492 auf jeden Fall Katzen auf dem Schiff. Zur nordamerikanischen Ostküste sollen im frühen 17. Jahrhundert die ersten englischen Siedler, die Gründer von Jamestown und die Pilgerväter, Katzen mitgebracht haben. Die sollten Schädlinge bekämpfen und Glück bringen.

Noch unklarer ist die erste Besiedlung Australiens. Nach Ansicht der Forscher könnten die ersten Katzen dort im 17. Jahrhundert von europäischen Seefahrern eingeschleppt worden sein. Unsere Gruppe an den National Institutes of Health geht dieser Frage mit DNA-Studien nach.

### Ursprünge der modernen Katzensucht

Die gezielte Züchtung von Katzenrassen setzte erst spät ein. Sollte der Mensch schon bei den alten Rassen des fernen Ostens eingegriffen haben, dann wohl eher marginal. Die alten Ägypter hatten die Tiere zwar in Mengen gezüchtet, scheinen jedoch noch nicht selektiv auf unterschiedliches Aussehen Einfluss genommen zu haben. Sie stellten Wild- wie Hauskatzen mit der gleichen streifig-fleckigen Fellzeichnung dar. Vermutlich waren damals noch keine Varianten aufgetreten. Die meisten der heutigen Rassen entstanden nach Meinung von Experten im 19. Jahrhundert in Großbritannien. Demnach begründete der englische Künstler, namhafte Tierzeichner und Buchillustrator Harrison Weir (1824–1906) die moderne Katzensucht. Er organisierte auch 1871 in London die erste Rasseausstellung. (Den ersten Preis trug eine Angora- oder Perserkatze davon – obwohl eine Siamkatze erhebliches Aufsehen erregte.)

Zuchtkatzenverbände unterscheiden heute an die 60 Rassen. Für die Farbunterschiede, die Haarlänge und -textur sowie Schattierungen und Fellschimmer sorgen nur rund ein Dutzend Gene. Die Abessinierkatze »Cinnamon«, Vertreterin einer der ältesten Katzenrassen, lieferte das Erbgut für die erste Sequenzierung eines Katzen-genoms, die 2007 gelang. Dank dessen finden Forscher nun rasch die Mutationen für die einzelnen, teils



MIT FROH. GEN. VON KATHRIN STUCKEL AT SAVANNAH

ausgefallenen Fellfarben, Zeichnungen und Haarstrukturen.

Abgesehen davon unterscheiden sich die Rassen genetisch auffallend wenig. Die Abweichungen sind nicht größer als etwa beim Menschen die zwischen benachbarten Populationen, sagen wir zwischen Franzosen und Italienern. Katzen sind längst nicht so verschieden wie Hunde, weder in der Größe – man denke nur an Dänische Doggen und Chihuahuas (Foto links) – noch in der Gestalt oder im Wesen. Hunde züchtet der Mensch seit der Vorzeit für verschiedene spezielle Arbeitszwecke: etwa als Wach-, Jagd- oder Schäferhund. Katzen erlebten nie einen so strengen Selektionsdruck. Sie mussten nur Menschen einigermaßen ertragen und durften dafür die Mäuse im Wohnumfeld in Schach halten.

Sind unsere Hauskatzen überhaupt richtig domestiziert? An sich schon – aber vielleicht nur gerade eben so. Sie dulden Menschen, ein wichtiges Kriterium. Trotzdem benehmen sich die meisten von ihnen eher wie Wildlinge: Sie können ihr Futter allein finden, ebenso Geschlechtspartner. Andere Haustiere, Hunde etwa, sehen oft ganz anders aus als ihre wilden Ahnen. Dagegen ähnelt das Gros der Hauskatzen körperlich noch einer Wildkatze. Morphologische Unterschiede gibt es dennoch, so hauptsächlich die kürzeren Beine, das kleinere Gehirn und der schon von Charles Darwin erwähnte längere Darm, der sich zum Fressen von Küchenabfällen entwickelt haben mag.

Für die Hauskatze ist die Evolution längst nicht beendet. Mit künstlicher Befruchtung, auch im Reagenzglas, betreten Katzenzüchter heute sogar neues Terrain: Sie kreuzen fremde Katzenarten ein und erzeugen so völlig neue, exotische Rassen, etwa mit Bengalkatzen (Leopardkatzen), Karakals oder Servals (siehe Foto oben). Das könnte den Weg zu einem nie da gewesenen Haustier ebnen, das gleich eine ganze Reihe von Arten in sich trägt. ◀

**Durch Kreuzung von Hauskatzen mit Servals entstand die Rasse der Savannah-Katzen. Die Mode, mit anderen Arten Bastarde zu erzeugen, könnte diesem Haustier neue Pforten öffnen.**



**Carlos A. Driscoll** arbeitet an der University of Oxford sowie in den USA am National Cancer Institute in Bethesda (Maryland) im Laboratory of Genomic Diversity, das **Stephen J. O'Brien** leitet. **Juliet Clutton-Brock**, eine Pionierin der Domestikationsforschung, hat den International Council for Archaeozoology gegründet und am Natural History Museum in London gearbeitet. **Andrew C. Kitchener** ist Kurator bei den National Museums Scotland.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023390](http://www.spektrum.de/artikel/1023390).

# Leben zum Selbermachen

Mit der synthetischen Biologie werden Forscher demnächst Organismen produzieren, die es bisher so in der Natur nicht gab. Neben Problemen der ökologischen Sicherheit wirft dies auch Fragen zur Rolle der Wissenschaft und ihrer Verantwortung auf.

Von Joachim Boldt und Oliver Müller

**E**ine stille Revolution bahnt sich an, wenn demnächst Biologen völlig neuartige Organismen in die Welt setzen können; erste Beispiele inklusive Patentanträge gibt es schon. Der Forschungszweig, der sich damit befasst, nennt sich synthetische Biologie. Er vereint Gentechnik, Systembiologie, Informationstechnik und Ingenieurwissenschaft mit dem Ziel, einzellige Lebensformen auf Wunsch herzustellen.

Wegen der Radikalität dieses Ansatzes ist es nicht erstaunlich, dass das Fragen aufwirft: Ist die synthetische Biologie vielleicht eine Bedrohung? Oder steht das Forschungsgebiet lediglich im Schatten des Frankenstein-Mythos von der künstlichen Erschaffung eines Lebewesens? Die noch junge Disziplin führt einerseits die klassische Gentechnik weiter, die ja schon fast traditionell zu kritischen Debatten und kontroversen Gesetzgebungen Anlass gab. Andererseits sehen wir in solchen Entwicklungen eine qualitativ neue Dimension des wissenschaftlichen Umgangs mit Lebewesen.

Beide Forschungsrichtungen haben zunächst zum Ziel, genetische Bausteine in Organismen so zu verändern, dass diese für den Menschen nützliche Eigenschaften erhalten. Mit den Fortschritten bei der Gentechnik

geht es in der synthetischen Biologie aber nicht mehr nur darum, kurze Genabschnitte zu transplantieren. Stattdessen können bald längere Abschnitte der Erbmoleküle und womöglich ganze Genome synthetisiert und weitgehend frei gestaltet werden.

Auf den ersten Blick mag das wie ein rein technischer Unterschied wirken. Er hat jedoch ethisch bedeutsame Konsequenzen:

- Die synthetische Biologie lässt sich nicht mehr nur als Manipulation von Lebewesen, sondern auch als Kreation neuer Lebensformen verstehen.
- Der kulturell tief verwurzelte Topos von der künstlichen Erschaffung von Leben sowie der Lebensbegriff rücken damit generell ins Zentrum der Aufmerksamkeit.
- Wenn nun der Mensch demnächst auf so dramatische Weise in die Natur eingreift, dann erwarten wir, dass dies auch das Selbstverständnis der Wissenschaftler sowie das Selbstbild des Menschen tangiert.

Ziel der synthetischen Biologie ist es, biologische Systeme, die in der Natur nicht vorkommen, von Grund auf zu entwerfen und herzustellen. Paradigmatisch dafür ist der Versuch, einen Organismus herzustellen, der auf elementare evolutionäre Funktionen beschränkt ist. Auf diese Basis könnten dann weitere standardisierte Genomsequenzen aufgesetzt wer-

## LEXIKON I

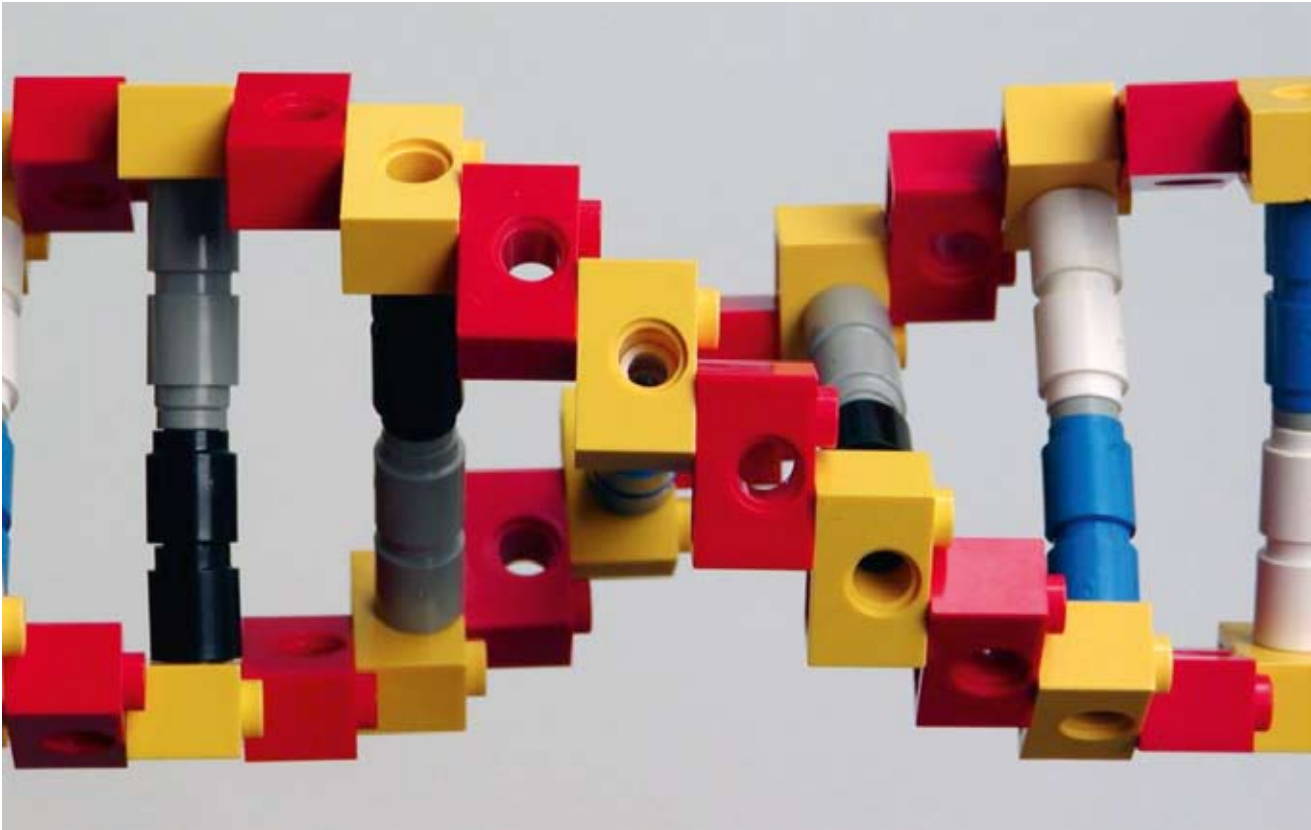
### MEDIZIN- UND BIOETHIK

Disziplinen, die sich in zunehmend institutionalisierter Form mit ethischen Aspekten aktueller Entwicklungen in der modernen Medizin und den Lebenswissenschaften beschäftigen

### SYNTHETISCHE BIOLOGIE

Ein junges Forschungsgebiet, das Gentechnik, Systembiologie, Informationstechnik und Ingenieurwissenschaft zusammenbringt, um einfache, einzellige Lebensformen synthetisch herzustellen





MICHAEL KNOWLES / FLORENZ

den, um einen Organismus hervorzubringen, der Fähigkeiten aufweist, die genau auf menschliche Bedürfnisse abgestimmt sind.

Der unter dem Begriff des minimalen Bakteriengenoms eingereichte Patentantrag des amerikanischen J. Craig Venter Institute vom Mai 2007 ist Ausdruck für erste Erfolge auf diesem ehrgeizigen Weg. In dem Antrag beanspruchen die Forscher das Herstellungs-, Gebrauchs- und Vermarktungsrecht an einem Lebewesen, dessen genetischer Kode eine reduzierte Version des Genoms von *Mycoplasma genitalium* darstellt, einem Erreger von Harnröhrentzündungen. (J. Craig Venter taufte sein Kunstprodukt übrigens auf den Namen *M. laboratorium* oder auch JCVI-1.0, Version 1.0 des neu erzeugten Lebens also.) Der Organismus könne, so berichtete Venters Forschergruppe Anfang 2008, zwar wachsen und sich reproduzieren; darüber hinaus aber habe er keine spezifischen Fähigkeiten mehr.

Die neue Basisstruktur könne als Ausgangsplattform dienen, um künstlich hergestellte, standardisierte genetische Module aufzunehmen. Diese sollten sie mit neuen Eigenschaften versehen, etwa der Fähigkeit, alternative Kraftstoffe wie Ethanol oder Wasserstoff zu erzeugen. Was mit solcher Art der Biotechnologie inzwischen möglich ist, zeigt sich bereits am Wettbewerb um die »Internation

Genetically Engineered Machine«, kurz iGEM, einer jährlichen Veranstaltung des Massachusetts Institute of Technology (MIT). Er wendet sich hauptsächlich an findige Studenten aus aller Welt. Sie sollen genetische Module entwickeln, die sie in lebende Zellen einpflanzen. Dort könnten diese Eigenschaften erzeugen, die keinen bestimmten Nutzen haben müssen, sondern nur überraschend oder cool sind. Die Ergebnisse reichen bislang von Bakterien, die in Regenbogenfarben schillern oder nach Banane riechen, bis hin zu Biosensoren, die Arsen in der Umwelt aufspüren (SdW 4/2009, S. 16).

Mit der Teilnahme ergeht die Aufforderung, standardisierte biologische Bausteine, so genannte BioBricks (angelehnt an *Lego bricks*, englisch für Legosteine), zu verwenden und neue Bausteine in einer Open-Source-, also frei zugänglichen Datenbank abzulegen. Den Gedanken freier Verfügbarkeit aufnehmend, hat sich inzwischen schon eine Gemeinschaft von Do-it-yourself-Biologen entwickelt. Wer im Netz nach DIYBio sucht, wird fündig.

Der etwas spielerische iGEM-Wettbewerb zeigt jedenfalls, dass in der synthetischen Biologie Leben nicht nur interessengeleitet umgestaltet, sondern auch mal nur so zum Spaß kreiert werden kann. Hier geht es ganz wörtlich um kreative Tätigkeiten: nämlich die

**Biologen wollen Erbmoleküle ähnlich wie im Legomodell künstlich herstellen. So werden die Forscher zu Schöpfern völlig neuer Lebewesen. Wie Wissenschaft und Gesellschaft damit umgehen sollen, wird derzeit heftig diskutiert.**

**nature**

Aktualisierte und erweiterte Fassung des Artikels aus »Nature Biotechnology« 26, S. 387–389, April 2008



PUBLIC DOMAIN

Für Immanuel Kant (1724–1804) war die Erschaffung neuer Lebewesen aus Materie prinzipiell undenkbar.

Herstellung einfacher Lebensformen, die es so noch nicht gibt. Zwar ist das Ziel dabei normalerweise nicht, eine lebende Zelle aus einfachen Molekülen aufzubauen (das gibt es auch). Aber die freie und sehr weit reichende genetische Synthese von Einzellern aus abge-speckten Basiszellen muss als qualitativer Sprung zu einer neuen Perspektive der Schöpfung verstanden werden.

### Neue Organismen, die nur der Willkür und Fantasie der Erzeuger unterliegen

Dieser qualitative Sprung von der gentechnischen *manipulatio* zur synthetisch-biologischen *creatio* ist nicht ohne ethische Bedeutung. Der in der synthetischen Biologie verwendete Basisorganismus weist nur solche Merkmale auf, die für ein biologisches Wesen als minimal erforderlich angesehen werden. Alle weiteren für die Identität des Einzellers verantwortlichen Eigenschaften unterliegen dagegen allein der Fantasie und Willkür seines Erzeugers. Sehen wir die Welt durch die Brille der Gentechnik, dann erblicken wir eine Vielzahl von Organismen, die bereits in vielen Aspekten nützlich für den Menschen sind, aber hier und da noch besser an unsere Bedürfnisse und Interessen angepasst werden können – ein Beispiel hierfür ist die Anreicherung von Reis mit Betacarotin beim so genannten goldenen Reis.

In der synthetischen Biologie geht es dagegen nicht darum, Organismen nützliche Merkmale hinzuzufügen, sondern sie von Grund auf so zu formen, dass sie für unsere Bedürfnisse maßgeschneidert sind. Aus dieser Perspektive gleicht die Natur einer leeren Hülle, die mit allem Erdenklichen gefüllt werden kann, was unseren Interessen entspricht. Es mag Fälle geben, in denen die Veränderung einer Lebensform per Gentechnik vielleicht sogar mehr ethische Bedenken aufwirft als eine Neuschöpfung. Dennoch steuern beide Technologien letztlich in unterschiedliche Richtungen. Die gentechnische Umgestaltung zielt immerhin auf die Verbesserung von bereits existierenden Lebewesen ab, was sich nicht mit einer Neuschaffung vergleichen lässt – jetzt lädt das Bild einer Natur, die nach Belieben gestaltet werden kann, fast schon von selbst dazu ein, gänzlich neue Lebensformen zu erfinden.

Ende des 18. Jahrhunderts behauptete Immanuel Kant kühn, dass es einen »Newton des Grashalms« niemals geben könne – nach dem Motto »Gebt mir Materie, ich will euch zeigen, wie eine Raupe erzeugt werden könne«. Für den Königsberger Philosophen war eine solche Vorstellung nicht nur praktisch unmöglich, sondern auch völlig ausgeschlos-

sen. Heutzutage ist die synthetische Biologie nahe an dem Punkt, Kant zu widerlegen. Obwohl die Erschaffung von Leben aus einzelnen Molekülen ein bis dato unerreichtes Ziel darstellt, stehen wir kurz davor, die Grenzlinie zwischen Manipulation und Kreation zu überschreiten. Aus ethischer Perspektive ist die Verschiebung von der *manipulatio* zur *creatio* – keiner *creatio ex nihilo*, aber doch einer *creatio ex existente* – von entscheidender Bedeutung, weil sich damit unser Verhältnis zur Natur grundlegend ändert.

Einem Objekt das Prädikat lebendig zuzusprechen ist, historisch wie systematisch, mit der Überzeugung verbunden, dass es – im Gegensatz zu einem bloßen Gegenstand – zumindest eine sich (mehr oder weniger) entwickelnde Entität darstellt. Daher ist es ethisch geboten, ein klares Verständnis davon zu bekommen, nach welchen Maßgaben eine neue Lebensform erschaffen wird. Denn dies betrifft die Art, wie Leben als solches begriffen und welcher Wert ihm beigemessen wird.

Das erwähnte Beispiel des iGEM-Wettbewerbs ist auch hier aufschlussreich. Sein Ziel ist ja nicht, Leben zu verändern oder Lebensformen zu kreieren, sondern aus BioBricks Maschinen herzustellen. Die künstlichen Mikroorganismen und ihre Signalkaskaden werden gerne auch mit den Metaphern von Hardware und Software beschrieben. Ebenso wird die Basisstruktur eines neuen Organismus als Chassis bezeichnet und die Resultate als *living machines*.

Diese Metaphern identifizieren Organismen mit Artefakten, womit beispielsweise die Evolutionsfähigkeit der Entitäten mit all ihren Implikationen auch in Bezug auf Risikoabschätzungen aus dem Blick geraten kann. Man mag außerdem – spekulativ – befürchten, eine solche Art der Beschreibung von Leben könnte auf lange Sicht dazu führen, dass höheren Lebensformen nicht mehr die Schutzwürdigkeit zugesprochen wird, die sie heute in der Regel erfahren. Wissenschaftler sollten daher umso vorsichtiger im Gebrauch bestimmter Metaphern sein, je mehr sich die eigentliche Erschaffung von Leben aus einfachen Molekülen der Verwirklichung nähert.

Die Frage, inwiefern synthetische Organismen lebendig sind, wird spätestens dann bedeutsam, wenn wir tatsächlich irgendwann Leben ab initio, also aus einfachen Molekülbausteinen synthetisieren können. Daneben könnten auch Ansätze diese Frage dringlicher werden lassen, in denen bereits versucht wird, die aus der Natur bekannten vier organischen Basen, aus denen die DNA aufgebaut ist, durch andere Basen zu ersetzen oder den genetischen Kode zu erweitern (siehe »Den

## LEXIKON II

**DER iGEM-WETTBEWERB** (International Genetically Engineered Machine Competition) des MIT in den USA wendet sich an Studenten weltweit. Hier geht es darum, genetische Module mit besonderen Eigenschaften zu entwickeln und in Zellen einzubauen.

**DIYBio** bezeichnet Amateurbiologen, die sich die Möglichkeiten der synthetischen Biologie in kleinen Heimlaboren nach der Methode »Do it yourself« zu eigen machen.

**J. CRAIG VENTER**, Pionier nicht nur der Genomik, sondern auch der synthetischen Biologie, plant, einen genetisch minimierten Organismus herzustellen, der als Basis für die Produktion etwa von Ethanol dienen kann.

Kode des Lebens erweitern«, Spektrum der Wissenschaft 1/2009, S. 42).

Wissenschaftliche Definitionen des Lebens sind Arbeitshypothesen, die nicht unbedingt dem entsprechen müssen, was wir im alltäglichen, philosophischen oder wissenschaftstheoretischen Sinn unter Leben verstehen. In anderen Zusammenhängen können diese Begriffsbildungen als zu eng erscheinen. Angesichts der Probleme, Leben und seine normative Reichweite zu bestimmen, ist es wichtig, dass Leben und Maschine begrifflich nicht voreilig gleichgesetzt oder ineinander überführt werden.

Die synthetische Biologie wird in der Öffentlichkeit wohl oder übel als Schöpfer von »Animuncula« wahrgenommen werden – ein Neologismus, den wir in Anlehnung an den bekannten Homunkulus gewählt haben. Goethes Faust und Shelleys Frankenstein sind nun mal kulturelle Chiffren, die hier durchschimmern, auch der häufig als Totschlagargument verwendete Vorwurf des Gott-Spielens liegt nicht fern. Diese Forscher mit Faust (Teil II) oder Frankenstein in Zusammenhang zu bringen, entspringt aber nicht bloß der Fantasie einer besorgten Öffentlichkeit. Vielmehr sind dies Stereotypen, die das Selbstbild von Wissenschaftlern und Gesellschaft künftig mitbestimmen werden. Forscher und Öffentlichkeit sind der Suggestivkraft solcher Vergleiche gleichermaßen ausgesetzt.

### Natur als leere Hülle

Im Schritt von der Manipulation zur Kreation wird sich das Selbstbild des baconschen Homo faber wandeln, und zwar hin zum Homo creator. Dieser wird nicht mehr lediglich Unzulänglichkeiten ausbügeln, sondern eine Natur erschaffen, die – jedenfalls dem Anspruch nach – keine Unzulänglichkeiten mehr aufweist. Die Nutzung der Natur als Ressource durch Kultivierung, Manipulation oder Ausbeutung läßt sich kaum vergleichen mit ihrer Neuerfindung. Zwar könnte dieses Vorgehen – entsprechende Sicherheitsmaßnahmen vorausgesetzt – in vielen konkreten Fällen gerechtfertigt sein. Aber das Paradigma vom Homo creator kann dazu führen, dass wir unser Verständnis von der Natur der Lebewesen überschätzen, wenn wir glauben, sie nicht nur manipulieren, sondern in besserer Form neu entwerfen zu können.

So bleibt zweifellos ein qualitativer Unterschied zwischen einer Einstellung, die die Natur als vorgegeben ansieht, und einer, welche sie als leere Hülle begreift, die sich nach Belieben füllen läßt. Solange dieser in der öffentlichen Debatte nicht berücksichtigt wird, besteht die Gefahr, dass man der großen Verfüh-

rungskraft des menschlichen Selbstbilds als Schöpfer unreflektiert erliegt. Mögliche Alternativen können damit aus dem Blickfeld geraten – und Selbstbilder fungieren immer als wichtiger Rahmen für ethische Bewertungen.

Angesichts der gesellschaftlichen Bedeutung dieser Entwicklungen ist es nicht verwunderlich, dass auch ethische Implikationen bereits heftig debattiert werden. Viele Einwände konzentrieren sich auf potenzielle Gefahren des neuen Forschungsfelds. So wird beispielsweise wie schon bei den genetisch modifizierten Organismen die genaue Überwachung und Prävention unkontrollierter Fortpflanzung und Verbreitung neuartiger Lebensformen in der Umwelt gefordert. Außerdem wird auf Gefahren des vorsätzlichen Missbrauchs durch terroristische Gruppen verwiesen, und es wird befürchtet, dass sich Einzelne als Biodesignhacker betätigen könnten.

Gerade dann, wenn man in Rechnung stellt, dass die synthetische Biologie einem Paradigma der Herstellung neuartiger, maschinengleicher Entitäten folgt, erscheint ein genauer Blick auf diese Arten von Risiken dringend erforderlich. Wenn man etwa an die Do-it-yourself-Biologen und ihre Spielwiesen denkt, wird schnell klar, wie anspruchsvoll die Aufgabe im Fall völlig neuartiger Organismen werden kann. Die Synthetic-Biology-Community ist sich solcher Probleme deutlich bewusst. So haben Forscher der University of California in Berkeley bereits 2006 ein *White Paper* mit Regeln für ethisches Verhalten erstellt, das auf der Konferenz Synthetic Biology 2.0 in einem breiten Kreis diskutiert wurde (siehe Weblinks).

Die Debatte, die gerade auch unter den Biologen selbst geführt wird, zeigt, dass es für Naturwissenschaftler abermals wichtig sein wird, eine Vorstellung von der Rolle ihrer Forschungen in einem breiteren kulturellen Kontext zu gewinnen. Ethische Fragen zur synthetischen Biologie sind hier keine lästige Pflichtübung, die sich auslagern läßt. Vielmehr sollten sie Teil des Studiums sowie des Forschungsalltags werden – sozusagen als Graswurzel-Ethik. Damit wollen wir nicht sagen, dass solche bisher noch nirgendwo formuliert worden sind. Wie wir zeigten, stellen sie sich aber jetzt in besonderer Schärfe.

Wir erwarten, dass die synthetische Biologie in naher Zukunft kritische Aufmerksamkeit über die Fachkreise hinaus auch in einer breiteren Öffentlichkeit hervorruft. Sie wird sich fragen, wie unsere Zukunft sich verändert angesichts von »Animuncula«, die im radikalen Bruch mit der Evolution von rastlosen Schöpfern in die Welt gesetzt werden. ◀



**Joachim Boldt** (links) studierte Philosophie, Linguistik und Literaturwissenschaft in Heidelberg, Sheffield und Berlin. Seit 2006 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Ethik und Geschichte der Medizin der Universität Freiburg und dort Mitglied des Exzellenzclusters »Biological Signalling Studies«. **Oliver Müller** hat in Heidelberg, Hamburg, Venedig und Berlin Philosophie und Literaturwissenschaft studiert und arbeitet heute am gleichen Institut als Leiter der dortigen Bioethik-Nachwuchsgruppe. Neben der synthetischen Biologie beschäftigen sich beide mit Fragen zu den anthropologischen Grundlagen der Ethik sowie zu ethischen Implikationen von Technisierungsprozessen.

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com/nbt](http://www.nature.com/nbt)

**Boldt, J., Müller, O., Maio, G.:** Synthetische Biologie. Eine ethisch-philosophische Analyse. Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern 2009. Erhältlich unter [www.ekah.admin.ch/uploads/media/EKAH\\_Synthetische\\_Biologie\\_Inhalt\\_V.pdf](http://www.ekah.admin.ch/uploads/media/EKAH_Synthetische_Biologie_Inhalt_V.pdf).

**Kwok, R.:** Five Hard Truths for Synthetic Biology. In: Nature 463, S. 288 – 290, 21. Januar 2010.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023389](http://www.spektrum.de/artikel/1023389).

# Neue Strategien gegen SUPERKEIME

Krank machende Bakterien entwickeln zunehmend Resistenzen gegen gebräuch-  
liche Antibiotika, oft sogar gegen mehrere zugleich. Nur innovative Forschung kann  
der Medizin den dringend benötigten Waffennachschub verschaffen.

Von Christopher T. Walsh und  
Michael A. Fischbach

» Superkeim schlägt in der Stadt zu.« So lautete eine Schlagzeile der »New York Post« vom 26. Oktober 2007. Zwölf Tage zuvor war Omar Riveira aus Brooklyn an einer schweren Infektion gestorben: Der Zwölfjährige hatte sich beim Basketball eine Wunde zugezogen, über die ein methicillinresistenter Stamm von *Staphylococcus aureus* eindrang. Diese Form des Bakteriums, unter dem Kürzel MRSA bekannt, ist resistent gegen eine der derzeit wirksamsten Klassen von Antibiotika.

Um dieselbe Zeit war die Studie eines großen Forscherteams erschienen, wonach MRSA allein in den USA jährlich schätzungsweise 19 000 Todesfälle verursacht – mehr als das Aidsvirus HIV (in Deutschland, wo andere Stämme kursieren, sind es schätzungsweise 500 bis 2000, meist infolge einer »Blutvergiftung«). Im Fall einer ernsten Infektion starben rund 20 Prozent der Betroffenen und – was noch brisanter ist – darunter zunehmend junge Menschen, die sich den Superkeim bei Alltagsaktivitäten zugezogen hatten.

Früher beschränkte sich das MRSA-Problem auf Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen, wo viele Patienten abwehrgeschwächt und daher anfälliger sind. Selbst wenn MRSA-Infektionen nicht tödlich verlaufen, verursachen sie hohe Kosten: Wer sich als Patient im Krankenhaus eine zuzieht, muss im Durchschnitt zehn Tage länger stationär behandelt werden. In den USA verschlingt die stationäre Behandlung aller MRSA-Patienten jährlich immerhin drei bis vier Milliarden Dollar. Dabei sind Staphylokokken nicht die einzigen Keime, die sich zunehmend schwieriger bekämpfen lassen. Die moderne Medizin verliert mehr und mehr Boden im Kampf ge-

gen bakterielle Krankheitserreger, die bereits als besiegt galten. Um das Blatt zu wenden, bedarf es dringend innovativer Ansätze zur Entdeckung und Entwicklung weiterer Antibiotika.

Die Geschichte von MRSA illustriert beispielhaft, wie schnell Resistenzen gegen vorhandene Medikamente entstehen können. Die natürlichen Mechanismen, die bei Staphylokokken und anderen Bakterien dahinterstehen, führen praktisch zwangsläufig dazu – und machen einen konstanten Nachschub an neuen Antibiotika notwendig.

Methicillin, ein Abkömmling des bekannten Penizillins, war einst selbst eine neue Waffe: Es wurde 1959 zur Bekämpfung von Bakterienstämmen eingeführt, die gegen Penizillin unempfindlich geworden waren – darunter solche von *Staphylococcus aureus* und *Streptococcus pneumoniae*. Doch schon zwei Jahre später traten in europäischen Kliniken die ersten methicillinresistenten Stämme von *S. aureus* auf, und in den 1980er Jahren machte MRSA sich bereits in Krankenhäusern und Pflegeeinrichtungen der ganzen Welt breit. Mitte der 1990er Jahre kamen dann MRSA-Infektionen hinzu, die im Alltag – außerhalb solcher Einrichtungen – erworben wurden.

Die Behandlung ist schwierig. Ein Grund: Kommt es nicht bloß zu einer lokalen, sondern zu einer so genannten Blutbahninfektion, so können sich die Erreger rasch im gesamten Körper ausbreiten (in Deutschland sterben dann rund 30 Prozent der Betroffenen). Ihre übelste Eigenschaft ist jedoch ihre Resistenz gegen die gesamte Klasse der Beta-Lactam-Antibiotika – eine der wichtigsten Antibiotikaklassen, die unter anderem Cephalosporine und alle Abkömmlinge des Penizillins umfasst. Die Erreger produzieren ein Enzym, das Beta-Lactame spaltet und inaktiviert. Die resultierende Resistenz schränkt das medizinische Ar-

## In Kürze

- ▶ Gefährliche Bakterien entwickeln derzeit schneller **Resistenzen gegen verfügbare Antibiotika**, als der Mensch neue Wirkstoffe entdecken oder gestalten kann.
- ▶ Zu den innovativen Strategien, um schneller zu **neuen Antibiotika** zu gelangen, gehört das Durchforsten exotischer ökologischer Nischen und der Genome von Mikroorganismen.
- ▶ Neue Substanzen, die zielgenau gegen einzelne **pathogene Organismen** wirken oder ihnen das Handwerk legen, ohne sie abzutöten, könnten den Teufelskreis der Resistenzentwicklung durchbrechen.

senal gegen MRSA auf ein kleines Sortiment noch greifender Antibiotika ein, keines davon ohne schwere Nebenwirkungen. Teilweise versagen auch diese. Selbst gegen Vancomycin – das noch effektivste – sind bereits einige unempfindliche MRSA-Stämme aufgetaucht.

Es ist das Schicksal eines jeden neuen Antibiotikums, dass ab dem Moment der ersten therapeutischen Anwendung seine Uhr tickt, seine noch nutzbare Zeit wegen drohender Resistenzbildung schmilzt. Schuld daran ist die natürliche Selektion: In Gegenwart eines Antibiotikums bekommen zufällig resistente Stämme gegenüber allen empfindlichen Konkurrenten plötzlich einen Überlebensvorteil und vermehren sich besser.

Vancomycin wurde 1958 in den USA zugelassen und seit dem Auftreten methicillin-resistenter Staphylokokken zum wichtigsten Reserveantibiotikum. 2002 jedoch tauchten in Krankenhäusern die ersten zugleich vancomycinresistenten Stämme von *Staphylococcus aureus* (VRSA) auf: Abkömmlinge von MRSA, die ein Paket mit fünf Resistenzgenen – als so genannte Genkassette – erworben hatten. Die Gene darin kodieren für spezielle Enzyme, die in der VRSA-Zellwand dafür sorgen, dass diese an Stelle der sonst von Vancomycin angreifbaren Zielstruktur eine andere enthält. Die einstige »letzte Reserve« versagt hier.

### Handel mit Resistenzgenen

Das Angriffsziel eines Antibiotikums gegen eine Ersatzstruktur auszuwechseln, ist nur eine von drei Hauptstrategien, wie Bakterien ihr Problem umgehen (siehe Kasten S. 49 oben). Eine weitere Möglichkeit stellen Enzyme dar, die den Wirkstoff spalten oder chemisch so verändern, dass er unwirksam wird (wie im Fall der Beta-Lactam-Resistenz von MRSA). Eine dritte Option sind molekulare Pumpen, die das Bakterium in seiner Zellmembran installiert. Sie befördern eingedrungene Antibiotikamoleküle unverzüglich aus dem Zellinnern heraus und halten damit die Wirkstoffkonzentration in der Zelle so niedrig, dass das Bakterium in Gegenwart des Antibiotikums überleben kann.

Woher aber stammen die dafür kodierenden Resistenzgene? Einige entstehen durch zufällige Mutationen im bakterieneigenen Erbgut. Beispielsweise ist das Gen für das Zielenzym von Ciprofloxacin und anderen Fluorchinolon-Antibiotika bei der widerstandsfähigen Form verändert. Resistenzgene können auch von anderen Bakterien übernommen werden. So stammt die Genkassette, welche die Vancomycinresistenz vermittelt, ursprünglich aus einem Bakterium, das dieses Antibiotikum

Wie lässt sich multiresistenten Problemkeimen, so genannten Superbakterien, beikommen?



PETER UND MARIA HOEY

**Typische gebräuchliche Antibiotika** sollen bakterielle Erreger abtöten, indem sie darin wesentliche lebenswichtige Funktionen beeinträchtigen. Bakterien verfügen jedoch über Mittel und Wege, Antibiotika zu inaktivieren oder nicht zum Zuge kommen zu lassen.

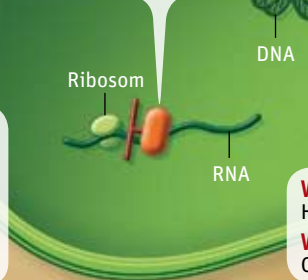
## ANGRIFFSWEISE

Gängige Antibiotika beeinträchtigen wichtige Funktionen der Bakterienzelle, darunter das Wachstum der Zellwand, die Produktion von Proteinen und das Entwinden der DNA beim Kopieren. Erläutert sind hier Wirkmechanismen verschiedener Antibiotikaklassen (mit Substanzbeispielen).



**WIRKMECHANISMUS:** Hemmung der Zellwandsynthese  
**WIRKSTOFFKLASSE (BEISPIEL):** Beta-Lactame (Methicillin)  
 Glykopeptide (Vancomycin)  
 Cephalosporine (Ceftibuten)  
 Carbapeneme (Imipenem)

**WIRKMECHANISMUS:** Hemmung der Proteinsynthese  
**WIRKSTOFFKLASSE (BEISPIEL):** Tetracycline (Minocyclin)  
 Makrolide (Erythromycin)  
 Oxazolidone (Linezolid)  
 Aminoglykoside (Streptomycin)  
 Mutilane (Retapamulin)



**WIRKMECHANISMUS:** Hemmung der Synthese von Nucleinsäurebausteinen  
**WIRKSTOFFKLASSE (BEISPIEL):** Sulfonamide (Sulfamethoxazol)  
 Trimethoprim



**WIRKMECHANISMUS:** Hemmung der DNA-Entwindung  
**WIRKSTOFFKLASSE (BEISPIEL):** Chinolone (Ciprofloxacin)

ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE: JAMITOLPA

zur Abwehr anderer Mikroben produziert. Es benötigt diese Gene, um sich vor seinen eigenen chemischen Waffen zu schützen. Stämme anderer Arten erwarben diesen Abwehrmechanismus vermutlich über den beständigen Genaustausch unter Bakterien, der als horizontaler Gentransfer bezeichnet wird.

Als Transfervehikel benutzen Bakterien oft Plasmide. Das sind ringförmige DNA-Moleküle, die sich wie radikal abgespeckte Viren verhalten: Plasmide sorgen für ihre eigene Übertragung von einem Wirtsbakterium zum anderen, das sie wie eigene DNA behandelt und mit vervielfältigt. Zur besseren Verbreitung enthalten Plasmide zugleich Gene, die das Überleben ihrer Wirte begünstigen, darunter solche für Antibiotikaresistenz. In Klärwerkstätten stießen Forscher sogar auf ein Plasmid mit neun verschiedenen Antibiotika-Resistenzgenen.

Ein frischer horizontaler Gentransfer offenbarte sich 2002 an einem Klinikum in Michigan bei einem Dialysepatienten: Im Körper wurden MRSA, VRSA und ein drittes Bakterium, *Enterococcus faecalis*, nachgewiesen. Die genetische Analyse der aus dem Betroffenen isolierten Bakterienstämme ergab, dass ein Plasmid mit der Vancomycinresistenz-Kassette (nebst weiteren Resistenzgenen für drei andere Antibiotika und eine Klasse von Desinfektionsmitteln) von *E. faecalis* auf MRSA übergegangen war und so einen neuen VRSA-Stamm erzeugt hatte.

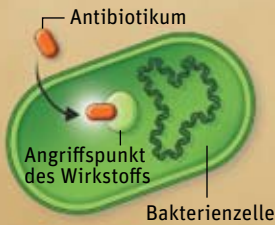
Dass ein chronisch kranker Patient sich mit zwei verschiedenen pathogenen Bakterien gleichzeitig infiziert hatte, die dann einen dritten Problemkeim hervorbrachten, kann den Fachmann leider nicht überraschen. Patienten auf Intensivstationen und in Pflegeeinrichtungen sind eben oft abwehrgeschwächt und werden intensiv mit Antibiotika behandelt. Sie sind daher die wichtigste Quelle für neue antibiotikaresistente Bakterien. Pflegepersonal und Ärzte fördern unbeabsichtigt den Austausch von Bakterien, wenn sie von Patient zu Patient gehen, etwa um intravenöse Zugänge und Katheter zu wechseln. Wird das Krankenhauspersonal dazu angehalten, konsequent vor und nach jedem Patientenkontakt die Hände zu desinfizieren, sinkt die Infektionsrate deutlich.

VRSA-Stämme, die sich bisher glücklicherweise noch nicht weit ausgebreitet haben, sprechen nur auf sehr wenige klinisch eingesetzte Antibiotika an. Eine Infektion verläuft häufig tödlich. Eine ganze Gruppe neuerer

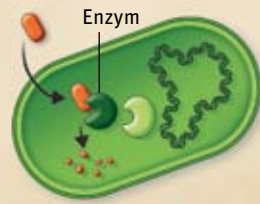


**RESISTENZFORMEN**

Durch Zufallsmutationen oder die Aufnahme von Genen anderer Mikroorganismen können Bakterien widerstandsfähig gegen heutige Antibiotika werden. Die drei häufigsten Resistenzmechanismen: Enzyme, die Antibiotika spalten oder inaktivieren; molekulare Pumpen in der Zellwand, die das Medikament ausschleusen, bevor es wirken kann; Ersatz der bakteriellen Zielstruktur des Antibiotikums durch eine nicht mehr von ihm erkennbare Variante. In der oberen Reihe sind diese Mechanismen dargestellt, darunter Beispiele für Krankheitserreger, die sie nutzen.



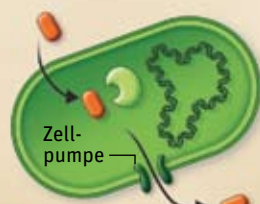
**MECHANISMUS:**  
Zerstörung des Wirkstoffs



**BEISPIEL:**  
*Escherichia coli*



**MECHANISMUS:**  
Ausschleusen des Wirkstoffs



**BEISPIEL:**  
*Pseudomonas aeruginosa*



**MECHANISMUS:**  
Austausch der Zielstruktur



**BEISPIEL:**  
*Staphylococcus aureus*  
(VRSA-Stamm)



Problemkeime mit noch gefährlicheren Resistenzeigenschaften stellen die so genannten panresistenten gramnegativen Bakterien dar. Gramnegative besitzen über ihrer Zellwand praktisch eine zweite, äußere Zellmembran, die viele Antibiotika am Eindringen in die Zelle hindert. Manche Formen gramnegativer Erreger sind gegen fast alle klinisch eingesetzten Antibiotika resistent. Hierzu zählen Stämme von *Escherichia coli*, die Lebensmittelvergiftungen hervorrufen, sowie Stämme des verwandten Bakteriums *Klebsiella pneumoniae* und zweier opportunistischer Erreger, *Pseudomonas aeruginosa* und *Acinetobacter baumannii*. Letztere können bei immungeschwächten Krankenhauspatienten Lungenentzündungen, Hirnhautentzündungen und Blutbahninfektionen hervorrufen.

Natürlich müssen die Verantwortlichen im Gesundheitssystem alles daran setzen, um der Ausbreitung resistenter Bakterien – und damit der Resistenzgene – in und außerhalb von Hospitälern vorzubeugen. Doch zugleich benötigt man als ergänzende Maßnahme neue Antibiotika, um bereits resistent gewordene Bakterien zu bekämpfen.

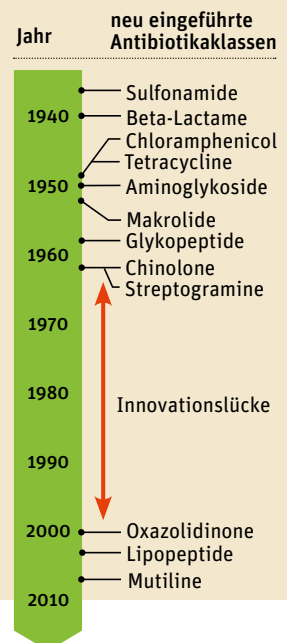
Die Spanne von den späten 1930er bis in die frühen 1960er Jahre gilt als das goldene Zeitalter der Antibiotikaentdeckung. In ihr wurden fast alle wichtigen Klassen gegenwärtig genutzter Antibiotika eingeführt (siehe Kasten rechts). Zwischen der Einführung der Chinolone 1962 als damals letzter Gruppe und der Zulassung des ersten Oxazolidinons im Jahr 2000 als dann neue Klasse klafft lei-

der eine Innovationslücke von vier Jahrzehnten. Zum einen fehlten Anreize für die Pharmaindustrie, in die Antibiotikaforschung zu investieren – was teilweise an dem hohen Aufwand bei vergleichsweise nur geringem Profit gegenüber Medikamenten lag, die nicht kurz-, sondern langfristig eingenommen werden müssen wie etwa bei Bluthochdruck oder Arthritis. Zum anderen waren die Verfahren, mit denen die gängigen Antibiotika noch entdeckt wurden, inzwischen veraltet. Um neue Substanzen zu finden, bedarf es somit innovativer Forschungsstrategien.

Die meisten der verfügbaren Antibiotika werden von Bakterien oder Pilzen erzeugt oder sind chemisch veränderte Derivate dieser natürlichen Wirkstoffe. Unter Mikroorganismen dienen eigene Antibiotika als chemische Waffe und in geringeren Konzentrationen möglicherweise auch als Signalmoleküle. Forscher fahndeten üblicherweise nach solchen natürlichen Antibiotika, indem sie – oft aus Bodenproben – zunächst Mikroorganismen isolierten, sie im Labor kultivierten und die freigesetzten Stoffe aus der Kulturflüssigkeit extrahierten. Diese Substanzen wurden dann an Krankheitserregern getestet, um Moleküle mit möglichem therapeutischem Nutzen zu finden. Auf diese Weise prüften die Pharmaunternehmen Millionen bakterieller Extrakte, und dennoch sind heute nur ungefähr zehn Klassen natürlicher Antibiotika auf dem Markt. Zwar wurden zahlreiche weitere entdeckt, aber aus den unterschiedlichsten Gründen, wie etwa geringe antibakterielle Aktivität

**MEILENSTEINE DER ANTIBIOTIKAGESCHICHTE**

Auffällig bei der Einführung neuer Antibiotikaklassen ist eine 40-jährige Lücke ab 1962. Selbst die in den letzten zehn Jahren eingeführten Klassen wurden schon vor Jahrzehnten entdeckt, damals aber nicht weiterverfolgt.



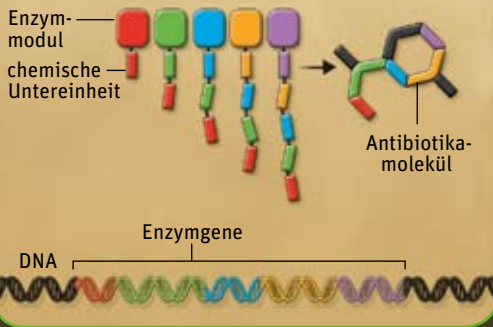
GENSUCHE FÜR NEUE ANTIBIOTIKA

Die meisten gebräuchlichen antibiotischen Wirkstoffe werden von Bakterien produziert, als eine Art chemische Waffe gegen Konkurrenten.

Mittels Genomforschung und Gentechnik lassen sich weitere dieser natürlichen Waffen entdecken oder zur besseren Nutzung modifizieren.

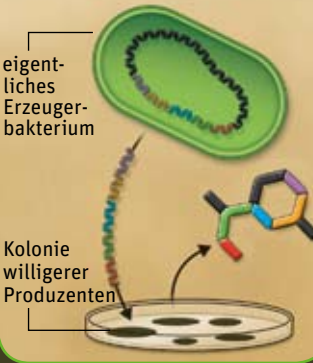
**GENIDENTIFIKATION**

Bakterien produzieren bestimmte natürliche Antibiotika an »Montagebändern« aus Gruppen modular organisierter Enzyme, die jeweils einen bestimmten Syntheseschritt durchführen. Die zugehörigen Gene sind seriell angeordnet. Wissenschaftler können inzwischen Genome vieler verschiedener Bakterien nach Gensortimenten durchforsten, mit denen sich möglicherweise noch unbekannte Antibiotika herstellen ließen. Da nicht alle solche Gencluster in der Zelle auch aktiv sind, stellt die Suche im Genom die einzige Möglichkeit dar, diese »kryptischen« Antibiotika zu finden.



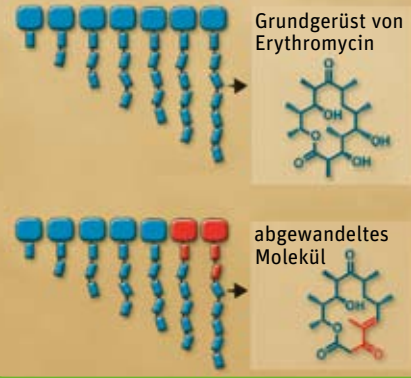
**GENTRANSFER**

Wenn mögliche Enzyme für ein neu entdecktes natürliches Antibiotikum im ursprünglichen Produzenten nicht oder nur unzureichend hergestellt werden (weil die Gene praktisch stumm sind), können Wissenschaftler den gesamten Gensatz, der die notwendigen Informationen enthält, in einen produktiveren Mikroorganismus transferieren.



**GENMODIFIKATION**

Resistenzen bei zu attackierenden Bakterien lassen sich unter Umständen mit modifizierten antibiotischen Wirkstoffen überwinden. Dazu kann man beispielsweise den mikrobiellen Produzenten genetisch so verändern, dass er neue Enzymmodule nutzt. In einer Versuchsreihe haben Forscher Gene für die Erythromycin-Synthese neu zusammengesetzt und so schließlich 50 Varianten des Grundgerüsts von Erythromycin erzeugt, als mögliche Basis für neue Versionen des Antibiotikums.



oder starke Nebenwirkungen, nicht in größerem Umfang angewendet.

Diese Vorgehensweise brachte im goldenen Zeitalter der Antibiotikaentdeckung gute Ernte, doch inzwischen hängen die übrigen Trauben höher. Trotz weiterer Bemühungen der Pharmaunternehmen wurde in den letzten fünf Jahrzehnten weniger gefunden. Ein frustrierender Grund hierfür: Man stößt bei der Suche immer wieder auf Altbekanntes. Die meisten Mikroorganismen, die Antibiotika produzieren, bilden Sporen. Diese kompakten Dauerformen der Mikroben verteilen sich mit der Zeit in der ganzen Welt, und da sich die Gene zur Antibiotikaproduktion genau wie Resistenzgene über horizontalen Gentransfer weiterverbreiten können, produzieren dann viele verschiedene Mikroben das gleiche Antibiotikum. Nach einer neueren Schätzung erzeugt beispielsweise ungefähr einer von 250 Actinomycetenstämmen das Antibiotikum Tetracyclin. Die Bakteriengruppe der Actinomyceten stellt die am häufigsten durchforstete Ordnung von Antibiotikaproduzenten dar. Aus der hohen Fundrate von Altbekanntem schlossen manche Forschergruppen, die »Mutterader« für Antibiotika sei erschöpft. Doch lassen neuere Erbgutanalysen an Bakterien daran zweifeln – vielmehr sind andere Erschließungsmethoden gefragt.

Technischer Fortschritt belebt oft ein altes Forschungsfeld wieder – und auch die Antibiotikaentwicklung scheint davorzustehen. Gegenwärtige Strategien zielen auf die Modifikation existierender oder die Entdeckung ganz neuartiger Substanzen. Der erste Ansatz – die chemische Veränderung natürlicher Antibiotika – führt zu halb synthetischen Produkten, mit abgewandelter Struktur, aber unverändertem »Gefechtskopf«. Bei einem jüngeren Beispiel hierfür dienten Antibiotika aus der Klasse der Tetracycline als Ausgangspunkt. Diese Wirkstoffgruppe legt die Proteinfabriken der Bakterienzelle lahm. Resistenz gegen Tetracycline beruht meist auf einer Pumpe in der bakteriellen Zellmembran, die das Medikament aus der Zelle befördert, bevor es seine Wirkung entfalten kann. Der Trick macht panresistente gramnegative Keime zu einem ersten Problem.

Ein chemisch verändertes Tetracyclin, das Bakterien nicht mehr hinauspumpen können, erhielt 2005 in den USA die Zulassung. Wissenschaftler des Pharmaunternehmens Wyeth, nun Teil von Pfizer, hatten es entwickelt und Tigecyclin getauft. Eingesetzt wird es gegen eine Vielzahl tetracyclinresistenter Keime, allerdings praktisch ausschließlich in Krankenhäusern, da es intravenös verabreicht werden muss. Eine erste Resistenz dagegen zeigte sich aber



leider bereits bei Stämmen von *Acinetobacter baumannii*. Bleibt nun abzuwarten, wie schnell sich diese Widerstandsfähigkeit verbreitet.

Statt natürliche Antibiotika wie Penizillin, Vancomycin oder Erythromycin auf chemischem Weg zu optimieren, können Forscher auch die Mikroorganismen genetisch manipulieren, die sie erzeugen (siehe Kasten links). Die meisten natürlichen Produzenten solcher Wirkstoffe bedienen sich ganzer Fabrikationsstraßen von Enzymen, die modular zusammenarbeiten. Jedes Modul katalysiert einen Schritt bei der Synthese eines Antibiotikummoleküls. Durch Änderungen am Erbgut lassen sich Enzymmodule so modifizieren, dass der Mikroorganismus nun einen Wirkstoff herstellt, der an einer gewählten Stelle in einem einzelnen Baustein vom Original abweicht. Kosan, ein Biotechnologieunternehmen, das kürzlich von dem Pharmakonzern Bristol-Myers Squibb übernommen wurde, nutzte dieses gentechnische Verfahren, um dutzende Derivate des Antibiotikums Erythromycin herzustellen. Mit herkömmlichen chemischen Verfahren wäre das schwierig gewesen.

### Goldmine Genom

Wenn auch die Modifikation bereits existierender Substanzen ein fruchtbarer Weg ist – wünschenswerter wäre die Entdeckung komplett neuer Antibiotikaklassen. Solche Wirkstoffe hätten vermutlich nicht so schnell mit Resistenzen zu kämpfen wie Weiterentwicklungen bereits eingesetzter Substanzklassen.

Ein zentrales Forschungsziel der letzten Jahre war die Identifikation von Enzymen, die Bakterien zum Überleben benötigen – in der Hoffnung, in chemischen Substanzbibliotheken Kandidaten zu finden, die diese essenziellen Biokatalysatoren blockieren und sich zu Medikamenten weiterentwickeln lassen. Im allerersten Schritt gilt es herauszufinden, was geschieht, wenn das betreffende Enzym in der Bakterienzelle fehlt. Heute kann man nach Sequenzierung des Genoms, des gesamten Erbguts, gezielt einzelne Gene für Enzyme ausschalten, um zu sehen, ob das Bakterium auch ohne das fragliche Enzym überlebt.

Diese Bemühungen haben zwar noch nicht zum Ziel – zu neuen Antibiotika – geführt, dürften sich aber in den kommenden Jahren auszahlen. Eine große Hürde ist die bakterielle Zellwand. Selbst kleine Moleküle, die ein wichtiges Bakterienenzym hemmen würden, bleiben nutzlos, wenn sie nicht in die Zelle gelangen. Statt nach Schwachstellen von zu bekämpfenden Bakterien zu suchen, könnte man zu neuen Antibiotika gelangen, indem man deren natürlichen Produzenten studiert – wobei hier die Genomforschung nützlich sein kann.

Die erste Genomsequenz solcher Produzenten wurde im Jahr 2002 publiziert. Sie stellte die Forscher vor ein Rätsel: Die Bakterien aus der Familie der Actinomyceten verfügten demnach über 25 bis 30 Gengruppen, deren Sequenz vermuten ließ, dass sie Enzymmodule für die Produktion antibiotikumähnlicher Substanzen kodieren – nur schienen die Bakterien die meisten dieser Gene überhaupt nicht zu nutzen. Denn unter Laborbedingungen produzierten sie lediglich ein oder zwei der möglichen Moleküle.

Um herauszufinden, ob solche anscheinend schlafenden Gene Bauinformationen für die Produktionsmaschinerie neuer Antibiotika tragen, sequenzieren wir gemeinsam mit mehreren Mitarbeitern an der Harvard Medical School und dem Broad Institute in Boston die Genome von 20 weiteren Actinomycetenstämmen. Dann wenden wir ausgefeilte Computeralgorithmen an, um Gene herauszufiltern,

## AUSWEITUNG DER SUCHE

**In der frühen Entdeckungsgeschichte** antibiotischer Wirkstoffe entpuppten sich bodenbewohnende Bakterien als solch reiche Quelle, dass Forscher sich kaum andernorts umsahen. Die Suche nach neuen Substanzen in bisher unbeachteten Lebensräumen und Organismen liefert inzwischen antibiotische Moleküle, die in ihren Wirkmechanismen hinreichend von den üblichen abweichen und damit kaum auf vorbestehende Resistenzen unter Erregern stoßen dürften.



### MEERESORGANISMEN

Extrembiotope bieten sich für die Suche nach ungewöhnlichen Wirkstoffen an, da die dort lebenden Erzeuger eben auf exotische Bedingungen und Bedrohungen reagieren müssen. Beispielsweise erzeugt ein Bakterium der Gattung *Verrucosipora* (links eine Kultur auf Nährboden, rechts das Sporen erzeugende Gebilde) ein wirksames neues Antibiotikum namens Abyssomicin. Die Mikrobe lebt im Japanischen Meer in fast 300 Meter Tiefe.



BEIDE AUFNAHMEN: MIT FRDL. GEN. VON RODERICHER SÜSSMUTH, TU BERLIN, UND HANS-PETER FIEDLER, UNIV. TÜBINGEN

### SYMBIONTISCHE MIKROORGANISMEN

Kooperation führt zur Spezialisierung, bei der die Symbiosepartner sehr zielgerichtet wirkende Moleküle erzeugen. Ein besonderer Pilz, der auf einem amerikanischen Borkenkäfer lebt, hilft ihm, das Holz der befallenen Bäume zu zersetzen. Das Insekt wiederum beherbergt ein Bakterium, das mit einem hochwirksamen Antimykotikum konkurrierende Pilze abtötet, nicht jedoch den Symbionten seines Wirts.



USDA FOREST SERVICE



### HEIKLE ERZEUGER

Bestimmte Bakteriengruppen stellen diverse neuartige Antibiotika her, lassen sich aber im Labor oder im industriellen Maßstab nicht oder nur schlecht kultivieren. So produziert *Stigmatella aurantiaca* (links) einen antibiotikumartigen Wirkstoff namens Myxochromid. Wie andere Myxobakterien lässt sich *S. aurantiaca* schlecht kultivieren. Mittels neuer Techniken können Forscher nun ein Sortiment relevanter Gene in »willigere« Produktionsorganismen übertragen. Auf diese Weise werden auch bisher vernachlässigte Bakterienfamilien zu einem Quell potenziell nützlicher Moleküle.

DAVID WHITE; COLORIERT VON YVES BRUN, COVER DES JOURNAL OF BACTERIOLOGY, BD. 185, NR. 4, FEBRUAR 2003

die für Enzymmodule der Antibiotikaproduktion kodieren könnten. Die Analyse von umliegenden DNA-Sequenzen sollte zudem helfen, Regulationsmechanismen zu entdecken, die über die Produktion des entsprechenden Antibiotikums entscheiden. Mit diesen Informationen könnten wir das Bakterium so manipulieren, dass es die jeweiligen Gene einschaltet, um dann die kryptischen Moleküle auf ihre antibiotische Aktivität zu untersuchen.

Eine Forschergruppe an der Universität des Saarlandes untersucht dagegen die Möglichkeit, Gene aus problematischen Produzenten in verschiedene einfacher handhabbare Bakterien zu transferieren. Rolf Müller und seine Kollegen arbeiten mit Myxobakterien: einer Ordnung meist bodenbewohnender Bakterien, die wie Actinomyceten kreative Produzenten

antibiotischer Wirkstoffe sind, sich aber schwieriger im Labor kultivieren lassen und daher bisher kaum auf die Herstellung potenzieller neuer Antibiotika untersucht wurden.

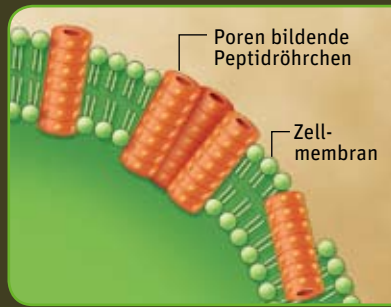
Müller umging die Kulturproblematik, indem er die Gene zur Produktion von Myxochromid, einem antibiotikumähnlichen Molekül, aus dem Myxobakterium *Stigmatella aurantiaca* in eine einfacher zu vermehrende Bakterienspezies transferierte. Es handelt sich um die Pseudomonade *Pseudomonas putida*, die bereits häufig zur kommerziellen Produktion nutzbarer Enzyme eingesetzt wird. Müller löste zwei zentrale Probleme: Zum einen fand er einen bakteriellen Wirtsorganismus, der sich gentechnisch manipulieren lässt und über die grundlegende Stoffwechselinfrastruktur verfügt, um Antibiotika produzieren zu können; zum anderen entwickelte er Verfahren zum Transfer großer DNA-Bereiche von einem Bakterium auf das andere. Mit seiner Arbeit öffnet er die Tür zur Entdeckung und Produktion einer Vielfalt neuer Antibiotika aus Myxobakterien. Eine groß angelegte Sequenzierung von Myxobakteriengenomen würde also lohnen.

Zusätzlich zu erst wenig ausgebeuteten Bodenmikroben könnten bisher unerforschte ökologische Nischen ein fruchtbares Feld sein, da Organismen in exotischen Lebensräumen wohl eher noch unbekannte Antibiotika produzieren (siehe Kasten S. 51). Tatsächlich fanden Roderich Süssmuth und seine Kollegen von der Universität Tübingen vor Kurzem ein neues Antibiotikum in Actinomyceten aus einer Sedimentprobe, entnommen in 289 Meter Tiefe, aus dem Japanischen Meer. Sie taufte es Abyssomicin. Meeresbakterien untersucht auch eine Forschergruppe bestehend aus Bradley Moore, William Fenical und Kollegen von der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien). Sie sequenzierte die Genome zweier bis dahin unbekannter maritimer Actinomycetenstämme und stieß dabei auf ein vielfältiges Sortiment von Genen für die Synthese von Antibiotika und ähnlichen Molekülen – ein weiteres Indiz dafür, dass Meeresbakterien einen Fundus neuer Antibiotikaklassen darstellen könnten.

Als Quelle nützlicher Wirkstoffe kommen auch symbiotische Mikroorganismen in Frage. Sie leben als Gast bei einem Wirt, zum beiderseitigen Nutzen. Ein Beispiel: Der in den Südstaaten heimische Borkenkäfer *Dendroctonus frontalis* ist mit einem symbiotischen Pilz besiedelt, der das Holz der Nadelbäume zersetzt, in die der Käfer sich hineinfrisst. Wie aber konnte das Insekt seinen Symbionten vor einem anderen, antagonistischen Stamm schützen, der um die gleiche Nahrungsquelle konkurriert? Das lange bestehende Geheimnis lüf-

NEUE ANSÄTZE GEGEN KEIME

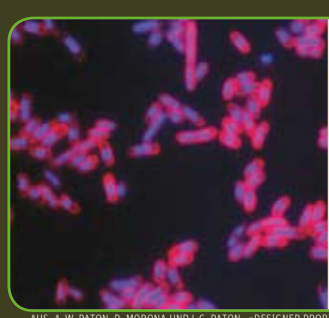
Forscher verfolgen auch neuartige Wege, um Krankheitserreger abzutöten oder anderweitig unschädlich zu machen. Viele der Ansätze umgehen dabei Mechanismen, die normalerweise zur Resistenzentwicklung führen. Das ist ein zusätzlicher Vorteil.



**LÖCHER SCHLAGEN**  
Statt bestimmte Enzyme oder lebenswichtige Stoffwechselprozesse eines pathogenen Bakteriums zu hemmen, kann man seine Zellmembran durchlöchern, um es abzutöten. Vorbild sind kleine, auch bei Säugern vorkommende Schutzproteine aus der Gruppe der Defensine. Mehrere Forschergruppen entwickeln synthetische Mini-proteine (Peptide), die sich in der Bakterienmembran selbstständig zu Poren zusammenlagern. Die Zelle wird quasi leck geschlagen.



**GEZIELT ANGREIFEN**  
Bakteriophagen (grün) – Viren, die Bakterien (blau) befallen – bevorzugen im typischen Fall nur einen bestimmten Wirt als Opfer. Schon seit Längerem untersuchen Forscher das Potenzial von Phagen zur Bekämpfung bakterieller Erreger. Dieser Ansatz veranschaulicht das Prinzip neuer »Schmalband«-Wirkstoffe: Sie sollen gezielt nur einen bestimmten Krankheitserreger angreifen und dabei menschliche Zellen und harmlose Bakterien unbehelligt lassen.



**BEZWINGEN, NICHT TÖTEN**  
Um die Entwicklung einer Resistenz bei der Therapie nicht zu fördern, verfolgen Forscher auch den Ansatz, die krank machenden Eigenschaften eines Bakteriums auszuschalten, ohne es abzutöten. Beispielsweise wurden Zellen des Darmbakteriums *Escherichia coli* (rötliche Stäbchen) genetisch so verändert, dass sie die Oberfläche von Schleimhautzellen im menschlichen Darm imitieren. Nimmt ein Patient diese harmlosen Kolibakterien ein, werden sie zum Köder für das tödliche Shiga-Toxin (blau), das von einem gefährlichen Bakterium der Gattung *Shigella* stammt.

AUS: A. W. PATON, R. MORONA UND J. C. PATON, "DESIGNER PROBIOTICS FOR PREVENTION OF ENTERIC INFECTION", IN: NATURE REVIEWS MICROBIOLOGY 4, S. 193-200, MÄRZ 2006, MIT GENEHMIGUNG VON MACMILLAN PUBLISHERS LTD.

teten erst Cameron Currie, Jon Clardy und ihre Forschungsgruppen von der University of Wisconsin-Madison und der Harvard Medical School. Sie entdeckten, dass der Käfer einen zweiten Symbionten in sich trägt, einen Actinomyceten, der ein potentes, bis dahin unbekanntes Antimykotikum produziert. Der Wirkstoff, Mycangimycin getauft, tötet den feindlichen, nicht jedoch den symbiontischen Pilz.

### Hilfe von Käfern und Schwämmen

Wie Jörn Piel von der Universität Bonn zeigen konnte, beherbergen ein anderer Käfer und ein Meeresschwamm bakterielle Lebenspartner, die verwandte antibiotische Moleküle herstellen. Christian Hertweck vom Hans-Knöll-Institut in Jena entdeckte einen Pilz, der seinen eigenen bakteriellen Symbionten beherbergt. Letzterer erzeugt Rhizoxin, einen antibiotischen Wirkstoff. Unerwartete Leistungen von Symbionten sind Podophylloctoxin und Camptothecin: Die beiden häufig eingesetzten Zytostatika werden nicht, wie lange gedacht, von bestimmten Pflanzen produziert, sondern von Pilzen, die darin leben. Obwohl die Wirkstoffsuche in symbiontischen Mikroorganismen noch am Anfang steht, gehören diese schon zu den aussichtsreichsten Quellen natürlicher Antibiotika, darunter vielleicht sogar solcher, die neue Klassen repräsentieren oder bislang unbekannte Wirkmechanismen nutzen.

Auch die Erforschung symbiontischer Mikroorganismen, die den menschlichen Körper besiedeln, liefert neue Ansätze zur antibiotischen Therapie. Wie Insekten oder Schwämme beherbergen auch wir Menschen eine Vielzahl bakterieller Symbionten, die diverse nützliche Aufgaben erfüllen. Zum Beispiel helfen sie bei der Verdauung der Nahrung oder fördern die korrekte Entwicklung unseres Immunsystems. Leider sind die heute verfügbaren Antibiotika alle nur recht grobe Waffen; sie treffen oft nicht nur die Krankheitserreger, sondern auch die nützlichen Bakterien in unserem Darm. In manchen Fällen macht diese Zerstörung der normalen Darmflora erst die Bahn frei für die Vermehrung eines anderen schädlichen Stamms eines Bakteriums, etwa von *Clostridium difficile*. Diese »Zweitinfektion« kann sogar gefährlicher sein als die ursprüngliche.

Eine mögliche Vorbeugung gegen bakterielle Infektionen besteht in der Gabe nützlicher Mikroben oder Substanzen, die das Wachstum von Symbionten fördern und so Pathogene nicht überhandnehmen lassen. Zwar können solche so genannten probiotischen Therapien den resistenzfördernden Einsatz von Antibiotika begrenzen helfen, doch ließ sich bisher nicht belegen, dass Probiotika auch zur Behandlung bereits existierender Infektionen taugen.

Immerhin wird die Rolle unserer natürlichen Darmflora bei der Infektabwehr zunehmend gewürdigt. Und das hat zu einer neuen Strategie bei der Entwicklung antibakterieller Substanzen geführt: Schmalbandantibiotika – solche mit engem Wirkspektrum – sollen Krankheitserreger abtöten, ohne die nützlichen Bakterien zu schädigen (siehe Kasten linke Seite). Neil Stokes und seine Kollegen von der Firma Prolysis in Oxford entwickelten beispielsweise vor Kurzem eine neue antibiotische Substanz; das potenzielle Antibiotikum tötet *Staphylococcus aureus* und seine Verwandten ab, indem es hier die Zellteilung blockiert, andere Bakterien aber unbehelligt lässt.

Ein Team unter Victor Nizet und Andrew Wang von der University of California in San Diego und Eric Oldfield von der University of Illinois in Urbana-Champaign verfolgte dieses Konzept noch einen Schritt weiter: Ihr neu entdeckter Wirkstoff blockiert die Synthese eines Pigmentmoleküls, das zur Aggressivität (Virulenz) von *S. aureus* beiträgt. Er hemmt also die Fähigkeit des Bakteriums, Erkrankungen zu verursachen, ohne es dabei abzutöten. Solche experimentellen Ansätze, bloß die Virulenzfaktoren eines Bakteriums zu hemmen, haben zudem den Vorteil, dass vermutlich eine Resistenzbildung vermieden wird.

Ganz ähnlich gilt es bei dem Schmalbandansatz eine Zielstruktur zu finden, die einzigartig oder lebensnotwendig für das pathogene Bakterium ist, nicht aber für andere. Selbst wenn das fragliche Bakterium schließlich resistent würde, wäre dies zumindest eine Form der Resistenz, die sich wohl nicht ausbreitet und anderen Bakterien keinen Vorteil bringt.

Ob sich solche Therapeutika allein oder in Kombination mit anderen Wirkstoffen in der realen Welt als praktikabel erweisen werden, bleibt abzuwarten. Insbesondere bedarf es Schnelltests, die bei einem Patienten das verantwortliche Pathogen sicher diagnostiziert. Solche sind zwar bereits entwickelt, werden jedoch noch nicht in größerem Umfang genutzt. Das ist auch eine ökonomische Frage. Schmalbandantibiotika, mit ihren beschränkten Einsatzmöglichkeiten, sind womöglich für Pharmaunternehmen finanziell gesehen unattraktiv.

»Rundumschlag-Antibiotika« stellen allerdings kein tragbares Konzept mehr dar. Das Ende der antibiotischen Ära haben multiresistente Bakterien aber auch nicht eingeläutet. Der Mensch mag zwar den Wettlauf gegen pathogene Keime nie endgültig für sich entscheiden können, doch im vergangenen Jahrhundert blieben wir ihnen durch neue Therapien insgesamt stets einen Schritt voraus. Nun ist jede Anstrengung gefordert, diesen Vorsprung zu halten. ◀



**Christopher T. Walsh** (rechts) ist Hamilton-Kuhn-Stiftungsprofessor für Biochemie und molekulare Pharmakologie an der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts) und zudem als Berater beziehungsweise im Vorstand mehrerer Biotechnologie- und Pharmaunternehmen tätig. Ihn interessiert besonders, wie Mikroorganismen Antibiotika oder andere Moleküle von möglichem therapeutischem Nutzen produzieren.

**Michael A. Fischbach** war bis vor Kurzem als Junior Fellow in der Abteilung für molekulare Biologie am Massachusetts General Hospital in Boston tätig. Dort hatte er mit Walsh begonnen, Bakteriengenome auf Gene zur Antibiotikaproduktion zu durchmustern. Nun arbeitet er als Assistenzprofessor im Fachbereich Biotechnologie und Therapiewissenschaften an der University of California in San Francisco.

**Clardy, J., Fischbach, M. A., Walsh, C. T.:** New Antibiotics from Bacterial Natural Products. In: Nature Biotechnology 24(12), S. 1541–1550, Dezember 2006.

**Groopman, J.:** Superbugs. In: New Yorker, 11. August 2008.

**Nathan, C.:** Antibiotics at the Crossroads. In: Nature 431, S. 899–902, 21. Oktober 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023391](http://www.spektrum.de/artikel/1023391).

# Mandelbrot dreidimensional

Ein Stück Mandelknolle im Nebel, von Daniel White. Die ganze herzergreifende Geschichte von der einsamen Seele, die vor 800 000 Jahren auf diesen Asteroiden verbannt wurde und, während sie ihrer Erlösung harpte, immerhin einige ihrer Wohnhöhlen mit elektrischer Beleuchtung ausstattete, ist auf <http://dspwhite.deviantart.com/art/The-Eternal-Dream-149572608> zu finden.

Es war unerwartet schwierig, den unglaublichen Formenreichtum der zweidimensionalen Mandelbrot-Menge in einem räumlichen Gebilde zu realisieren. Vor wenigen Monaten ist es gelungen – und wieder eröffnen sich atemberaubende Ansichten.



Von Christoph Pöppe

Sie ist wohl das populärste Objekt der fraktalen Geometrie: die Mandelbrot-Menge. Nachdem Benoît Mandelbrot 1978 die Menge, die heute seinen Namen trägt, ans Licht der Welt geholt hatte, investierten Amateure wie Profis Millionen von Rechenzeitstunden, um das stachelige »Apfelmännchen« mit den unzähligen haarigen Auswüchsen immer noch schöner auf den Bildschirm oder zu Papier zu bringen.

Dabei ist das Gebilde nach den strengeren Definitionen gar kein Fraktal, weil ihm die wesentliche Eigenschaft der Selbstähnlichkeit fehlt. Schaut man sich den Rand der Mandelbrot-Menge unter immer stärkerer Vergrößerung an, so entdeckt man eben nicht immer wieder dieselben Strukturen – das wäre Selbstähnlichkeit –, sondern etwas viel Besseres: immer wieder neue Strukturen (Spektrum der Wissenschaft 9/1989, S. 52). Selbst wenn die Mandelbrot-Euphorie inzwischen etwas abgeklungen ist: Ein Zoom in das Tal der Seepferdchen (Kasten rechts) hat von seiner Faszination nichts verloren.

Auch über mangelnde Zuwendung aus der Fachwelt kann sich diese sehr spezielle Teilmenge der Ebene nicht beklagen. Aber die Mathematiker, die sonst nichts Eiligeres zu tun haben, als jedes Ergebnis von zwei auf drei, vier, ganz viele oder sogar unendlich viele Dimensionen zu verallgemeinern, hatten just in diesem Fall wenig Erfolg.

Das liegt nicht daran, dass Fraktale im Allgemeinen auf zwei Dimensionen beschränkt wären. Im Gegenteil, Mandelbrot selbst hat dreidimensionale Fraktale überall in der belebten wie unbelebten Natur – im Brokkoligemüse wie in Küstenlinien – ausfindig gemacht und damit ihre Popularität enorm gefördert. Vielmehr stießen die Freunde der schönen bunten Computerbilder – zumindest damals – auf technische Hindernisse.

Für ein solches Bild überzieht man ein Rechteck in der Ebene mit einem Gitter aus, sagen wir, 1400 mal 1000 Punkten. Für jeden dieser 1,4 Millionen Gitterpunkte bestimmt man mit Hilfe eines Computerprogramms, ob er zur Menge gehört. Wenn das der Fall ist, färbt man das entsprechende Pixel auf dem Bildschirm schwarz, ansonsten weiß oder in einer Farbe, die über den genannten Rechenprozess noch etwas genauere Auskunft gibt. Will man dieses Prinzip auf drei Dimensionen übertragen, so wird aus dem Rechteck ein Quader aus, sagen wir, 1400 mal 1000 mal 1000 Punkten. Von diesen wäre jeder, der zur Menge gehört, schwarz zu färben, und die anderen bleiben am besten durchsichtig.

Demnach müsste das Programm nicht 1,4 Millionen, sondern 1,4 Milliarden Mal dieselbe Frage, mit jedes Mal anderen Zahlenwerten, beantworten. Für das Bild einer dreidimensionalen Mandelbrot-Menge hätte man also mit einem PC nicht ein paar Minuten, sondern die tausendfache Rechenzeit aufwenden müssen – zu viel für Amateure, die in erster Linie schöne Bilder sehen wollten.

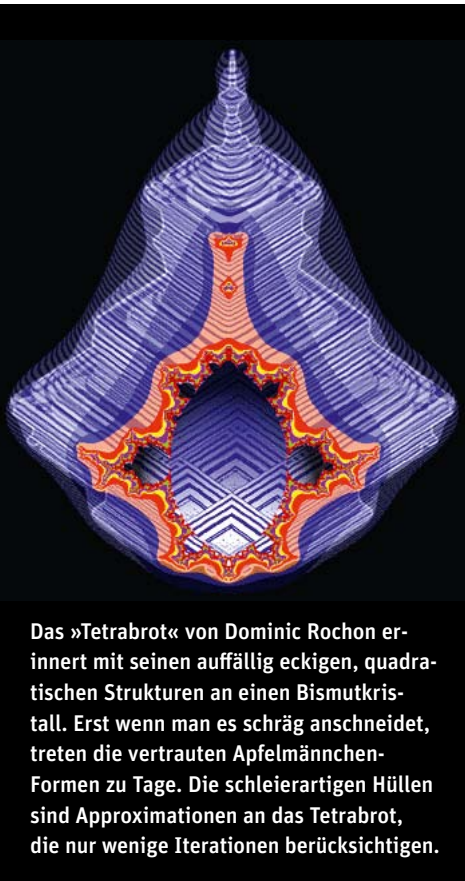
Da die Rechner inzwischen tausendmal so schnell geworden sind, hat sich das Rechenzeitproblem erledigt. Es bleibt jedoch ein prinzipielles Hindernis. Die schiere Existenz der Mandelbrot-Menge hängt entscheidend an der algebraischen Struktur, die man der Ebene geben kann: den komplexen Zahlen.

### Verallgemeinerte Apfelmännchen

Jeder Punkt der Ebene ist eine komplexe Zahl, das heißt, man kann diese Punkte addieren, subtrahieren, multiplizieren und dividieren, wie man es von gewöhnlichen (reellen) Zahlen gewohnt ist; auch Folgen und deren Grenzwerte verhalten sich wie gewohnt. Mit diesen Rechenoperationen hat das Bildungsgesetz der Mandelbrot-Menge eine verführerisch einfache Form:  $f(z) = z^2 + c$ . Diese komplexe Funktion wird allerdings immer wieder angewandt, im Prinzip unendlich oft. Ein Punkt  $c$  gehört genau dann zur Mandelbrot-Menge, wenn die Folge  $0, f(0), f(f(0)), f(f(f(0))), \dots$ , die »Iterationsfolge«, nicht gegen unendlich strebt. (Die Funktion  $f$  ist für jeden Punkt  $c$  eine andere, wie aus der Definition hervorgeht.)

Was ist das Besondere an der Funktion  $f(z) = z^2 + c$ ? Die erste Auskunft ist ernüchternd: So besonders ist sie gar nicht. Um ein neues Phänomen zu studieren, nehmen die Mathematiker immer gerne das einfachste Objekt, bei dem das überhaupt möglich ist. Die einfachsten Funktionen sind die linearen wie  $f(z) = az + b$ ; aber die liefern keine ernst zu nehmenden Mandelbrot-Mengen. Wenn der Parameter  $a$  im Inneren des Einheitskreises liegt, streben alle Iterationsfolgen gegen null, ansonsten streben alle gegen unendlich; das ist langweilig. Man braucht schon eine Funktion, deren Anwendung den Abstand zweier Punkte mal vergrößert, mal verkleinert, damit nicht von vornherein klar ist, ob die Iterationsfolge gegen unendlich geht oder nicht. Damit das Chaos ausbrechen kann und damit die ganze Sache interessant wird, muss unsere Iterationsfunktion nichtlinear sein. Die einfachsten nichtlinearen Funktionen sind die quadratischen, und für die ist unsere Funktionenschar  $f(z) = z^2 + c$  schon sehr repräsentativ.

Andere nichtlineare Funktionen ergeben neue, interessante Mandelbrot-Mengen. Statt der zweiten Potenz von  $z$  darf es die dritte,



Das »Tetrabrot« von Dominic Rochon erinnert mit seinen auffällig eckigen, quadratischen Strukturen an einen Bismutkristall. Erst wenn man es schräg anschneidet, treten die vertrauten Apfelmännchen-Formen zu Tage. Die schleierartigen Hüllen sind Approximationen an das Tetrabrot, die nur wenige Iterationen berücksichtigen.

DOMINIC ROCHON (WWW.SFRACALS.COM/FRANCONI/PIFFGALLERY/28PFC6)

vierte, ... sein; aus ihnen sowie der Exponentialfunktion und vielen anderen, die der Baukasten der komplexen Analysis bereithält, lassen sich Iterationsfunktionen basteln, welche die bizarrsten Bilder ergeben. Merkwürdigerweise findet sich in ihnen beim Ausschnittvergrößern immer wieder das klassische Apfelmännchen. Anscheinend ist jede Nichtlinea-

rität, wenn man sie nur häufig genug iteriert und mit einem hinreichend starken Vergrößerungsglas betrachtet, »im Wesentlichen quadratisch«, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die klassische Iterationsfunktion das Wesentliche an der Nichtlinearität bereits erfasst.

Damit haben die Mathematiker eben doch einen guten Grund für ihre Anhänglichkeit an

## ITERATIONSFOLGEN UND DIE EINFÄRBUNG VON FRAKTALBILDERN

**Die Mandelbrot-Menge** ist die Menge aller Punkte  $c$  in der komplexen Ebene, für welche die Iterationsfolge  $0, f(0), f(f(0)), f(f(f(0))), \dots$  mit  $f(z) = z^2 + c$  nicht über alle Grenzen wächst. Will man dieses Kriterium durch Nachrechnen überprüfen, müsste man theoretisch unendlich viele Folgenglieder ausrechnen – für jeden Bildpunkt. Wenn aber auch nur ein Folgenglied außerhalb des Kreises um den Nullpunkt mit Radius 2 zu liegen kommt, strebt die Folge ins Unendliche. Man braucht also nur so lange zu rechnen, bis die Folge erstmalig aus diesem Kreis ausbricht. Das geschieht sehr früh, wenn der Punkt weit von der Mandelbrot-Menge entfernt ist, und immer später, je näher man der Menge kommt.

In der Praxis berechnet man die Folge höchstens bis zu einer vorab festgelegten Nummer und erklärt jeden Punkt, dessen Folge bis zu dieser Nummer noch nicht ausgebrochen ist, als zugehörig zur Mandelbrot-Menge. Die anderen Punkte färbt man nach der Nummer des erstmaligen Ausbruchs ein. So sind die Bilder rechts berechnet worden; sie zeigen zunehmend stärker vergrößerte Ausschnitte vom Rand der Mandelbrot-Menge.

Umgekehrt kann die Anzahl der Folgenglieder bis zum Ausbruch als Schätzung für die Entfernung des zugehörigen Punkts von der Mandelbrot-Menge dienen. Die Einfärbung nach der Ausbruchszeit hebt die Grenze der Mandelbrot-Menge optisch hervor. Außerdem machen sich die Verästelungen der Mandelbrot-Menge auf diese Weise bemerkbar. Sie sind nämlich so dünn, dass kaum ein Pixel genau die richtigen Koordinaten hat. Die Folge zu einem Punkt in der Nähe eines solchen Ästchens bricht zwar aus, aber so spät, dass seine Färbung von der Existenz des Ästchens kündigt.

Theoretisch müsste die so berechnete Darstellung die Mandelbrot-Menge überschätzen, indem sie Punkte zur Menge zählt, deren Folgen erst sehr spät ausbrechen. In der Praxis dominiert der entgegengesetzte Effekt: Die unendlich dünnen Ästchen fallen durch das Raster, wodurch die Menge wesentlich weniger haarig erscheint, als sie ist.

aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen diese Bilder leider nicht online zeigen



ABBILDUNGEN DIESER SEITE: DANIEL WHITE (WWW.SKYTOPIA.COM/PROJECT/FRACTAL/DMANDELBULE.HTM)



Die Mandelknolle, hier in der Darstellung von Daniel White. Aus Norden betrachtet (rechts oben) ist sie siebenzählig drehsymmetrisch – nicht weiter verwunderlich, denn auch die klassische Mandelbrot-Menge zur Iterationsfunktion  $f(z) = z^k + c$  hat eine  $(k-1)$ -zählige Drehsymmetrie. Dagegen findet sich eine angenäherte achtzählige Symmetrie in den »Blüten«, die überall aus der Menge hervorsprossen. Wie beim klassischen Vorbild zeigt jede Ausschnittsvergrößerung am Rand der Mandelknolle neue Details (unten).

die quadratische Funktion: Sie realisiert »das Wesen des Nichtlinearen« und hat überdies die nützlichsten algebraischen Eigenschaften. Und genau die widersetzen sich einer Verallgemeinerung in höhere Dimensionen. Wie soll man einen Punkt im dreidimensionalen Raum mit sich selbst multiplizieren, so dass wieder ein Punkt im dreidimensionalen Raum herauskommt? Das Kreuzprodukt aus der Physik bringt nichts, denn das Kreuzprodukt eines Vektors mit sich selbst ist stets null.

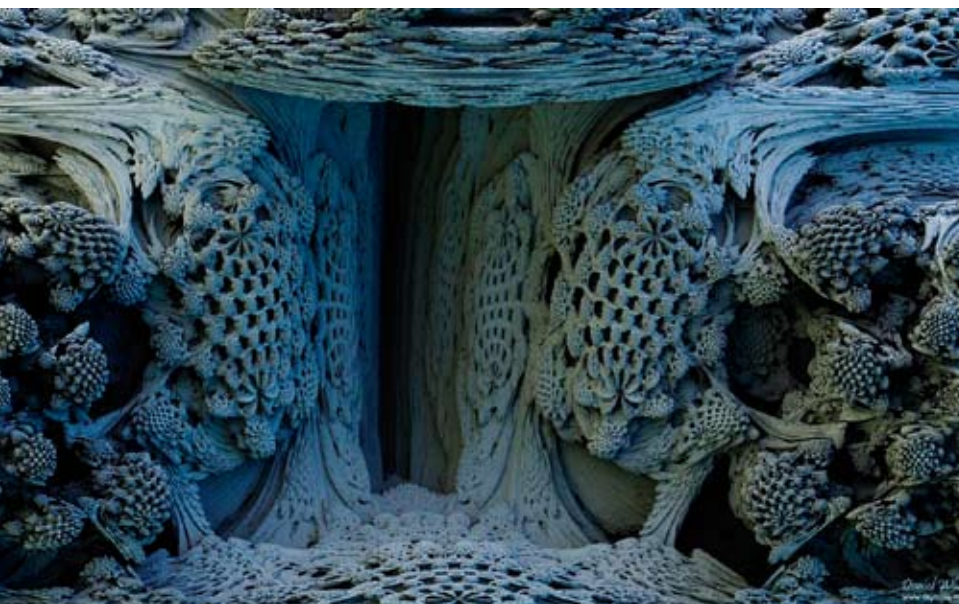
Wenn es vier statt drei Dimensionen sein dürfen, geht es mit dem Multiplizieren wieder etwas besser. Von einer auf zwei Dimensionen, sprich von den reellen zu den komplexen Zahlen, kommt man, indem man ein Paar reeller Zahlen zu einer neuen Zahl erklärt

und auf diesen Paaren eine Multiplikation definiert. Wenn man diesen Prozess »auf der höheren Ebene« wiederholt, bekommt man Paare von komplexen Zahlen; eine Zahl neuen Typs besteht also aus vier reellen Komponenten, entsprechend einem Punkt im vierdimensionalen Raum. Auf diesen Paaren eine Multiplikation zu definieren ist allerdings nicht einfach und gelingt nicht vollständig.

Der historisch erste Versuch sind die Quaternionen des irischen Mathematikers William Rowan Hamilton (1805–1865). Deren Multiplikation ist zwar nicht kommutativ, es ist also im Allgemeinen  $ab$  nicht gleich  $ba$ , aber das stört gerade beim Quadrieren nicht besonders.

Wie sieht eine Mandelbrot-Menge im Raum der Quaternionen aus? Das können wir nicht sehen, da uns dreidimensionalen Wesen die unmittelbare Anschauung des vierdimensionalen Raums fehlt. Aber eine dreidimensionale »Scheibe« des vierdimensionalen Raums ist uns zugänglich – und liefert ein eher enttäuschendes Ergebnis. Von einem Zentralkörper gehen lange »Äste« aus, und wenn man die durchsägt, ist die Schnittfläche – ein Apfelmännchen (Spektrum der Wissenschaft 10/1991, S. 12)! Sehr hübsch; aber die Vielfalt der Strukturen zeigt sich eben nur quer zum Ast und nicht in dessen Längsrichtung. Damit ist sie im Wesentlichen doch wieder zweidimensional.

Dominic Rochon von der Université du Québec in Trois-Rivières (Kanada) hat eine andere Art gefunden, auf Paaren komplexer Zahlen eine Multiplikation zu definieren. Sie ist sogar kommutativ; allerdings gibt es außer der Null sehr viele Zahlen, durch die man





nicht dividieren darf, was die Bewegungsfreiheit in diesem vierdimensionalen Raum etwas einschränkt. Rochon hat seine »bikomplexen Zahlen« nicht in erster Linie erfunden, um damit vierdimensionale Apfelmännchen zu machen; aber es geht und liefert überraschende Ergebnisse (Bild S. 58).

### Erfolg mit Polarkoordinaten

Vielleicht ist es ja unergiebig, allzu sehr auf der algebraischen Sichtweise zu beharren. Wenn man sich schon eigens eine Multiplikation zurechtdefinieren und dabei einige Mängel in Kauf nehmen muss, bloß um damit  $z^2$  ausrechnen zu können, entgehen einem möglicherweise die schönsten Eigenschaften der Mandelbrot-Menge. Stattdessen könnte eine geometrische Sichtweise zum Ziel führen.

Was macht die Abbildung  $f(z) = z^2 + c$  aus einem Punkt  $z$  der komplexen Zahlenebene (Kasten unten)? Es gibt in dieser Ebene einen speziellen Punkt, den Nullpunkt, und von ihm ausgehend eine spezielle Achse, die positive  $x$ -Achse. Die Zahl  $z^2$  hat, verglichen mit  $z$ , den doppelten Winkel gegen die positive  $x$ -Achse und das Quadrat des Betrags.  $z^2 + c$  ist  $z^2$  verschoben um die Zahl  $c$ .

Diese geometrischen Verhältnisse sind in der Tat auf drei Dimensionen verallgemeinerbar. Der Nullpunkt unseres Koordinatensystems sei der Erdmittelpunkt, und wir wählen zwei spezielle Achsen. Eine verläuft vom Erdmittelpunkt durch den Nordpol, die andere durch den Kreuzungspunkt von Äquator und Nullmeridian. Dann können wir jeden Punkt des dreidimensionalen Raums beschreiben



JÉRÉMIE BRUNET (WWW.FRACTALFORUMS.COM/MANDELBROT/REPERES/S/LICED-MANDELBROT/)

durch seine Entfernung vom Erdmittelpunkt, seine geografische Breite und seine geografische Länge. Die beiden letzteren Angaben sind nichts anderes als die Winkel gegen die genannten ausgezeichneten Achsen. Dass die Geografen die Breite null nicht beim Nordpol, sondern am Äquator lokalisieren, soll uns nicht weiter stören. Die geografische Breite 180 Grad entspricht dem Südpol; ab dort geht es wieder nordwärts, bis bei 360 Grad der Nordpol erreicht ist, und so weiter.

Wie quadriert man also einen Punkt des dreidimensionalen Raums? Man quadriert den Betrag und verdoppelt seine beiden Win-

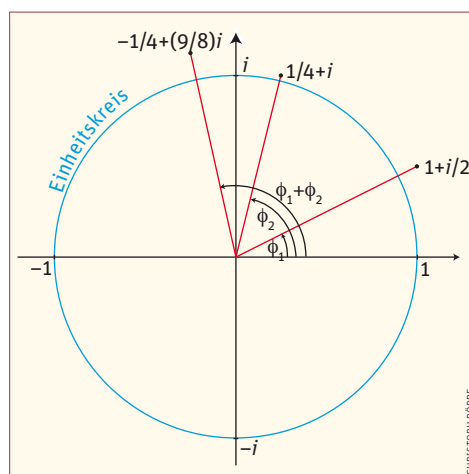
**Die angeschnittene Mandelknolle zeigt auf der Schnittfläche die klassischen, von der Mandelbrot-Menge bekannten Figuren.**

## KOMPLEXE MULTIPLIKATION

**Einer komplexen Zahl  $a+bi$**  entspricht der Punkt in der Ebene (der »gaußschen Zahlenebene«) mit den Koordinaten  $(a, b)$ . Alternativ zu diesen üblichen (»kartesischen«) Koordinaten kann man auch Polarkoordinaten verwenden. Dabei wird ein Punkt beschrieben durch seinen Abstand  $r$  vom Nullpunkt (den »Betrag« der komplexen Zahl) und seinen (im Gegenuhrzeigersinn gemessenen) Winkel  $\phi$  gegen die positive reelle Achse.

Man multipliziert zwei komplexe Zahlen, indem man ihre Beträge multipliziert und ihre Winkel addiert.

Wenn, wie im Bild, beide Zahlen außerhalb des Einheitskreises liegen, das heißt ihre Beträge größer als 1 sind, gilt dies auch für ihr Produkt. Entsprechend liegt das Produkt zweier Faktoren, die



im Inneren des Einheitskreises liegen, ebenfalls daselbst.

Quadrieren einer komplexen Zahl verdoppelt ihren Winkel und quadriert ihren Betrag. Fortgesetztes (»iteriertes«) Quadrieren lässt eine Zahl vom Betrag 1 auf dem Rand des Einheitskreises umherspringen. Eine Zahl außerhalb strebt in spiralförmiger Bahn ins Unendliche, eine Zahl innerhalb ebenfalls spiralförmig gegen null. Indem zu  $z^2$  die Konstante  $c$  addiert wird, rutscht die Zahl möglicherweise über den Rand des Einheitskreises hinweg, wodurch sich das weitere Verhalten der Iterationsfolge dramatisch

ändern kann. Dieser Wechsel von innen nach außen oder umgekehrt kann im Prinzip bei jedem Iterationsschritt stattfinden, was das Verhalten der Iterationsfolge so interessant macht.

Daniel White,  
Paul Nylander und  
ihre Mitstreiter  
haben die **echte  
dreidimensionale  
Mandelbrot-  
Menge** noch nicht  
gefunden – aber  
viele schöne Bilder

Paul Nylander berechnete diese Julia-Menge zur Iteration von  $f(z) = z^2 + c$  mit dem Parameter  $c = (-0,2, 0,8, 0, 0)$  im vierdimensionalen Raum der bikomplexen Zahlen von Dominic Rochon. Von den vier Koordinaten jedes Punkts der Julia-Menge sind drei dargestellt; die vierte bestimmt die Einfärbung.

kel. Was unter der Erdoberfläche ist, sinkt dadurch noch tiefer, was darüber schwebt, steigt höher, und was auf der Oberfläche liegt, springt auf ihr herum, wie auch die anderen Punkte ihre geografische Länge und Breite verdoppeln. (Wir wählen den Längenmaßstab so, dass der Erdradius gleich 1 ist.) Und dadurch, dass nach dem Quadrieren noch die Konstante  $c$  addiert wird, kann ein Punkt von der Unterwelt in die Lüfte wandern oder umgekehrt. Die so verstandene Iterationsfunktion  $f(z) = z^2 + c$  ist also im Prinzip ebenso chaoträchtig wie das Original. Die Punkte des dreidimensionalen Raums, versehen mit der so definierten Multiplikation, haben den Namen *triplex numbers* (»Dreifachzahlen«) bekommen, gewissermaßen eine Steigerung von *complex numbers*.

Rudy Rucker, besser bekannt als Science-fiction-Autor, war schon 1988 auf diese Idee gekommen, konnte sie aber nicht in Bilder umsetzen, wohl auch weil die Rechenleistungen damals noch nicht ausreichten. Im Herbst letzten Jahres kam jedoch Bewegung in die Sache. Eine lose Gruppe von Programmierern in aller Welt, nur verbunden durch das Internetforum [www.fractalforums.com/3d-fractal-generation/](http://www.fractalforums.com/3d-fractal-generation/), hat die Idee aufgegriffen und im Verlauf weniger Wochen erstaunliche Bilder produziert.

Der britische Programmierer Daniel White hatte unabhängig von Rucker die »geografische« Art des Quadrierens gefunden und in ein Programm umgesetzt, damit aber nur mäßig eindrucksvolle Ergebnisse erzielt. Dann

kam der amerikanische Mathematiker Paul Nylander, dem wir auch das »Bild des Monats« in der Februar Ausgabe verdanken, und erhöhte spaßeshalber den Exponenten.  $z^3$  bilden heißt, die Winkel verdreifachen und den Betrag zur dritten Potenz nehmen. Die zugehörige Mandelbrot-Menge sah schon besser aus. Weiter ging es mit höheren Exponenten, bis schließlich die Nummer 8 ein echtes Prachtstück lieferte (Bilder S. 60): »the Mandelbulb« oder »die Mandelknolle«.

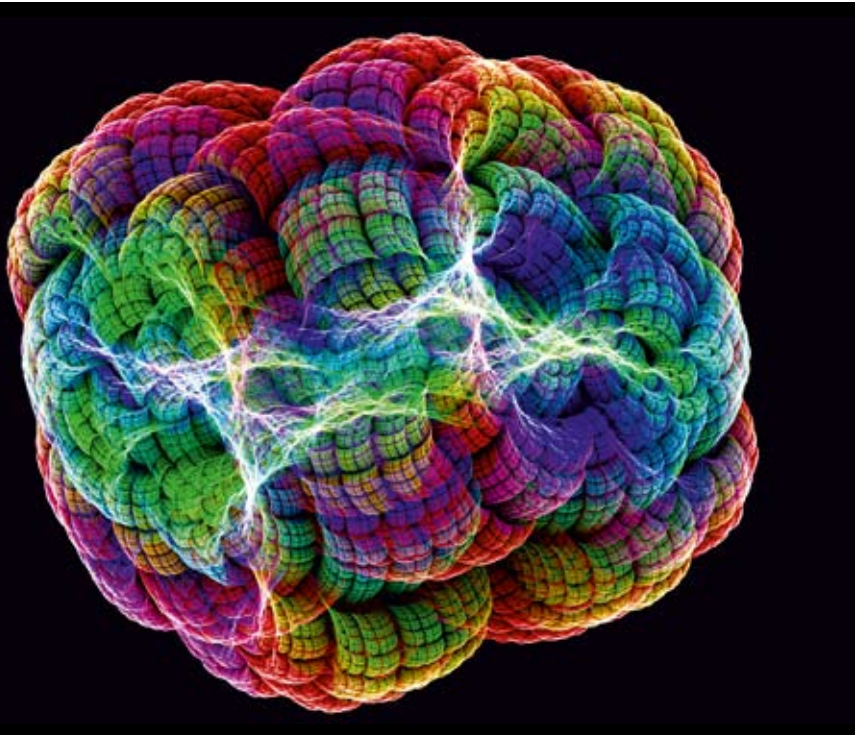
Vergößert man Ausschnitte des Rands dieser Menge, so treten immer feinere Details zu Tage, wie sich das für eine richtige Mandelbrot-Menge gehört (Bilder S. 60 unten und S. 56/57). Zerschneidet man die Mandelknolle entlang einer Ebene, so trifft man auch hier die vertrauten Strukturen (Bild S. 61 oben und Titelbild dieses Hefts).

### Trügerische Glätte

Es fällt jedoch auf, dass die Mandelknolle weit weniger stachlig ist als das zweidimensionale Vorbild. Man findet sogar glatte Streifen, in denen anscheinend keine kleineren Details verborgen sind, so als hätte jemand zuerst durch viele kleine Explosionen eine Wolke aus Schlagsahne hergestellt und diese hinterher hier und da mit dem Löffel glatt gestrichen.

Oder die Oberfläche wird dort nicht richtig dargestellt, weil ihre Berechnung problematisch ist. Es ist nämlich keineswegs einfach, ein solches dreidimensionales Gebilde auf dem Bildschirm darzustellen, aus zwei Gründen. Erstens treibt kaum ein Programmierer den Aufwand, tatsächlich die eingangs erwähnten 1,4 Milliarden Quaderpunkte auszurechnen. (Krzysztof Marczak, von dem die Simulation des Titelbilds stammt, tut es, was seinen Bildern einige interessante Qualitäten verschafft.) Zweitens bringt es nichts, die Punkte außerhalb der Menge einzufärben; sie würden die Menge selbst vor dem Auge des Betrachters verbergen.

Vielmehr wendet man die Verfahren an, mit denen auch die Szenen in Computerspielen dargestellt werden: Von dem – an einer gewissen Stelle im Raum gedachten – Auge des Betrachters aus sendet man in Umkehrung des Lichtwegs »Sehstrahlen« aus. Wenn ein Sehstrahl die Oberfläche des Objekts trifft, wird der entsprechende Bildschirmpunkt so eingefärbt, wie der Oberflächenpunkt aussehen würde. Der wiederum bekommt sein Licht von einer externen Lichtquelle, und wie viel davon er in Richtung Auge reflektiert, hängt von Ein- und Ausfallwinkel ab – bezüglich der Senkrechten auf die Oberfläche (der »Normalen«) in diesem Punkt. Die Oberfläche ist aber fraktal und hat deswegen im Allgemeinen keine Tangentialebene und



PAUL NYLANDER (WWW.BIGMAN23.COM/HYPERCOMPLEX/INDEX.HTML)



TOM BEDDARD (WWW.SIBILLIE.COM/BLOG/2009/12/13/MANDELBROT)

schon gar keine Flächennormale. Der Programmierer muss also ein Surrogat für die Flächennormale verwenden und macht die Oberfläche damit in der Tendenz glatter, als sie ist.

Um den ersten Treffpunkt des Sehstrahls mit der Oberfläche des Objekts zu finden, muss man den Sehstrahl vom Auge her entlangschreiten und nach jedem Schritt überprüfen, ob man sich im Objekt befindet. Dabei müssen die Schritte so klein gewählt werden, dass das Programm nichts Wesentliches verpasst. Mit Mitteln der Analysis kann man eine Schätzung dafür gewinnen, wie weit man noch von der Menge entfernt ist, und mit deren Hilfe die Schrittweite feinsteuern. Diese Schätzfunktion liefert auch die oben angesprochene Pseudo-Flächennormale. Trotzdem können dem Algorithmus gewisse filigrane Strukturen an der Oberfläche entgehen.

Um zu bestimmen, ob ein Punkt im Schatten liegt, muss auch nachgeprüft werden, ob dem Licht auf dem Weg von der Lichtquelle zum Oberflächenpunkt ein anderer Teil des Objekts im Weg steht. Das geschieht durch ein gleichartiges Schrittverfahren.

Nachdem die ersten Mandelkollennbilder gelungen waren, kam bei den Programmierern der natürliche Spieltrieb durch. Um die Winkel richtig zu vervielfachen, muss man die gewöhnlichen (kartesischen) Koordinaten eines Punkts in Polarkoordinaten umrechnen und umgekehrt. Ändert man die zugehörigen Formeln ein bisschen ab, so kann man die Ite-

rationsfunktion endgültig nicht mehr als Verallgemeinerung des klassischen Vorbilds auffassen; aber es gibt interessante Bilder.

Andere Programmierer entsinnen sich, dass schon die klassische Mandelbrot-Menge gar nicht so elementar ist. Vielmehr ist sie eine Zusammenfassung, sozusagen ein Katalog, einer ganzen Schar von Fraktalen, der so genannten Julia-Mengen. Auch diese Mengen bestehen per definitionem aus Punkten, für welche die Iterationsfunktion nicht ins Unendliche strebt. Nur liegt diesmal der Parameter  $c$  fest, und die Bildpunkte entsprechen den Anfangswerten der Folge. Hat man erst eine Iterationsfunktion, kann man daraus statt einer Mandelbrot-Menge eine ganze Schar von Julia-Mengen machen. Die Ergebnisse sind erstaunlich (Bilder links und oben).

Haben Daniel White, Paul Nylander und ihre vielen Mitstreiter nun das dreidimensionale Äquivalent der Mandelbrot-Menge entdeckt? Das glauben sie selbst nicht. Es ist nicht zu erkennen, wieso gerade die etwas eigenwillige Definition der Multiplikation und auch noch die Acht im Exponenten der Iterationsfunktion die Universalität geben sollen, die man an der klassischen Funktion so schätzt. Aber sie haben das Tor zu einem neuen unbekanntem Gebiet aufgestoßen, in dem noch viele Schätze ihrer Entdeckung harren, darunter vielleicht die »echte« dreidimensionale Mandelbrot-Menge – wenn es sie überhaupt gibt. ◁

**Der schottische Mathematiker Tom Beddard hat diese Julia-Menge zur Iterationsfunktion  $f(z) = z^{-13/2} + (1, 0, 0)$  im Raum der Dreifachzahlen berechnet.**



**Christoph Pöppe** ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

**Mandelbrot, B. B.:** Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser, Basel 1991.

**Peitgen, H.-O., Jürgens, H., Saupe, D.:** Fraktale. Bausteine des Chaos. Klett-Cotta, Stuttgart 1992.

**Peitgen, H.-O., Jürgens, H., Saupe, D.:** Chaos. Baustein der Ordnung. Klett-Cotta, Stuttgart 1994.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023388](http://www.spektrum.de/artikel/1023388).

# Neues vom HOBBIT



## In Kürze

► Im Jahr 2004 entdeckten Anthropologen auf der indonesischen Insel Flores Überreste von **besonders kleinen, auch sonst eigenartigen Menschen**. Ihrer Ansicht nach handelt es sich um eine bisher unbekannte Hominidenart, die sie *Homo floresiensis* nannten. Populär wurden jene Floresmenschen als »Hobbits«. Das geringe Alter der Knochen erstaunt: Diese Floresmenschen lebten noch vor 17 000 Jahren.

► Anfangs hielten die Forscher den *Homo floresiensis* für einen Abkömmling vom *Homo erectus*. Letzterer gehörte zu den Vorfahren des modernen Menschen und besaß ähnliche Körperproportionen wie wir.

► Nach neuen Erkenntnissen sahen **die Hobbits** allerdings in vielem urtümlicher aus als zunächst vermutet. Das könnte einige Lehrmeinungen über den Gang der menschlichen Evolution erschüttern.

Die kürzlich entdeckten Zwergmenschen (»Hobbits«) von der indonesischen Insel Flores erscheinen noch seltsamer als bisher angenommen. Vielleicht müssen die Anthropologen nun manche Modelle zur Evolution des Menschen revidieren.

Von Kate Wong  
Fotos von Djuna Ivereigh

**A**ls die Entdecker den Fund im Jahr 2004 bekannt gaben, machte er Schlagzeilen. In der Liang-Bua-Höhle auf der indonesischen Insel Flores hatten australische und indonesische Wissenschaftler Skeletteile einer nur gut einen Meter großen Frau ausgegraben, deren Gehirn ein Drittel so groß war wie das unsere. In die Wissenschaft fand das seltsame Skelett Eingang als LB1. Doch berühmt wurde es bald als »Hobbit«, nach fiktiven Zwergenwesen des englischen Schriftstellers J.R.R. Tolkien.

Die Forscher, die am selben Ort Knochenreste weiterer Individuen geborgen hatten, dachten an eine neue Menschenart und taufte sie *Homo floresiensis*. Am ehesten, folgerten sie, handelte es sich um einen Abzweig der Spezies *Homo erectus*, der nach damaliger Kenntnis ers-

ten Menschenart, die außerhalb Afrikas aufgetreten war. Die kleine Statur führten sie auf die inselbedingte Ressourcenknappheit zurück. In etlichen Fällen waren Säugetiere auf Inseln mit der Zeit kleiner geworden, doch waren solche Fälle für Menschen bis dahin nicht bekannt.

In der Paläoanthropologie verursachte der Fund einigen Aufruhr (siehe SdW 3/2005, S. 30). Spektakulär war daran ja nicht nur, dass der Floresmensch das erste Beispiel für einen Inselzwergwuchs beim Menschen darstellen sollte. Er schien überdies eine Grundfeste der Menschenevolution einzureißen – die Tendenz zu einem immer größeren Gehirn. Aber nun ein Schrumpfen bis auf fast die Größe eines Schimpansenhirns?

Bei den Menschenknochen kamen zudem Steinwerkzeuge zu Tage, etwa Geräte zum Jagen und Zerlegen von Tieren sowie Überreste von Herdfeuern – alles Zeichen recht hoch entwickelten Verhaltens, die man solch kleinhirnigen



ALLE FOTOS DES ARTIKELS, SOFERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN: DJUNA IVEREIGH

Wesen eigentlich nicht zugetraut hätte. Rätsel gibt besonders auch das geringe Alter der Knochen auf: Dieser Mensch lebte vor nur 18 000 Jahren. Damals waren die Neandertaler und der *Homo erectus* längst von der Erde verschwunden, und der *Homo sapiens*, der so genannte moderne Mensch, hatte sich breitgemacht.

Auf Kritik von anderen Fachleuten mussten die Forscher nicht lange warten. Es hieß, jenes Individuum sei in Wirklichkeit nur ein moderner Mensch gewesen, der wegen einer Krankheit im Wachstum zurückgeblieben war. Die Palette der Erklärungsvorschläge reichte von Kretinismus bis hin zum Laron-Syndrom (einer genetisch bedingten Unempfindlichkeit gegenüber dem Wachstumshormon). Gegen sämtliche kritischen Stimmen fand die Pro-Hobbit-Gruppe jedoch ihrerseits triftige Argumente.

Inzwischen gibt es allerdings weitere Befunde. Hierdurch sehen sich nicht nur die Befürworter der These von einer neuen Men-

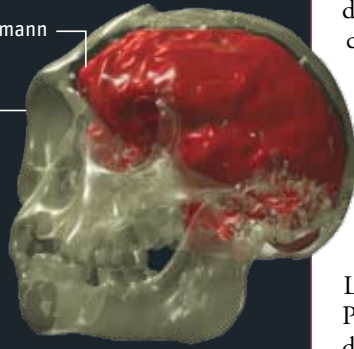
schenart jetzt veranlasst, einige wichtige Aspekte nochmals zu überdenken. Denn das nun verfügbare Datenmaterial berührt etablierte Auffassungen über entscheidende Phasen der Menschenevolution. Vor allem geht es darum, wann, in welchem Entwicklungsstadium, Menschen – oder sogar Vormenschen? – erstmals Afrika verließen.

An den neuen Erkenntnissen erstaunt am meisten, wie sehr der Körperbau des Floresmenschen noch ursprüngliche, quasi primitive Züge im evolutionären Sinn besaß. Bisher haben die Forscher Überreste von schätzungsweise 14 Individuen ausgegraben. Von ihnen ist LB1 der vollständigste Fund. Schon früher hatten die Anthropologen dieses Skelett mit dem der 3,2 Millionen Jahre alten »Lucy« aus Afrika verglichen, dem bekanntesten Exemplar des Menschenvorfahren *Australopithecus afarensis*. Beide waren ja ähnlich klein und hatten ähnlich mickrige Gehirne. Die neueren

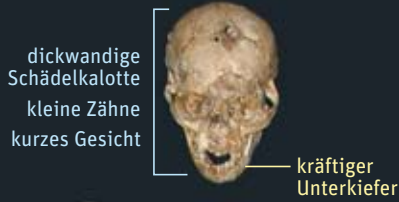
**Das »Hobbit«-Skelett LB1 verunsichert die Paläoanthropologen. Es wirft Fragen zur Frühgeschichte des Menschen auf. Links der Archäologe Thomas Sutikna. Er ist einer der Grabungsleiter in der Liang-Bua-Höhle, aus der das Skelett stammt.**

**Überreste von vielleicht 14 Individuen** kamen bisher auf Flores in der Liang-Bua-Höhle zu Tage. Der vollständigste Fund ist das wohl 18000 Jahre alte Skelett LB1 (Bild). Es bietet eine Mixtur altmodischer und moderner Merkmale: Manche (gelb) erinnern an Vormenschen wie die 3,2 Millionen Jahre alte Lucy, wenn nicht gar an Schimpansen. Andere Kennzeichen (blau) passen gut zu unserer eigenen Gattung *Homo*. Wohin im Hominidenstammbaum gehören die Hobbits?

Area 10 nach Brodmann



Homo-ähnlich     ähnelt Vormenschen oder Menschenaffen



dickwandige  
Schädelkalotte  
kleine Zähne  
kurzes Gesicht

kräftiger  
Unterkiefer

Das Gehirn war kaum größer als das von Schimpansen. Die Computergrafik – nach Tomogrammen vom Schädelinneren – deutet aber einige höher entwickelte Merkmale an, so eine vergrößerte Area 10. Dieses Gebiet könnte mit komplexerem Denken zu tun haben. Erklärt das vielleicht die Steinwerkzeuge?



breit  
auslaufendes  
Becken

kurzer  
Oberschenkel-  
knochen

kurzes  
Schienbein

Das Handgelenk ähnelt dem von afrikanischen Menschenaffen. Das Kleine Vieleckbein (Os trapezoideum) hat Pyramidenform. Beim modernen Menschen ist es eher stiefelförmig – was die Kraftverteilung in der Hand bei der Fertigung und dem Gebrauch von Werkzeug verbessert.



Der Fuß ist sehr lang im Verhältnis zur Beinlänge, eher vergleichbar dem Verhältnis bei Bonobos. Gut rennen konnten die Hobbits wohl nicht. Auch die langen, gebogenen Zehen und das fehlende Fußge-



wölbe erinnern an Menschenaffen. Doch finden sich auch moderne Merkmale, etwa der nach vorn stehende große Zeh.

Studien erbrachten weitere Gemeinsamkeiten mit frühen Hominiden vor dem Stadium des *Homo erectus*. Manche Merkmale von LB1 wirken sogar ausgesprochen menschenaffen-typisch.

Im Mai 2009 beispielsweise publizierte ein Forscherteam um William L. Jungers von der Stony Brook University (New York) merkwürdige Erkenntnisse zum Bau der Füße. In mancher Hinsicht wirkten sie zwar durchaus modern. So wies der große Zeh in die gleiche Richtung wie die anderen. Er stand nicht abgewinkelt wie bei Menschenaffen und den Australopithecinen. Trotzdem wirken die Füße im Ganzen altertümlich. Im Verhältnis zu den kurzen Beinen waren sie riesig: 20 Zentimeter lang, 70 Prozent der Länge vom Oberschenkelknochen. Solche Proportionen tauchten bisher bei keinem anderen Hominiden auf. Unser Fuß misst zum Beispiel nur 55 Prozent der Oberschenkelknochenlänge. Abgesehen von Tolkiens Hobbits mit ihren Riesenfüßen käme der Floresmensch den Bonobos oder Zwergschimpansen am nächsten. Außerdem war der große Zeh ziemlich kurz, die anderen Zehen waren lang und leicht gekrümmt. Zudem fehlte ein richtiges Fußgewölbe. Auch das sind urtümliche Merkmale.

»So einen Fuß hat man bei einem Menschenfossil noch nie gefunden«, erklärte Jungers in einer Pressemitteilung. Damit zu laufen dürfte nicht so einfach gewesen sein. Verschiedene Merkmale an Becken, Bein und Fuß zeigen, dass diese Wesen aufrecht gingen. Doch mit so kurzen Beinen und großen Füßen dürften sie die Beine beim Gehen besonders hoch gehoben haben, ähnlich wie wir vielleicht mit Schwimfflossen vorwärtstapfen. Vermutlich konnten sie sogar kleine Strecken rennen, etwa um vor den Riesenwaranen der Insel zu flüchten. Einen Marathon hätten sie aber kaum geschafft.

Wenn nur ihre Füße urtümlich ausgesehen hätten, könnten die Forscher vielleicht noch an der Idee festhalten, dass die Hobbits von *Homo erectus* abstammten. Denkbar wäre dann unter Umständen gewesen, dass der Fußbau im Zuge der Verzweigung eine evolutionäre Rückentwicklung durchgemacht hatte. Aber archaische Merkmale finden sich praktisch rundum an Skelett LB1. Zum Beispiel hat das kleine Vieleckbein (Os trapezoideum) des Handgelenks Pyramidenform – wie bei Menschenaffen –, während es bei uns eher wie ein Stiefel aussieht. Auch besaß LB1 ein kurzes, stark gebogenes Schlüsselbein; unseres ist länger und gerader. Zudem war sein Becken mehr wie eine Schale geformt, ähnlich wie bei den Aus-

SKELETT: WILLIAM L. JUNGERS, STONY BROOK UNIVERSITY; SCHÄDEL: MIT FRIEDRICH VON KIRCH, MALLINCKRODT INSTITUTE OF RADIOLOGY, WASHINGTON UNIVERSITY SCHOOL OF MEDICINE

tralopithecinen; seit dem *Homo erectus* hat es Trichterform ... und so weiter.

An sich ähnelt LB1 vom Hals abwärts stärker Lucy und den anderen Australopithecinen als der menschlichen Gattung *Homo*. Der Schädel macht die Sache jedoch kompliziert. Das grapefruitgroße Gehirn fiel mit seinen gerade einmal 417 Kubikzentimetern zwar in den Größenbereich dessen von Schimpansen und Australopithecinen. Andere Merkmale weisen aber auf die Gattung *Homo*, etwa die schmale Nase und die starken Überaugenwülste.

### War der Hobbit ein sehr früher *Homo*?

Ungewöhnlich ist eine derartige Kombination von Alt und Neu in der Menschenevolution nicht, also ein modernerer Schädel zusammen mit einem altmodischeren Rumpf und auch solchen Gliedmaßen. Die ersten Vertreter der Gattung *Homo*, etwa *H. habilis*, sind dafür gute Beispiele. Als die Forscher immer mehr anatomische Details am Skelett des Floresmenschen erkannten, wuchsen die Zweifel, ob dies wirklich ein Abkömmling von *Homo erectus* gewesen sein konnte, jenem späten Hominiden mit schon modernen Körperproportionen. Handelte es sich bei den Hobbits nicht vielmehr um eine noch ganz urtümliche *Homo*-Spezies?

Für diese These sprechen auch neue Stammbaumstudien zu LB1 von Debbie Argue und ihren Kollegen von der Australian National University in Canberra. Das Wissenschaftlerteam bediente sich der Kladistik (oder phylogenetischen Systematik), einer Methode, bei der man vergleicht, welche gleichen neuen Merkmale bei verschiedenen Organismen vorkommen – die darum einen gemeinsamen Vorfahren haben müssen. Die Forscher bezogen neben verschiedenen Hominiden auch Menschenaffen ein.

Diese Analyse ergab für die Hobbits zwei mögliche – und zwar erstaunlich frühe – Stammbaumpositionen (siehe Kasten S. 71). Entweder wäre ihr Zweig demnach bald nach *Homo rudolfensis* aufgetreten. Jene afrikanische Art erschien vor etwa 2,3 Millionen Jahren, somit noch vor *Homo habilis*, der vor ungefähr zwei Millionen Jahren auftrat. Oder aber der Hobbitzweig entstand später als *Homo habilis*, jedoch viel früher als *H. erectus*, der vor rund 1,8 Millionen Jahren evolvierte. Doch vor allem fanden die Forscher keinerlei Belege für eine enge Verwandtschaft von *H. floresiensis* mit *H. erectus*. Das spricht gegen eine verzweigte Inselform von einem *H. erectus*-Abkömmling. Eine Zugehörigkeit zu *Homo sapiens* kommt nach all dem schon gar nicht in Betracht.

Zu einer ganz frühen *Homo*-Spezies würde das mickrige Gehirn des Floresmenschen auf den ersten Blick ganz gut passen. Die verschiedenen Vertreter von *H. erectus* waren in der Regel wesentlich besser ausgestattet als die älteren *Homo*-Arten. Allerdings unterbietet LB1 den *Homo habilis* nochmals um etwa ein Fünftel. Das kleinste Gehirn eines *Homo habilis* maß schätzungsweise immerhin 509 Kubikzentimeter.

Erklärt sich der Rest vielleicht doch durch Inselzergwuchs? Das hatten die Hobbitentdecker anfangs angenommen. Doch andere Forscher wandten ein: Das Gehirn des Floresmenschen sei wesentlich kleiner als bei einem Hominiden dieser Körperhöhe zu erwarten. Wenn bei Tieren Zwergformen entstünden, reduziere sich die Hirngröße nur mäßig, in einem bestimmten Verhältnis. Diese Auffassung revidierten im Mai 2009 Eleanor Weston und Adrian Lister vom Natural History Museum in London. Demnach muss dieselbe Regel für Inselformen nicht gelten. Die Forscher untersuchten mehrere ausgestorbene Flusspferdarten Madagaskars, die dort viel kleiner geworden waren. Jene Tiere entwickelten eindeutig kleinere Gehirne, als nach herrschender Vorstellung zu erwarten gewesen wäre. Die Autoren folgerten: Sogar ein früher Mensch von *Homo-erectus*-Größe könnte eine Inselform mit den Körper- und Kopfmaßen von LB1 hervorgebracht haben, durchaus auch mit einem entsprechend winzigen Hirn.

Dieses Ergebnis machte Eindruck. Daniel Lieberman von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) kommentierte: Die Befunde seien die Rettung, weil sie eine Erklärung für das Minigehirn vom *Homo floresiensis* erlaubten.

Nach wie vor halten einige Anthropologen jedoch die erste Einordnung der Hobbits in einen Seitenzweig vom *Homo erectus* für wahrscheinlicher. Andere haben ihre Meinung geändert. Auch Mike Morwood von der University of Wollongong (Australien, siehe Foto S. 70), einer der Koordinatoren des Liang-Bua-Projekts, vertritt inzwischen die Ansicht, dass die Vorfahren dieser kleinen Menschen recht frühe Angehörige der Gattung *Homo* darstellten. Schon jene Vorfahren seien, als sie nach Flores kamen, von niedriger Statur gewesen, auf jeden Fall viel kleinwüchsiger als selbst die kleinsten bekannten Vertreter von *Homo erectus*. Vor Ort, meint Morwood, könnte noch etwas Inselverzweigung dazugekommen sein.

Die von den Hobbits hinterlassenen Artefakte könnten die These von einer frühen *Homo*-Art stützen. Schwer erklärlich waren zunächst einige – wenn auch wenige – erstaunlich ausgefeilt wirkende Steinwerkzeuge,

## VORBILD FÜR *HOMO SAPIENS*?

In der Zeit vor 95 000 bis 17 000 Jahren hinterließen die Floresmenschen in der Liang-Bua-Höhle Werkzeuge. Sie nutzten dafür eine Machart ähnlich der Oldowan-Technik afrikanischer früher Menschen vor fast zwei Millionen Jahren. Doch die Hobbits kombinierten die Verfahren in besonderer Weise. So machten das auch die modernen Menschen, die erstmals vor 11 000 Jahren in der Höhle siedelten. Kannten sich die beiden Menschenarten? Übernahmen die modernen Menschen etwa Methoden von den Hobbits?



Messer von Floresmenschen

DIE AUSGRABUNGEN

**Die große Kalksteinhöhle Liang Bua** liegt im bewaldeten Hochland des westlichen Flores. Die Hobbits scheinen hier vor rund 95 000 bis 17 000 Jahren gelebt zu haben. Außer Menschenknochen finden sich dort Unmassen von Steinwerkzeugen, außerdem Tierknochen – von Komodowaranen, Stegodons (mit Elefanten verwandt), Riesenratten und einem drei Meter großen, Fleisch fressenden Vogel. Ganz in der Nähe liegt ein Fluss, den sicherlich viele Tiere als Tränke nutzten.

Warum die Zwergmenschen den Ort schließlich aufgaben, ist noch nicht geklärt. Die Forscher suchen auch noch nach Knochen oder Zähnen mit verwertbarer DNA für Vergleichsstudien. Ganz oben auf der Wunschliste steht ein zweiter Hobbit-schädel. Solch ein Fund könnte sich eignen, um die Kritiker endgültig zu widerlegen.

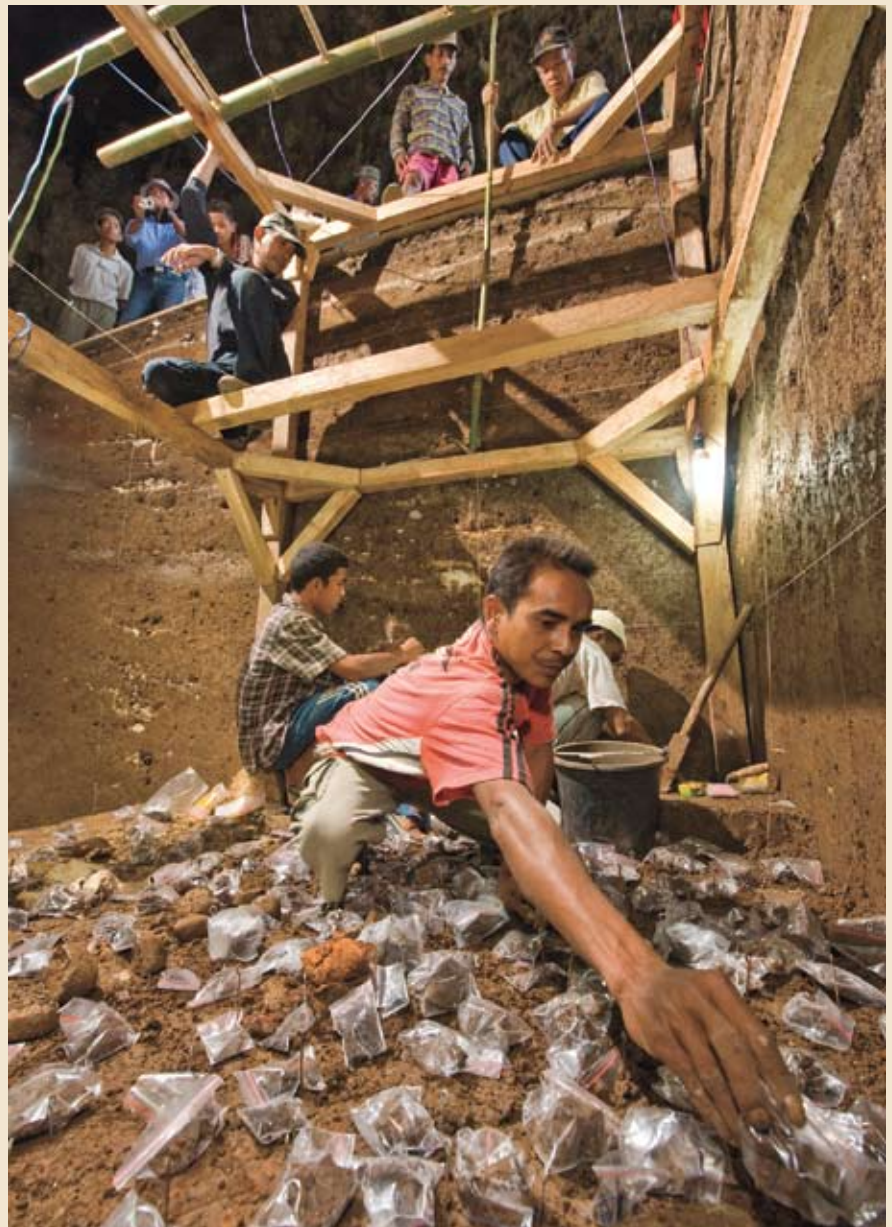


Die Liang-Bua-Höhle



Die Ablagerungen von den Hobbits reichen bis in tief liegende, feuchte Schichten. Damit die Wände nicht einstürzen, werden sie verschalt und gestützt.

Schicht um Schicht werden die Ablagerungen vorsichtig abgetragen. Von jedem freigelegten Objekt, ob Knochen oder Artefakt, wird die genaue Lage erfasst, bevor es in einen Plastikbeutel kommt. Die Erde wird in Eimern gesammelt und später genauer untersucht.







Ein Ausgräber begutachtet eine *Stegodon*-Rippe. Die vielen Steinwerkzeuge an dieser Stelle lassen vermuten, dass das Tier hier zerlegt wurde.



Mitarbeiter aus der Umgebung durchsuchen die hochgehaltenen Sedimente sorgfältig auf kleinste Kochen- und Werkzeugbruchstücke. Im ersten Schritt prüfen sie die Erde mit den Händen, dann sieben sie alles. Danach bringen sie die Erde eimerweise nach draußen zu einem Reisfeld, wo sie eingeschlämmt und dann noch einmal gesiebt wird.

die man einem so kleinhirnigen Wesen eigentlich nicht recht zugetraut hätte. Die Analysen hatten sich anfangs darauf konzentriert. Kritiker nahmen diese Geräte als weiteres Argument, dass dort Vertreter von *Homo sapiens* gelebt hatten. Allerdings ergaben spätere Studien unter Leitung von Mark W. Moore von der University of New England (Australien) und Adam R. Brumm von der University of Cambridge ein anderes Bild. Demnach besaßen jene Menschen überwiegend ziemlich einfache Werkzeuge. Das Gros stach keineswegs von den Artefakten anderer früherer Hominiden mit kleinem Hirn ab. Jene Hand voll scheinbar ausgeklügelter Gerätschaften in Liang Bua halten Moore und Brumm für Zufallsprodukte. Das sei bei solch einer Massenfertigung, die in die Tausende ging, nichts Besonderes.

### Früherer Aufbruch aus Afrika?

Für ihre Werkzeuge hatten die Hobbits draußen größere Stücke von Felsen abgehauen und in die Höhle mitgenommen. Dort machten sie kleinere Abschläge, und zwar auf dieselbe primitive Weise, wie es auf Flores auch andere Menschengruppen lange vor ihnen schon getan hatten, wie der Fundort Mata Menge 50 Kilometer weiter östlich bezeugt. Die dortigen Hinterlassenschaften sind 880 000 Jahre alt. Damals lebten noch nicht einmal in Afrika moderne Menschen. Leider sind in Mata Menge bisher keine menschlichen Fossilien aufgetaucht. Vielleicht handelte es sich um Vorfahren der Liang-Bua-Bewohner. Auffällig ist, wie stark die Artefakte beider Orte den zwischen 1,9 und 1,2 Millionen Jahre alten Funden aus der Olduvaischlucht in Tansania ähneln, die vermutlich von *Homo habilis* stammen.

»Die Vorstellung, vor ungefähr zwei Millionen Jahren könne ein sehr primitives Mitglied der Gattung *Homo* Afrika verlassen haben und bis vor wenigen tausend Jahren hätte eine Nachfahrenpopulation überlebt, gehört zu den provokantesten Hypothesen in der Paläoanthropologie der letzten Jahre«, meint David S. Strait von der University at Albany (State University of New York). Lange galt *Homo erectus* als Pionier – als der erste Mensch, der auch außerhalb Afrikas Gebiete besiedelte. Die ältesten Fossilien auf anderen Kontinenten stammen von diesem Hominiden. Die Anthropologen schlossen daraus, dass erst ein genügend großes Gehirn, lange Beine und gut entwickelte technologische Fertigkeiten Menschen überhaupt befähigten, ihrer Urheimat den Rücken zu kehren.

Mittlerweile sind sie sich dessen nicht mehr so sicher. Heute stammen die ältesten eindeutigen Zeugnisse für Menschen außer-

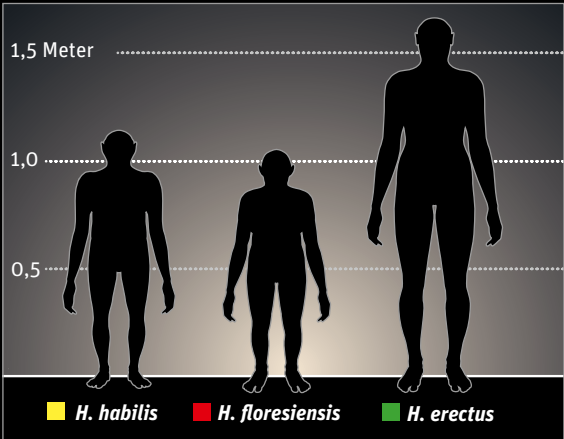
FOTO: SÉBASTIEN PAULY / LOOK AT SCIENCES; REKONSTRUKTION: ATELIER DAVIES, PARIS, 2009



LB1

**Anfangs hielten die Forscher** den *Homo floresiensis* für einen Abkömmling vom *Homo erectus* mit seinen schon praktisch modernen Körperproportionen (mittlere Grafik). Sie glaubten, der Zwergwuchs sei erst unter den kargen Inselbedingungen entstanden.

Nach neueren Studien erscheint der Floresmensch aber viel ursprünglicher. Vermutlich entwickelte er sich kurz vor oder kurz nach dem *Homo habilis*, einer der ältesten Menschenarten (rechte Grafiken). Somit würde er aus Afrika stammen. Dann wären schon die ersten Ankömmlinge in Indonesien ziemlich klein gewesen. Auf Flores könnte die Größe aber weiter zurückgegangen sein.



CATHERINE WILSON, NACH: DEBBIE ARGUE ET AL., HOMO FLORESIENSIS: A CLADISTIC ANALYSIS, IN: JOURNAL OF HUMAN EVOLUTION, BD. 57, NR. 5, NOV. 2009, S. 623-639

halb Afrikas aus Georgien. Bei Dmanisi am Südrand des Kaukasus kamen 1,78 Millionen Jahre alte Fossilien von *Homo erectus* zu Tage (siehe SdW 4/2004, S. 24). Diese Hominiden entsprachen der alten Vorstellung keineswegs. Für einen *Homo erectus* war ihr Gehirn eher klein. Auch arbeiteten sie ihre Geräte nach Oldowan-Methode, nicht wie erwartet im Acheuléen-Stil. Trotzdem gehörten sie zu obiger Spezies.

Sollten nun diejenigen Recht behalten, die den Vorreiter im Umkreis der Hobbits vermuten, dann wären die ersten Interkontinentalwanderungen noch einige hunderttausend Jahre früher geschehen. Ein ganz anderer Men-

schentyp hätte sich als Erstes auf den Weg gemacht. Der mag mehr mit Lucy gemein gehabt haben als mit einem *Homo erectus*, wie ihn sich die Forscher noch vor Kurzem dachten. Das würde auch bedeuten: Irgendwann könnten Anthropologen auf zwei Millionen Jahre alte Indizien von den frühen Einwanderern stoßen, irgendwo zwischen Afrika und Südostasien.

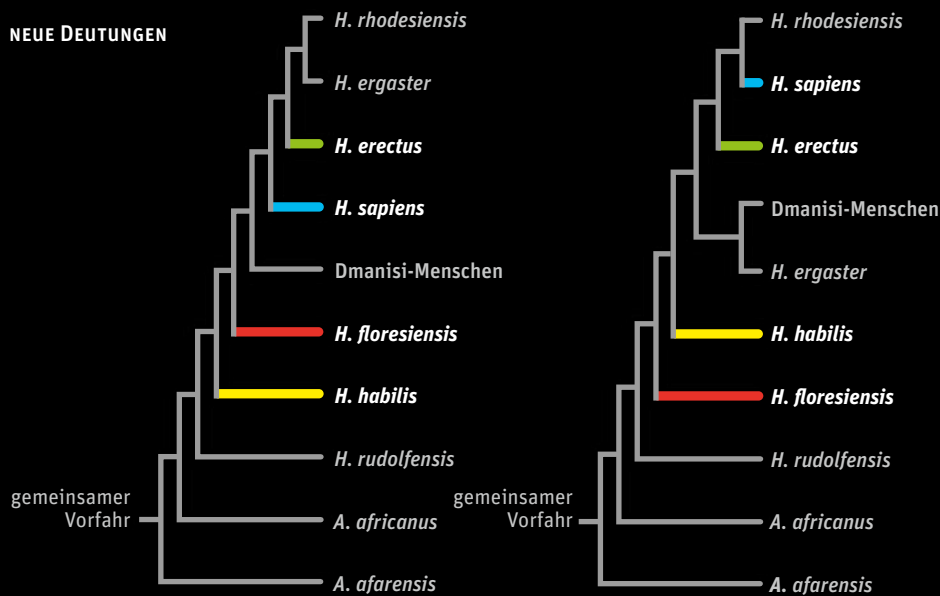
Es gibt Experten, die von solchen Ideen nicht viel halten. Robert Martin vom Field Museum in Chicago etwa meint: »Je weiter man den Abzweig der Floresverwandtschaft zurückzulegen versucht, desto schwieriger lässt sich erklären, wieso eine Linie, die wohl sicherlich

EIN NEUER WEGBEREITER?



KARTE: CATHERINE WILSON





aus Afrika stammte, ihre einzige Spur ausgerechnet auf dieser ziemlich kleinen Insel hinterließ.« Der Fachmann für Primatenevolution glaubt deshalb nicht an eine eigene Menschenart. Martin hält es nicht einmal für ausgeschlossen, dass sich das Individuum LB1 schließlich doch noch als ein kranker moderner Mensch entpuppt. Allein für dieses eine Individuum ließ sich die Hirngröße ermitteln. Allerdings müsste der Defekt dann zugleich die anderen Abweichungen im Skelettbau verursacht haben, die so stark an Australopithecinen erinnern.

Doch eine Reihe von Wissenschaftlern freut sich über den frischen Wind in der Homindenforschung, auch Matthew W. Tocheri von

der Smithsonian Institution in Washington, der die Handgelenkknöchel der Hobbits untersucht hat. Er bringt es auf den Punkt: »Niemand würde sich über LB1 groß aufregen, wenn das Skelett in Afrika aufgetaucht und zwei Millionen Jahre alt wäre. Es stammt aber aus Indonesien und gehört noch dazu praktisch in die moderne Zeit.« Das Gute daran sei, dass man mehr solche Funde erwarten dürfe. »Über Frühmenschen in Asien wissen wir so wenig. Da bleibt jede Menge Raum für Überraschungen«, spekuliert Robin W. Denell von der University of Sheffield. Seines Erachtens könnten schon Australopithecinen Afrika verlassen haben. Vor drei Millionen Jahren erstreckten sich die Graslandschaften, in denen jene Vormenschen lebten, bis nach Asien hinein. »Wir brauchen mehr Funde – von Flores, von den Nachbarinseln, etwa Sulawesi, dann vom Festland Südostasiens, und natürlich überhaupt aus Asien.«

Das alles hat auch Mike Morwood vor Augen. Der australische Forscher ist nicht nur mit den Ausgrabungen in Liang Bua und Mata Menge befasst, sondern ebenso mit zwei Projekten auf Sulawesi (Celebes). Außerdem liebäugelt er mit Borneo. Hobbitvorfahren auf dem asiatischen Festland zu finden, dürfte allerdings schwer sein. In der Region sind Gesteine des passenden Alters kaum frei zugänglich. Doch Widrigkeiten halten ehrgeizige Forscher normalerweise nicht ab, zumal hier, wo es um so viel geht. Tocheri ist gespannt: »Sollten wir in den nächsten 15 Jahren in diesem Teil der Welt nichts Passendes entdecken, dann muss ich mir Gedanken machen, ob wir uns nicht doch geirrt haben. Eigentlich sollten aber eine ganze Menge interessante Sachen ans Licht kommen.«



Kate Wong ist Mitarbeiterin bei »Scientific American«.

**Argue, D. et al.:** *Homo floresiensis*: A Cladistic Analysis. In: *Journal of Human Evolution* 57(5), S. 623–639, November 2009.

**Falk, D. et al.:** LB1's Virtual Endocast, Microcephaly, and Hominin Brain Evolution. In: *Journal of Human Evolution* 57(5), S. 597–607, November 2009.

**Jungers, W. L. et al.:** The Foot of *Homo floresiensis*. In: *Nature* 459, S. 81–84, 7. Mai 2009.

**Moore, M. W., Brumm, A. R.:** *Homo floresiensis* and the African Oldowan. In: Hovers, E., Braun, D. R. (Hg.): *Interdisciplinary Approaches to the Oldowan*. Springer, Dordrecht 2009.

**Morwood, M., van Oosterzee, P.:** *A New Human: The Startling Discovery and Strange Story of the »Hobbits« of Flores, Indonesia*. Smithsonian Books, Washington, DC 2007.

**Tocheri, M. W. et al.:** The Primitive Wrist of *Homo floresiensis* and Its Implications for Hominin Evolution. In: *Science* 317, S. 1743–1745, 21. September 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023393](http://www.spektrum.de/artikel/1023393).

**Bisher galt der *Homo erectus*** als der erste Mensch, der Afrika verließ. Vor ungefähr 1,8 Millionen Jahren mag er in Asien aufgetaucht sein. Doch möglicherweise war ihm ein primitiverer Menschenschlag zuvorgekommen. Dieser Hominiide könnte Afrika schon vor rund zwei Millionen Jahren hinter sich gelassen haben. Falls es davon auf der langen Wegstrecke nach Südostasien und über zwei Millionen Jahre Zeugnisse gibt, haben die Anthropologen sie noch nicht gefunden.

Mike Morwood (Foto) von der University of Wollongong (Australien), einer der leitenden Forscher der Ausgrabungen auf Flores, kümmert sich um zwei Grabungsstellen auf Sulawesi. Er vermutet, dass weitere Forschungen in der Niah-Höhle im Norden Borneos weit ältere Hominiden zu Tage bringen könnten als in der Liang-Bua-Höhle auf Flores. Die Suche auf dem asiatischen Festland dürfte sich schwieriger gestalten, schon weil es dort kaum geeignete Felsformationen gibt.



## Das GEWÄCHSHAUS im Wolkenkratzer

Nahrungsmittelanbau in eigens dafür errichteten Hochhäusern spart Wasser und fossile Energien. Die Umwelt bleibt von landwirtschaftlichen Schadstoffen verschont, und Stadtbewohner haben stets frisches Obst und Gemüse vor der Haustür.

### In Kürze

- ▶ Im Jahr 2050 müssen **schätzungsweise 9,5 Milliarden Menschen** satt werden; dafür reichen die landwirtschaftlich nutzbaren Flächen nicht aus.
- ▶ **Pflanzenzucht in Hochhäusern** kann die Emissionen aus fossilen Brennstoffen drastisch reduzieren und das Abwasser der Städte recyceln.
- ▶ Ein Treibhaus-Wolkenkratzer von der Größe eines 30-stöckigen Häuserblocks vermag fast so viel Lebensmittel zu liefern **wie 1000 Hektar Ackerland** – und das ohne Transportverluste.
- ▶ Heutige Hydrokultur-Treibhäuser dienen Stadtplanern in aller Welt als **Prototypen für vertikale Farmen**.

### Von Dickson Despommier

**D**ie 6,8 Milliarden Menschen auf der Erde nutzen für Ackerbau und Viehzucht eine Fläche, die der Größe von Südamerika entspricht – ein gewaltiger landwirtschaftlicher Fußabdruck. Für das Jahr 2050 sagen Demografen sogar 9,5 Milliarden Erdbewohner voraus. Da jeder mindestens 1500 Kalorien pro Tag benötigt, wird die Menschheit, falls sie ihre Landwirtschaft weiter so betreibt wie heute, dann zusätzlich ein Areal von der Größe Brasiliens kultivieren müssen – 850 Millionen Hektar. Doch so viel neuer Ackerboden existiert einfach nicht.

Zudem verbraucht die Landwirtschaft zur Bewässerung 70 Prozent des weltweit verfügbaren Süßwassers; danach ist es mit Düngemitteln, Pestiziden, Herbiziden und Schlamm kontaminiert und lässt sich nicht mehr trinken. Wenn das so weitergeht, wird sauberes Wasser in vielen dicht besiedelten Regionen bald Mangelware. Außerdem verschlingt die Landwirtschaft Unmengen an fossilen Treibstoffen – in den USA zum Beispiel 20 Prozent des gesamten Benzin- und Dieserverbrauchs. Besorgnis erregend sind dabei nicht nur die emittierten Treibhausgase, sondern auch die steigenden Nahrungsmittelpreise, da sie an den Ölpreis gekoppelt werden; allein dadurch ist das Essen zwischen 2005 und

2008 vielerorts ungefähr doppelt so teuer geworden.

Einige Agrarwissenschaftler schlagen als Lösung eine noch intensivere industrielle Landwirtschaft vor, mit einer weiter sinkenden Anzahl hoch mechanisierter Agrarkonzerne und mit noch ertragreicheren Ernten durch Gentechnik und Chemie. Doch das ist kurzsichtig, denn der Klimawandel verändert die Rahmenbedingungen rapide und vereitelt selbst die raffiniertesten Strategien. Kurz nach dem Amtsantritt von US-Präsident Obama warnte sein Energieminister Steven Chu öffentlich, der Klimawandel könnte bis zum Ende des Jahrhunderts die Landwirtschaft Kaliforniens lahmlegen.

Wenn wir fortgesetzt Wald roden, um neues Ackerland zu gewinnen, wird sich die globale Erwärmung zusätzlich beschleunigen. Obendrein würden riesige Mengen landwirtschaftlicher Abwässer die meisten Flussmündungen und sogar Teile der Weltmeere in biologisch tote Zonen verwandeln.

Hinzu kommen durch Lebensmittel übertragene Krankheitskeime, die weltweit viele Todesopfer fordern – Salmonellen, Choleraerreger, *Escherichia coli*, Ruhrerreger und viele andere. Noch bedrohlicher sind Infektionen mit Parasiten, die in schmutzigem Wasser gedeihen, wie Malaria und Schistosomiasis. Außerdem wird in weiten Teilen Südostasiens, Afrikas sowie Zentral- und Südamerikas mit



Auch inmitten einer modernen Großstadt können Nutzpflanzen in großem Stil angebaut werden.

KENN BROWN, MONOLITHIC STUDIOS

**Die Frage ist:  
Wie können wir alle  
gut leben und  
gleichzeitig den Öko-  
systemen unserer  
Erde eine Verschnauf-  
pause gönnen?**

menschlichen Fäkalien gedüngt, weil Kunstdünger zu teuer ist; das fördert die Ausbreitung von Wurmkrankheiten, an denen 2,5 Milliarden Menschen leiden.

Offenbar tut radikaler Wandel not. Eine einzige Strategie würde fast alle genannten Probleme auf einen Schlag lösen: der Anbau von Nahrungspflanzen unter streng kontrollierten Bedingungen in Gewächshochhäusern (*vertical farms*). Wolkenkratzer auf leer stehenden städtischen Grundstücken sowie mehrstöckige Gewächshäuser auf ungenutzten Dächern könnten das ganze Jahr hindurch Nahrung liefern. Sie würden dabei viel weniger Wasser verbrauchen, kaum Abfall produzieren, Infektionskrankheiten eindämmen und keine fossilen Treibstoffe für Landmaschinen oder für den Transport von entlegenen ländlichen Bauernhöfen benötigen. Zudem würde uns das Essen besser schmecken: Obst und Gemüse wären immer frisch.

Mein Szenario mag auf den ersten Blick haarsträubend anmuten. Aber Ingenieure, Stadtplaner und Agrarwissenschaftler haben die erforderlichen Technologien untersucht und sind davon überzeugt, dass vertikale Landwirtschaft nicht nur theoretisch machbar ist, sondern praktisch ausprobiert werden sollte.

### Schont die Erde!

Wenn wir für unsere Nahrungsmittel riesige Wald- und Grasflächen roden, fügen wir unserem Planeten schwere Wunden zu und sägen den Ast ab, auf dem wir sitzen. Als Mindestforderung sollte gelten: Schont die Erde! Die Menschen haben immer wieder scheinbar unmögliche Aufgaben bewältigt. Seit Mitte des 19. Jahrhunderts, als Charles Darwins

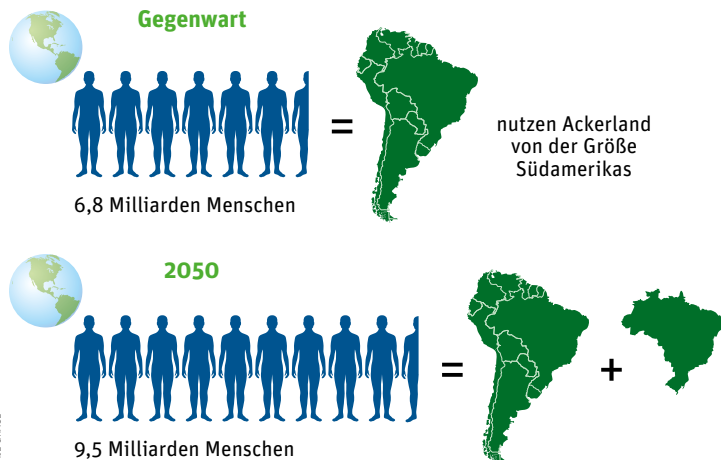
Zeitgenosse Thomas Malthus das Ende der Welt durch Übervölkerung vorhersagte, hat ein technologischer Durchbruch nach dem anderen den Welthunger in Schach gehalten. Unterschiedlichste Landmaschinen, verbesserte Düngemittel und Pestizide, Zuchtplanzen mit höherem Ertrag und höherer Widerstandskraft sowie Impfstoffe und Medikamente gegen Tierkrankheiten haben insgesamt dazu geführt, dass die Nahrungsproduktion mit der steigenden Weltbevölkerung Schritt gehalten hat.

Das galt zumindest bis in die 1980er Jahre. Damals wurde offensichtlich, dass Ackerbau vielerorts den Boden überlastet; Chemikalien hatten die natürlichen Nährstoffkreisläufe zerstört. Darum müssen wir zu nachhaltigen Anbautechniken übergehen.

Der bekannte Ökologe Howard Odum soll gesagt haben: »Die Natur hat alle Antworten, also wie lautet Ihre Frage?« Meine ist: Wie können wir alle gut leben und gleichzeitig den Ökosystemen unserer Erde eine Verschnaufpause gönnen? Viele Klimaexperten – von Sprechern der Welternährungsorganisation FAO bis zur Trägerin des Friedensnobelpreises von 2004 Wangari Maathai – meinen übereinstimmend: Die einfachste Maßnahme gegen den Klimawandel ist die Renaturierung von Ackerland. Naturbelassenes Grasland und Wälder entziehen der Luft das Treibhausgas Kohlendioxid. Wenn wir das Land sich selbst überlassen, heilt es den Planeten.

Lokale Beispiele gibt es genug. Als 1953 nach dem Koreakrieg die entmilitarisierte Zone zwischen Süd- und Nordkorea entstand, war sie ein vier Kilometer breiter, vom Krieg verwüsteter Streifen Brachland; heute ist sie

## FÜR DIE ZUKUNFT GIBT ES NICHT GENUG ACKERLAND



**Schon heute braucht die Weltbevölkerung** für Ackerbau und Viehzucht eine Landfläche von der Größe Südamerikas. Bis zum Jahr 2050 würde sie für traditionell betriebene Landwirtschaft zusätzlich ein Gebiet von der Größe Brasiliens benötigen. So viel Ackerland gibt es nicht.



NASA, GSFC / MODIS LAND RAPID RESPONSE TEAM, JACQUES DESCLOITRES



GETTY IMAGES / DAVID R. FRAZIER



GETTY IMAGES / PAUL GREBLUNAS

üppig bewachsen und völlig erholt. Der einstmals kahle Korridor zwischen Ost- und Westdeutschland ist nun grün. Der Dust Bowl im Mittleren Westen der USA, eine in den 1930er Jahren durch landwirtschaftliche Übernutzung und Dürre entstandene »Staubschüssel«, ist inzwischen wieder ein hochproduktiver Weizengürtel. Neuengland, das von europäischen Einwanderern zuerst besiedelte Gebiet im Nordosten der USA, wurde seit 1700 mindestens dreimal kahl geschlagen – heute beherbergt es große und gesunde Laub- und Nadelwälder.

### Von der Vision zur Praxis

Aus vielen Gründen braucht die stetig wachsende Weltbevölkerung eine Alternative zum Land fressenden Ackerbau. Aber sind Gewächshochhäuser in Städten eine praktische Möglichkeit?

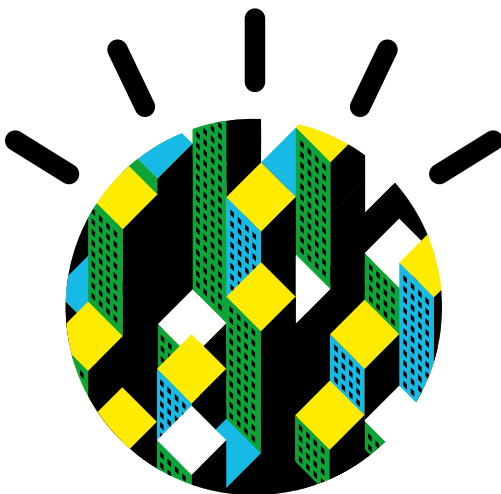
Jawohl, denn Nahrungsanbau im Glashaus ist längst gängige Praxis. Drei Verfahren werden weltweit mit Erfolg genutzt: Tropfbewässerung, Aeroponik und Hydrokultur. Bei der Tropfbewässerung wurzeln die Pflanzen in Mulden aus leichtem und jahrelang verwendbarem Material, zum Beispiel Vermiculit,

**Landwirtschaft belastet die Umwelt schwer: Ausgeschwemmte Düngemittel verursachen großflächige Algenblüten, die manchmal biologisch tote Meeresregionen hinterlassen (links; blaue und grüne Wirbel). Großflächige Bewässerung verschwendet enorme Mengen an wertvollem Trinkwasser (rechts oben). Pestizide kontaminieren Nahrung, Boden und Grundwasser (rechts unten).**

Ideen für einen smarten Planeten

## Städte, die uns das Leben leichter machen.

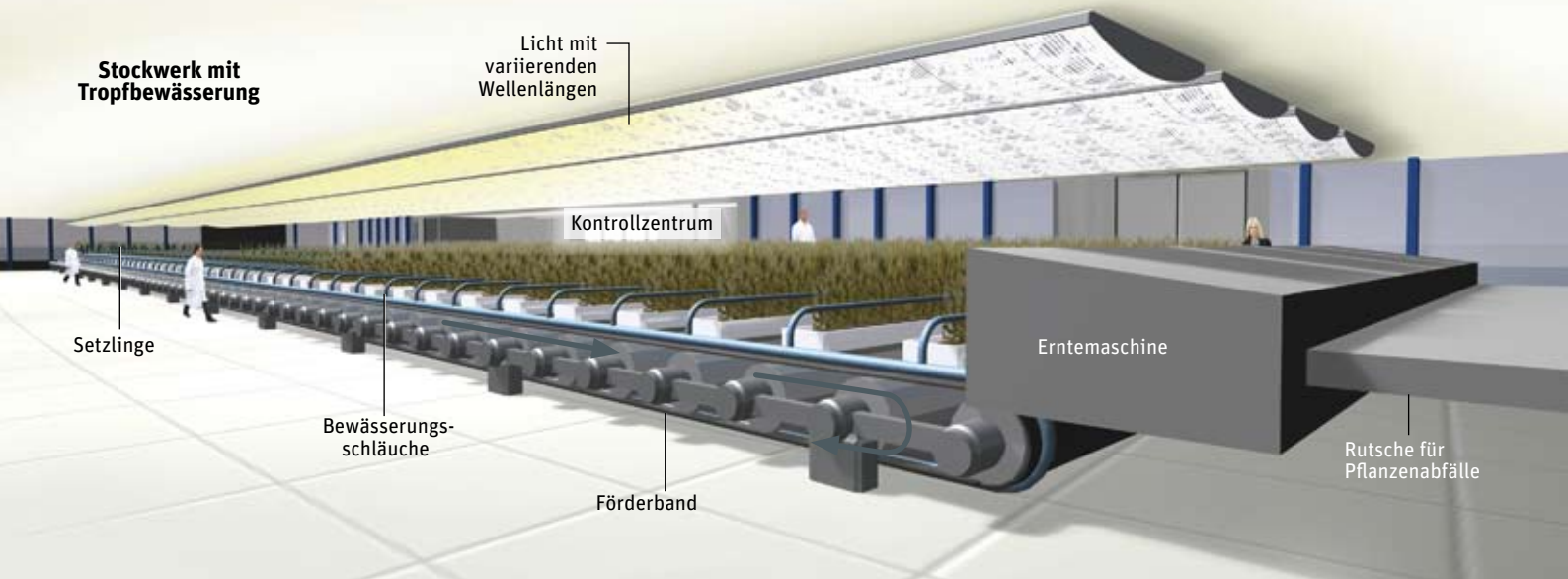
Bis 2050 werden 70% der Weltbevölkerung in Städten leben. Wenn die urbanen Infrastrukturen mit diesem Ansturm Schritt halten sollen, müssen wir sie intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Städte als komplexe Ökosysteme begreifen und die Infrastrukturen für Verkehr, Wasser, Abfall, Verwaltung, Sicherheit, Energie miteinander vernetzen. Davon profitieren alle Aspekte der Lebensqualität – von sauberer Luft über staufreie Straßen bis zur Schulbildung unserer Kinder. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter [ibm.com/think/de/city](http://ibm.com/think/de/city)



## MAXIMALER ERTRAG

**Auf den meisten Stockwerken einer vertikalen Farm** (siehe S. 78) transportiert ein automatisches Fließband die Setzlinge von einem Ende zum anderen, so dass die Pflanzen unterwegs reifen und möglichst viel Getreide oder Gemüse liefern, wenn sie eine Erntema-

schine erreichen. Wasserzufuhr und Beleuchtung sind optimal auf jede Wachstumsphase eingestellt. Nicht essbares Pflanzenmaterial fällt durch einen Müllschlucker zu Verbrennungsanlagen im Keller, die Strom erzeugen.



Stockwerk mit  
Tropfbewässerung

Licht mit  
variierenden  
Wellenlängen

Kontrollzentrum

Setzlinge

Bewässerungs-  
schläuche

Förderband

Erntemaschine

Rutsche für  
Pflanzenabfälle

KEVIN HAND

**Erst groß angelegte  
Treib(hoch)häuser  
bieten die Chance für  
ein wirklich nachhaltiges  
urbanes Leben**

Tierliebhabern als Katzenstreu bekannt. Aus kleinen Röhren über den Pflanzen tropft nährstoffreiches Wasser gezielt an jeden einzelnen Stängel; dadurch wird die sonst übliche Wasserverschwendung vermieden. Bei der Aeroponik – 1982 von K.T. Hubick entwickelt und später von NASA-Wissenschaftlern verbessert – hängen die Pflanzen in der mit Wasserdampf und Nährstoffen angereicherten Luft. Auch hier wird keine Erde benötigt.

Die moderne Hydrokultur entwickelte der Agrarforscher William F. Gericke im Jahr 1929. Die Pflanzen werden so fixiert, dass ihre Wurzeln in Trögen ohne Erde liegen und von Wasser mit gelösten Nährstoffen umspült werden. Im Zweiten Weltkrieg wurden auf diese Weise für die auf südpazifischen Inseln stationierten alliierten Streitkräfte mehr als 4000 Tonnen Gemüse produziert.

Bei der Standortwahl spielen Umweltbedingungen wie Boden, Niederschlag oder Temperatur keine Rolle. Ackerbau im Gewächshaus kann überall stattfinden, wo es genügend Wasser und Energie gibt. Große Hydrokulturanlagen findet man unter anderem in den Niederlanden, in Großbritannien, Dänemark, Deutschland und Neuseeland. Ein Beispiel aus den USA sind die 130 Hektar großen EuroFresh Farms in der Wüste von Arizona; die Anlage produziert das ganze Jahr

über große Mengen qualitativ hochwertiger Tomaten, Gurken und Paprika.

Allerdings liegen diese großflächigen Gewächshäuser meist in ländlichen Gebieten, wo Grundstücke billiger sind. Doch der Transport der Nahrungsmittel über viele Kilometer verursacht zusätzliche Kosten, verbraucht fossilen Treibstoff, emittiert Kohlendioxid und lässt einen beträchtlichen Teil der Ware unterwegs verderben. Ein Umzug der Treibhäuser in hohe Gebäude innerhalb der Stadtgrenzen vermag all diese Probleme zu lösen. Ich stelle mir 30-stöckige Gebäude vor, die einen ganzen Häuserblock einnehmen. Erst bei dieser Größe bieten Treib(hoch)häuser die Chance für ein wirklich nachhaltiges urbanes Leben: Städtische Abwässer werden recycelt und zur Bewässerung genutzt; der feste, vorwiegend pflanzliche Abfall wird verbrannt, um das Treibhaus mit Strom zu versorgen. Mit heutigen Technologien lassen sich vielerlei essbare Pflanzen in Gewächshäusern ziehen; ein benachbartes Aquakulturzentrum könnte Fische, Garnelen und Muscheln züchten.

Als Starthilfe müssten Subventionen für Firmengründungen und staatlich gesponserte Forschungszentren dienen, oder Partnerschaften zwischen Universitäten und Großunternehmen. Talentierte Absolventen der vielen Universitäten für Landwirtschaft, Ingenieur-



wissenschaften oder Architektur könnten dann zunächst etwa fünfstöckige und einen halben Hektar große Prototypen entwickeln. Diese Anlagen wären Spielwiesen für Doktoranden, Wissenschaftler und Ingenieure, die durch Versuch und Irrtum lernen würden, wie ein komplettes Riesentreibhaus funktioniert. Auch kleinere Gewächshäuser auf den Dächern von Apartmentkomplexen, Krankenhäusern und Schulen könnten für Tests dienen. Forschungsanlagen existieren bereits an mehreren Universitäten in Amerika, Europa und Asien; eine der bekanntesten ist das Controlled Environment Agriculture Center der University of Arizona unter der Leitung von Gene Giacomelli.

Wenn es gelingt, die Nahrungsmittelproduktion in den städtischen Alltag zu integrieren, ist ein gewaltiger Schritt zur Nachhaltigkeit urbanen Lebens getan. Neue Betriebe und Arbeitsplätze werden entstehen, die man sich in Städten niemals hat träumen lassen – Gärtner, Bauern, Erntearbeiter. Die traditionellen Landwirte würden ermuntert, Gräser und Bäume anzupflanzen, da sie für die dadurch bedingte CO<sub>2</sub>-Minderung Geld bekommen. Die Holzindustrie könnte zu selektivem Holzschlag übergehen.

### Platz auch mitten in Manhattan

Gegen die Idee der vertikalen Farmen werden vor allem zwei Einwände erhoben. Erstens bezweifeln Skeptiker angesichts der oft überhöhten Immobilienpreise in Städten wie Chicago, London oder Paris die wirtschaftliche Realisierbarkeit. Im Stadtzentrum sind kommerziell nutzbare Zonen vielleicht Mangelware, doch in jeder Großstadt gibt es auch viele we-

niger begehrte Orte, wo man über ein halbwegs rentables Projekt froh wäre.

In New York beispielsweise liegt der ehemalige Flottenstützpunkt Floyd Bennett Field seit 1972 brach. Diese 5,4 Quadratkilometer große Fläche schreit förmlich nach einer Nutzung. Ein ähnlicher Fall ist Governors Island; diese 70 Hektar große Parzelle im Hafen von New York hat die Regierung der Vereinigten Staaten kürzlich der Stadt zurückgegeben. Eine wenig genutzte Stelle im Herzen von Manhattan ist der Verschiebebahnhof in der 33. Straße. Außerdem sind leere Fabriken und Abbruchhäuser über die ganze Stadt verstreut. Vor einigen Jahren untersuchten meine Doktoranden das gesamte Stadtgebiet New Yorks; sie fanden nicht weniger als 120 verlassene Orte, die auf eine Nutzung warteten. Dort kämen Gewächshochhäuser den unterversorgten Innenstadtbewohnern sehr zugute. Zahllose ähnliche Orte existieren in allen Städten der Welt – und Dächer gibt es überall.

Simplex Einmaleins wird manchmal als Gegenargument angeführt, stützt aber tatsächlich die Machbarkeit vertikaler Farmen. Ein typischer Straßenblock in Manhattan bedeckt ungefähr zwei Hektar. Nun rechnen die Kritiker vor: Dann bieten 30 Stockwerke doch nur 60 Hektar – nicht viel im Vergleich zu großen Farmen im Freien. Doch ein Treibhaus kennt keine Jahreszeiten. Salat kann alle sechs Wochen geerntet werden, und sogar langsam wachsende Pflanzen, die wie Mais oder Weizen drei bis vier Monate vom Säen bis zur Reife brauchen, lassen sich drei- bis viermal pro Jahr ernten. Außerdem braucht ein für die NASA entwickelter Zwergmais viel weniger Platz als gewöhnlicher Mais und

## TREIBHAUS-TECHNOLOGIEN

Vertikale Farmen können drei Verfahren nutzen:

### ➤ AEROPONIK

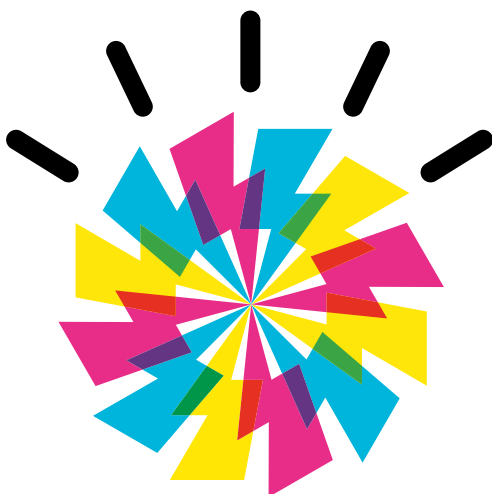
Die Pflanzen sind so fixiert, dass ihre Wurzeln in der – mit Wasserdampf und Nährstoffen gesättigten – Luft hängen. Gut für Wurzelgemüse (Kartoffeln und Möhren)

### ➤ HYDROKULTUR

Die Pflanzen sind so fixiert, dass ihre Wurzeln in offenen Trögen liegen, in denen Wasser mit gelösten Nährstoffen zirkuliert. Gut für viele Gemüse (Tomaten, Spinat) und Beerensträucher

### ➤ TROPFBEWÄSSERUNG

Die Pflanzen wachsen in Mulden aus leichtem, chemisch tragem Material, zum Beispiel Vermiculit, das viele Jahre lang benutzt werden kann. Aus kleinen Röhren an der Oberfläche tropft nährstoffreiches Wasser genau an jeden einzelnen Halm. Gut für Getreide (Weizen, Mais)



Ideen für einen smarten Planeten

## Stromnetze, die Strom sparen.

Ein beträchtlicher Teil des Stroms, den wir erzeugen, geht auf dem Weg zum Verbraucher verloren – ein Verlust, den wir uns nicht mehr leisten können. Deshalb müssen wir unsere Stromnetze intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Einspeisung, Netzauslastung und Verbrauch mit einem integrierten System in Echtzeit erfassen und steuern. Das minimiert Verluste, erleichtert die Einbindung neuer, nachhaltiger Energiequellen und hilft den Kunden, ihren Verbrauch bewusster zu steuern. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter [ibm.com/think/de/energy](http://ibm.com/think/de/energy)



**Eine vertikale Farm** mit 30 Stockwerken nutzt auf ihren Etagen unterschiedliche Treibhaustechnologien. Solarzellen und das Verbrennen von Pflanzenabfall erzeugen Energie. Geklärt<sup>es</sup> städtisches Abwasser wird nicht in die Umwelt abgegeben, sondern dient der Bewässerung der Pflanzen. Künstliche Beleuchtung ergänzt das Sonnenlicht. Die angelieferten Samen werden in einem Labor getestet und keimen in einer Gärtnerei aus. Ein Lebensmittel-  
laden und ein Restaurant verkaufen frische Nahrung direkt an die Verbraucher.



Solarzellen

Regenwasser-  
sammeltanks

Müllschlucker für  
Pflanzenabfälle

AEROPONIK

HYDROKULTUR

Wassertank

TROPFBEWÄSSERUNG

Anlieferung und Abtransport

Müllverbrennung

Dünnschicht-  
solarzellen auf  
Außenträgern

Gärtnerei

Qualitäts-  
kontroll-  
labor

Besucher-  
zentrum

ingespeistes  
städtisches  
Klärwasser

Restaurant

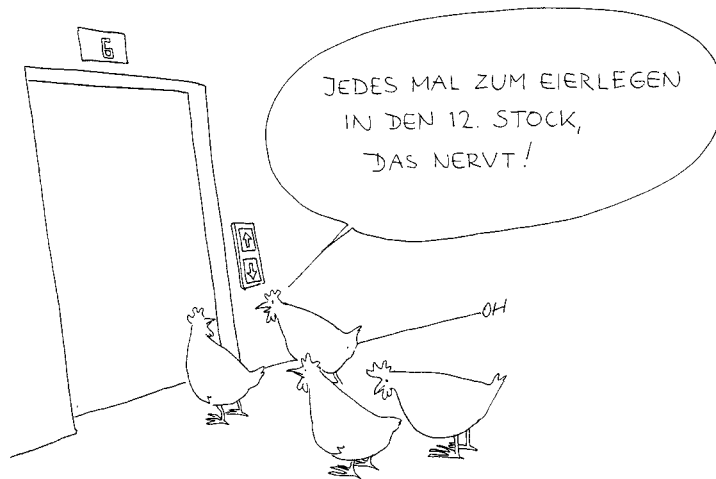
Lebensmittel-  
laden

wächst nur 60 bis 90 Zentimeter hoch. Auch Zwergweizen ist klein, aber nahrhaft. Solche Pflanzen lassen sich dichter setzen, was den Ertrag pro Hektar verdoppelt, und pro Stockwerk können mehreren Lagen Zwerggetreide angebaut werden. Für bestimmte Hydrokulturlpflanzen sind Stapelcontainer bereits in Gebrauch.

Nun sieht die Rechnung schon anders aus: Angenommen, jede Etage einer vertikalen Farm ermöglicht vier Ernten, doppelte Pflanzendichte und zwei Lagen pro Stockwerk – dann ergibt sich ein Multiplikator von vier mal zwei mal zwei gleich 16. Ein 30 Stockwerke hohes und einen Häuserblock großes Gebäude kann also pro Jahr eine Getreidemenge produzieren, die einer Fläche von 30 Stockwerken mal zwei Hektar mal 16 gleich 960 Hektar entspricht. Ebenso könnte ein flaches Gewächshaus auf dem Dach eines Krankenhauses oder einer Schule mit einem halben Hektar Fläche die hauseigene Küche mit Lebensmitteln versorgen, die acht Hektar entsprechen.

Weitere Faktoren vergrößern diese Zahl. Jedes Jahr ruinieren Dürren und Überschwemmungen vielerorts ganze Ernten. Zudem verderben 30 Prozent der Ernte bei Lagerung oder Transport. All das fällt in städtischen Farmen weg, denn die Nahrungsmittel werden praktisch sofort und am Ort verkauft.

Der zweite häufig vorgebrachte Einwand betrifft die Versorgung eines großen Treibhochhauses mit Energie und Wasser. Da kommt alles darauf an, wo das Haus steht. Vertikale Farmen in Island, Italien, Neuseeland, Südkalifornien und einigen Teilen Ostafrikas können die reichlich vorhandene



Erdwärme anzapfen. Zu sonnenreichen Wüstengegenden im amerikanischen Südwesten, im Nahen Osten oder in Zentralasien passen eher zwei- oder dreistöckige Gebäude; sie wären 50 bis 100 Meter breit, aber kilometerlang, um die Sonnenstrahlung unmittelbar für die Pflanzenzucht sowie per Fotovoltaik zur Energiegewinnung zu verwenden. In den meisten Küstenregionen, aber auch in vielen Binnenlandstrichen bietet sich Windenergie an. In jedem Fall können die pflanzlichen Abfälle zur Stromgewinnung verbrannt oder in Biosprit umgewandelt werden.

Eine weitere sehr wertvolle Ressource wird gern übersehen; die Kommunen opfern sogar enorm viel Geld und Energie, um sie sicher loszuwerden. Ich meine flüssigen städtischen Abfall, oft Schwarzwasser genannt. Die Bewohner New Yorks produzieren täglich fast vier Millionen Liter fäkalienreiches Abwasser. Für dessen Reinigung gibt die Stadt Unsummen aus und pumpt das resultierende »Grau-

### HINDERNISSE

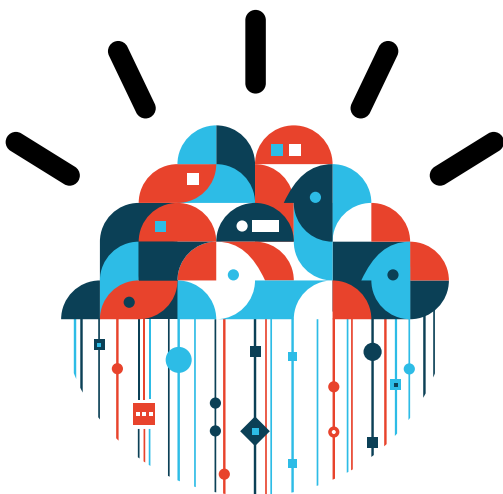
Für die Etablierung von städtischen Agrarbetrieben sind mehrere Hürden zu überwinden:

- Freigabe von **unge-nutzten städtischen Grundstücken** und Flachdächern für Gewächshäuser
- Umwandlung städtischer Abwässer in Brauchwasser für Treibhäuser
- Lieferung billiger Energie für die Zirkulation von Wasser und Luft
- Bau von Prototypen durch Stadtplaner, Investoren, Wissenschaftler und Ingenieure, um **praktische Probleme** zu lösen

Ideen für einen smarten Planeten

## Supercomputer arbeiten für jedermann.

Muss wirklich jeder, der Rechenleistung benötigt, den Aufwand für ein eigenes Rechenzentrum betreiben: für Stromversorgung, Kühlung, Sicherheit – und für Reservekapazitäten, die dann doch die meiste Zeit brachliegen? Es ist an der Zeit, den Umgang mit dieser Ressource einfacher und intelligenter zu gestalten. Mit innovativen Technologien wie Cloud Computing kann man Rechenleistung heute zuverlässig und nach Bedarf punktgenau zur Verfügung stellen, wo, wann und wie sie gebraucht wird. Mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter [ibm.com/think/de/cloud](http://ibm.com/think/de/cloud)





Die EuroFresh Farms in Willcox (Arizona) produzieren auf 130 Hektar seit mehr als zehn Jahren mittels Hydrokultur schmackhafte Tomaten, Gurken und Paprika. Solche Anlagen beweisen, dass Treibhaustechnologien auch in großem Stil eingesetzt werden können.



**Dickson Despommier** ist Professor für Gesundheitswesen und Mikrobiologie an der Columbia University sowie Präsident des Vertical Farm Project, das als Vermittlungsstelle für Entwicklungsarbeit dient (siehe [www.verticalfarm.com](http://www.verticalfarm.com)). Als junger Forscher an der Rockefeller University freundete er sich seinerzeit mit dem berühmten Agrarwissenschaftler René Dubos an, der ihn mit den Ideen der Humanökologie bekannt machte.

**Despommier, D.:** Vertical Farm: The Big Idea That Could Solve the World's Food, Water and Energy Crises. Thomas Dunne Books/St. Martin's Press, New York (in Druck).

**McDonough, W., Braungart, M.:** Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. North Point Press, New York 2002.

**Wackernagel, M., Rees, W.:** Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. New Society Publishers, Gabriola Island (Kanada) 1996.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023392](http://www.spektrum.de/artikel/1023392).

wasser« in den Hudson River. Doch damit ließen sich vertikale Farmen bewässern, und die festen, energiereichen Beiprodukte könnten verbrannt werden. Ein normaler Stuhlgang hat einen Brennwert von 300 Kilokalorien. Hochgerechnet auf die gut acht Millionen Einwohner New Yorks ergibt das theoretisch pro Jahr rund 100 Millionen Kilowattstunden Strom allein aus Fäkalien – genug, um vier 30-stöckige Farmen zu betreiben.

Vorab werden hohe Investitionskosten anfallen, weil erst ausprobiert werden muss, wie die verschiedenen Systeme am besten zusammenpassen. Deshalb braucht man wie bei jeder neuen Technologie zunächst kleinere Prototypen. Das Erzeugen erneuerbarer Energie an Ort und Stelle dürfte kaum teurer werden als der fossile Treibstoff für große Landmaschinen, die obendrein Schadstoffe und klimaschädliche Gase emittieren. Mangels praktischer Erfahrung lässt sich schlecht vorhersehen, wie profitabel eine vertikale Farm letztlich sein kann. Gewiss soll das Endprodukt nicht mehr kosten als im üblichen Supermarkt; das sollte vor allem wegen der entfallenden Transportkosten möglich sein.

### Die Chancen einer Idee

Vor fünf Jahren habe ich erste Überlegungen und Skizzen unter [www.verticalfarm.com](http://www.verticalfarm.com) im Web publiziert. Seitdem nehmen Architekten, Ingenieure, Designer und größere Organisationen allmählich Notiz davon. Heute befürworten viele Investoren, Stadtplaner und Bürgermeister die Idee und zeigen starkes Interesse an einem Prototyp. Stadtplaner in New York City, Portland (Oregon), Los Angeles, Las Vegas, Seattle, Surrey (Kanada), Toronto,

Paris, Bangalore, Dubai, Abu Dhabi, Incheon (Südkorea), Schanghai und Peking haben mich angesprochen. Das Illinois Institute of Technology entwirft gerade einen detaillierten Plan für Chicago.

All diese Interessenten stellen harte Fragen zu Kosten und Rendite, zu Energie- und Wasserverbrauch sowie zum Ernteertrag. Sie machen sich Sorgen über Stahlträger, die in der Feuchtigkeit korrodieren, über den Aufwand, überallhin Wasser und Luft zu pumpen, und über die spezifischen Probleme einer Produktion in großem Stil. Für detaillierte Antworten wird noch viel interdisziplinäre Arbeit nötig sein.

Erfolg oder Misserfolg hängt nun davon ab, wie viel Zeit und Mühe in den Bau von Prototypen gesteckt wird. »Biosphere 2«, das missglückte Projekt eines geschlossenen Ökosystems außerhalb von Tucson (Arizona), in dem ab 1991 zunächst acht Menschen wohnten, ist ein abschreckendes Beispiel. Der Bau war zu groß, auf Pilotprojekte wurde verzichtet, und niemand ahnte, wie viel Sauerstoff der aushärtende Zement des massiven Fundaments absorbieren würde. Derzeit besitzt die University of Arizona Nutzungsrechte an dem Gebäude.

Wenn die Idee des Gewächshochhauses ein Erfolg werden soll, müssen die Planer solche unwissenschaftlichen Abenteuer vermeiden. Ich habe gute Neuigkeiten: Der Ökotechnikexperte Peter Head, Direktor für globale Planung bei Arup, einer internationalen Entwicklungs- und Ingenieurfirma in London, ist davon überzeugt, dass der Bau eines Treibhauswolkenkratzers keine neuartigen Technologien erfordert. Also: Worauf warten wir noch? <

# KRAFTSTOFF SPAREN

MIT MICHELIN ENERGY™ SAVER REIFEN.

Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA, Michelinstraße 4, 76185 Karlsruhe, Deutschland, Stand 02/10



Es gibt gute Gründe, sich für  
MICHELIN ENERGY™ Saver Reifen zu entscheiden:

BREMSWEG	LANGLEBIGKEIT	KRAFTSTOFFVERBRAUCH
BIS ZU <b>3 m*</b> KÜRZER AUF NASSEN STRASSEN	HÄLT BIS ZU <b>45.000 km**</b>	SPART BIS ZU <b>80 l***</b> KRAFTSTOFF

MICHELIN ENERGY™ Saver Reifen sind echte Kraftstoffsparer. Sie helfen, den Verbrauch um bis zu 80 l\*\*\* zu senken. Darüber hinaus halten sie bis zu 45.000 km\*\* und bieten noch mehr Sicherheit mit einem bis zu 3 m\* kürzeren Bremsweg. Der richtige Reifen macht den Unterschied.

Mehr Informationen unter [www.michelin.de](http://www.michelin.de)



\*Im Vergleich zu seinem Vorgängermodell MICHELIN ENERGY™ E3A. Basierend auf vom TÜV SÜD Automotive (Deutschland) 2007 im Auftrag von Michelin durchgeführten Reifentests in den Dimensionen 175/65 R 14 T, 195/65 R 15 H und 205/55 R 16 V.

\*\*Durchschnittliche Lebensdauer von MICHELIN Reifen (2006–2008, intern durchgeführte Statistik).

\*\*\*Berechnung der Durchschnittersparnis mit einem MICHELIN ENERGY™ Saver Reifen für Benzinfahrzeuge im Vergleich zu den Hauptwettbewerbsergebnen. Berechnungen auf der Grundlage von Rollwiderstandstests des TÜV SÜD Automotive (Deutschland) 2009 im Auftrag von Michelin an MICHELIN ENERGY™ Saver Reifen der Dimensionen 175/65 R 14 T, 195/65 R 15 H und 205/55 R 16 V (meistverkaufte aus insgesamt 15 getesteten Dimensionen) und der durchschnittlichen Lebensdauer von MICHELIN Reifen, d.h. 45.000 km (2006–2008, intern durchgeführte Statistik).

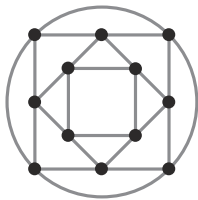
# Glücksfall- ALGORITHMEN

Eine neue Familie merkwürdiger Rechenverfahren wirft ein neues Licht auf die Grenze zwischen leichten und schweren Problemen und damit auf die härteste Nuss auf dem Gebiet der Komplexitätstheorie.

Von Brian Hayes

**W**arum sind einige Berechnungsprobleme so schwierig, andere dagegen recht einfach? Im Jargon der Komplexitätstheorie ausgedrückt, klingt die Frage längst nicht so albern: Ist P gleich NP? Für eine Antwort zahlt das Clay Mathematics Institute eine Million Dollar, jedenfalls wenn ein Beweis mitgeliefert wird (Spektrum der Wissenschaft 10/2008, S. 74 und 80).

Ein Beispiel möge erläutern, wie diffizil die Unterscheidung zwischen leicht und schwer im Einzelfall ist. Wir betrachten einen mathematischen Graphen, also eine Zusammenstellung von »Ecken« oder »Knoten« (durch Punkte dargestellt) und »Kanten« (Linien, die jeweils zwei Ecken miteinander verbinden). Links sehen Sie ein schön symmetrisches Beispiel.



Ein endlicher Graph

Gibt es in diesem Graphen einen Weg, der jede Kante genau einmal durchläuft und dann zu seinem Ausgangspunkt zurückkehrt? Für jeden Graphen mit endlich vielen Kanten könnten wir diese Frage mit *brute force* (»roher Gewalt«) beantworten: Wir probieren alle möglichen Wege der Reihe nach durch, ob sie die Bedingungen erfüllen. Es gibt aber ein erheblich besseres Verfahren: Leonhard Euler (1707–1783) bewies 1736, dass es einen solchen Weg (der heute »Euler-Kreis« heißt) genau dann gibt, wenn in jeder Ecke eine gerade Anzahl von Kanten zusammentrifft. Das ist leicht zu überprüfen und erspart einem die überaus mühsame erschöpfende Suche.

Nehmen wir jetzt denselben Graphen, stellen aber wie William Rowan Hamilton (1805–1865) eine etwas andere Frage: Gibt es einen Weg, der jede Ecke genau einmal durchläuft (einen »Hamilton-Kreis«)? Diesmal gibt es keine Alternative zur rohen Ge-

walt. Bis heute kennt niemand eine Methode, die für jeden Graphen die richtige Antwort liefert und deutlich schneller arbeitet als die erschöpfende Suche.

Die beiden so ähnlich aussehenden Probleme sind so unterschiedlich schwierig wie nur denkbar. Woran liegt das? Gibt es einfach keine kurze Lösung für das Hamilton-Problem, oder sind wir bisher nur zu beschränkt, um sie zu finden? Die meisten Wissenschaftler sind von Ersterem überzeugt – aber bewiesen ist noch nichts. Und schließlich könnten jederzeit völlig neue, überraschende Ideen zur Lösung solcher Probleme auftauchen. Vor 1736 sah die Frage nach der Existenz eines Euler-Kreises schließlich auch schwer aus.

Eine solche Überraschung hat kürzlich stattgefunden. Eine völlig unerwartete Familie von Algorithmen liefert effiziente Lösungen für Probleme, bei denen bisher nur rohe Gewalt half. Entdeckt hat sie Leslie G. Valiant von der Harvard University; Jin-Yi Cai von der University of Wisconsin hat weitere Beiträge dazu geleistet. Valiant nennt sie »holografische Algorithmen« oder »Glücksfall-Algorithmen« (*accidental algorithms*), weil sie ihre Lösung aus dem Hut ziehen wie der Zauberer das Kaninchen: Mitten im Rechengestrüpp heben sich wie durch Magie gewisse Terme weg, und auf einmal ist alles ganz einfach.

## Das Kaffeepausen-Kriterium

Für einen praktizierenden Wissenschaftler ist der Unterschied zwischen langsam und schnell eine klare Sache. Wenn er von der Kaffeepause zurück ist, und der Computer ist noch nicht fertig, dann ist es eine langsame Berechnung. Die Komplexitätstheoretiker fassen diese Definition etwas formaler als den Unterschied zwischen Algorithmen mit polynomialer und solchen mit exponentieller Zeit.

Nehmen wir ein Computerprogramm, das eine Liste von  $n$  Zahlen verarbeitet, zum Beispiel sie nach Größe sortiert, ihren größten gemeinsamen Teiler bestimmt oder alle ihre Permutationen erzeugt. Im Allgemeinen wird das Programm umso mehr Zeit benötigen, je größer die Länge  $n$  der Liste ist, genauer: die Gesamtzahl an Bits, die zur Darstellung der Zahlen erforderlich sind. Wenn die Rechenzeit ungefähr wie  $n^2$  wächst und der Computer 100 Sekunden für ein Problem der Größe 10 benötigt, dann sind es 400 Sekunden für eines der Größe 20 und eine Viertelstunde für Größe 30. Dagegen nimmt ein Programm, dessen Rechenzeit wie  $2^n$  wächst, für ein Problem der Größe 10 schon 1000 Sekunden in Anspruch, für das Zwanzigerproblem eine Million und für das Dreißiger eine Milliarde. Das sind reichlich 30 Jahre – merklich länger als eine Kaffeepause.

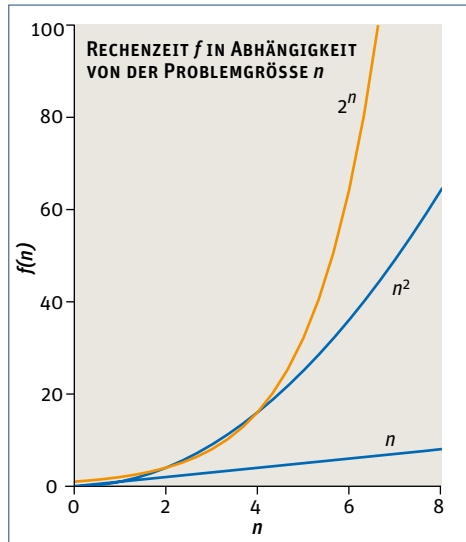
Die Funktion  $n^2$  ist ein Polynom,  $2^n$  eine Exponentialfunktion. Zwischen diesen beiden Funktionentypen verläuft die entscheidende Grenze der Komplexitätstheorie. Grob gesagt sind polynomiale Algorithmen schnell und effizient, exponentielle langsam und eigentlich unbrauchbar. Ein wenig sorgfältiger ausgedrückt: Für hinreichend große  $n$  ist jedes Programm mit polynomialer Rechenzeit schneller als jedes mit exponentieller Rechenzeit.

So viel zur Klassifikation von Algorithmen. Wie sind nun die Probleme zu klassifizieren, die von den Algorithmen gelöst werden sollen? Unter einem »Problem« versteht man dabei nicht eine konkrete Aufgabe wie »Finde in obigem Graphen einen Hamilton-Weg«, sondern die abstrakte Aufgabe, also etwa in einem beliebigen Graphen einen Hamilton-Weg zu finden. Ein konkreter Fall heißt dann eine »Instanz« des Problems.

Für jedes Problem gibt es im Allgemeinen mehrere Lösungsalgorithmen, und nicht immer ist der eine eindeutig besser als der andere. Man pflegt einen Algorithmus an seiner Leistung im schlimmsten Fall (*worst-case performance*) zu messen.

Ein Problem wird in die Klasse P (wie polynomial) eingeordnet, falls es mindestens einen Lösungsalgorithmus gibt, der stets die richtige Antwort gibt und im schlimmsten Fall dafür polynomiale Rechenzeit benötigt.

Richtig schwer wird die Klassifikation bei den Problemen, für die wir keinen Algorithmus mit polynomialer Rechenzeit kennen. Zunächst sind einige eher uninteressante Fälle auszusortieren, zum Beispiel die Aufgabe, alle Teilmengen einer Menge mit  $n$  Elementen zu bestimmen. Das ist nicht schwer; weil es aber insgesamt  $2^n$  Teilmengen sind, erfordert be-



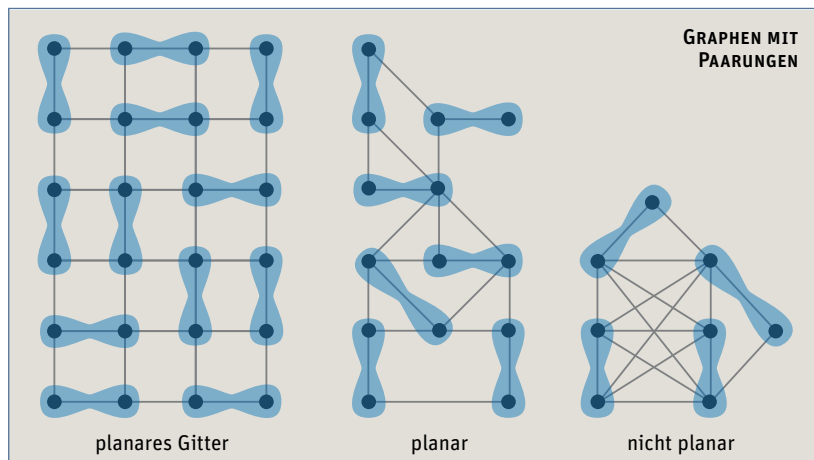
Polynome und Exponentialfunktionen kennzeichnen die beiden wesentlichen Klassen von Algorithmen. Hängt die Rechenzeit eines Algorithmus vom Eingabumfang  $n$  wie ein Polynom ab, zum Beispiel  $n$  oder auch  $n^2$ , so gilt der Algorithmus als effizient; wächst sie dagegen exponentiell mit  $n$ , etwa wie  $2^n$ , ist er zu langsam für praktische Anwendungen.

reits das Aufschreiben exponentielle Zeit. Um sich mit solchen pseudoschweren Problemen nicht aufzuhalten, konzentriert sich die Komplexitätstheorie auf Probleme mit kurzen Antworten, etwa Ja oder Nein (»Hat der Graph einen Hamilton-Kreis?«) oder eine schlichte Anzahl (»Wie viele Hamilton-Kreise gibt es in diesem Graphen?«). Grundsätzlich könnte es für derartige Probleme Lösungsalgorithmen mit polynomialer Rechenzeit geben; für einige sind sogar welche bekannt. Die große Frage bleibt aber, ob es für alle diese Probleme zutrifft. Falls nicht, was unterscheidet dann die leichten von den schweren Fragen?

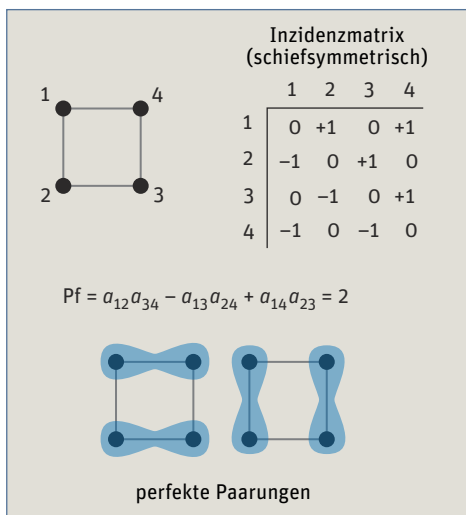
## Gewissenhaftes Schummeln

Die Abkürzung NP bedeutet »nichtdeterministisch polynomial«. Der Begriff nimmt Bezug auf eine hypothetische Maschine, die Probleme durch Raten lösen kann – nichtdeterministisch eben. Ein Problem aus der Klasse NP hat einen polynomialen Lösungsalgorithmus oder auch nicht. Rät man aber die Antwort oder bekommt sie von der wundersamen

Das Paarungsproblem für Graphen wurde zuerst für solche mit einer periodischen Struktur untersucht (links). Der im Text beschriebene Algorithmus arbeitet aber auch für weniger reguläre Exemplare (Mitte). Dagegen ist der Graph rechts nicht planar; seine perfekten Paarungen lassen sich nicht schnell abzählen.

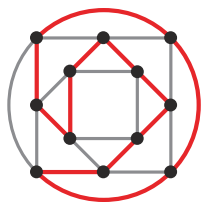


Die Kantenstruktur eines Graphen stellt man durch eine Inzidenzmatrix dar: Jede Zeile und Spalte entspricht einer Ecke des Graphen. Wenn Ecke  $i$  und Ecke  $j$  durch eine Kante verbunden sind, trägt man in Zeile  $i$  und Spalte  $j$  den Wert 1 ein, sofern  $i < j$  ist, und  $-1$  für  $i > j$ . In alle anderen Felder wird 0 eingetragen. Die pfaffsche Determinante  $P_f$ , eine Summe über gewisse Produkte der Einträge, gibt die Anzahl aller möglichen perfekten Paarungen des Graphen an – im gezeigten Beispiel 2.



Maschine eingeflüstert, kann man sehr rasch prüfen, ob sie stimmt. NP ist so etwas wie die Komplexitätsklasse für gewissenhafte Schummler – Schüler, die ihre Hausaufgaben zwar nicht selbst machen, aber sich vergewissern, ob die abgeschriebene Lösung stimmt.

Die Frage nach der Existenz eines Hamilton-Kreises ist ein NP-Problem. Ich weiß zwar nicht, wie das Problem für alle Graphen effizient zu lösen wäre, aber ich sehe sofort, ob ein vorgelegter Rundweg durch den Graphen tatsächlich jede Ecke passiert (Bild links).



Graph mit Hamilton-Kreis

(Es bleibt anzumerken, dass diese Methode nur funktioniert, falls die Antwort Ja lautet. Die Behauptung, der Graph habe keinen Hamilton-Kreis, ist wieder nur durch erschöpfende Suche zu beweisen.)

Innerhalb der Klasse der NP-Probleme sitzt die Spitzengruppe der so genannten NP-vollständigen Probleme. Die definierende Eigenschaft ist: Ein Problem  $C$  ist NP-vollständig, wenn es selbst in NP liegt und jedes Problem aus NP in polynomialer Zeit auf  $C$  reduzierbar ist, das heißt, jede Instanz eines Problems in NP ist in eine Instanz von  $C$  übersetzbar, und die Lösung lässt sich rückübersetzen.

NP-vollständige Probleme verfügen über eine außerordentliche Eigenschaft: Gibt es für ein einziges dieser Probleme ein Lösungsverfahren in Polynomialzeit, dann lässt sich diese Methode so anpassen, dass sie jedes NP-Problem in polynomialer Zeit löst (die NP-vollständigen und alle übrigen auch). Ein einziger derartiger Algorithmus würde also beweisen, dass beide Klassen identisch sind:  $P = NP$ .

Das klingt etwas mysteriös. Wie kann die Lösung eines einzigen Problems zugleich alle anderen Probleme in NP miterledigen? Dabei ist noch nicht einmal klar, welche Probleme zur Klasse der NP-vollständigen gehören. Die Antwort ist so merkwürdig und unerwartet, dass sie eine kurze Abschweifung rechtfertigt.

Zum ersten Mal wurde die NP-Vollständigkeit im Jahr 1971 von Stephen A. Cook von der University of Toronto für das so genannte Erfüllbarkeitsproblem bewiesen. Gegeben ist eine Formel aus der booleschen Logik, das heißt, die Variablen können die Werte »wahr« und »falsch« annehmen und sind durch die logischen Operatoren UND, ODER und NICHT miteinander verknüpft. Das Entscheidungsproblem fragt dann: Gibt es eine Belegung der Variablen mit den Werten wahr und falsch, für welche die gesamte Formel wahr wird? Für  $n$  Variablen gibt es insgesamt  $2^n$  mögliche Belegungen; sie alle auszuwerten erfordert exponentielle Rechenzeit und ist daher ein Akt roher Gewalt. Aber eine geratene Lösung zu überprüfen kostet genau eine Auswertung der Formel. Damit reiht sich das Problem in die Klasse NP ein.

Cooks Beweis für die NP-Vollständigkeit beruht auf einer wunderschönen Idee, die Einzelheiten dagegen sind eher abschreckend. Den Schlüssel bildet die Tatsache, dass boolesche Formeln auch die Schaltkreise und Operationen eines Computers beschreiben können. Cook stellt sich einen Computer mitsamt einem Programm vor, das – nichtdeterministisch! – eine Lösung rät und auf ihre Korrektheit prüft. Er zeigt dann, wie eine komplizierte Formel zu konstruieren wäre, die alle Operationen des Computers darstellt. Das Programm beendet seine Arbeit genau dann erfolgreich, wenn diese Formel erfüllbar ist, das heißt für die Variablen Werte so gefunden werden können, dass sie wahr wird. Könnte man also in polynomialer Zeit entscheiden, ob diese boolesche Formel erfüllbar ist, dann wäre zugleich das darin kodierte Entscheidungsproblem gelöst. Dabei hängt der Beweis überhaupt nicht von den konkreten Einzelheiten ab; er beruht allein auf der Tatsache, dass das Prüfverfahren in Polynomialzeit arbeitet.

Heute ist bekannt, dass Tausende von Problemen NP-vollständig sind; sie sind durch ein enges Geflecht von Beziehungen miteinander verbunden. Entweder ist jedes von ihnen schwer, oder alle Angehörigen der Klasse NP sind einfach.

### Das Paarungsspiel

Zurück zu den neuen holografischen Algorithmen. Wir benötigen noch eine weitere Zutat aus der Graphentheorie: die Idee der perfekten Paarung.

Betrachten wir dazu ein Filmfestival, in dem Filme stets paarweise vorgeführt werden. Die beiden Filme jedes Paares müssen mindestens einen Schauspieler gemeinsam haben, und auf dem ganzen Festival darf kein Film mehr als einmal gezeigt werden. Diese Bedin-

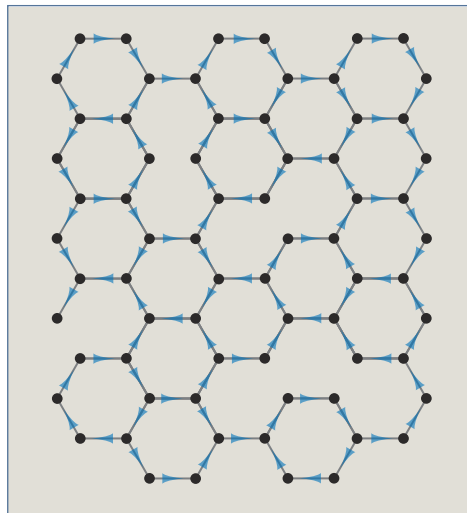


gungen lassen sich gut mit Hilfe eines Graphen beschreiben. Dessen Ecken bilden die Filme; zwei von ihnen werden durch eine Kante verbunden, sowie mindestens ein Schauspieler in beiden auftritt. Es ist nun eine Teilmenge der Kanten so auszuwählen, dass keine zwei von ihnen eine Ecke gemeinsam haben. Eine Kantenwahl, welche die Menge aller Ecken in Paare einteilt, heißt perfekte Paarung. Wieder benötigt das Durchmusterung aller möglichen Paarungen mit roher Gewalt exponentielle Zeit; für jeden gegebenen Lösungskandidaten lässt sich die Korrektheit aber sehr effizient prüfen (Bild rechts unten). Die Suche nach einer perfekten Paarung für einen beliebigen Graphen ist also ein NP-Problem.

In den 1960er Jahren entwarf Jack Edmonds, heute an der University of Waterloo (Ontario, Kanada), einen effizienten Algorithmus, der eine perfekte Paarung findet, falls es überhaupt eine gibt. Sein Algorithmus arbeitet in polynomialer Zeit; das Entscheidungsproblem für perfekte Paarungen gehört demnach zur Klasse P. Die 1965 erschienene Arbeit von Edmonds ist übrigens die erste, in welcher der Unterschied zwischen polynomialen und exponentiellen Algorithmen diskutiert wird.

Eine andere Erfolgsgeschichte über Paarungsmethoden bezieht sich auf planare Graphen – solche, die sich ohne Kantenkreuzungen in der Ebene zeichnen lassen. Für einen planaren Graphen lässt sich nicht nur das Entscheidungsproblem für Paarungen effizient lösen, sondern auch das zugehörige Abzählproblem, bei dem die Anzahl aller möglichen perfekten Paarungen zu bestimmen ist. Im Allgemeinen sind Abzählprobleme schwerer als Entscheidungsprobleme, da ihre Lösung mehr Information enthält. Die wichtigste Komplexitätsklasse für Abzählprobleme wird mit #P bezeichnet. In jeder Lösung eines Problems aus #P (»Wie viele Lösungen gibt es?«) ist die Lösung des zugehörigen Entscheidungsproblems (»Gibt es eine Lösung?«) inbegriffen. Ein Problem aus #P ist also mindestens so schwer wie sein Kollege aus NP.

Das Problem, perfekte Paarungen in planaren Graphen abzuzählen, hat seine Wurzeln in Physik und Chemie. An eine Oberfläche lagern sich zweiatomige Moleküle so an, dass sich dabei eine nur ein Atom dicke Schicht bildet. Auf wie viele verschiedene Weisen ist das möglich? Dieselbe Frage in anderer Verkleidung: Auf wie viele Weisen kann man Dominosteine (Rechtecke mit den Seitenlängen 1 und 2) ohne Lücken oder Überlappungen auf einem Schachbrett auslegen? Die Anzahlen selbst wachsen anscheinend exponentiell mit der Brettgröße: Auf Brettern der Größe



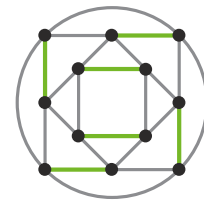
$2 \cdot 2$ ,  $4 \cdot 4$ ,  $6 \cdot 6$ ,  $8 \cdot 8$  gibt es 2, 36, 6728 und 12 988 816 Anordnungen. Erstaunlicherweise kann gleichwohl die Anzahl der möglichen Konfigurationen von einem Algorithmus in Polynomialzeit bestimmt werden. Das geniale Verfahren haben Anfang der 1960er Jahre Pieter W. Kasteleyn und – unabhängig von ihm – Michael E. Fisher und H.N.V. Temperley entwickelt. Es ist heute als FKT-Algorithmus bekannt.

Man kodiert zunächst die Struktur eines Graphen mit  $n$  Ecken in einer  $n \cdot n$ -Matrix (Grafik links oben). Aus der Determinante dieser Matrix ist die Anzahl aller möglichen perfekten Paarungen zu berechnen. Die Determinante ist definiert als eine Summe von  $n!$  Termen; jeder davon ist das Produkt von  $n$  Einträgen der Matrix.  $n!$  (» $n$ -Fakultät«) steht hier für das Produkt  $n \cdot (n-1) \cdot \dots \cdot 2 \cdot 1$ , und das ist keine polynomiale Funktion von  $n$ , sondern wächst wie eine Exponentialfunktion. Das Verfahren wäre also nicht effizienter als rohe Gewalt, sprich die Auflistung aller perfekten Paarungen.

Jetzt kommt das Kaninchen aus dem Zylinder! Es gibt nämlich alternative Verfahren zur Berechnung der Determinante, die sich polynomial verhalten. Das bekannteste Beispiel ist das gaußsche Eliminationsverfahren zur Lösung linearer Gleichungssysteme. (Bei diesem Verfahren fällt die Determinante als Zwischenergebnis mit ab.) Folgt man dessen Regeln, so reduziert sich die gigantische Summe auf eine polynomiale Anzahl von Termen, denn fast alle Terme heben sich auf magische Weise gegenseitig auf. Sie müssen überhaupt nicht berechnet, ihre Gestalt oder Eigenschaften gar nicht betrachtet werden.

Die für perfekte Paarungen zu berechnende Größe ist nicht die Determinante selbst, sondern deren Quadratwurzel, die pfaffsche Determinante; aber das macht für die Komple-

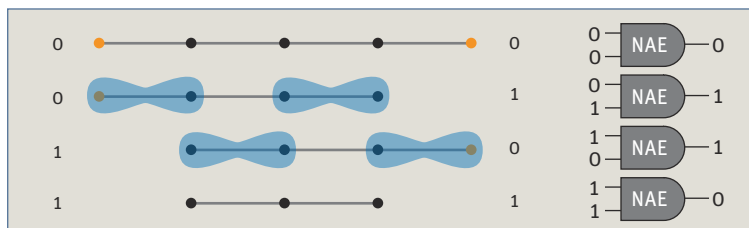
Aus der Chemie motiviert ist das Studium von Graphen mit gerichteten Kanten (jede Kante ist mit einem Pfeil versehen) und Ecken, in denen höchstens drei Kanten aufeinandertreffen. Zusätzlich dürfen an jeder Ecke die Kanten nicht alle einlaufend oder alle auslaufend sein. Eine derartige Struktur heißt »Drei-Eis«, weil sie (Ecken für Atome, Kanten für chemische Bindungen) die chemische Struktur von Eis wiedergibt.



Graph mit perfekter Paarung

## EIN RECHNENDER PAARUNGSGRAPH

**Wie konstruiert man einen Graphen mit zwei Eingängen**, der genau dann eine perfekte Paarung hat, wenn an beiden Eingängen verschiedene Eingaben vorliegen? Man nimmt eine Kette aus fünf Ecken, die mit vier Kanten verbunden sind (oberste Zeile im Bild). Die beiden orangefarbenen Ecken stehen für die Eingänge. Bei einer Eins wird der zugehörige Eingangsknoten entfernt, bei einer Null geschieht nichts.



Wenn genau eine Eins vorliegt, hat der verbleibende Graph vier Ecken und lässt daher eine perfekte Paarung zu. Bei den Eingaben 00 und 11 ist die Anzahl der Ecken ungerade, so dass keine perfekte Paarung möglich ist.

Dieser – sehr einfache – Graph ist also ein NAE-Gatter mit zwei Eingängen. Das analoge Gatter mit drei Eingängen lässt sich nicht auf diese direkte Art in einen Graphen umsetzen.

transformiert. Schon eine solche Reduktion zu finden ist eine Kunst für sich.

Holografische Reduktionen sind komplizierter. Sie bilden nicht unbedingt einzelne Instanzen aufeinander ab, sondern größere Mengen von Instanzen. Dabei bleiben die Anzahl der Lösungen oder ihre Summe erhalten; das erweist sich für gewisse Abzählungsprobleme als ausreichend.

Betrachten wir als Beispiel ein Problem mit der kryptischen Bezeichnung #P-3-NAE-ICE. Es befasst sich mit planaren Graphen vom maximalen Grad 3, das heißt, in keiner seiner Ecken treffen mehr als drei Kanten zusammen. Jede Kante soll außerdem so mit einer Richtung versehen sein, dass an keiner Ecke vom Grad 2 oder 3 alle Kanten zu ihr hin oder von ihr weg weisen; diese Forderung nennt man NAE-Bedingung (*not all equal*). Derartige Graphen heißen »Eisgraphen«, weil sie als Modelle für die Struktur von Eis dienen (Bild S. 85 oben); dabei stellen die Ecken Moleküle dar und die Kanten chemische Bindungen zwischen ihnen. In seiner Entscheidungsversion fragt das Problem danach, ob man allen Kanten Richtungen so zuweisen kann, dass in jeder Ecke des Graphen die NAE-Bedingung erfüllt ist. Uns interessiert hier aber die Abzählversion des Problems: Wie viele derartige Zuweisungen von Richtungen an die Kanten gibt es?

Die Strategie besteht darin, zunächst einen neuen planaren Graphen zu konstruieren, das so genannte Paarungsgitter (*matchgrid*), das sowohl die Struktur des Eisgraphen als auch die NAE-Bedingung wiedergibt. Für das Paarungsgitter berechnet man mit Hilfe des FKT-Algorithmus eine gewichtete Summe über die perfekten Paarungen des Graphen. Diese Summe ist gleich der Anzahl der zulässigen Richtungszuweisungen! Es ist aber nicht so, dass einer einzelnen Paarung eine bestimmte NAE-Bedingung entsprechen müsste.

Wieder ist das Paarungsgitter als eine Art Computer zu verstehen. Es besteht aus einzelnen Bauteilen, den so genannten Paarungsgattern (*matchgates*), die wie die elementaren logischen Gatter in der booleschen Algebra mehrere binäre (null oder eins) Eingaben entgegennehmen und daraufhin eine Null oder eine Eins ausgeben (Kasten links oben). So wird eine Ecke eines Eisgraphen vom Grad 3 durch ein »Erkennner«-Gatter mit drei Eingängen wiedergegeben. Dieses realisiert die NAE-Funktion, das heißt, es gibt eine Null aus, wenn alle drei Eingaben gleich sind (000 oder 111) und in allen anderen Fällen (001, 010, 100, 011, 101, 110) eine Eins.

Jede Kante des Eisgraphen wird im Paarungsgitter durch ein »Erzeuger«-Gatter mit

xität der Berechnung keinen nennenswerten Unterschied.

Die Existenz einer Vereinfachung bei der Berechnung der Determinante ist so etwas wie ein Schlupfloch im Steuergesetz – ein Glückstreffer für alle, die davon profitieren können. Das sind allerdings nur wenige, weil die Bedingungen sehr eng gefasst sind.

So funktioniert der Algorithmus ausschließlich für planare Graphen – alle Verallgemeinerungsversuche sind bisher gescheitert –, und da auch nur für perfekte Paarungen; alle Paarungen überhaupt abzuzählen ist ein #P-vollständiges Problem.

### Algorithmische Holografie

Im Fall des FKT-Algorithmus wird ein Problem aus der Graphentheorie in eines aus einem anderen Teilbereich der Mathematik, der linearen Algebra, übertragen, weil es sich in dieser Form leichter lösen lässt. Solche Übertragungen (»Reduktionen«) eines Problems auf ein anderes sind in der Komplexitätstheorie alltäglich. Holografische Algorithmen beruhen ebenfalls auf einer solchen Reduktion – und zwar wiederum auf ein Problem mit Determinanten –, aber einer völlig neuartigen.

Üblicherweise macht eine Reduktion aus einer Instanz des Problems *A* genau eine des Problems *B* und umgekehrt. Wenn also Problem *B* lösbar ist, kann man jede Instanz von *A* lösen, indem man sie auf eine Instanz von *B* abbildet, diese löst und die Lösung zurück-

## KOMPLEXITÄT

Auf den ersten Blick erscheint die in diesem Artikel diskutierte **Klasseneinteilung der Algorithmen** in »langsam« und »schnell« und der Probleme in »leicht« und »schwer« ungeheuer grob. Sie kann daher auch nie direkt die Frage beantworten, wie viel Rechenzeit die Lösung eines konkreten Problems in Anspruch nehmen wird.

Sie gibt allerdings Auskunft darüber, wie sich die Rechenzeiten für eine kleine und eine große **Instanz eines Problems** zueinander verhalten.

Auch diese Auskunft ist noch sehr grob, reicht aber aus, um einen langsamen Algorithmus für **im Prinzip unbrauchbar** zu erklären: Nur die kleinsten Instanzen eines Problems erledigt er in akzeptabler Zeit.

zwei Eingängen dargestellt, die für die beiden Enden der Kante stehen. Eine Kante hat eine zulässige Orientierung, wenn sie von der einen Ecke weg und zur anderen hin weist; das Erzeuger-Gatter muss also auf die Eingänge 01 und 10 eine Eins ausgeben und sonst eine Null.

Die Variablen, die in die Gatter eingehen, sind sozusagen die Pfeile an den Kanten in der Nähe der Ecken: 1 für »von der Ecke weg«, 0 für »auf die Ecke zu«. Wenn alle Gatter eine Eins ausgeben, dann hat man eine zulässige Kantenbelegung gefunden. Auch dieses Problem ist damit in ein Erfüllbarkeitsproblem umgesetzt.

Nun soll aber jedes Paarungsgatter selbst ein Stück von einem Graphen sein mit der Eigenschaft, dass es genau dann eine Eins ausgibt, wenn es eine perfekte Paarung zulässt. Das ist eine sehr unkonventionelle, aber durchaus zulässige Art, einen Computer zu bauen. Sie hat nur einen Haken. Viele Gatter, insbesondere das entscheidende Erkennergatter für Knoten vom Grad 3, sind nicht als Paarungsgraphen realisierbar. Der Grund ist leicht zu erkennen: Bei perfekten Paarungen kommt es entscheidend auf die Parität, das heißt den Unterschied von gerade und ungerade an. Ein Graph kann keine perfekte Paarung haben, wenn die Anzahl seiner Ecken ungerade ist. Unser Gatter muss aber auf die beiden Eingaben 000 und 111 in gleicher Weise reagieren, und die haben entgegengesetzte Parität; eine hat eine gerade Anzahl von Einsen, die andere eine ungerade.

Was hilft gegen dieses Problem der Algebra? Noch mehr Algebra. Man realisiert das gewünschte Verhalten nicht durch ein einzelnes Paarungsgatter, sondern durch eine lineare Superposition anderer Funktionen. Ein geeignetes Gleichungssystem aufzustellen, das solche Superpositionen ergibt, ist der entscheidende und zugleich schwierigste Teil der holografischen Methode. Die bisherigen Erfolge beruhten auf genialem Probieren zusammen mit intensivem Gebrauch von Computeralgebra-Systemen. Erst vor Kurzem hat Cai gemeinsam mit Pinyan Lu von der Tsinghua University etwas Systematik in den Suchprozess gebracht.

Warum nennt man diese Methoden holografische Algorithmen? Valiant erklärt das dadurch, dass sich viele Beiträge zu einer Summe gegenseitig aufheben, ähnlich wie bei der optischen Interferenz, die der Holografie zu Grunde liegt, viele Lichtwellen sich gegenseitig auslöschen. Von der optischen zur quantenmechanischen Überlagerung von Wellen ist es nicht mehr weit; und tatsächlich handelt Valiants erste Veröffentlichung zu diesem The-

ma von der Simulation der Elemente eines Quantencomputers mit klassischen Mitteln – in polynomialer Zeit.

Lernen wir durch holografische Algorithmen mehr über das Problem  $P=NP$ , als wir vorher wussten? Nun ja, die Behauptung  $P=NP$  ist auf diesem Weg nicht bewiesen worden: Einige Probleme haben sich zwar erst durch die holografischen Algorithmen als zu  $P$  gehörig herausgestellt, aber keines von ihnen ist  $NP$ - oder  $\#P$ -vollständig. Bis heute bleibt die Barriere zwischen  $P$  und  $NP$  also unangetastet.

### P oder NP, das ist hier die Frage

Die Idee,  $P$  und  $NP$  könnten doch gleich sein, ist völlig aus der Mode. Die Vorstellung, alle  $NP$ -Probleme hätten einfache Lösungen, scheint bloßes Wunschdenken, viel zu schön, um wahr zu sein. Es wäre ein Wunder, sollten wir tatsächlich in einem Universum leben, das – zumindest beim Rechnen – so ganz ohne echte Anstrengung auskommt. Andererseits: Damit  $NP$  tatsächlich ungleich  $P$  ist, darf kein einziges der Tausende von  $NP$ -vollständigen Problemen eine effiziente Lösung haben; das ist auch nicht einfach zu glauben.

Valiant zieht eine Parallele zur goldbachschen Vermutung, die besagt, dass jede gerade Zahl größer als zwei die Summe zweier Primzahlen ist (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 94). Praktisch jeder glaubt heute, dass sie zutrifft; solange es aber keinen Beweis dafür gibt, haben wir keine Ahnung, warum sie stimmen sollte. Eine einzige Ausnahme würde die Lage total verändern. Das gilt in noch stärkerem Maß, wenn sich ein polynomialer Algorithmus für ein einziges  $NP$ -vollständiges Problem finden würde.

Aber die Suche nach dieser Weltsensation muss nicht das einzige Motiv sein, sich mit holografischen Algorithmen zu beschäftigen. Es ist auch schon der Mühe wert, die Grenzen zwischen den Komplexitätsklassen genauer zu erkunden und damit besser zu verstehen, was mit polynomialen Mitteln erreichbar ist und was nicht.

Schließlich geht es auch darum, die holografischen Algorithmen selbst auf einer höheren Ebene zu verstehen. Die Bezeichnung »Glücksfälle« – oder auch »exotisch« oder »abnormal«, wie in der Fachliteratur – lässt sie als Launen der Natur erscheinen, ähnlich wilden Kreaturen, die als Fossilien im Museum ausgestellt sind. Und Zufallsfunde sind es nun wirklich nicht. Die Gleichungssysteme, die zur Erzeugung ganzer Familien von Paarungsgattern benötigt werden, sind nicht einfach aus der mathematischen Ursuppe zu fischen. Jemand musste sie erfinden. ◀



**Brian Hayes** ist Senior Writer bei »American Scientist«. Seine Blogseite steht unter <http://bit-player.org>.

© American Scientist ([www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org))

**Cai, J.-Y., Lu, P.:** 2007. Holographic Algorithms: The Power of Dimensionality Resolved. In: Proceedings of the 34th International Colloquium on Automata, Languages and Programming. Springer, Berlin 2007, S. 631–642.

**Cook, S. A.:** The Complexity of Theorem-Proving Procedures. In: Proceedings of the Third ACM Symposium on the Theory of Computing. ACM, New York 1971, S. 151–158.

**Edmonds, J.:** Paths, Trees, and Flowers. In: Canadian Journal of Mathematics 17, S. 449–467, 1965.

**Kasteleyn, P. W.:** The Statistics of Dimers on a Lattice. In: Physica 27, S. 1209–1225, 1961.

**Valiant, L. G.:** Accidental Algorithms. In: Proceedings of the 47th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE, New York 2006, S. 509–517.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023394](http://www.spektrum.de/artikel/1023394).

## GEFÄSSCHIRURGIE

# Gestützt, geschützt

Ein Metallgeflecht, Stent genannt, hilft bei Arteriosklerose Herzinfarkt und Schlaganfall vorzubeugen.

Von Julia Eder

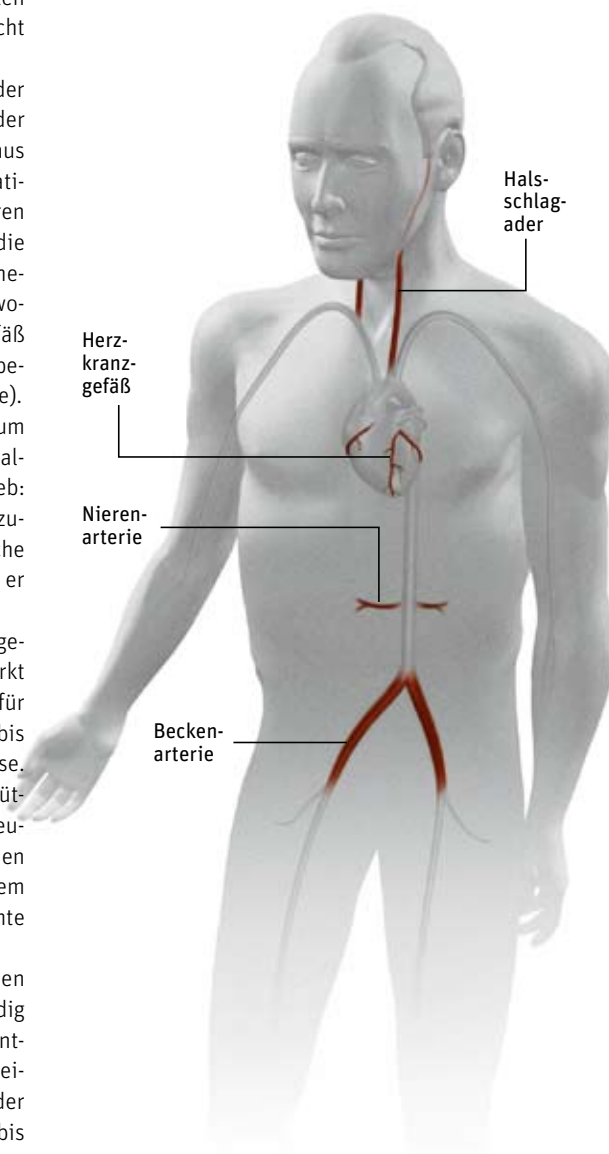
**A**llein in Deutschland erleiden jährlich etwa 260 000 Menschen einen Herzinfarkt und 200 000 einen Schlaganfall. Hauptursache: cholesterinhaltige Partikel, die sich in den Wänden der Blutgefäße einlagern, mitunter verhärten und den Blutfluss behindern. Liegt eine solche Arteriosklerose vor, versucht man mit technischen Mitteln, das Gefäß zu stabilisieren und offen zu halten.

Sind die Einlagerungen sehr groß und verengen sie weite Strecken in der Blutbahn, wird operiert. Der Chirurg schabt die so genannten Plaques aus der aufgeschnittenen Arterie. Ist das nicht möglich, überbrückt ein Bypass aus Kunststoff oder einem Stück Vene die Engstelle. Weniger belastend für den Patienten ist die Ende der 1970er Jahre entwickelte Ballonmethode, die bei kleineren arteriosklerotischen Herden angewandt wird: Bei dieser Angioplastie, wie die Weitung von Blutgefäßen im Fachjargon heißt, wird ein Ballon über einen Katheter von der Leiste aus zu der betroffenen Stelle geführt und dort aufgeblasen, wobei er die Gefäßwände dehnt, und anschließend wieder entfernt. Um das Gefäß dauerhaft zu weiten, sind aber meist mehrere Anwendungen nötig, und es besteht ein hohes Risiko, dass sich die Adern erneut verengen (fachlich: Restenose).

Deshalb kommen heutzutage meist Drahröhrchen, so genannte Stents, zum Einsatz. Über einen Katheter platziert, werden sie entweder mit Hilfe eines Ballons auf die nötige Größe gebracht oder sie erweitern sich aus eigenem Antrieb: Wird eine Metalllegierung mit Formgedächtnis verwendet, dehnt sich der zusammengepresste Stent im körperwarmen Blut wieder auf seine ursprüngliche Größe aus. Für den chirurgischen Eingriff genügt eine örtliche Betäubung, er dauert eine halbe bis maximal zwei Stunden.

Die Metallstützen müssen im Gefäß einwachsen. Bis sie von Gewebe umgeben sind, können sich daran aber Blutgerinnsel bilden, die ihrerseits Herzinfarkt oder Schlaganfall verursachen. Um dem vorzubeugen, erhalten die Patienten für einen Monat bis zu einem Jahr gerinnungshemmende Medikamente. In 20 bis 30 Prozent der Fälle führt leider ein übermäßiges Zellwachstum zur Restenose. Dieses Risiko verringert sich auf zehn Prozent durch den Einsatz von Gefäßstützen, die mit speziellen Wirkstoffen beschichtet sind. Sie hemmen die Zellneubildung – freilich nur bei direktem Kontakt mit den Drähten, nicht zwischen den Maschen. Eine weitere Verbesserung des Verfahrens entwickelten vor Kurzem Forscher am Tübinger Uniklinikum: Ein Spezialkatheter imprägniert die gesamte Arterienwand mit dem Wirkstoff.

Problematisch bleibt jedoch, dass die Drahtgeflechte den betreffenden Arterienabschnitt starrer machen und möglicherweise auch nicht vollständig einwachsen. Es bleibt somit die Gefahr chronischer Entzündungen und der Entstehung von Blutgerinnseln. Deshalb versuchen Biologen und Mediziner seit einigen Jahren, Stents aus Materialien zu konstruieren, die der Körper im Lauf der Zeit abbauen kann. Sie sollen die Gefäßwände nur so lange stabilisieren, bis sich neues Stützgewebe gebildet hat. Magnesiumlegierungen und Polymere aus Milchsäure wurden getestet. Erstere verursachten jedoch häufig starke Entzündungen. Viel versprechend scheinen laut einer Studie von 2008 Stents aus Milchsäurepolymeren zu sein: Auch nach sechs Monaten konnten die Wissenschaftler keine Restenosen feststellen. Bis die bioresorbierbaren Stützen auf dem Markt sind, ist aber wohl noch viel Forschungsarbeit nötig.



**Stents werden vor allem bei Verengungen der dargestellten Arterien eingesetzt.**

**JULIA EDER** ist freie Wissenschaftsjournalistin in Passau.

WUSSTEN SIE SCHON?

- ▶ **Wird ein arteriosklerotischer Herd gedehnt**, kann Plaque-material in die Blutbahn gelangen. Um einen Schlaganfall zu verhindern, führt der Arzt entweder mit dem Stent einen schirm-artigen Filter ein, oder er unterbricht den Blutfluss vorüberge-hend und saugt freigesetzte Partikel ab.
- ▶ **Stents werden individuell angepasst** – mittels bildgeben-der Verfahren wie Computer- oder Magnetresonanztomografie. Die meisten Herzarterien sind zwischen zwei und vier Millimeter weit. Dafür bevorzugt man Stents mit Ballonausweitung, da sich ihr Durchmesser während des Eingriffs fein anpassen lässt. Ge-

fäßstützen, die sich selbst ausdehnen, sind druckresistenter und werden deshalb häufiger bei den vier bis sechs Millimeter weiten Halsschlagadern eingesetzt, zumal diese unter der Haut liegen und durch äußeren Druck gequetscht werden können.

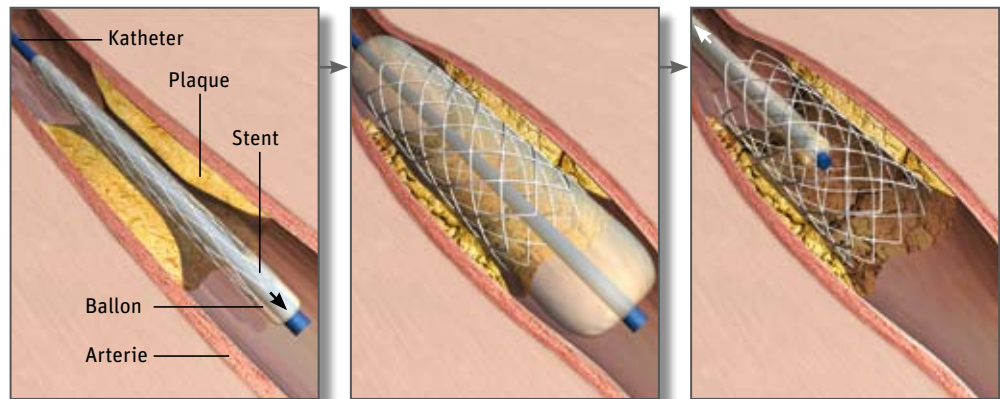
▶ **Auch in der Krebstherapie** kommen Stents zum Einsatz, etwa wenn ein Tumor Speiseröhre, Luftröhre oder Gallenwege verengt.

▶ **In Deutschland erhalten jährlich zirka 290 000 Patienten** einen oder mehrere Gefäßstents, weltweit sind es mehr als zwei Millionen.

ALLE ILLUSTRATIONEN: KEN EDWARD, BIOGRAFX

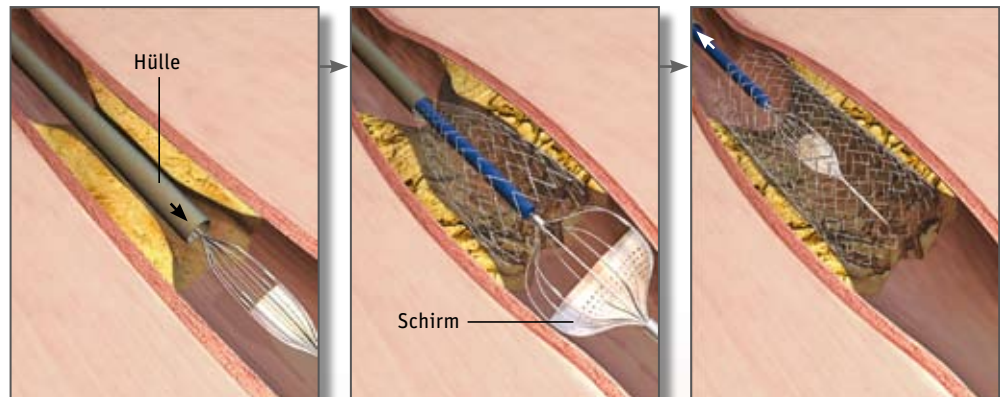
**Stent mit Ballonmethode**

Die Gefäßstütze ummantelt beim Einbringen einen Ballon. Wird er aufgeblasen, drückt er das Geflecht gegen den arteriosklerotischen Herd. Nachteil: Der Eingriff muss eventuell wiederholt werden.



**Stents mit Formgedächtnis**

In einer Hülle verpackt, wird dieser Stent eingeführt. Sobald sie zurückgezogen wird, dehnt sich das Metallgeflecht dank seines Formgedächtnisses auf seinen alten Durchmesser aus. Ein Schirm soll verhindern, dass dabei gelöstes Material in die Blutbahn gelangt.



**Eingewachsene Stütze**

Als Reaktion auf den Fremdkörper werden verstärkt Zellen gebildet, was einerseits die Gefahr der Gerinnselbildung verringert, andererseits aber selbst zu einer erneuten Gefäßverengung führen kann. Spezielle Wirkstoffe in der Stentbeschichtung sollen dies verhindern.



# Motoren für NANOROBOTER

Herkömmliche Antriebsmechanismen scheitern in der Nanowelt an den speziellen Bedingungen, die dort herrschen. Die Konstruktion von Motoren für Roboter auf dieser Größenskala ist deshalb eine besondere Herausforderung.

Von Thomas E. Mallouk  
und Ayusman Sen

## In Kürze

- ▶ Die Nanotechnologie verspricht futuristische Anwendungen wie **submikroskopische Roboter**, die andere Maschinen zusammenbauen oder im Innern des Körpers Wirkstoffe abliefern und **mikrochirurgische Eingriffe** durchführen.
- ▶ Die Physik macht solchen Robotern das Leben schwer, weil Flüssigkeiten für die Winzlinge zäh wie Sirup sind und sie **auf Grund der brownischen Bewegung** unablässig herumgeschubst werden.
- ▶ Von biologischen Motoren in lebenden Zellen holen sich Chemiker Anregungen, wie sich Maschinen im Mikro- und Nanometerbereich durch **katalytische Reaktionen** antreiben lassen.

**M**an stelle sich vor, es gäbe Autos, Flugzeuge und U-Boote in der Größe von Bakterien oder Molekülen. Das würde ungeahnte neue Möglichkeiten eröffnen. So könnten mikroskopisch kleine Roboter mit chirurgischen Instrumenten, in den Körper injiziert, die Ursache von Krankheiten lokalisieren und beseitigen – zum Beispiel Plaques in Arterien oder jene Proteinablagerungen im Gehirn, die als Auslöser der Alzheimerkrankheit gelten. Winzige Maschinen mit Abmessungen im Bereich von Nanometern (millionstel Millimetern) wären in der Lage, in Stahlträger von Brücken oder in Flugzeugflügel einzudringen, um dort unsichtbare Risse zu reparieren, bevor diese sich ausbreiten und zum katastrophalen Versagen führen.

In den letzten Jahren haben Chemiker eine Reihe erstaunlicher Strukturen in molekularen Dimensionen geschaffen, die als Teile solcher Nanomaschinen in Frage kämen. James Tour und seine Mitarbeiter an der Rice University in Houston (Texas) konnten zum Beispiel ein »Auto« fabrizieren, das 5000-mal kleiner ist als eine menschliche Zelle. Vier Buckyballs – Kohlenstoffmoleküle, die wie ein Fußball aussehen – dienen dem Vehikel als Räder (Spektrum der Wissenschaft 12/2005, S. 10).

Schaut man jedoch unter die Haube dieses Nanoautos, findet man keinen Motor. Es handelt sich mithin eher um eine Seifenkiste. Das Gefährt wird nur durch zufällige Stöße mit Molekülen in der Umgebung, also durch die brownische Bewegung, hin und her geschubst. Das derzeit größte Problem bei molekularen Maschinen ist denn auch: Wir können sie wohl bauen, aber nicht mit einem Antrieb versehen.

Im Maßstab von lebenden Zellen oder darunter herrschen denkbar ungünstige Bedingungen für eine gezielte Fortbewegung. Luft und Wasser sind für Vehikel in einer solchen Nanowelt zäh wie Sirup, und die brownische Bewegung macht es ihnen fast unmöglich, Kurs zu halten. Unter diesen Bedingungen wären Motoren, wie sie Autos oder Haartrockner antreiben, ziemlich nutzlos – abgesehen davon, dass man sie in so kleinen Abmessungen wohl gar nicht bauen könnte.

Die Natur kennt dagegen viele Beispiele für Nanomotoren. Dazu brauchen Sie nur eine lebende Zelle zu betrachten. Sie nutzt Nanomaschinen, um ihre Gestalt zu ändern, bei der Teilung die Chromosomen auseinanderzuziehen, Proteine zusammenzubauen, Nahrung aufzunehmen, chemische Stoffe zu transportieren und so weiter. All diese Motoren – einschließlich derjenigen für die Muskelkontraktion oder die korkenzieherähnliche Bewegung der Geißeln von Bakterien – beruhen auf demselben Prinzip: Sie wandeln chemische Energie, die norma-



erweise als Adenosintriphosphat (ATP) gespeichert ist, in mechanische Energie um.

Im Jahr 2004 gehörten wir zu einem Forscherteam an der Pennsylvania State University in University Park, das Nanomotoren entwickelte, die in Treibstoffmolekülen gespeicherte Energie auf katalytischem Weg in Bewegung umsetzen. Dabei ließen wir uns von einem erheblich größeren katalytischen Motor inspirieren, über den Rustem Ismagilov und George Whitesides von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) 2002 berichtet hatten. Laut den Untersuchungen der beiden Forscher bewegen sich zentimetergroße »Boote« mit schmalen Platinstreifen am Heck in einem mit Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) versetzten Wasserbecken von sich aus fort. Das Platin katalysiert dabei die Spaltung des Bleichmittels in Sauerstoff und Wasser, und die entstehenden Sauerstoffblasen schieben das Boot – ähnlich wie die Verbrennungsgase beim Antrieb einer Rakete – durch den Rückstoß vorwärts.

Unsere Miniaturversion der Maschine von Harvard war ein Stab aus Au + Pt, etwa so lang wie eine Bakterienzelle (zwei Mikrometer) und halb so breit (350 Nanometer). Wir setzten ihn als U-Boot ein, statt ihn auf der Oberfläche schwimmen zu lassen. Wie die mit ATP angetriebenen molekularen Motoren in der Zelle badeten diese winzigen katalytischen Zylinder sozusagen im eigenen Treibstoff. Und genau wie diese bewegten sie sich selbstständig – mit einer Geschwindigkeit von einem

zehntel Mikrometer pro Sekunde; unter dem Mikroskop sahen sie dabei schwimmenden Bakterien zum Verwechseln ähnlich.

Aber wie so oft in der Wissenschaft stimmte die Hypothese nicht, die zu unserem Experiment geführt hatte. Wir stellten uns vor, dass die Nanostäbe hinten Blasen freisetzen und durch den Rückstoß vorangetrieben würden. In Wirklichkeit passiert aber etwas völlig anderes, weil die Bewegung auf dieser Größenskala keineswegs so abläuft wie in der uns vertrauten Welt.

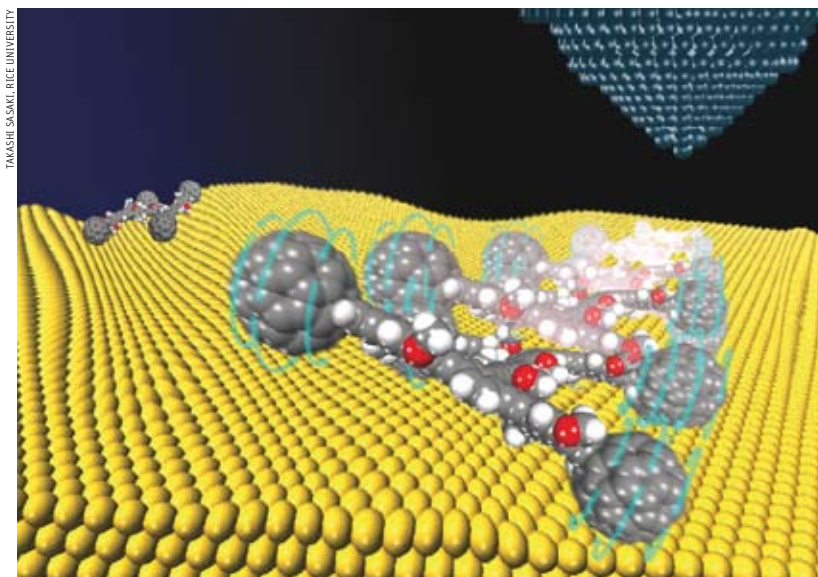
### Waten im Sirup

Rückstoß ist nur im makroskopischen Bereich ein sinnvoller Begriff. Beim Schwimmen oder Rudern stoßen Arme, Beine oder die Paddel das Wasser zurück, was den Körper oder das Boot nach vorn treibt. Auch nach Beendigung der Schwimm- oder Ruderstöße hält die Vorwärtsbewegung an. Wie weit ein Objekt gleitet, wird dabei durch zwei Größen bestimmt: seine Trägheit, also seine Tendenz zur Beibehaltung der momentanen Geschwindigkeit, und den Reibungswiderstand, den es erfährt.

Letzterer ist proportional zur Breite des Körpers, die Trägheit dagegen zu seiner Masse und damit zur dritten Potenz der Breite. Diese Größe nimmt beim Verkleinern eines Objekts deshalb viel schneller ab als der Reibungswiderstand, der folglich am Schluss die Oberhand gewinnt. Im Mikrometerbereich endet jede Gleitbewegung nach einer Mikrosekunde, und die Gleitstrecke ist kürzer als

**Mikroskopische Roboter der Zukunft, hier mit viel künstlerischer Fantasie dargestellt, könnten energiereiche Moleküle in ihrer Umgebung zum Antrieb nutzen, indem sie diese katalytisch zersetzen.**





Dieses »Nanoauto« ist einer von mehreren Typen molekularer Vehikel mit beweglichen Teilen. Es hat ein Chassis aus starr verbundenen Benzolringen. Die Räder bestehen aus Buckyballs – fußballförmigen Kohlenstoffmolekülen. Bisher ohne Motor, bewegt sich das Gefährt beim Aufheizen der Unterlage nur erratisch vor und zurück.



**Literaturhinweise**

**Marden, J. H., Allen, L. R.:** Molecules, Muscles and Machines: Universal Performance Characteristics of Motors. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 99, S. 4161–4166, 2.4. 2002.

**Paxton, W. F. et al.:** Chemische Fortbewegung. In: Angewandte Chemie 118, S. 5546–5556, 18.8. 2006.

**Wang, J.:** Can Man-Made Nanomachines Compete with Nature Biomotors? In: ACS Nano 3, S. 4–9, 27.1. 2009.

Weblinks unter: [www.spektrum.de/artikel/1023395](http://www.spektrum.de/artikel/1023395)

ein hundertstel Nanometer. Für entsprechend winzige Körper bedeutet Schwimmen daher dasselbe wie durch Honig Waten. Bei einem Nanomotor bewirkt ein Stoß keine bleibende Bewegungsänderung; eine Erklärung der Vorwärtsbewegung mit Trägheitseffekten, wie sie der Rückstoß durch Bläschen impliziert, ist darum nicht überzeugend.

Bei unseren Nanostäben überwindet vielmehr eine stetige Kraft kontinuierlich den Wasserwiderstand; Gleiten spielt keine Rolle. Am Platінде wird jedes Wasserstoffperoxid in ein Sauerstoffmolekül, zwei Elektronen und zwei Protonen zerlegt. Am Goldende bilden sich durch Umsetzung von zwei Elektronen und Protonen mit einem Wasserstoffperoxid zwei Wassermoleküle. Auf diese Weise kommt es auf der einen Seite zu einem Überschuss und auf der anderen zu einem Mangel an Protonen. Diese bewegen sich deshalb, dem Konzentrationsgefälle folgend, an der Oberfläche des Stabs entlang vom Platin zum Gold. Als positive Ionen ziehen sie dabei die negativ geladenen Bereiche des Wassermoleküls an. Auf ihrer Wanderung schleppen sie folglich Wasser mit. Dadurch wird der Stab in die entgegengesetzte Richtung bewegt (siehe Kasten rechts).

Nachdem wir dieses Prinzip mit Hilfe unserer Mitarbeiter sowie unserer Kollegen Vincent H. Crespi, Darell Velegol und Jeffrey Catchmark von der Pennsylvania State University erkannt hatten, gelang uns die Konstruktion weiterer katalytischer Nanomotoren. Spätere Experimente der Forschungsgruppe von Adam Heller an der University of Texas in Austin und von Joseph Wang an der Arizona State University in Tempe zeigten, dass sich mit Mischungen mehrerer Treibstoffe – Glukose und Sauerstoff oder Wasserstoffperoxid und Hydrazin – die Schubkraft erhöhen lässt.

Fixiert man unsere Nanostäbe oder analoge Metallstrukturen im Becken, so lösen sie in ihrer unmittelbaren Umgebung Flüssigkeitsströme aus, die andere im Wasser schwimmende Körper mitreißen können. Auch diesen Pumpeffekt haben wir auf einer halbseitig versilberten Goldoberfläche nachgewiesen.

**Das Problem der Steuerung**

Unsere ersten schwimmenden Nanostäbe hatten nur einen Nachteil: Ihre Bewegungsrichtung war zufällig und änderte sich unter dem Einfluss der brownischen Bewegung ständig unvorhersehbar. Für realistische Anwendungen brauchen Nanostäbe einen wirksamen Steuerungsmechanismus. Bei unserem ersten Versuch nutzten wir dazu ein äußeres Magnetfeld (siehe Kasten auf S. 94). Wir bauten Nickelscheibchen in unsere Stäbe ein und magnetisierten sie so, dass sie sich wie winzige Kompassnadeln verhielten, die quer zum Zylinder zeigten. Ein wenige Millimeter entfernt gehaltener Hufeisenmagnet sorgte dann für die Orientierung der Nanostäbe senkrecht zu den Feldlinien. Nicht mehr abgelenkt von der brownischen Bewegung, die zu schwach ist, um gegen die Magnetkraft anzukommen, schwammen die Mini-U-Boote folglich immer geradeaus. Dabei ließen sie sich durch Drehen des Magneten nach Belieben dirigieren. In einem magnetischen Labyrinth im Mikromaßstab folgen solche Motoren den Feldlinien durch alle Windungen.

Vor zwei Jahren konnten Crespi und einer von uns (Sen) zeigen, dass magnetisch gesteuerte Motoren die Fähigkeit haben, etwa zehnmal größere Plastikugeln durch die Flüssigkeit mitzuschleppen. Für solche Frachter im Nanomaßstab sind viele interessante Anwendungen vorstellbar. Sie könnten zum Beispiel Wirkstoffe zu bestimmten Zellen im Körper befördern oder an einem Nanofließband entlang Moleküle transportieren, an die dann der Reihe nach andere Moleküle geknüpft würden.

So nützlich die externe Steuerung für manche Anwendungen ist, kommt es in anderen Fällen jedoch darauf an, dass sich die Nanoroboter autonom bewegen können. Deshalb freuen sich Velegol und Sen ganz besonders über ihre jüngste Entdeckung: Ähnlich wie Bakterien sind auch die katalytischen Stäbchen in der Lage, einer chemischen Spur zu folgen. Typischerweise bewegt sich eine Mikrobe jeweils ein Stück geradeaus und ändert dann ihre Richtung. Wenn jedoch auf einer der geraden Strecken die Konzentration einer Substanz zunimmt – etwa der Geruch eines Nährstoffs immer intensiver wird –, kriecht das Bakterium etwas weiter, bevor es wieder abbiegt. Da Spurts zum Ursprung des che-





mischen Gradienten hin länger dauern als solche in andere Richtungen, erreicht der Einzeler schließlich sein Ziel, obwohl er es nicht direkt ansteuern kann. Biologen sprechen von Chemotaxis.

Ähnliches gilt für unsere Nanomotoren. Bei höherer Treibstoffkonzentration schwimmen sie schneller und kommen somit etwas weiter voran, ehe die brownische Bewegung sie wieder aus der Bahn wirft. Dadurch bewegen sie sich im Mittel auf die Treibstoffquelle zu – zum Beispiel ein Gelteilchen, das mit Wasserstoffperoxid getränkt ist (siehe Bildfolge auf S. 94 unten und Weblink mit Online-Video).

Wie wir kürzlich herausfanden, funktioniert dasselbe auch mit einer Lichtquelle. Bei dieser so genannten Fototaxis nutzen die Nanomotoren die Strahlungsenergie zum Aufbrechen von Molekülen, so dass positive und negative Ionen entstehen. Da diese unterschiedlich schnell wegdiffundieren, erzeugen sie ein elektrisches Feld, das die Teilchen antreibt. Je nach Art der freigesetzten Ionen und der Ladung auf dem Motor ergibt sich eine Bewegung auf die Lichtquelle zu oder von ihr weg. Eine interes-

sante Variante dieser Vorgehensweise ist ein lichtgetriebenes System, in dem einige Teilchen als »Räuber« und andere als »Beute« dienen. Dabei sondert eine Partikelsorte Ionen ab, die anziehend auf die andere wirken. Die korrelierte Bewegung dieser Teilchen hat frappierende Ähnlichkeit mit der Jagd von weißen Blutkörperchen auf Bakterien.

Die Steuerung von Partikeln durch Chemo- und Fototaxis steckt noch in den Kinderschuhen, eröffnet jedoch faszinierende Perspektiven. So könnten nach diesem Prinzip dereinst »intelligente« autonome Nanoroboter auf eigene Faust ihr Ziel ansteuern und dabei Glukose oder andere Treibstoffe, die im Organismus oder in der betreffenden Umgebung reichlich vorhanden sind, als Energiequelle nutzen. Denkbar wäre auch, dass sie auf chemischem Weg kommunizieren und dann kollektiv agieren, indem sie zum Beispiel gemeinsam auschwärmen oder bestimmte Muster bilden.

Obwohl Nanoroboter mit aufeinander abgestimmtem Verhalten immer noch unbelebt sind, gehorcht ihre Bewegung doch ähnlichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten wie die von



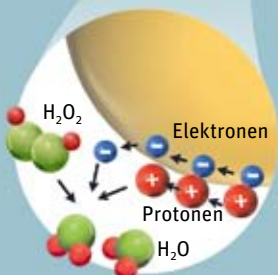
KEIICHI NARBA, PROTONIC NANOMACHINE PROJECT, ERATO, OSAKA UNIVERSITY

**Bakterien wie *Escherichia coli* nutzen Geißeln (Flagellen) zur Fortbewegung. Deren Molekülstruktur ist hier im Computermode dargestellt. Durch spiralartige Rotation der Geißel wird die Mikrobe ähnlich angetrieben, wie sich eine Schraube beim Aufdrehen nach oben bewegt. Wegen der hohen Viskosität von Wasser für ein darin schwimmendes Bakterium kommt dieses sofort zum Stillstand, wenn die Geißelbewegung aufhört.**

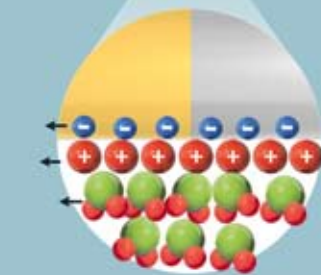
## ANATOMIE EINES KATALYTISCHEN MOTORS

Ein Mikrometer lange Stäbe aus Au + Pt können sich in einer wässrigen Lösung von Wasserstoffperoxid ( $H_2O_2$ ) fortbewegen, indem sie dafür sorgen, dass die Flüssigkeit gerichtet an ihnen entlangströmt. Auslöser dieser Strömung sind zwei unterschiedliche chemische Reaktionen, die an der Gold- und Platinober-

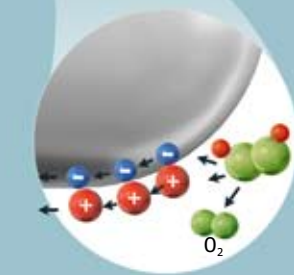
fläche ablaufen. Solche katalytischen Motoren könnten Robotern von Bakteriengröße die Fähigkeit verleihen, Ziele im menschlichen Körper anzusteuern. Desgleichen ließen sich mikroskopische Maschinenteile wie Zahnräder damit antreiben (unten rechts).



**BEDARF AN PROTONEN**  
Die Goldfläche katalysiert eine Reaktion, bei der aus  $H_2O_2$  Elektronen und Protonen Wasser entsteht. Die benötigten Elektronen und Protonen müssen von der Platinseite kommen.



**PROTONEN SCHLEPPEN WASSER MIT**  
Die Elektronen fließen im Stab, während eine gleiche Anzahl von Protonen außen an ihm entlangwandert. Diese ziehen mit ihrer positiven Ladung Wassermoleküle an und schleppen sie so mit.



**PRODUKTION VON PROTONEN**  
Die Platinoberfläche generiert kontinuierlich Protonen, indem sie die Zersetzung von  $H_2O_2$  in Elektronen, Protonen und  $O_2$  katalysiert.



**ROTATIONSMOTOR**  
Dieselben zwei chemischen Reaktionen bewegen Protonen und Wasser um die Zacken dieses 100 Mikrometer großen Zahnrads und bringen es zum Rotieren.

AUS: JEFFREY M. CATCHMARK, SHYAMALA SUBRAMANIAN UND AYUSHMAN SEN, »DIRECTED ROTATIONAL MOTION OF MICROSCALE OBJECTS USING INTERFACIAL TENSION GRADIENTS CONTINUALLY GENERATED VIA CATALYTIC REACTIONS«, IN: SMALL 1(2), S. 202–206, FEB. 2005.



## KOMPASSNAVIGATION

**Ein geeigneter Antrieb allein** genügt für Nanoroboter noch nicht. Man muss auch dafür sorgen, dass sie sich geradeaus bewegen und zu einem Ziel dirigieren lassen. Eingebaute Magnete erlauben zum Beispiel eine derartige Steuerung mit einem angelegten äußeren Magnetfeld.

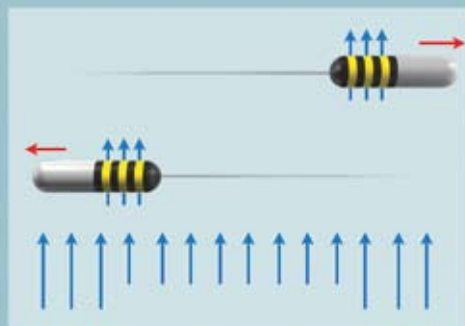
### UNKONTROLLIERTE STÄBE

Bei ausgeschaltetem Magnetfeld ist die Bewegung zufallsbestimmt.



### STEUERBARE STÄBE

Wird das Magnetfeld angelegt, orientieren sich die Stäbe senkrecht dazu und bewegen sich nur noch in eine Richtung. Diese lässt sich durch Drehen des Magnetfelds ändern.



DON FOLEY, NACH: WALTER F. PAXTON, SHAKUNTALA SUNDARARAJAN, THOMAS E. MALLOUK UND AYUSMAN SEN, »CHEMICAL LOCOMOTION«, IN: ANGEWANDTE CHEMIE INTERNATIONAL EDITION, AUG. 2006, BD. 45, NR. 33, S. 5540-5549



**Den Brotkrumen auf der Spur:** Katalytische Nanostäbe machen in Gegenwart von Treibstoff geradlinige Spurts in zufällige Richtungen, die umso länger dauern, je höher die Treibstoffkonzentration ist. Dadurch nähern sich die Stäbe allmählich der Quelle des Treibstoffs – hier ein damit getränktes Gel – und sammeln sich dort. Analog finden Bakterien Nahrung, indem sie einer Geruchsspur folgen.

lebenden Zellen. Deshalb ahmen sie nicht nur biologische Vorbilder nach, sondern liefern umgekehrt auch Einsichten, wie die beweglichen Teile von lebenden Systemen funktionieren.

So ergab sich aus unseren Untersuchungen eine einfache Faustregel: Die typische Fortbewegungsgeschwindigkeit eines Nanomotors ist ungefähr proportional zu seiner linearen Ausdehnung (Länge, Breite oder Höhe). Dieses Skalierungsgesetz folgt aus der Tatsache, dass der Reibungswiderstand proportional zur Ausdehnung ist, die Geschwindigkeit der katalytischen Reaktion jedoch zur Fläche, also zur Ausdehnung im Quadrat.

Ein allgemeineres Skalierungsgesetz hat der Biologe James H. Marden von der Pennsylvania State University entdeckt. Es verknüpft

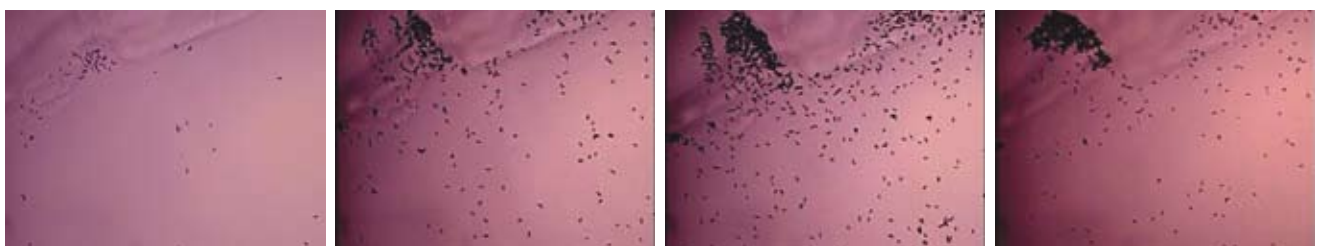
die Masse eines Motors mit der Kraft, die er maximal ausüben kann. Nach diesem Gesetz gewinnt bei katalytischen Nanomotoren unterhalb einer Ausdehnung von etwa 50 bis 100 Nanometern die brownische Bewegung die Oberhand. Sie vereitelt jeden Versuch, in einer Flüssigkeit die Richtung zu halten. Mikrometergroße Bakterien bilden folglich die kleinsten freien Schwimmer in der Natur. Alle biologischen Motoren von molekularer Größe – wie Muskelproteine und Enzyme, die ATP produzieren – sind entweder an eine Schiene gebunden oder in eine Membran eingebettet.

### Die brownische Bewegung nutzen

Statt zu versuchen, gegen die brownische Bewegung anzukommen, kann man sie allerdings auch für sich einspannen. Viele biologische Motoren machen das. Sie basieren auf dem Prinzip der Sperrklinke, die Energie aus einer chemischen Reaktion nicht zum direkten Antrieb nutzt, sondern dazu, Stöße der brownischen Bewegung nur dann zu erlauben, wenn sie in die gewünschte Richtung gehen, während solche in der Gegenrichtung blockiert werden (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 36). Seit einigen Jahren erproben Forscher diese Strategie auch bei Nanorobotern (Kasten rechts).

Ein Verfahren zur Fortbewegung und Lenkung, das ganz ohne chemischen Treibstoff auskommt, haben dagegen Orlin Velev und seine Mitarbeiter an der North Carolina State University in Raleigh ersonnen. Ihre »Fahrzeuge« enthalten eine Diode, die elektrischen Strom nur in einer Richtung durchlässt. Sie konvertiert ein angelegtes elektrisches Wechselfeld in der Nähe des Objekts in ein statisches Feld, das in eine konstante Richtung zeigt. Dadurch erzeugt es eine Kraft, die einen Schub bewirkt.

Weil Diodenmotoren ihre Energie von außen beziehen, gehorchen sie einem anderen Skalierungsgesetz als katalytische Motoren. Folglich sollte ihre Maximalgeschwindigkeit auch nicht von ihrer Größe abhängen. Velev konnte das für die Zentimeter- bis Millimeterkala bestätigen. Theoretisch müssten solche Motoren selbst im Bereich von 10 bis 100 Mikrometern, der Größe einer menschlichen Zelle, noch ausreichend Schub entwickeln.



AUS: YIYING HONG, NICOLE M.K. BLACKMAN, NATHANIEL D. KOPP, AYUSMAN SEN UND DARRELL VELEGOL, »CHEMOTAXIS OF NONBIOLOGICAL COLLOIDAL RODS«, IN: PHYSICAL REVIEW LETTERS, OKT. 2007, BD. 99, NR. 17

## FREIFAHRKARTE MIT VERSTECKTEN KOSTEN

**Moleküle stehen nie ganz still.** In einer Flüssigkeit folgen sie einem endlosen Zickzackkurs, der als brownische Bewegung bekannt ist. Chemiker bauen nun erste Sperrklinken, die dieses Torkeln nutzen, statt dagegen anzukämpfen. David Leigh und sein Team von der University of Edinburgh (Schottland) entwickeln zum Beispiel ein Monorailsystem, das Zufallsschritte in

gerichtete Bewegung umwandelt (unten). Ihre Konstruktion könnte als Perpetuum mobile erscheinen, das den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik verletzt, weil es einfach Umgebungswärme in Bewegung umwandelt. Auch wenn der Antrieb keine Energie verbraucht, wird aber für das Wählen unter den vielen Möglichkeiten der brownischen Bewegung Energie benötigt.

### 1 DAS FAHRZEUG BEWEGT SICH REGELLOS

Ein molekularer Eisenbahnwaggon kann schrittweise an einer Schiene entlangfahren. Ohne eigenen Antrieb ist er der brownischen Bewegung ausgesetzt, die ihn regellos rückwärts- oder vorwärtsschiebt, wann immer ein besonders schnelles Molekül aus der Flüssigkeit dagegenstößt.

### 2 HEMMSCHUHE KOMMEN INS SPIEL

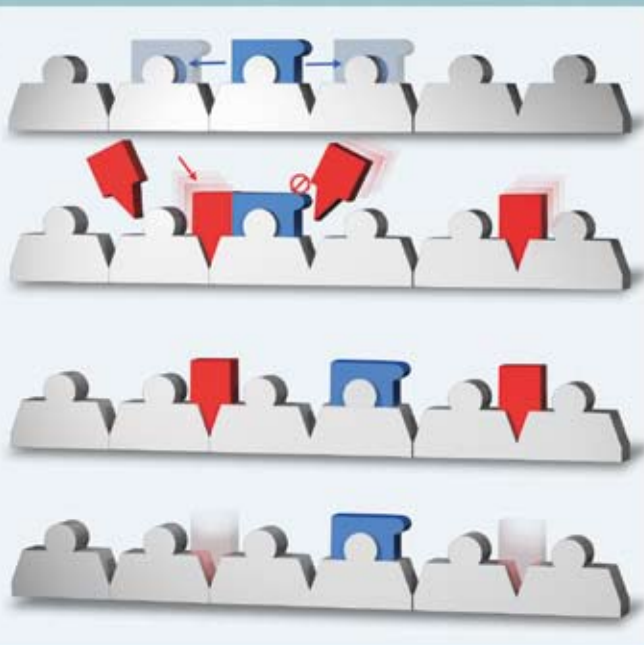
Moleküle aus der Flüssigkeit können sich an bestimmten Stellen an die Schiene heften und als Hemmschuh fungieren. Wegen der asymmetrischen Form des Waggons passt ein solcher Bremsklotz zwar unmittelbar hinter ihn, nicht aber direkt davor.

### 3 AUS REGELLOS WIRD ZIELGERICHTET

Die Blockade hinter dem Waggon verhindert, dass ihn die brownische Bewegung zurückschiebt. Er kann jedoch nach vorn gedrückt werden, wenn ein Flüssigkeitsmolekül zufällig von hinten dagegenstößt.

### 4 DIE SCHIENE WIRD FREIGERÄUMT

In regelmäßigen Abständen werden die Hemmschuhe entfernt, was den Weg für den Waggon wieder frei macht. Dieses Ablösen der blockierenden Moleküle kostet Energie. Obwohl allein die brownische Bewegung das Gefährt antreibt, handelt es sich also nicht um ein Perpetuum mobile, das im Widerspruch zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik stünde.



DON FOLEY

Dank der Fortschritte in der Halbleitertechnologie lassen sich inzwischen Dioden mit Abmessungen weit unter einem Mikrometer herstellen; molekulare Versionen mit nur zwei oder drei Nanometer Länge können Chemiker schon lange synthetisieren. Damit wäre ein mikroskopisches Skalpell denkbar, das Motor-, Lenkungs- und Sensorkomponenten auf einem winzigen Siliziumchip vereinigt. Es ließe sich mit Radiofrequenzfeldern, die vom Körper nicht absorbiert werden, drahtlos aus der Ferne antreiben und ans Ziel steuern. Versehen mit einer extrem feinen Nadel, könnte es dort als winziges chirurgisches Instrument dienen.

Wissenschaftler (und Sciencefiction-Autoren) haben spätestens seit 1959 über Nanomaschinen nachgedacht, als Richard P. Feynman in einer visionären Vorlesung mit dem Titel »Plenty of Room at the Bottom« (»Viel Raum nach unten hin«) die Grenzen der Verkleinerung von Maschinen und Informationsspeichersystemen erörterte. Er machte klar, dass die physikalischen Gesetze bis hinab zu molekularen Dimensionen gültig bleiben. Darum gebe es keinen prinzipiellen Hinderungsgrund – außer den offensichtlichen Schwierig-

keiten der Herstellung – für die Konstruktion entsprechend kleiner Fahrzeuge oder sogar den Bau von Fabriken für die Massenproduktion von Nanomaschinen aus mit atomarer Präzision gefertigten Molekülteilen.

Bis heute beflügelt Feynmans Vision das Gebiet der Nanotechnologie. In den Jahrzehnten seither hat sich das Bild der lebenden Zelle als Suppentopf voller Enzyme, die Stoffwechselreaktionen durchführen, gewandelt zu dem einer Schweizer Uhr aus mechanisch verbundenen Nanomotoren. In vieler Hinsicht ist das die molekulare Fabrik, die dem genialen Physiker vorschwebte.

Wissenschaftler haben eine Menge Know-how darüber erworben, wie man nichtbiologische Nanomotoren nach biologischem Vorbild herstellen kann, doch über die Prinzipien der gezielten Fortbewegung auf dieser Längenskala – sei es durch katalytische Reaktionen oder physikalische Mechanismen – bleibt noch viel zu lernen. Zweifelsohne werden sich Möglichkeiten eröffnen, dieses Wissen in der Biomedizin, bei der Energieumwandlung und der chemischen Synthese zu nutzen – sowie vielleicht auf anderen Gebieten, die wir uns heute noch gar nicht vorstellen können. ◁



**Thomas E. Mallouk** (links) ist Professor für Werkstoffchemie und -physik an der Pennsylvania State University in University Park. Im Mittelpunkt seiner Forschungsarbeiten stehen Synthese und Eigenschaften anorganischer Werkstoffe im Nanobereich. **Ayusman Sen** (rechts) wurde im indischen Kalkutta geboren und ist Professor für Chemie an der Pennsylvania State University. Er beschäftigt sich hauptsächlich mit Katalyse sowie anorganischen und organischen Werkstoffen.



## 1960

### Unbemannt auf U-Boot-Jagd

»Vom Deck einiger Zerstörer der U.S. Navy steigen ferngesteuerte Hubschrauber, so-

genannte »DSN-1 Drones« auf. Sie steuern Unterseeboote an und werfen Torpedos ab, die ihre Ziele unter Wasser automatisch aufspüren und zerstören. Diese Kombination aus DSN-1 und Zerstörer bildet das DASH-(Destroyer Anti-Submarine Helicopter)-Waffensystem der Marine. Die beiden Hubschrauben drehen sich gegenläufig.« *Populäre Mechanik, Band 10, Heft 4, Nr. 55, April 1960, S. 10*

### Pakistan wird dezimal

»Die Reihe der Staaten, die von althergebrachten Systemen des Münz-, Maß- und Gewichtssystems zugunsten des international weitgehend eingeführten Dezimalsystems abgehen, wird nun von Pakistan fortgesetzt. Am 2. März dieses Jahres hat sich die Regierung entschieden, diesen Übergang zu vollziehen und dazu zunächst mit dem Münzwesen zu beginnen. Dabei wird die pakistanische Rupie als Einheit erhalten bleiben und auch in ihrem Werte gegenüber anderen Währungen nicht angetastet werden. Statt in bisher 16 Annas zu je 4 Pices wird sie von dem genannten Zeitpunkt ab aber in 100 Pices (neu) geteilt werden.« *Chemiker-Zeitung, Chemische Apparatur, 84. Jg., Nr. 7, 5. April 1960, S. 235*

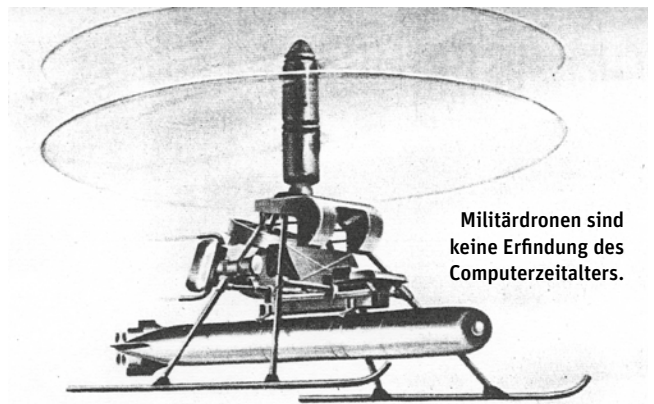
### Des Archäologen Walk of Fame

»Die nebenstehenden Bilder zeigen Aufnahmen, welche ich vor Jahresfrist im Innern von Paraguay gemacht habe. Zu sehen sind neben dem Abdruck mehrerer Tierfährten, von denen eine an die des Chirotherium erinnert, eine andre die eines großen Stelz-

vogels ist, – auch die Abdrücke von drei menschlichen Füßen. Die Länge der menschlichen Fußabdrücke beträgt 21,6 cm; die Zehen des Vogelfußes sind 27,8 cm lang. Alle diese Abdrücke finden sich auf dem in einer Ausdehnung von 3:12 m freiliegenden Teil einer Sandsteinplatte. Das Gestein ist hellrot, grobkörnig, sehr hart und gehört allen Anzeichen nach zum tertiären Buntsandstein, der etwa  $\frac{2}{3}$  der Oberfläche des östlichen Paraguay einnimmt. Die Eingeborenen verehren die menschlichen Fußspuren als solche des heiligen Thomas, haben ein Kreuz an der Stelle errichtet und diese mit einem Zaun aus wagerecht angebrachten Latten umgeben. Von diesem Zaun rühren die Schatten auf der Aufnahme her.« *Die Umschau, 14. Jg., Nr. 18, 30. April 1910, S. 356f*



Versteinerte Fußspuren zeugen vom Leben in früheren Zeiten.



Militärdronen sind keine Erfindung des Computerzeitalters.

### Kosmischer Zollstock

»13 Jahre nach dem ersten gelungenen Experiment, ausgestrahlte Radarimpulse als Echo vom Mond wiederzuempfangen, ist es jetzt mit dem 26-m-Radioteleskop (Millstone Hill, Massachusetts) gelungen, Echos von der Venus zu erhalten. Die Unsicherheit in der Entfernung Erde-Venus, die bisher über 8000 km be-

trug, ist damit auf unter 1000 km herabgedrückt. Wenn die Entfernung eines Planeten von der Erde genau bekannt ist, folgen daraus nach dem 3. Keplerschen Gesetz alle Entfernungen im Sonnensystem, insbesondere die Entfernung Erde-Sonne.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik, 60. Jg., Heft 8, 15. April 1960, S. 248*

### Rechts vor links – auch am Himmel

»Der Kodex für den Verkehr in den Lüften ist vom Ausschuss des Aero-Club de France ausgearbeitet worden. Die Hauptbestimmungen sind: Flugapparate müssen den Lenkballons ausweichen; zwei Luftschiffe müssen bei der Begegnung jedes zur Rechten ausweichen; ein Luftschiff, das ein andres in der gleichen Höhe zur Rechten auftauchen



sieht, muß sich 50 m über dieses erheben; Flüge über Städte sind verboten. Die Luftschiffe müssen an sichtbaren Stellen in hell leuchtender Farbe ihre Nummern tragen.« *Die Umschau, 14. Jg., Nr. 16, 16. April 1910, S. 320*

### Strahlende Heliumschleudern

»Herr Rutherford hatte schon lange auf die große Wahrscheinlichkeit hingewiesen, daß die  $\alpha$ -Teilchen doppelt geladene Heliumatome seien. 200 mg Radium wurden in einer evakuierten Glasröhre 83 Tage lang aufbewahrt. Nach Ablauf dieser Zeit wurden die vorhandenen Gase durch Tierkohle beseitigt. Die hat die Eigenschaft, alle Gase außer

Helium zu absorbieren. Das schließlich restierende Gasquantum entsprach einer Heliumproduktion von 163 mm<sup>3</sup> pro Gramm Radium und Jahr. Damit ist eine neuerliche Stütze für das schon recht sicher fundierte Gebäude der Atomzerfallstheorie gewonnen.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, 25. Jg., Nr. 16, 7. April 1910, S. 203*



ASTRONOMIE

## Bauer, du hast die Gans gestohlen

Auf einer Kreuzfahrt durch Raum und Zeit lernt man viele Phänomene und Objekte des Weltalls kennen – und ihre Entdecker.

Paul Murdin ist eine führende Figur der britischen Astronomie und Raumforschung: Professor in Cambridge, ehemaliger Direktor für Wissenschaft des British National Space Center und Wissenschaftsautor. Das vorliegende Buch ist so etwas wie eine erweiterte Neuauflage seiner »Canopus Encyclopedia of Astronomy« (2004), mit abgeändertem Konzept. Jedes der 65 vierseitigen Kapitel behandelt einen bestimmten Aspekt der Astronomie, seien es Arbeiten, die zu einem Nobelpreis führten, die Entdeckung einer neuen Objektklasse oder die Erschließung eines Spektralbereichs zur Beobachtung des Kosmos.

Ein ausklappbarer »Stammbaum der Entdeckungen« gibt die Gliederung vor, mit samt der Farbkodierung nach Themenbereichen, die das ganze Buch durchzieht. Murdin folgt dem klassischen Schema »Vom Nahen zum Fernen« oder, was auf dasselbe hinausläuft, vom bloßen Auge über Fernrohre, große Teleskope und Raumsonden bis hin zu Instrumenten, die noch im Bau oder gar erst in einem Planungsstadium sind. Teilweise leuchtet die Zuordnung der einzelnen Kapitel zu den Themenbereichen nicht ein; so taucht die Energieerzeugung

der Sonne im Abschnitt »Galaxis« und nicht im »Sonnensystem« auf. Dies stört aber nicht weiter; denn man liest das Buch ohnehin am besten wie eine Website, indem man per Querverweis von Kapitel zu Kapitel hüpfte. Hier macht sich die Herkunft von einer Enzyklopädie bemerkbar.

Wer das Buch von vorn bis hinten liest, wird sich womöglich am stets gleichen Aufbau der Kapitel stören: Das Phänomen wird kurz erklärt; dem schließt sich die Geschichte seiner Erforschung an, die oft im 18. Jahrhundert ihren Anfang nimmt und sich dann bis in die heutige Zeit erstreckt – auf die Dauer ein wenig eintönig.

Die opulente Bebilderung macht beim ersten Aufschlagen einen prächtigen Eindruck. Dies geht allerdings zu Lasten der Textmenge. Ausführliche Beschreibungen der physikalischen Grundlagen kommen vielfach zu kurz, ebenso die kulturellen Auswirkungen. So werden die kopernikanische Revolution und die fortschreitende Abwertung der menschlichen Heimat im Kosmos in den vergangenen vier Jahrhunderten wiederholt angesprochen, jedoch meist nicht eindrücklich genug in den Kontext der jeweiligen Epoche gesetzt.



Dafür wartet Murdin immer wieder mit Anekdoten auf, zum Beispiel über den ostfriesischen Pastor David Fabricius (1564–1617), der den veränderlichen Stern Mira entdeckte. Der wurde von einem Bauern, den er beschuldigt hatte, eine Gans gestohlen zu haben, mit dem Torfspaten erschlagen. Auch die teils ausufernde Aufzählung zahlreicher Wissenschaftler, die in neuerer Zeit an einem bestimmten Thema gearbeitet haben, entspannt die Platzfrage nicht gerade, ein Problem, das durch eingestreute Zitate der Astronomen oder ihrer Zeitgenossen noch verschärft wird.

Überhaupt sind die Seiten recht vollgepackt. Fast jeder Quadratzentimeter Papier ist genutzt, wenn nicht für Inhalte, dann für Layoutelemente wie farbige Kreise oder Muster aus gestrichelten Linien. Diese ziehen sich gelegentlich auch durch den Text und die Bilder, was das Erfassen ihrer Inhalte – oder ihrer Ästhetik – stellenweise enorm stört.

Noch irritierender sind die vielen Fehler, von denen etliche allerdings nicht dem Autor, sondern der deutschen Bearbeitung zuzuschreiben sind. Da tauchen zahlreiche falsche Formulierungen, Aussagen und Begriffe auf, die sich nur durch Schlamperei oder fachliche Defizite erklären lassen. Dies betrifft sowohl den eigentlichen Text wie auch die Bildunterschriften.

Ein Teil der inhaltlichen Kritik trifft jedoch Murdin selbst. Abgesehen davon, dass er bei der Aufzählung der Forscher eine Vorliebe für seine englischsprachigen Kollegen zeigt, unterlaufen ihm Detailfehler, wo es um Galileo Galilei und Wilhelm Herschel geht. In der Astronomie der jüngeren Zeit bleibt er stellenweise die neueren Ergebnisse schuldig, beispielsweise in Bezug auf Gammastrahlungsausbrüche und aktive Galaxienkerne.

Generell behandelt er die Hochenergie-themen recht stiefmütterlich: Weder die wichtigen Forschungserfolge durch die Satelliten XMM-Newton, Integral oder Fermi finden Erwähnung noch die der Tscherenkow-Teleskope wie Magic auf La Palma oder Hess in Namibia. Die Astroteilchenphysik ist unterrepräsentiert – von der Neutrino-astronomie einmal abgesehen –, obwohl dieser Bereich gerade zu voller Blüte kommt, 100 Jahre nach der Entdeckung der kosmischen Strahlung durch den Österreicher Victor Franz Hess. Trotz des Nobelpreises für Physik 1936 war dies Murdin kein zusätzliches Kapitel wert.

Auch ein weiteres Feld wird nur gestreift: die Suche nach fernen Welten (Exopla-



Genau im Zentrum dieses Helixnebels liegt der Stern, der das Nebelmaterial auswarf.



Die zerfetzten Überreste von Cassiopeia A, einer Supernova des Typs II, die jüngsten Berechnungen zufolge 1667 explodierte

neten) und die Möglichkeit von Leben darauf. Indem das Buch den im März 2009 gestarteten NASA-Satelliten Kepler verschweigt, geht das Buch in dieser Hinsicht an den Interessen etlicher Leser vorbei.

So empfiehlt sich das Werk hauptsächlich jenen Käufern, die einen ersten, einiger-

maßen breit angelegten Überblick über astronomische Objekte und Phänomene und die thematischen Querverbindungen zwischen ihnen erhalten möchten.

*Oliver Dreissigacker*

Der Rezensent arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Mannheim.

Paul Murdin

**Geheimnisse des Universums**

65 große astronomische Entdeckungen

Aus dem Englischen von Werner Kügler.

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2009. 341 Seiten, € 39,95

**BAUGESCHICHTE**

## Kirche, Burg und Bauernhaus

Ein Handbuch über die Architektur des Mittelalters lädt zum Schmökern ein.



So fern und doch so nah – vielleicht lässt sich die Faszination, die das europäische Mittelalter heute ausübt, auf diese einfache Formel zurückführen. Einerseits liegt uns jenes Jahrtausend zwischen Antike und Neuzeit so fern, dass wir eine kulturelle Distanz verspüren, andererseits ist es in Form von Burgruinen und Kirchen, Resten alter Stadtmauern und Patrizierhäusern in der Gegenwart präsent.

Matthias Untermann, Professor für Europäische Kunstgeschichte an der Universität Heidelberg, wollte mit dem vorliegenden Werk vornehmlich Experten wie Studenten ein Nachschlagewerk an die Hand geben. Doch eignet es sich auch für den Laien als Reiseführer durch eine vergangene Zeit, der zum Schmökern anregt.

Schon die 20-seitige Einleitung bietet eine Fülle von Informationen. Am Beispiel des Aachener Doms erläutert der Autor ein Kernproblem seines Fachgebiets. Was den

Betrachter »typisch mittelalterlich« anmutet, erweist sich bei genauem Hinsehen als im 19. Jahrhundert überformtes Kunstwerk, das gleichwohl Elemente mittelalterlicher Baukunst bewahrt hat.

Untermann gibt auch gleich einen ersten Abriss der Formgeschichte, die mehr kennt als nur die beiden großen Kategorien Romanik und Gotik. Die Meisterschaft des Bauforschers erweise sich nicht zuletzt in der Kunst, ältere Bauzustände am heute noch Sichtbaren abzulesen, Wiederverwendetes in seinen ursprünglichen Zusammenhang zu stellen, verfüllte Fundamente mit den Mitteln der Archäologie nachzuweisen und auszuwerten. Und natürlich wisse ein Bauforscher wie jeder Historiker zeitgenössische Darstellungen und Chroniken zu nutzen.

»Über die notwendige Behausung von Menschen und Haustieren, den Schutz von Vorräten hinaus erfüllten Bauwerke grund-

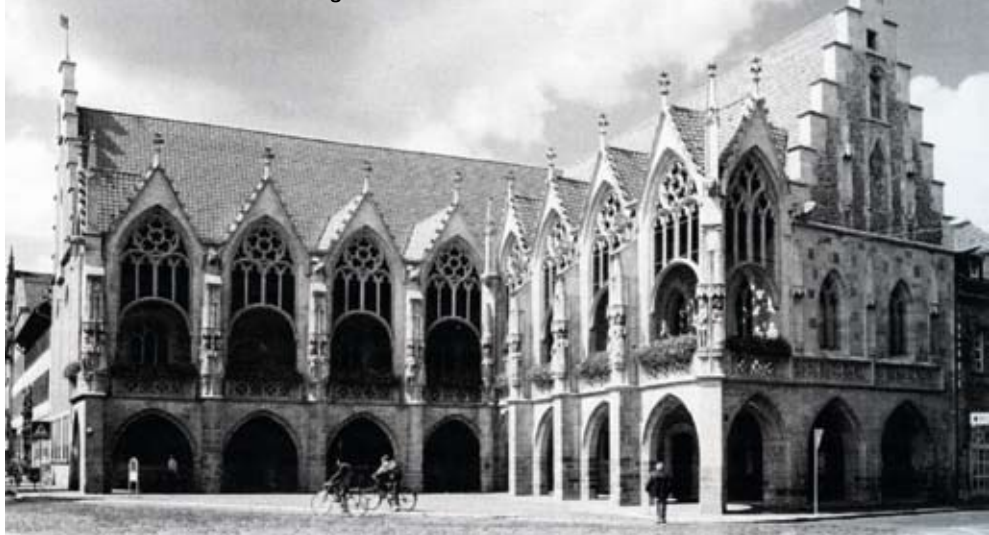
legende Funktionen in der Ordnung der Gesellschaft, ... vor allem in der Organisation und Repräsentation von Herrschaft und Religion. ... Kirche und Wohnhaus, Kloster und Burg bildeten in der Tat leicht verständliche Gegensätze.« Damit ist das Thema für die erste Hälfte des Buchs angesagt: die Funktion sakraler und profaner Architektur. Die Besprechung der Form folgt im zweiten Teil.

Bei der prägenden Bedeutung des Christentums für das Mittelalter stehen am Anfang geradezu zwangsläufig die Sakralbauten und vor allem ihr prominentester Typus: die Kirche. Erstaunlicherweise war deren Architektur keineswegs von den Aspekten der Liturgie, sondern von künstlerisch-ästhetischen Traditionen geprägt. »Im Gegensatz zu den Sakralbauten anderer Religionen war die Gestalt der Kirchen von frühchristlicher Zeit an bemerkenswert vielfältig.« Welche Frage auch immer dem Leser in der steinernen Kulisse eines mittelalterlichen Gotteshauses schon in den Sinn gekommen sein mag, in diesem Buch verbirgt sich vermutlich die Antwort. Sofern er die richtige Frage stellt und vor Begriffen wie »Sanktuarium« oder »Lettner« nicht zurückschreckt.

Nach »Kloster und Stift« und den »Bauten der jüdischen Gemeinden« widmet sich der Autor Konstruktionen mit profaner Funktion. »Bauten weltlicher Herrschaft« fallen durchaus unterschiedlich aus, je nachdem, ob ihr Auftraggeber als König, Fürst oder Bischof ein größeres Gebiet regierte und demgemäß zwischen diversen Pfalzen, Schlössern und Residenzburgen pendelte oder ob er dem niederen Adel angehörte, dessen Burgen bescheidener ausfielen – aber so zahlreich sind, dass sie heute unser Bild von der trutzigen Burg prägen. Das Kapitel schließt mit den vielfältigen Bauten in Stadt und Dorf, seien es die Ummauerungen mit ihren Stadttoren, die Residenzen der Vögte, die Rathäuser der bürgerlichen Stadtregierung, die Zehntscheuern und Zunfthäuser oder die einfachen Mühlen.

In einem zweiten Ansatz der Kategorisierung unterscheidet Untermann die mittelalterliche Architektur nach »Baupformen und Bautechnik«. Hier erklärt er Holz- und Steinbau sowie die »Haut des Bauwerks«, angefangen von der Gewinnung des Baumaterials, seinem Transport und Vertrieb, über Phasen der Vorbereitung und Verarbeitung bis hin zu den bautechnischen Anforderungen. So wurde Mauerwerk stets zweischalig hochgezogen: Zwischen einer äußeren und einer inneren Wand befand sich ein Kern aus preiswertem Steinmaterial, durch-

**Zweigeschossige Lauben (hier am Altstadtrathaus in Braunschweig) dienten der öffentlichen Bekanntgabe von Beschlüssen.**



setzt mit Kalkmörtel. Von der Luft abgeschlossen benötigte dieser lange, um abzubinden. Das Mauerwerk größerer Gebäude musste deshalb durch zusätzliche Holzanker, Eisenstifte und -klammern stabilisiert werden. Auch die häufig anzutreffenden Bögen über Maueröffnungen, ob Fenster oder Portal, hatten solche Funktion: Sie leiteten die Kräfte der aufliegenden Steine zu den Seiten hin ab. Zu einer eigenen Kunstform wurde dies in der Gotik durch das fili-

gran wirkende Strebewerk der Kathedralen, die wohl schönste Ausprägung mittelalterlicher Architektur.

*Klaus-Dieter Linsmeier*

Der Autor ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft« und »epoc«.

Matthias Untermann

**Handbuch der mittelalterlichen Architektur**

Theiss, Stuttgart 2009. 400 Seiten, € 49,90



MATHEMATIK/PHILOSOPHIE

## Roulett und Religion

Pierre Basieux packt konkrete Anleitungen zum Gewinnen beim Glücksspiel und seine persönliche Philosophie zwischen zwei Buchdeckel – nicht unproblematisch, aber anregend.

Das Buch fängt ganz wissenschaftlich und solide an mit einer Einführung in die Spieltheorie. Pierre Basieux, studierter Mathematiker und Philosoph, seit 1990 selbstständiger Unternehmensberater, geht dann über zu den Anwendungen der Spieltheorie in der Realität und zum Schluss weit über das Thema hinaus zu philosophischen Gedanken. Ein angemessener Untertitel wäre »Mein Weltbild auf Grundlage erkenntnisphilosophischer Aspekte der Naturwissenschaften, mit besonderer Berücksichtigung einer Religionskritik«.

Aber der Reihe nach. Im ersten und größten Teil des Buchs geht es um »Spiele in vitro«, also in der von allem Firlefanz befrei-

ten Reinform, in der sie der Mathematiker zu analysieren pflegt. Ein Spiel besteht aus einer Menge zulässiger Zustände (dem »Spielraum«) und Vorschriften zum Übergang zwischen diesen Zuständen (den »Spielregeln«). Die Spieler (»Akteure«) beleben den Spielraum durch Handlungen und Strategien mit dem Ziel, eine bestimmte Auszahlung – in Geld, Prestige oder anderen Werten – zu maximieren.

Auf dieser Grundlage geht es nun um Spiele wie Schere–Stein–Papier (Knobeln), Schach, Roulett, Black Jack und Poker. Quasi spielerisch vermittelt uns Basieux zusammen mit den Spielregeln Fachausdrücke wie »Bimatrix«, »Nullsummenspiel«,

»Gleichgewicht« und »Spiel mit vollständiger Information«. Wir erfahren, dass das klassische Roulett unbesiegbar ist und dass es beim Schach eine Gewinnstrategie gibt. Das Spiel bleibt nur deshalb spannend, weil niemand sie kennt. Außerdem wird uns Mathematik als ein, wenngleich wenig beliebtes, Spiel vorgestellt. Es besteht darin, Aussagen über mathematische Objekte mit den Regeln der Logik aus einem System angenommener gültiger Grundannahmen (Axiome) abzuleiten.

Für endliche Zweipersonen-Nullsummenspiele, also Spiele mit zwei Akteuren, bei denen die Summe der Gewinne des einen gleich der Summe der Verluste des anderen ist, gibt es stets eine optimale gemischte Strategie: Jeder Spieler kann seine Mindestauszahlung maximieren oder, was auf dasselbe hinausläuft, den Maximalgewinn des Kontrahenten minimieren. Gemischte Strategien enthalten im Gegensatz zu den reinen Strategien Zufallszüge.

Die Allgemeinheit des mathematischen Spielbegriffs erlaubt eine Vielzahl von An-



wendungen in Wirtschaft, Politik, Biologie, Physik und Psychologie. Ein prominentes Beispiel ist das Gefangenendilemma, das auch in abgeänderter Form in vielen Lebenssituationen auftritt (Spektrum der Wissenschaft 2/1998, S. 8). Vertrauen ist gut für beide Beteiligten, aber noch besser ist es für jeden, den anderen übers Ohr zu hauen. Was ist die beste Strategie beim einmaligen und beim mehrmaligen Spiel, wenn es nur um vorteilhafte Auszahlung geht? Wir lernen: Gier lohnt nicht, und Erfolg hängt nicht von kurzfristigen Vorteilen ab.

Optimierungsaufgaben aus der Wirtschaft können als Einpersonenspiele aufgefasst werden. Hier geht es für den einzigen Spieler darum, das Maximum aus der »Natur« herauszuholen; die aber hat ihrerseits keine Strategie. Wenn das Spiel darin besteht, den Partner fürs Leben zu finden, ein einmal verschmähter Kandidat nie wieder zu haben ist und einige weitere Zusatzbedingungen erfüllt sind, liefert die Mathematik ein sehr seltsames Ergebnis (Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 102, und 6/2005, S. 78): Weise zunächst ungefähr 37 Prozent aller Kandidaten ab und nimm den nächsten, der besser ist als alle Vorgänger. Zu diesem Ergebnis kann man sicherlich geteilter Meinung sein.

Basieux zitiert auch die unrealistischen spieltheoretischen Fantasien der US-Armee im Irakkrieg 2003. Man wollte eine »Revolution in Militärangelegenheiten« vollziehen, indem man den Krieg führt wie eine Supermarktkette. Der Autor macht klar: »Überhaupt liefert die Spieltheorie nur selten Lösungen. Dafür vermittelt sie anhand von überschaubaren Modellen häufig Einsichten in wesentliche Eigenschaften von Interessenkonflikten.«

Im zweiten Teil geht es nicht mehr um ideale Spielsituationen und das Spiel als Modell, sondern um »Spiele in Wirklichkeit«. Sind die Chancen beim Roulette oder Lotto im wirklichen Leben tatsächlich so schlecht wie in der Theorie? Nicht ganz. Zwar kann man beim Lotto die Wahrscheinlichkeit für einen Sechser nicht erhöhen, aber immerhin die Gewinnerwartung, indem man auf wenig beliebte Kombinationen tippt (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 114). Beim Roulette hingegen kann

man mit Hilfe der Statistik mechanische Unzulänglichkeiten des Geräts oder Regelmäßigkeiten im Verhalten des Croupiers aufspüren und nutzen.

Auch die Börse ist eine Art Kasino. Die wichtigsten Erkenntnisse: Der Aktienkurs eines Unternehmens reflektiert nicht (nur) dessen Geschäftsaussichten; und über Kursentwicklungen kann unter bloßer Verwendung vergangener Kursentwicklungen nichts ausgesagt werden. Die Annahme vom rationalen Verhalten der Börsenteilnehmer sei eine Fiktion.

Ausgehend vom so genannten Ultimatumspiel (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 52) kommt Basieux zu einem wichtigen Punkt: Der Mensch ist kein nur rational handelndes Wesen im Sinn eines Homo oeconomicus, daher sei die ideale normative Spieltheorie durch eine realistische deskriptive zu ersetzen, die sich am tatsächlichen Verhalten des Menschen orientiert. Mathematische Modelle, die zum Beispiel den Fairnessgedanken enthalten, würden besser funktionieren als die klassische Spieltheorie.

Im letzten Kapitel dieses Teils »Spiele um Regelfindung« behandelt Basieux die Denkprinzipien der Naturwissenschaften, wirtschaftspolitische Regeln und die Lebensregeln der Religionen – letztere sehr eigenwillig. Zwischen Frömmigkeit und doktrinärem Fundamentalismus bestehe ein fließender Übergang, und aus der Bibel – einer zusammenhanglosen Schrift, in der ein grausamer Rächergott beschrieben wird – komme sicherlich keine Ethik und Moral. Eine sachliche Auseinandersetzung sieht anders aus.

Im dritten und letzten Teil geht es schließlich um die von Kurt Gödel bewiesene Unvollständigkeit der Mathematik, die Ablösung des mechanistischen Weltbilds durch die Quantenmechanik und das Streben nach Erkenntnis im Allgemeinen.

Diese Vielfalt macht das Buch überraschend, kurzweilig und spannend, aber auch unübersichtlich und stellenweise angreifbar. Wenn man den Glauben der Vernunft wie gefordert gänzlich unterstellt, hebt man dann ihn nicht auf? Das haben bereits mittelalterliche Philosophen wie Anselm von Canterbury oder Thomas von Aquin erkannt, die – jeder auf seine Art – eine Ordnung entwickelten, in der Vernunft und Glaube im Einklang stehen sollen. Würde man also, so wie es Basieux gerne tut, unter Verwendung philosophischer Autoritäten argumentieren, käme man hier sehr schnell auch zu einem ganz anderen Ergebnis.

An anderer Stelle äußert Basieux einerseits humanistische Gedanken, behauptet aber andererseits, dass das Handeln der Menschen maßgeblich durch Egoismus und Furcht bestimmt sei; und ab und an scheint sich bei ihm Fairness aus eigennützigen Motiven zu erklären.

Wer über diese Schwachstellen hinwegsieht, hat immer noch eine interessante, spannende und vor allem abwechslungsreiche Hinführung zur Spieltheorie, ihren Anwendungen und ihren Ergebnissen.

Roland Pilow

Der Rezensent studiert Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin. Dort beschäftigt er sich vornehmlich mit den Grundlagen der topologischen Räume.

Pierre Basieux

### Die Welt als Spiel

Spieltheorie in Gesellschaft, Wirtschaft und Natur

Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2008. 255 Seiten, € 8,95

Anzeige

**Interaktive Lern-CD**

Interaktives Lernspiel zu Astronomie und Raumfahrt ab 10 Jahren

**Abenteuer im Weltall**

INFO-Programm gemäß § 14 JuSchG

Herzangegeben von **Spektrum** für Wissenschaft

In Kooperation mit **Klaus Tschira Stiftung Gemeinnützige GmbH** **KTS**

**JUGENDSOFTWAREPREIS 2008**

Ab 10 Jahren; € 9,90 (zzgl. Versand)  
Schullizenz: € 98,-  
Systemvoraussetzungen: PC mit CD-Laufwerk, Microsoft Windows XP oder Vista

in Kooperation mit **Klaus Tschira Stiftung Gemeinnützige GmbH** **KTS**

[www.spektrum.com/sparky](http://www.spektrum.com/sparky)

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869



LICHTBLICK AG / TOM MAELSA

»Nur wer in großen Dimensionen denkt und plant, ist erfolgreich«

Der Maschinenbauer Heiko von Tschischwitz gründete 1998 die Firma »LichtBlick«, die mittlerweile Marktführer im Bereich Ökostrom ist. 2006 wurde er von der Zeitschrift »Capital« und von der Umweltstiftung WWF zum Ökomanager des Jahres gewählt. Ein Gespräch über einen rasanten Aufstieg, eine clevere Energietechnik – und unternehmerischen Mut

**Spektrum der Wissenschaft:** 1998 traten Sie mit einer neuen Firma gegen Konzerne wie Vattenfall und RWE an. Ein David gegen mehrere Goliaths. Woher nahmen Sie den Mut?

**Heiko von Tschischwitz:** Wir waren davon überzeugt, dass unsere Konkurrenten mit der Einstellung, Ökologie und Ökonomie seien unvereinbar, ziemlich falsch lagen und dass sich umweltfreundliche Energie sehr wohl massentauglich vermarkten lässt.

**Spektrum:** Warum wollten Sie überhaupt eine Stromfirma gründen?

**von Tschischwitz:** Ich arbeitete schon während meiner Diplomarbeit bei der Firma Vasa Energy, damals beschäftigte ich mich mit Kraft-Wärme-Kopplung. Als der Strommarkt 1998 durch die Liberalisierung für neue Anbieter offenstand, wussten wir sofort: Da tut sich eine Riesenchance auf. Und so rief ich mit Vasa-Energy-Gründer Michael Saalfeld »LichtBlick« ins Leben.

**Spektrum:** Wie haben die etablierten Anbieter auf Ihren Markteintritt reagiert?

**von Tschischwitz:** (*lacht*) Die nahmen uns gar nicht ernst. Bei einer Podiumsdiskussion traf ich einen Vorstand von Vattenfall. Er beugte sich zu mir und meinte: »LichtBlick? Das ist ja putzig!«

Als wir aber 2005 eine Grundsatzentscheidung des Bundesgerichtshofs für transparentere Strompreise durchfochten, schlug uns ein scharfer Wind entgegen. Die Großkonzerne verlangten von Neueinsteigern hohe Gebühren für die Nutzung der Stromnetze.

**Spektrum:** Und heute?

**von Tschischwitz:** Wir befinden uns mit den Großen auf Augenhöhe, es ist ein professionelles und sportliches Gegenüber. Zudem gibt es seit 2005 die Bundesnetzagentur, die darüber wacht, dass ehrlicher Wettbewerb herrscht.

**Spektrum:** Sie verzeichnen eine wachsende Kundenzahl, darunter auch den Deutschen Bundestag und das Bundesumweltministerium. Was macht Sie erfolgreicher als andere Ökostromanbieter?

**von Tschischwitz:** Wir waren von vornherein mit großen Zielen unterwegs: Wir wollten in die Topliste der Branche, was eine professionelle Vermarktung verlangt. Um Kunden zu gewinnen, offerierten wir unseren Strom über die Filialen der Deutschen Post und Tchibo. Nur wer in großen Dimensionen denkt und plant, ist erfolgreich.

**Spektrum:** Wer garantiert Ihren Kunden, dass sie wirklich Strom aus regenerativen Quellen beziehen?

**von Tschischwitz:** Namhafte Organisationen wie der WWF oder das Öko-Institut e. V. Die prüfen Lieferverträge und Kraftwerke und vergeben Zertifikate wie das Gütesiegel ok-power.

**Spektrum:** Ab diesem Jahr will LichtBlick 100 000 Minikraftwerke in Privathaushalten aufstellen. Worin besteht der Vorteil gegenüber der zentralen Energieproduktion?

**von Tschischwitz:** Ein herkömmliches Großkraftwerk erreicht eine Energieausbeute von durchschnittlich unter 50 Prozent. Das genügt einfach nicht, um das Problem der globalen Erwärmung in den Griff zu bekommen. Die Zukunft gehört deshalb den regenerativen Energien. Aber Wind und Sonne stehen nicht immer in ausreichendem Maß zur Verfügung, wie Kritiker gern anführen. Die Großkraftwerke können nicht mal eben ihre Erzeugung hochfahren, um das zu kompensieren. Das aber lässt sich durch eine dezentrale, flexibel gesteuerte Energieversorgung lösen.

**Spektrum:** Sie sprechen von Mini- und Mikroblokheizkraftwerken, die Strom und Wärme vor Ort erzeugen?

**von Tschischwitz:** Ja. Wir nennen unser Konzept ZuhauseKraftwerk. Es ersetzt den herkömmlichen Gas- oder Ölbren-



LICHTBLICK AG / MANFRED WITZ

**Die Firma »LichtBlick«** bietet Strom aus Erdgas, Wind, Wasserkraft und Biomasse. Das Erdgas stammt aus Norwegen, Russland und zu kleinen Teilen aus Deutschland. 1998 gegründet, hat LichtBlick mittlerweile 570 000 Kunden und 300 Mitarbeiter. Firmengründer von Tschischwitz ist heute als Aufsichtsratsvorsitzender für die strategische Ausrichtung des Unternehmens und die Kontrolle des Vorstands zuständig.

100 000 so genannte Zuhause-Kraftwerke sollen bald mit erdgasbetriebenen Motoren 2000 Megawatt ins Netz einspeisen – weit mehr als eines der deutschen Atomkraftwerke.

ner, sorgt also für Wärme. Wann immer daran ein Überschuss entsteht, wird er gespeichert und so auf Vorrat gehalten. Den gleichfalls erzeugten Strom speisen wir ins Netz ein. Der Kunde, der mit uns, aber auch einem anderen Versorger einen Vertrag über die Stromversorgung abschließen kann, erhält für jede erzeugte Kilowattstunde einen Bonus. Die Energieausbeute wird über 90 Prozent betragen.

**Spektrum:** Welchen Vorteil soll das für den Kunden bringen?

**von Tschischwitz:** Die Anschaffung einer Gasheizung würde ihn weit mehr kosten. Außerdem erhält der Kunde am Jahresende noch einen Strombonus.

**Spektrum:** Und was bringt ein solches Konzept für die Umwelt?

**von Tschischwitz:** Wir wollen die ZuhauseKraftwerke vernetzen und von unserer LichtBlick-Zentrale so steuern, dass ein virtuelles, flexibel auf Bedarfsschwankungen reagierendes Großkraftwerk entsteht. Wann immer der Kunde Wärme benötigt, die ihm der Speicher nicht mehr liefern kann, springt die Maschine an. Wann immer Strom nachgefragt wird, speist die zentrale Steuerung den erzeugten Strom ins Netz ein. Dabei wird ein Optimum angestrebt zwischen der Wärmebedarfsdeckung beim Kun-

den und dem erzielbaren Strompreis. So lässt sich ein Geschäft machen, vom dem unsere Kunden und die Umwelt profitieren, denn mit diesem Konzept können wir den Gegnern der erneuerbaren Energien begegnen, die Wind und Sonne vorwerfen, unzuverlässig zu sein. Wir springen ein, wenn sich die Flügel nicht drehen wollen und der Himmel bedeckt ist.

**Spektrum:** Wie sieht dabei die technische Seite aus?

**von Tschischwitz:** Das Konzept der dezentralen Kraftwerke ist nicht neu, daran arbeiten auch andere Gruppen. Das Problem war bislang aber, dass kleine Anlagen für Haushalte viel zu teuer sind. Wir dachten an einen Automotor, denn die laufen zu Millionen vom Band und sind dementsprechend billig. In Wolfsburg fanden wir mit VW den passenden Kooperationspartner. Zurzeit werden die Motoren noch mit Erdgas betrieben, das zwar immer noch um die Hälfte weniger CO<sub>2</sub> erzeugt als Kohle, aber wir arbeiten daran, Biogas zuzumischen.

**Spektrum:** Was kostet so ein Zuhause-Kraftwerk?

**von Tschischwitz:** Für 5000 Euro bauen wir die alte Heizung ab und die neue ein. Hinzu kommen 20 Euro Grundgebühr – für die wir aber auch einen Rundum-

service bieten – plus der individuelle Wärmeverbrauch. Gegen Jahresende erhält der Kunde einen Bonus für seine erzeugten Kilowattstunden zurück.

**Spektrum:** Ab wann ist die Technologie erhältlich?

**von Tschischwitz:** Im Frühjahr 2010 werden die ersten 300 ZuhauseKraftwerke in städtischen Einrichtungen, Kindergärten und bei Wohnungsbaugesellschaften in Hamburg in Betrieb genommen. Die Serienproduktion beginnt Ende 2010.

**Spektrum:** Haben Sie schon Voranmeldungen?

**von Tschischwitz:** Wir waren überrascht: Bei Privatkunden sind es 25 000. Es gibt auch schon zahlreiche Anfragen von Liegenschaften, große Firmen, sogar Dax-Konzerne.

**Spektrum:** Was sind Ihre nächsten Unternehmensziele?

**von Tschischwitz:** Zwei Millionen Kunden und statt wie derzeit Platz 10 unter Stromlieferanten der Platz 5. Die Zukunft gehört den regenerativen Energien. Außerdem arbeiten wir an neuen Ideen. Nur so viel: Es betrifft den Sektor Elektroautos. ◀

Das Interview führte die Berliner Wissenschaftsjournalistin **Dagmar Pohland**.

## Research Opportunities in Luxembourg. See what's behind.

### **PEARL**

LUXEMBOURG'S RESEARCH PROGRAMME FOR INTERNATIONALLY RECOGNISED SENIOR RESEARCHERS

If you are an **internationally recognised senior researcher**, our **research programme PEARL** gives you the opportunity to transfer your research programme to a public-sector research institution in Luxembourg and thus to accelerate the development of and to strengthen Luxembourg's research priorities. 3-5M€ are offered to Luxembourg's public-sector research institutions through this programme to compete for the best candidates. The FNR foresees to grant 1 to 2 PEARL awards per year. The call is open all year.

### **ATTRACT**

LUXEMBOURG'S RESEARCH PROGRAMME FOR OUTSTANDING YOUNG RESEARCHERS FROM ALL OVER THE WORLD

If you are an **outstanding young researcher**, our **research programme ATTRACT** helps you to set up an independent research team within a public-sector research institution in Luxembourg. The innovation, dynamism and creativity of your project as well as its high scientific quality should enhance Luxembourg's position in the international world of R&D. Projects selected under ATTRACT have a lifespan of five years and the financial contribution will be up to 1.5M€. The 5<sup>th</sup> ATTRACT Call will be launched in November 2010.

More information about ATTRACT and PEARL as well as the other funding opportunities offered by the National Research Fund Luxembourg can be found on the FNR's website. Go and see what's behind on [www.fnr.lu](http://www.fnr.lu)

 Fonds National de la  
Recherche Luxembourg

INVESTIGATING FUTURE CHALLENGES

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**naturejobs**

*Spektrum der Wissenschaft* and *Naturejobs* have joined forces. Now, with *Naturejobs*, you can place your jobs, courses, announcements and events in *Spektrum* as well as *Nature*, extending your reach among scientists, academics and students in Germany, Austria and Switzerland.

For more information, please contact *Naturejobs*:

**Hildi Rowland**

**T:** +44 (0)20 7014 4084

**E:** [h.rowland@nature.com](mailto:h.rowland@nature.com)

**Kerstin Vincze**

**T:** +44 (0)20 7843 4970

**E:** [k.vincze@nature.com](mailto:k.vincze@nature.com)

[www.naturejobs.com](http://www.naturejobs.com)

nature publishing group 



## Genomics Group Leader

### Who we are

At Roche, 80,000 people across 150 countries are pushing back the frontiers of healthcare. Working together, we've become one of the world's leading research-focused healthcare groups. Our success is built on innovation, curiosity and diversity, and on seeing each other's differences as an advantage. To innovate healthcare, Roche has ambitious plans to keep learning and growing – and is seeking people who have the same goals for themselves.

The headquarters in Basel is one of Roche's largest sites. It is home to the Corporate Executive Committee, the Pharmaceuticals and Diagnostics Divisions and the global business functions. Roche Basel also covers the entire business chain from research, development and production through to marketing. Over 8,000 people from more than 60 countries work at the site.

### The position:

As the Genomics group leader in Translational Research Sciences, you will effectively manage multiple disease area-focused genomics laboratories in Basel to collaborate with their respective Disease Translational Areas to molecularly characterize novel targets, pathways in disease biology, drug effects and biomarker signatures linked to prognosis and therapeutic response. In this role you'll collaborate within and across departments to generate impactful genomics data that facilitates drug development and personalized healthcare strategies. As the Genomics group leader you are a core member of Global Genomics Core Competency Center Leadership, chair of Basel Genomics Management team and a member of Basel TRS Site Leadership Team.

### Main tasks:

- Provision of scientific and business leadership for the Basel Genomics group, optimizing value creation for Roche and Translational Research Sciences (TRS). Representation of the TRS Global Genomics Core Competency Center internally & externally together with the Global Head of Genomics
- Contribution to the overall conceptual, strategic and logistical aspects of genomics platform support for DTAs in conjunction with the Global Head of Genomics
- Evaluation and implementation of new technologies, models and approaches in the context of the Functional Excellence Project portfolio, including liaising with external and internal technology suppliers as needed
- Coordination and overall management of disease area projects within the Basel Genomics group; provision of accurate forecasting of full-time employee (FTE) and project variable cost (PVC) requirements for all projects undertaken internally by Basel Genomics, provision of accurate actuals for financial portfolio and updates for each financial round, and active management of the portfolio of the Basel Genomics group on an ongoing basis
- Serve as TRS project manager for selected projects conducted within TRS
- Planning for capital equipment needs of the Basel Genomics group on a yearly basis, and execution of those needs
- Maintenance of the functional budget for the Basel Genomics group on a yearly basis, and accountability for the functional budget with Finance
- Lead and coach a small group of Lab Heads supporting various disease areas.

### Who you are

You're someone who wants to influence your own development. You're looking for a company where you have the opportunity to pursue your interests across functions and geographies, and where a job title is not considered the final definition of who you are, but the starting point.

A University degree in molecular biology, cell biology or equivalent discipline to PhD level with additional post-doctoral experience is required; sound knowledge and experience in applying both established (microarray, RT-PCR) and emerging next generation genomics technologies (transcriptome sequencing, RNAseq) is critical; prior leadership/management experience in industry setting is important; excellent communication skills and fluency in English, both written and spoken. Good writing, presentation & organizational skills and ability to proactively initiate and successfully execute both cross-departmental and academic collaborations a must.

Job ID No.: 18896

Contact HR: G. Foshag, Phone: +41 61 688 09 10

The next step is yours. To apply online today or learn about other exciting positions, please visit <http://careers.roche.com>

*“Make your mark.  
Improve lives.”*

*Tim I.*

Roche, Switzerland





## Leben im Multiversum

Auch in Parallelwelten könnte es Leben geben – trotz unterschiedlicher physikalischer Gesetze

SLIM FILMS

### WEITERE THEMEN IM MAI

#### Geheime Datenbankabfrage

Quantenmechanik macht's möglich: Eine Suchmaschine liefert die korrekte Antwort auf eine Frage, ohne diese überhaupt gekannt zu haben

#### Unser Dreifarbensinn

Die Evolution des Farbsehens verlief bei den Primaten seltsam kompliziert. So sehen bei Neuweltaffen nur Weibchen mehrfarbig

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

[www.spektrum.com/newsletter](http://www.spektrum.com/newsletter)

FOTO: JUPITERIMAGES; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN



#### Fatale Darmkrankheit

Zöliakie, eine Autoimmunerkrankung des Dünndarms, wird durch Gluten in Getreide ausgelöst. Ihre Erforschung könnte auch andere Leiden aufklären, von Diabetes über multiple Sklerose bis zu rheumatoider Arthritis

DOUG DIXON

#### Geburtshilfe von Asteroiden?

Asteroideneinschläge auf der frühen Erde begünstigten womöglich die Entstehung der ersten Kontinente, statt sie zu behindern – so das paradoxe Ergebnis neuer Befunde

