

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Wissenschaftler  
im Gespräch

**AXEL MEYER –  
DER HERR  
DER FISCHE**

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC  
AMERICAN

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

05/10

MAI 2010

PRIMATEN

Wie sich unser  
Farbsehen entwickelte

GEOLOGIE

Asteroiden als Geburtshelfer  
für erste Kontinente?

MEDIZIN

Fatale Darmkrankheit  
durch Getreide-Allergie

## Leben im Multiversum

Auch Parallelwelten  
könnten bewohnt sein



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





Reinhard Breuer  
Chefredakteur

## Aliens in der Parallelwelt?

**Spekulationen sind was Feines**, vor allem in der Kosmologie. Um sich von schlichtem Spinnertum zu unterscheiden, bedarf es dabei jedoch eines gerüttelten Maßes an Wissenschaft, in der Regel einer lockeren Mischung aus Relativitätstheorie, Astronomie, Teilchenphysik, Astrobiologie sowie einer kräftigen Portion Fantasie. Dass sich aus dieser Mischung auch wissenschaftliche Gedanken entwickeln lassen, die sich bisweilen kaum von Sciencefiction unterscheiden, wird kaum jemanden überraschen.

Im Grenzbereich zwischen seriöser Wissenschaft und Sciencefiction bewegt sich seit Langem die Suche nach außerirdischer Intelligenz, kurz SETI. Vor 50 Jahren, als der amerikanische Astronom Frank Drake mit einem Teleskop erstmals Sterne nach künstlichen Radiosignalen abhorchte, war das noch völlig exotisch.

Heute ist die Suche nach Außerirdischen zwar auch noch nicht bei allen Astronomen gleich beliebt, aber Anlagen wie zuletzt das private Allen Telescope Array in Nordkalifornien, gemeinsam betrieben vom SETI Institute und der University of California, zeigen, dass die Suche nach anderen Zivilisationen im All zumindest Teil regulärer Forschung geworden ist. Um heute exotisch zu wirken, ist es mit Außerirdischen also nicht mehr getan. Es sollten dann schon, die Wortbildung sei erlaubt, Außeruniversische sein: Aliens in Parallelwelten!

Dass es hierbei zwar um Spekulation, aber auch um Wissenschaft geht, bedarf vielleicht der Begründung. Die Idee von Multiversen, die einst in einem grandiosen Schöpfungsakt aus einem Urvakuum entstanden, beruht auf einer ziemlich zwin-

genden Konsequenz der Quantenphysik. Jedes der Tochteruniversen wird, so sagt es die Theorie, von anderen physikalischen Gesetzen regiert als unser »Heimatkosmos«.

Da ist es nur noch ein Schritt zu der Frage, welche der Parallelkosmen, falls es sie denn gibt, auch bewohnbar sein könnten. Das ähnelt durchaus der Suche nach bewohnbaren Zonen um sonnenähnliche Fixsterne. Noch mehr könnte man auch an das »anthropische Prinzip« denken, wonach die Welt so gebaut sein muss, dass sie unsere Form irdischen Lebens hervorbringen konnte. Die Kunst besteht darin, die Evolution alternativer, bewohnbarer Universen durchzurechnen und zu prüfen, ob sie »komplexe Systeme« hervorbringen könnten. Selbst wenn sich das niemals durch Beobachtungen testen lässt, besteht der eigentliche Nutzen solcher Analysen darin, etwas über unser Universum und uns selbst zu lernen. Schließlich geht es um die alte und gar nicht tautologische Frage, warum die Welt so ist, wie sie ist (S. 24).

**Wer Buntbarsche schon mal im Aquarium gesehen hat**, der kann zumindest teilweise nachfühlen, warum Axel Meyer ein Freund dieser zumeist farbenprächtigen Fische ist. Doch der Konstanzer Biologe sieht darin weniger Zierfische als vielmehr Spitzenexemplare im Dienst der Evolutionsforschung. Die Medizinjournalistin Claudia Eberhard-Metzger und ich haben den quirligen Professor in seinen Labors besucht. Der ist nicht nur dabei, dem Rätsel der Artenbildung auf die Spur zu kommen, sondern hat auch Sinn für Humor (S. 36).

Herzlich Ihr

*Reinhard Breuer*



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PETER SCHMIDT

Der Evolutionsforscher Axel Meyer (rechts) führt Chefredakteur Reinhard Breuer begeistert seine Aquarien vor.



Unser neuestes Dossier ist erschienen: mit Spannendem zu Quantenphysik und Urknall.



SCHIMPANSEN: BOB ELSDALE; GEMÄLDE: IRMGARD STAHRKE



44

## MEDIZIN & BIOLOGIE

Die dreidimensionale Farbenwelt der Primaten



52

## MEDIZIN & BIOLOGIE

Darmleiden Zöliakie – Schlüssel zu Autoimmunkrankheiten



## MENSCH & GEIST

Antiker Astronomie-Computer

62

## AKTUELL

### 12 Spektrogramm

Wie Töne riechen · Ältestes Kunstgewerbe · Gefräßige frühe Milchstraße · Bei großem Vater wird es ein Sohn · Krebszellen kriechen mit Krakenarmen u. a.

### 15 Bild des Monats

Todesstern in Nahaufnahme

### 16 Pulsare als Gravitationswellen-Detektoren

Gelingt per galaktischem GPS der erste Nachweis von Raumzeitoszillationen?

### 18 Immunzellen mit Gangschaltung

Dendritische Zellen passen die Übersetzung ihres Motors dem Untergrund an

### 20 Invasion der Drohnen

Unbemannte Flugzeuge helfen bei der Erkundung der Polarregionen

### 22 Kosmische Kohlekugeln

Terrestrische Planeten um ferne Sonnen sind möglicherweise Klumpen aus Koks, Diamant und Teer

### 23 Springers Einwüfe

Unser begrenztes moralisches Budget

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### TITEL

### 24 ► Gibt es belebte Paralleluniversen?

Nach manchen kosmologischen Theorien ist unser Universum nicht das einzige. Könnte auch in einem Paralleluniversum mit anderen Naturgesetzen Leben entstehen?

### PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

### 32 Die wenig erstaunliche Kraft der Ameise

Das 50-fache Eigengewicht tragen? Das kann eine Büroklammer auch. Bei vielen unsinnigen Vergleichen werden einfache Skalengesetze missachtet

### SCHLICHTING!

### 35 Sphärische Irrwege

Zu Kreisen mutierende Linien und aufscheinende Farben – ein Parfümflakon illustriert die Gesetze der geometrischen Optik

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### PORTRÄT

### 36 ► Der Herr der Fische

Buntbarsche helfen dem Evolutionsforscher Axel Meyer bei der Beantwortung einer der ältesten Fragen der Biologie: Wie entstehen neue Arten?

### 44 ► Der merkwürdige Farbensinn der Primaten

Die Primaten erkennen weniger Farben als Vögel und Reptilien, aber mehr als andere Säugetiere. Einige Affen fallen jedoch aus der Norm – was die Evolution unseres Farbensinns enträtseln half

### 52 ► Fatale Darmkrankheit Zöliakie

Fast jeder hundertste Mensch verträgt kein Getreide mit dem Protein Gluten: Es bringt sein Immunsystem dazu, den Darm anzugreifen. Molekulare und histologische Befunde liefern nun ein neues Erklärungsmodell auch für andere Autoimmunkrankheiten





TITEL

# Leben im Multiversum

24

## MENSCH & GEIST

### 62 Die Entschlüsselung eines antiken Computers

Ein internationales Team von Wissenschaftlern hat das Geheimnis des »Mechanismus von Antikythera« gelüftet, eines antiken astronomischen Rechenwerks erstaunlicher Komplexität

Titelmotiv: Slim Films

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)

## WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Aliens in Parallelwelten?
- 6 Onlineangebote
- 8 Leserbriefe/Impressum
- 85 Im Rückblick
- 106 Vorschau

## ERDE & UMWELT

### 72 ► Asteroiden als Geburtshelfer für die ersten Kontinente

Große Himmelskörper, die auf der frühen Erde einschlugen, hatten womöglich einen paradoxen Effekt: Sie begünstigten die Entstehung der ersten Kontinente, statt sie, was naheläge, zu behindern



72

ERDE & UMWELT

Produktive Asteroideneinschläge



88

TECHNIK & COMPUTER

Sternenfeuer im Fusionsreaktor

## TECHNIK & COMPUTER

### 80 Perfekte Vertraulichkeit

Im Quanten-Internet der Zukunft beantworten Suchmaschinen Fragen, ohne sie zur Kenntnis zu nehmen

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

### 86 Plastik statt Gras

Profisport verlangt einen Profirasen. Und der ist mitunter nicht aus Gras

### 88 Fusion mit Hindernissen 🔊

Die ersten Tests der weltgrößten Laserfusionsanlage stehen bevor. Gezähmt ist das Sternenfeuer aber noch lange nicht

WISSENSCHAFT & KARRIERE

### 104 Filmreife Forschung

Thomas Wiegand, einer der Väter des Videostandards H.264

Seite 105

# naturejobs

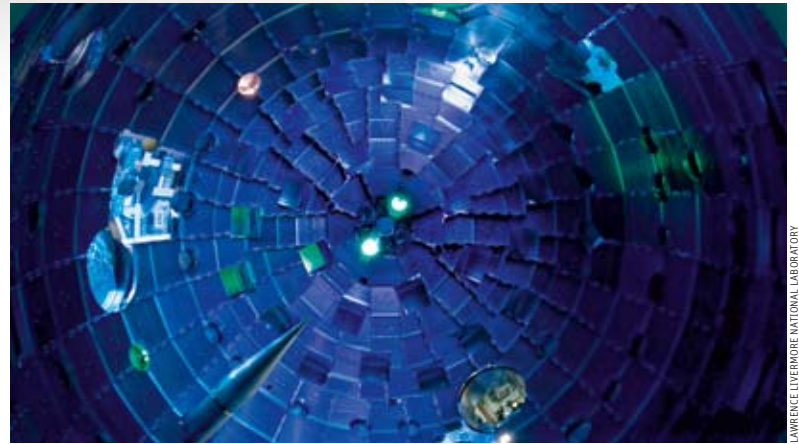
Weitere Stellenangebote unter [www.spektrum.com/naturejobs](http://www.spektrum.com/naturejobs)

- 100 Rezensionen:
  - Mario Markus *Die Kunst der Mathematik*
  - Peter Spork *Der zweite Code*
  - Florian Holsboer *Biologie für die Seele*
  - Ian Stewart *Meilensteine der Mathematik*

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!



**SPEKTRUMDIREKT** Schwindende Vielfalt  
[www.spektrumdirekt.de/artenvielfalt](http://www.spektrumdirekt.de/artenvielfalt)



**INTERAKTIV** Umfrage: Energie im Überfluss dank Kernfusion?  
[www.spektrum.de/artikel/1028472](http://www.spektrum.de/artikel/1028472)

**spektrumdirekt.de**

*Die Wissenschaftszeitung im Internet*

## Verschwindende Vielfalt

Die sechste große Aussterbewelle in der Erdgeschichte lässt die Zahl der Tier- und Pflanzenarten schrumpfen. Schuld daran sind auch politische und wirtschaftliche Interessen. Dieses **spektrumdirekt**-Dossier berichtet unter anderem über fatale Entwicklungen im Bereich des Artenschutzes, den heillos überfischten Roten Tun und die Nachfrage nach Tigerprodukten

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

## Neu in der Menschenfamilie

Die Geschichte des Menschen ist weiter verzweigt als gedacht – und ihre Erforscher müssen sie immer wieder umschreiben. *Homo sapiens*, so scheint es, lebte im eiszeitlichen Asien nicht nur neben Neandertalern; jüngst kam auch der Denisovamensch ins Spiel. Über diese und andere Entdeckungen berichtet **spektrumdirekt** im Dossier »Der Ursprung des Menschen«

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

## TIPPS

*Nur einen Klick entfernt*

## Erfinderisches Gehirn

Immer wieder berichten Menschen, die physischen und psychischen Extremsituationen ausgesetzt waren – ob im Hochgebirge, in der Antarktis oder auf dem Atlantik –, von seltsamen Eindrücken: Sie nahmen plötzlich Dinge und Menschen wahr, die gar nicht existierten. »Scientific American«-Kolumnist Michael Shermer über ein faszinierendes Phänomen, dessen Ursachen im Gehirn zu suchen sind

[www.spektrum.de/artikel/1028468](http://www.spektrum.de/artikel/1028468)

## Virtuelle Wissenschaftstour durch 32 Staaten

Ein gänzlich unwissenschaftliches Unterfangen, nämlich die kommende Fußball-Weltmeisterschaft, nehmen die Autoren des SciLogs-Blogportals zum Anlass, alle 32 Teilnehmerstaaten vorzustellen – dies aber natürlich aus wissenschaftlicher Sicht. Ihre virtuelle vierwöchige Rundreise beginnt am 11. Mai

[www.scilogs.de](http://www.scilogs.de)

## INTERAKTIV

*Machen Sie mit!*

## Umfrage: Energie im Überfluss dank Kernfusion?

Fusionsreaktoren, in denen Wasserstoffisotope zu Helium verschmelzen, könnten praktisch unbegrenzte Mengen an klimafreundlicher Energie bereitstellen. Selbst Optimisten rechnen allerdings erst ab 2050 mit kommerziellen Anlagen (siehe »Wann kommt der Fusionsreaktor?« auf S. 88). Pessimisten halten diesen Traum überhaupt für unrealistisch. Stellen Fusionskraftwerke wirklich eine Alternative zur Energie aus Sonne, Wind und Wasser dar? Diskutieren Sie mit auf

[www.spektrum.de/artikel/1028472](http://www.spektrum.de/artikel/1028472)

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





FÜR ABONNENTEN »Entfesselte Visionen«

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

## FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel  
zum Download

### »Entfesselte Visionen«

Nicht alle Halluzinationen sind Anzeichen einer psychischen Störung. Vor allem Menschen mit nachlassender Sehkraft spielt das Gehirn oft Streiche. Bekannt ist dieser Effekt als »Bonnet-Syndrom«: Die Betroffenen sind äußerst lebendigen Trugbildern ausgesetzt, die von unkontrollierter neuronaler Aktivität herrühren

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN  
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

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

## FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Gehirn&Geist**  
und **Sterne und Weltraum** kostenlos  
online lesen

### »Phantom Chemobrain«

Krebspatienten fürchten als Nebenwirkung einer Chemotherapie dauerhafte kognitive Einschränkungen – Gedächtnislücken, mangelnde Konzentrationsfähigkeit oder Probleme beim Planen und Organisieren. Zwei Forscherinnen geben jedoch Entwarnung. Meist sind die geistigen Fähigkeiten nur vorübergehend geschwächt

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

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1026156](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1026156)

### »Schwarze Löcher«

Schon seit Ende der 1960er Jahre machen Schwarze Löcher Schlagzeilen. Inzwischen kennen Astronomen zahlreiche Exemplare dieser von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten extrem kompakten Objekte – und rätseln vor allem über ihre sehr unterschiedlichen Massen

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE  
LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

[www.astronomie-heute.de/  
artikel/1025409](http://www.astronomie-heute.de/artikel/1025409)



FREIGESCHALTET

»Schwarze Löcher«

[www.astronomie-heute.de/artikel/1025409](http://www.astronomie-heute.de/artikel/1025409)

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

### »And the winner is ...«

Gleich zwei WissensLogger erhielten jüngst internationale Anerkennung: Gunnar Ries (»Mente et Malleo«) vom Geologisch-Paläontologischen Institut und Museum der Universität Hamburg wurde mit dem Researchblogging-Award für den besten deutschsprachigen Wissenschaftsblog ausgezeichnet, Bloggerkollege Lars Fischer (»Fischblog«) zählte zu den Finalisten. Der Geowissenschaftler Ries beschäftigte sich zuletzt mit Erdbeben und dem Ausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull; der Chemiker Fischer widmete sich Auswahleffekten in klinischen Studien, dem Norovirus und einem möglichen »Freak« unter den Exoplaneten. Die Website [researchblogging.org](http://researchblogging.org) versammelt Blogbeiträge aus aller Welt, die sich mit Publikationen in begutachteten Fachzeitschriften beschäftigen

[www.wissenslogs.de](http://www.wissenslogs.de)

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



## Armes Menschenherz

Organersatz aus der Retorte  
März 2010

»Ein Menschenherz muss rund 300 Millionen Mal schlagen und darf nie ermüden.« So weit die Aussage im Artikel. Hört sich auch viel an. Nur ist viel eben nicht immer genug. Bei einem sicherlich nicht zu hoch veranschlagten Durchschnittspuls von 60 pro Minute sind nach 300 Millionen Herzschlägen gerade mal 9½ Jahre vergangen. Ein doch sehr bescheidenes Menschenalter. Für ein Lebensalter von etwas über 63 Jahre muss das Herz zwei Milliarden Mal schlagen.

Marlies Feucht, Dußlingen

## Schlecht informiert

Kopenhagen – quo vadis?  
Forschung aktuell, März 2010

Konrad Kleinknecht zeigt sich in seinem Kommentar zur internationalen Klimapolitik in ärgerlicher Weise schlecht informiert. Die USA, China und Indien hätten das Kioto-Protokoll nicht unterschrieben. Das ist falsch: Die USA haben »Kioto« nicht ratifiziert (aber unterschrieben), China und Indien haben ratifiziert. Auch dass es in Kopenhagen darum gegangen sei, »eine Nachfolgeregelung für das Kioto-Protokoll zu finden«, ist nicht korrekt: Es war gerade ein zentraler Streitpunkt, ob das Kioto-Protokoll durch ein neues Abkommen abgelöst oder fortgesetzt wer-

den soll. Schließlich schreibt Kleinknecht, eine globale Zuteilung von Emissionsrechten nach dem Pro-Kopf-Prinzip, wie es der WBGU vorschlägt, würde Deutschland benachteiligen, da dieses seine emissionsintensiv produzierten Güter exportiere. Auch das ist falsch: Nach der bisher umfassendsten Studie zum Thema (Hertwich, Peters 2009) importiert Deutschland mehr Grauemissionen, als es exportiert; es stünde also bei einer Pro-Kopf-Zuteilung »zu gut« da. Freilich wäre das in einem wirklich globalen und funktionierenden Emissionshandelssystem irrelevant, da die Kosten der Emissionszertifikate letztlich über die Produktpreise bei den Konsumenten ankämen – egal, in welchem Land sie produziert wurden.

Marcel Hänggi, Zürich

## Antwort des Autors:

Herr Hänggi hat in zwei Punkten Recht: In Kopenhagen wurde über die Art der Nachfolgeregelung für das Kioto-Protokoll gestritten, und US-Präsident Bill Clinton hat Kioto unterschrieben. Aber sein Nachfolger George W. Bush hat die Unterschrift zurückgezogen und das Repräsentantenhaus den Vertrag nicht ratifiziert. Das Kioto-Protokoll war wirkungslos, weil die USA nicht teilnahmen und China als »Entwicklungsland« keine Auflagen zur Reduktion erhielt, obwohl es inzwischen die Exportnation Nr. 1 ist, über die größten Devisenreserven verfügt und das meiste CO<sub>2</sub> weltweit emittiert. Die Reduktionen der teilnehmenden Industrieländer, 118 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> jährlich, wurden deshalb von

den zusätzlichen Emissionen in China um das Fünffache übertroffen.

Eine Fortsetzung dieser Politik – ohne China, die USA und Indien, die die Hälfte des weltweiten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes verursachen – liefe auf einen Emissionshandel der EU hinaus, der im Endeffekt zu einer höheren Entwicklungshilfe führt, aber dem Klima wenig nützt. Großer Verlierer wäre die deutsche Industrie, die von den EU-Emissionsrechten (860 Millionen Tonnen pro Jahr) mehr als die Hälfte kaufen muss, Frankreich dagegen gar keine.

Letztlich führt kein Weg daran vorbei, die drei größten CO<sub>2</sub>-Emittenten ins Boot zu holen. Und da China mit seiner Messlatte »CO<sub>2</sub> pro Wirtschaftsleistung« einen Fingerzeig gegeben hat, auf welches Kriterium es sich einlassen würde, muss man diese Chance ergreifen.

Prof. Dr. Konrad Kleinknecht,  
Universität Mainz

## 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 Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser  
**Redaktion:** Thilo Körkel (Online Koordinator), 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 Heinzlmann, 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, Dr. Susanne Lipps-Breda, Isabel Müller, Dr. Michael Springer, Dr. 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 vom 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, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: 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. Schaffhär 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 Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandete 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 Inchocombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



## Muss die Menschenwürde doch unantastbar bleiben?

Die Würde des Menschen ist antastbar! Essay, März 2010

### Holzschnittartig und wenig durchdacht

Erst argumentiert Edgar Dahl ausführlich, dass der Begriff der Menschenwürde vermeintlich untauglich, geradezu überflüssig ist. Aus unserer Verfassung eliminieren will er ihn aber nicht. Warum? Traut er seiner eigenen Argumentation nicht?

Und wenn die Menschenwürde in der Verfassung stehen bleiben soll, weshalb soll sie dann aus der bioethischen Diskussion herausgehalten werden? Gilt für die Bioethik ein außerhalb oder gar über der Verfassung stehendes Sonderrecht? Und wenn ja, welches? Wer formuliert und wer legitimiert es?

An die Stelle des schwammigen Begriffs der Menschenwürde sollen die Menschenrechte treten, da diese präziser seien, schreibt Edgar Dahl. Wie aber der Begriff Menschenrecht definiert ist, wie ein Recht beschaffen sein muss, um ein Menschenrecht zu sein, und auf was dieses Recht fußt, darüber verliert er kein Wort. Hätte er das getan, so wäre schnell klar geworden, dass sich die Menschenrechte gerade eben auf die Menschenwürde beziehen. Ohne diesen Bezugspunkt fehlt dem Begriff des Menschenrechts das Fundament. Man könnte dann alles nach Gutdünken zum Menschenrecht erklären – oder, je nach Kassen- und Wirtschaftslage, wieder abschaffen!

Ein gewachsener Begriff wie die Menschenwürde lässt sich nicht in eine einfache Definition packen (wobei Kants Verbot der reinen Instrumentalisierung des Menschen hier schon weit reicht). JEDER Begriff, also auch der der Menschenwürde, ist für sich allein genommen zunächst einmal eine leere Hülse. Er gewinnt erst durch Konkretisierungen und Handlungsanweisungen wie zum Beispiel die Menschenrechte an Kontur und Leben. In der deutschen Verfassung sind das die in den Artikeln 2 bis 19 aufgeführten Grundrechte: Die Würde des Menschen ist unantastbar (Artikel 1), das heißt, jeder Mensch hat ein Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit (Artikel 2), Mann und Frau sind gleichgestellt (Artikel 3) und so weiter. Dass es auf die Fragen, was die Menschenwürde konkret bedeutet und wie sie zu schützen ist, zu verschiedenen Zeiten verschiedene Antworten gab und dass um sie immer wieder aus Neue gerungen werden muss, wie das von Edgar Dahl angeführte Beispiel der Sterbehilfe zeigt, ist nicht zu vermeiden. Gerade dieses Ringen darum formt den Begriff der Menschenwürde und darf natürlich auch nicht aus der Bioethik-Diskussion herausgehalten werden.

Edgar Dahl geht in seinem Essay mit der Menschenwürde doch sehr holzschnittartig um, bedient sich wenig durchdachter Argumente und holpriger oder sogar falscher Vergleiche – wie der Aussage, wir alle seien Chimären, weil sich Bakterien in unserem Darm befinden. In der Bioethik-Diskussion geht es um genetische Chimären, also um Menschen, denen tierische Gensequenzen – im Zweifelsfall weit vor ihrer Geburt – in ihr Erbgut eingefügt wurden. Das ist

etwas essenziell anderes als Bakterien im Darm oder Schweineklappen im Herzen!

Werner Kirsch, Köln

### Unverzichtbare Menschenwürde

Der Begriff »Menschenwürde« ist natürlich unverzichtbar – man kann ja auch das Wort »Freiheit« nicht einfach aus dem Vokabular streichen, weil es nicht positiv definierbar ist. Gerade die Interpretationsvielfalt von »Menschenwürde« fordert aber zu einer permanenten Suche nach einem konsensfähigen Inhalt auf, die allerdings nie als abgeschlossen betrachtet werden darf. Das ist eine starke Seite des Wortes »Menschenwürde«.

Wenn nun nach Vorstellung des Autors die Menschenwürde in der Bioethik nichts zu suchen hat, wird gerade in der Gentechnik mit ihren unabsehbaren Möglichkeiten der Öffentlichkeit eine Wertung vorgesetzt: Was »gut« ist, bestimmt ein Forscherteam.

Anton Berk Müller, Landshut

### Für Ethik braucht es mehr als Rhetorik

Die Darstellung Edgar Dahls provoziert – schon weil sie die Komplexität der ethischen Frage, um die das Konzept der Menschenwürde ringt, so hartnäckig ausblendet. Bereits die Definition des Enhancement als »generell die Verbesserung menschlicher Fähigkeiten« ist hinterhältig – falsch vom Wortsinn und tendenziös in der Logik (oder in den Interessen). Das ist billiger Utilitarismus, wo eigentlich die Diskussion einzusetzen hat, die Kant zu seinem Imperativ führte.

Was Neuro-»Enhancement«, Smart Pills, Happy Pills et cetera betrifft, drohen schiere materielle Ziele statt moralischer Werte die Oberhand zu gewinnen, wohl verstärkt durch milliardenschwere Werbung. Wer definiert die Ziele, bestimmt, was besser ist? Und die Entwicklung ist absehbar: Pharmazeutisch verstärkte Höchstleistung wird erst zum akzeptierten Standard, dann zum faktischen Nutzungszwang. Menschliche Fehler, Talente, Schwächen und Regungen verkommen zu aussteuerbaren Größen.

Ulfert Höhne, Wien

### Ideologische Waffe

Ein Argument als »Totschlagargument« zu bezeichnen, wird üblicherweise selbst als solches eingesetzt. Wenn eine Diskussion auf einmal darum geht, ob etwas ein Totschlagargument ist, zeigen die Diskussionsteilnehmer nur, dass sie entweder nicht wissen, wie man diskutiert, oder dass einige sich schlicht weigern, angemessen zu diskutieren.

Dieter Kohl, Ludwigsburg



BEN MILLER, KINGS PARK AND BOTANIC GARDEN, WEST PERTH

## BOTANIK

### Rauch lässt Samen schneller keimen

■ Die Folgen von Waldbränden gehen weit über die Zerstörung des aktuellen Bewuchses hinaus: Sie verändern die Zusammensetzung der Vegetation dramatisch. Einer der Gründe dafür ist, dass wesentlich mehr Licht den Boden erreicht und so auch Gewächse eine Chance haben, die im Schatten hoher Bäume nicht gedeihen können.

Einige Pflanzen nutzen Waldbrände aber auch direkt: Bei ihnen leiten Rauch und Hitze die Keimung der Samen ein. Eine solche keimungsfördernde Wirkung wurde kürzlich für Karrikine nachgewiesen, die bei

**Nach einem Buschfeuer liegen Rauchschwaden in der Luft. Das darin enthaltene Karrikin verstärkt die keimungsfördernde Wirkung von Sonnenlicht auf Samen im Boden.**

Feuern in der Wildnis entstehen und in die Luft gelangen. Diese Substanzklasse hat aber offenbar noch einen weiteren positiven Effekt auf Samen: Sie macht sie sensibler gegenüber Licht.

Das ergaben nun Versuche, die Steven M. Smith und Kollegen von der University of Western Australia in Crawley an der Ackerschmalwand (*Arabidopsis thaliana*) durchführten. Demnach fördern die Rauchbestandteile die Keimung bei geringer Lichtintensität. Außerdem beschleunigen sie die Entwicklung der Keimblätter, während sie die Sprossachse langsamer wachsen lassen. Das Team um Smith vermutet daher, dass Pflanzensamen dank der Karrikine auch unter der Erde auf den stärkeren Lichteinfall nach einem Waldbrand reagieren können.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

## NANOTECHNOLOGIE

### Lego-System für Mikrostrukturen

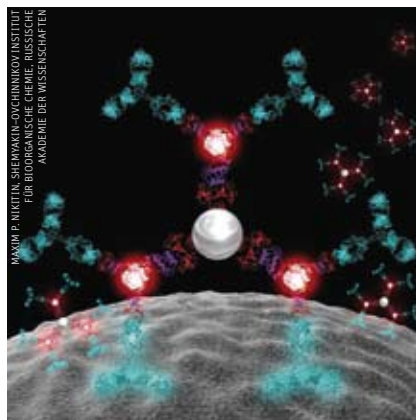
■ Nanopartikel haben sich für verschiedenste wissenschaftliche Disziplinen als nützlich erwiesen, insbesondere auch für die Medizin. So können sie als diagnostische Marker dienen, zusammen mit Antikörpern Krebszellen angreifen oder dafür sorgen, dass Arzneistoffe erst nach und nach an den Körper abgegeben werden. Maxim P. Nikitin und seine Kollegen von der russischen Akademie der Wissenschaften in Moskau haben nun einen Weg entdeckt, auf dem es gelingt, verschiedene dieser winzigen Teilchen miteinander zu koppeln und damit ihre Eigenschaften nach Wunsch zu kombinieren.

Eine zentrale Rolle spielen dabei zwei bakterielle Proteine: Barnase und Barstar. Wie Alleskleber verbinden sie in wässrigen Lösungen Teilchen verschiedenster Größe und chemischen Typs miteinander. Um das Prinzip zu demonstrieren, erzeugte das Team um Nikitin eine Struktur aus magne-

tischen Nanopartikeln, Antikörpern und Quantenpunkten, also Halbleitern im Nanomaßstab. Die Klebekraft der beiden Proteine erwies sich dabei als stark genug für den dauerhaften, festen Zusammenhalt dieser ganz verschiedenartigen Teilchen, deren Größe zwischen nur drei Nanometern und fünf Mikrometern variierte.

Die neue Struktur vereinigte die nützlichen Eigenschaften all ihrer Komponenten in sich. Dank der Antikörper heftete sie sich spezifisch an Krebszellen, die sich dann über das Magnetfeld der Nanopartikel lokalisieren und durch die Fluoreszenz der Quantenpunkte identifizieren ließen. Andere Partikelkombinationen könnten auch bei Biosensoren oder in der Photonik von unschätzbarem Wert sein.

PNAS, Bd. 107, S. 5827



MAXIM P. NIKITIN, SHERWATIN-OVCHINIKOV-INSTITUT FÜR BIOORGANISCHE CHEMIE, RUSSISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

**In dieser multifunktionalen Nanostruktur verbindet ein Proteinaggregat (Zentrum) Quantenpunkte (rot), Antikörper (blau) und ein magnetisches Nanoteilchen (angeschnittene graue Kugel) miteinander.**

## WAHRNEHMUNG

### Wie Töne riechen

■ Unsere fünf Sinne sind im Gehirn weniger strikt getrennt, als wir meinen. Der Geschmack von Speisen etwa beruht hauptsächlich auf deren Geruch. Zudem sind seit Langem Personen bekannt, die Töne sehen oder Farben schmecken. Den neurologischen Hintergrund einer solchen Synästhesie könnten nun Daniel W. Wesson und Donald A. Wilson vom Nathan S. Kline Institute for Psychiatric Research in Orangeburg (New York) an Mäusen entdeckt haben.

Die Hirnforscher leiteten elektrische Impulse aus dem Tuberculum olfactorium der Nager ab, um die Rolle dieser neuralen Schaltstelle zwischen Nase und Großhirn bei der Geruchsverarbeitung zu untersuchen. Als Wesson gedankenlos seine Kaffeetasse mit lautem Scheppern auf den Labortisch stellte, feuerten plötzlich einige der Nervenzellen. Weitere Versuche zeigten, dass knapp 20 Prozent der untersuchten Neurone auf einen bloßen Ton reagierten. Bei anderen schwächte eine Kombination aus Gerüchen und Geräuschen die elektrischen Impulse ab oder verstärkte sie. Ungeklärt ist allerdings noch, wo und wie die Signale aus dem Tuberculum weiterverarbeitet werden.

The Journal of Neuroscience, Bd. 30, S. 3013



## Ältestes Kunstgewerbe

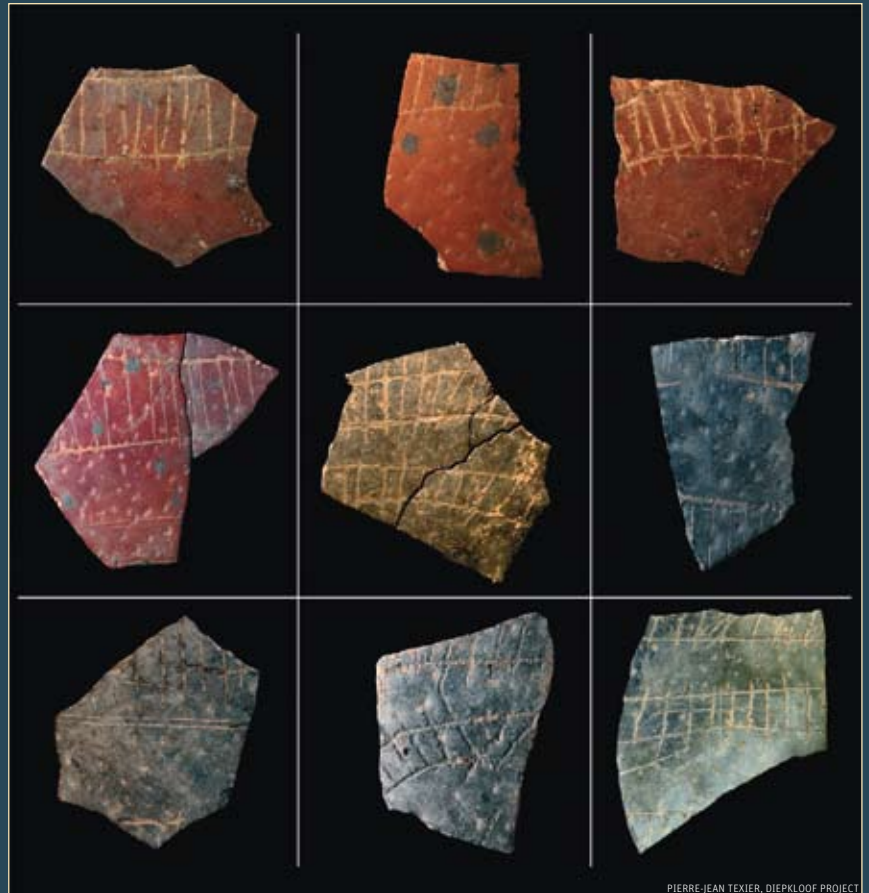
■ Höhlenmalereien, Schmuck oder verzierte Werkzeuge: Solche prähistorischen Formen der Kunst künden von der beginnenden Fähigkeit des Menschen zum symbolischen und damit abstrakten Denken. In Südafrika sind Forscher jetzt auf Fragmente von 55 000 bis 65 000 Jahre alten Straußeneierschalen gestoßen, deren Gravierungen das bisher älteste System komplexer Symbole darstellen.

Die 270 nur zwei bis drei Zentimeter großen Schalenstücke aus der 180 Kilometer nördlich von Kapstadt gelegenen Diepkloof-Höhle stammen von mindestens 25 Eiern und zeigen unterschiedliche Muster: mal ein Band, das sich aus einer Vielzahl schraffierter Striche zusammensetzt, mal akkurat gezogene parallele Linien.

Solche geometrischen, sich wiederholenden Muster zeugen – so die Ausgräber um Pierre-Jean Texier von der Universität de Bordeaux – von einer »Tradition«; denn die Bearbeitung der Eierschalen mit einem scharfen Gegenstand musste nach gewissen Standards erfolgen. Dafür spricht auch, dass das Dekor über einen so langen Zeitraum – immerhin rund 10 000 Jahre – hinweg kaum variierte. Offenbar handelte es sich um eine weithin gebräuchliche, von allen anerkannte Symbolik. Damit unterscheiden sich diese Darstellungen von anderen, teils älteren Schmuckerzeugnissen.

Die stabilen Schalen der rund einen Liter fassenden Straußeneier wurden von den Menschen der Diepkloof-Höhle wahrscheinlich wie »Mehrwegflaschen« verwendet, was auch heute noch bei den Buschmännern der Kalahari üblich ist. Auch sie gravieren die Behälter mit Symbolen, um Besitzer oder Inhalt zu benennen.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung



PIERRE-JEAN TEXIER, DIEPKLOOF PROJECT

Diese mit Linien verzierten Straußeneierschalen sind Fragmente mittelsteinzeitlicher »Mehrwegflaschen«. Die bunte Farbe entstand nachträglich durch Hitze.

## HIRNFORSCHUNG

### Warum Überraschung blind macht

■ Bei der Lektüre eines spannenden Buchs vergessen wir die Welt um uns. Doch ein plötzlicher, unerwarteter Laut lässt uns hochschrecken – und dann brauchen wir erst einen Moment, um den Faden wiederzufinden. Überraschungen erhöhen den Puls und steigern den Erregungszustand des Nervensystems. Unwillkürlich ziehen sie unsere Aufmerksamkeit von ihrem bisherigen Ziel auf den äußeren Reiz.

Christopher Asplund und seine Kollegen von der Vanderbilt University in Nashville haben nun untersucht, wie das Gehirn zwischen der Versenkung beim Konzentrieren auf eine Tätigkeit und der hellwachen Aufnahmebereitschaft für Umgebungssignale nach einer Überraschung umschaltet. Dazu beobachteten sie die Hirnaktivität von 31

Probanden, die auf einem Bildschirm mit vorbeiziehenden Buchstaben alle »X« identifizieren sollten. Nach einem überraschend aufgetauchten Gesicht übersahen die Versuchspersonen die nächsten »X«. Es dauerte einen Moment, bis sie wieder alle so sicher identifizieren konnten wie zuvor.

Wie sich zeigte, unterscheidet sich die Hirnaktivität bei zielgerichteter und reizgeleiteter Aufmerksamkeit. Doch eine Region namens *inferior frontal junction* (IFJ) wird in beiden Fällen erregt. Daher vermuten die Forscher hier den Umschalter zwischen den zwei Verhaltensweisen. Der betreffende Hirnbereich kann nicht beide Aufgaben zugleich erledigen: Wenn ihn ein Überraschungssignal beansprucht, bleibt keine Kapazität, auch noch für volle Konzentra-



CHRISTOPHER ASPLUND, VANDERBILT UNIVERSITY

Die bei der Konzentration auf eine Aufgabe aktiven Hirnregionen sind rot und die durch ein überraschendes Ereignis erregten Areale blau markiert. Der in beiden Fällen an der Signalverarbeitung beteiligte Bereich erscheint gelb.

tion zu sorgen. Umgekehrt können beim Fokussieren auf eine Tätigkeit nicht zusätzlich äußere Reize verarbeitet werden.

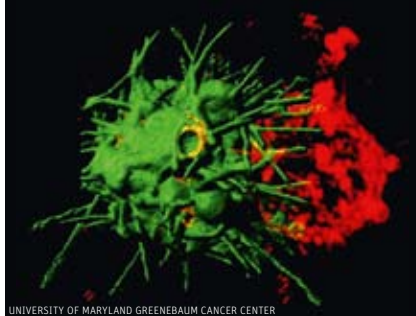
Nature Neuroscience, Bd. 13, S. 507

## MEDIZIN

## Krebszellen kriechen mit Krakenarmen

■ Wenn sich gesunde Zellen von ihrem Gewebeverband lösen, ist ihr Tod vorprogrammiert. Entweder sterben sie durch eine Art Selbsterstörungsmechanismus, oder der Blutkreislauf trägt sie in dünne Adern, die sie zerquetschen. Krebszellen können dagegen Monate oder gar Jahre isoliert im Körper überleben. Aus den engen Blutgefäßen zwängen sie sich durch mikroskopisch kleine Lücken und bilden in Organen wie Lunge, Gehirn oder Leber die gefürchteten Metastasen. Michael Matrone von der University of Maryland in College Park und seine Kollegen haben nun herausgefunden, dass einzelne Brustkrebszellen überdauern, indem sie sich mit mikroskopisch kleinen Tentakeln an die Wände von dünnen Kapillaren heften.

Deren Bildung fördert ein Protein namens tau. Es war zwar zuvor schon in einigen gegen Chemotherapie resistenten Brustkrebstypen nachgewiesen worden –



UNIVERSITY OF MARYLAND GREENEBAUM CANCER CENTER

**Mit ihren Mikrotentakeln (grün) hält eine Krebszelle (rot) eine andere fest im Griff. Normalerweise dienen die Ärmchen zum Anheften an die Wände von Blutgefäßen.**

einen Zusammenhang mit der Metastasenbildung hatte jedoch niemand hergestellt. Nun fanden die Wissenschaftler bei mehr als der Hälfte der 102 untersuchten Patientinnen tau in den Tochtergeschwülsten; häufig stieg die Menge des Proteins mit fortschreitender Erkrankung weiter an. In einigen Fällen war es in den Metastasen sogar dann nachweisbar, wenn es im ursprünglichen Tumor nicht vorkam.

Bisher hatte das Protein übrigens in einem ganz anderen Zusammenhang traurige Berühmtheit erlangt: als Hauptbestandteil neurofibrillärer Bündel im Gehirn von Alzheimerpatienten.

*Oncogene, Online-Vorabveröffentlichung*

## ASTRONOMIE

## Gefräßige frühe Milchstraße

■ Zwerggalaxien umfassen nur einige Millionen Sterne. Vor über 30 Jahren entwickelten Forscher ein Modell, wonach große Galaxien wie die Milchstraße sich einst mit den Winzlingen in ihrer Nachbarschaft mästeten. Das impliziert allerdings, dass beide Galaxientypen die gleichen Sternpopulationen enthalten. Nun ist der Randbereich der Milchstraße, der so genannte Halo, voll von besonders alten, metallarmen Sternen. Gegenstücke dazu aber waren in den Zwerggalaxien nicht auffindbar – bis jetzt.

**Künstlerische Darstellung des metallarmen Sterns S 10 20 549 aus der Zwerggalaxie Sculptor**



ILLUSTRATION: DAVID A. AGUIAR, CFA

Als Anna Frebel vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics in Massachusetts und ihre Kollegen nun gezielt danach suchten, wurden sie in der Zwerggalaxie Sculptor fündig. Dort entdeckten sie in über 280 000 Lichtjahren Entfernung einen Stern, dessen Gehalt an Metallen – worunter Astronomen alle Elemente verstehen, die schwerer sind als Helium – weniger als ein 4000stel desjenigen auf der Sonne betrug. Auch die spektroskopisch ermittelte Konzentration bestimmter Elemente wie Kalzium oder Magnesium stimmte mit den Werten von Objekten aus dem Halo der Milchstraße überein.

Nach Ansicht von Frebel und ihren Kollegen wurden metallarme Sterne in fernen Zwerggalaxien bisher schlicht übersehen, weil sie sich mit gängigen Methoden nur schwer entdecken ließen. Die Forscher sind überzeugt davon, dass die Suche danach weitere Exemplare zu Tage fördern wird. Damit wäre die Abstammung der Halosterne von Zwerggalaxien bestätigt.

*Nature, Bd. 464, S. 72*

## FORTPFLANZUNG

## Bei großem Vater wird es ein Sohn

■ Die Weibchen des Bahamas-Anolis (*Anolis sagrei*) optimieren die Überlebenschancen ihres Nachwuchses mit einer ungewöhnlichen Methode: Anhand der Größe des jeweiligen Vaters entscheiden sie, ob sie mehr männliche oder weibliche Junge bekommen. Das haben nun Robert Cox und Ryan Calsbeek vom Dartmouth College in Hanover (New Hampshire) herausgefunden. Demnach überwiegen bei kleineren Vätern die Töchter und bei größeren die Söhne.

Cox und Calsbeek beobachteten acht Monate lang junge Echsen, die sie in ihrem natürlichen Lebensraum auf den Bahamas frei ließen. Dabei sahen sie, dass Männchen mit großen Vätern eine wesentlich höhere Überlebenschance hatten. Bei den



SCIENCE-AMAS

**Ein Anolis-Weibchen auf den Bahamas**

Weibchen spielte die Größe des Erzeugers dagegen keine Rolle. Bei kleineren Vätern ist es für eine Echsendame deshalb günstiger, in Töchter zu investieren. Auf welche Weise sie das Geschlecht ihres Nachwuchses beeinflusst, wissen die Forscher allerdings noch nicht.

Bei den Bahamas-Anolis bestehen große physische Unterschiede zwischen den Geschlechtern: Die Männchen sind bis zu 30 Prozent länger und 150 Prozent schwerer als die Weibchen. Im Unterschied zu anderen Echsen wird die Körpergröße des Vaters direkt auf den Sohn vererbt. Generell bevorzugen die Anolis-Weibchen große Männchen als Sexualpartner.

*Science, Online-Vorabveröffentlichung*



# Todesstern in Nahaufnahme

Aus der Ferne ähnelt der siebtgrößte Saturnmond Mimas dem Todesstern aus dem Kinoepos »Star Wars«. Prominenteste Struktur ist der 140 Kilometer breite und zehn Kilometer tiefe Krater Herschel, der fast ein Drittel des Monddurchmessers von 397 Kilometern ausmacht. Die Raumsonde Cassini hat bei einem dichten Vorbeiflug im Februar die bisher detailliertesten Ansichten des zernarbten Himmelskörpers geliefert, der vermutlich größtenteils aus Eis besteht. Dieses Falschfarbenbild aus rund 16 000 Kilometer Entfernung kombiniert Aufnahmen aus dem infraroten, sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich. Der Farbunterschied zwischen dem bläulichen Material im Umkreis von Herschel und den eher grünlichen Regionen am Bildrand deutet auf leichte Variationen in der Zusammensetzung der Oberfläche hin, über deren Grund nur spekuliert werden kann. Die fünf Kilometer hohen Kraterwände sind mit einem Neigungswinkel von 24 Grad auffallend steil.





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

## Pulsare als Gravitationswellen-Detektoren

Viele mit dem Gammastrahlen-Observatorium Fermi entdeckte Punktquellen haben sich als Pulsare erwiesen. Diese könnten nun in einer Art galaktischem GPS zur genauen Positionsbestimmung der Erde dienen – und damit zum Nachweis von Positionsänderungen durch Gravitationswellen.

Von Georg Wolschin

Indem Russell Hulse und Joseph Taylor mit dem Arecibo-Radioteleskop auf Puerto Rico die Abnahme der Umlaufperiode zweier umeinanderkreisender Neutronensterne maßen, gelang ihnen 1974 der erste indirekte Nachweis von Gravitationswellen. Das ermutigte zu Versuchen, die von Albert Einstein schon 1916 vorhergesagten periodischen Verzerrungen der Raumzeit auch direkt zu beobachten.

Die größten Hoffnungen ruhen dabei auf Interferometern, die nach minimalen Änderungen im Abstand zweier weit entfernter Fixpunkte suchen (Spektrum der Wissenschaft 12/2000, S. 48). Doch seit etwa zehn Jahren diskutieren Astrophysiker auch eine andere Möglichkeit: die genaue Bestimmung von winzigen Verschiebungen in der Position der Erde

durch Gravitationswellen mit Hilfe einer Art von galaktischem GPS.

Als Bezugspunkte – analog den GPS-Satelliten – könnten dabei Pulsare dienen. Diese senden wie kosmische Leuchttürme in regelmäßigen Abständen ein kurzes Radarsignal. Besonders geeignet für den Nachweis von Gravitationswellen sind Millisekunden-Pulsare; denn ihre Radarblitze folgen sehr schnell aufeinander und sind äußerst regelmäßig, so dass sich ihre Ankunft auf der Erde hochpräzise bestimmen lässt.

Millisekunden-Pulsare erreichen ihr rasantes Rotationstempo über Akkretionsprozesse in Binärsystemen: Durch gravitative Wechselwirkung zieht ein Neutronenstern (oder Weißer Zwerg) nach und nach Materie von einem normalen Stern an sich und wird dabei wie eine Eiskunstläuferin bei der Pirouette in immer

schnellere Drehung versetzt (Bild unten). Jetzt haben Astronomen in weniger als drei Monaten 17 neue solche Objekte entdeckt – unter Rückgriff auf Beobachtungen durch das Gammastrahlen-Observatorium Fermi der US-Weltraumbehörde NASA (Bild rechts oben).

Eigentlich durchmustert dieser Satellit den Himmel nach Gammastrahlenquellen, von denen er bisher rund 100 neue aufgespürt hat. Deren systematische Untersuchung mit Hilfe von fünf großen Radioteleskopen ergab jedoch, dass es sich bei einem Sechstel von ihnen zugleich um Millisekunden-Pulsare handelt. Vier davon sind »Schwarze Witwen«, die sich das Material ihres Begleitsterns völlig einverleibt haben.

»Radioastronomen haben den ersten Millisekunden-Pulsar vor 28 Jahren entdeckt«, berichtet Paul Ray vom Naval Research Laboratory in Washington. »Die Suche bei Himmelsdurchmusterungen mit Hilfe von Radioteleskopen erfordert viel Zeit und enormen Aufwand, und wir haben seitdem in unserer Milchstraße nur 60 gefunden. Jetzt zeigt uns Fermi die möglichen Quellen: Das ist wie eine Karte zur Schatzsuche«, meint der Forscher begeistert.

Ein Pulsar ist ein rotierender Neutronenstern, dessen Strahlungskegel periodisch auf die Erde trifft. Seine Rotations- und Emissionsfrequenz nimmt mit der Zeit ab. Bildet er jedoch ein Paar mit einem normalen Stern, kann er von diesem Gas abziehen und seine Rotation wieder bis auf mehrere hundert Umdrehungen pro Sekunde beschleunigen. Dann wird er zum Millisekunden-Pulsar.

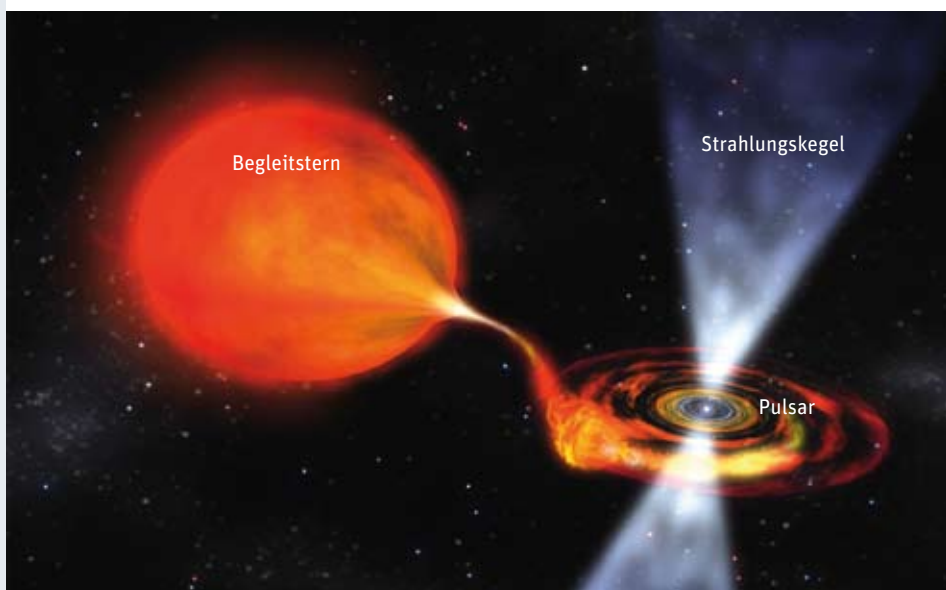
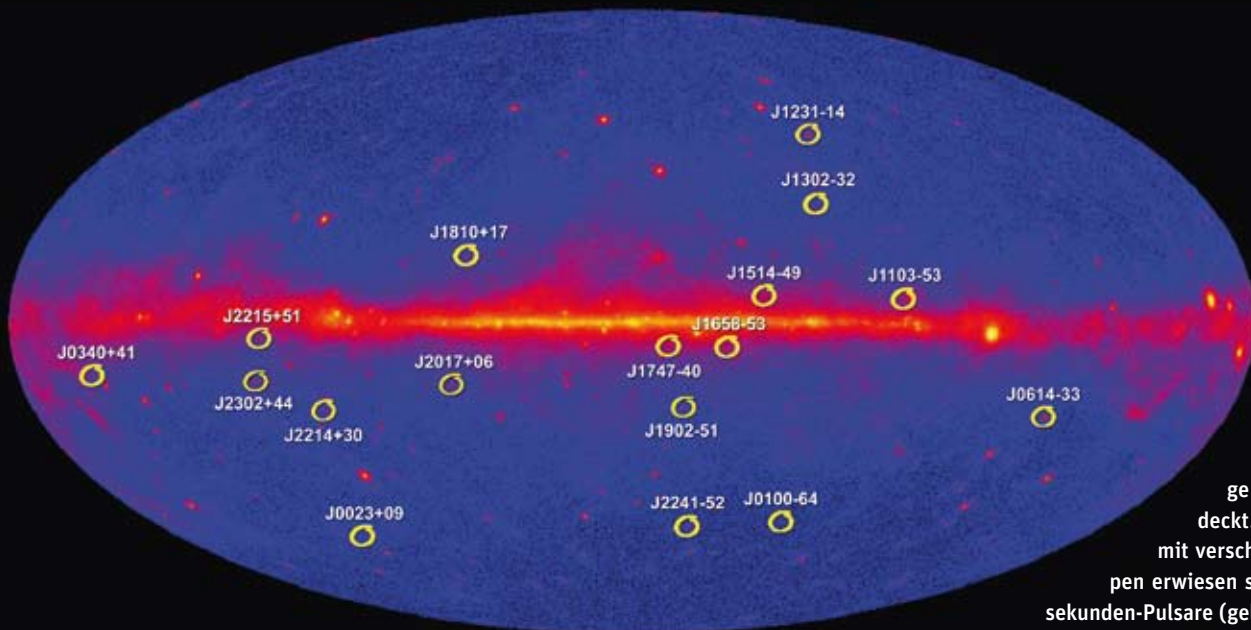


ILLUSTRATION: NASA / DANA BERRY



Das Fermi-Gammastrahlen-Observatorium der NASA hat zahlreiche punktförmige Strahlungsquellen entdeckt. Bei Untersuchungen mit verschiedenen Radioteleskopen erwiesen sich 17 davon als Millisekunden-Pulsare (gelbe Kreise).

NASA / DOE / FERMI LAT COLLABORATION

Millisekunden-Pulsare sind die genauesten Taktgeber der Natur. Mit langfristigen Schwankungen von weniger als einer millionstel Sekunde erreichen sie fast die Präzision menschengemachter Atomuhren. Beim Global Positioning System (GPS) nutzt man Laufzeitbestimmungen der Signale von Satelliten, um beispielsweise festzustellen, wo sich ein Fahrzeug auf der Erdoberfläche befindet. Analog lässt sich durch genaues Registrieren der Zeitunterschiede in den Ankunftssignalen von Millisekunden-Pulsaren die exakte Position der Erde ermitteln; Abweichungen vom Erwartungswert weisen auf die Einwirkung von Gravitationswellen hin (Bild rechts unten).

Schon Ende der 1970er Jahre berechneten unabhängig voneinander Mikhail V. Sazhin von der Lomonossow-Universität Moskau und Steven Detweiler von der Yale University in New Haven (Connecticut) die zu erwartenden Verschiebungen der Signalankunftszeiten von Pulsaren beim Durchgang einer Gravitationswelle durch die Milchstraße. Theoretisch würden vier solche Quellen ausreichen. In der Praxis sind jedoch weitaus mehr nötig, damit sich ein schlüssiges Bild ergibt, da aus vielen Gründen Irregularitäten bei

den Pulsankunftszeiten auftreten können. Nur eine gemeinsame Verschiebung bei allen Pulsarsignalen zeigt eine Verzerrung der Raumzeit am Ort der Erde an.

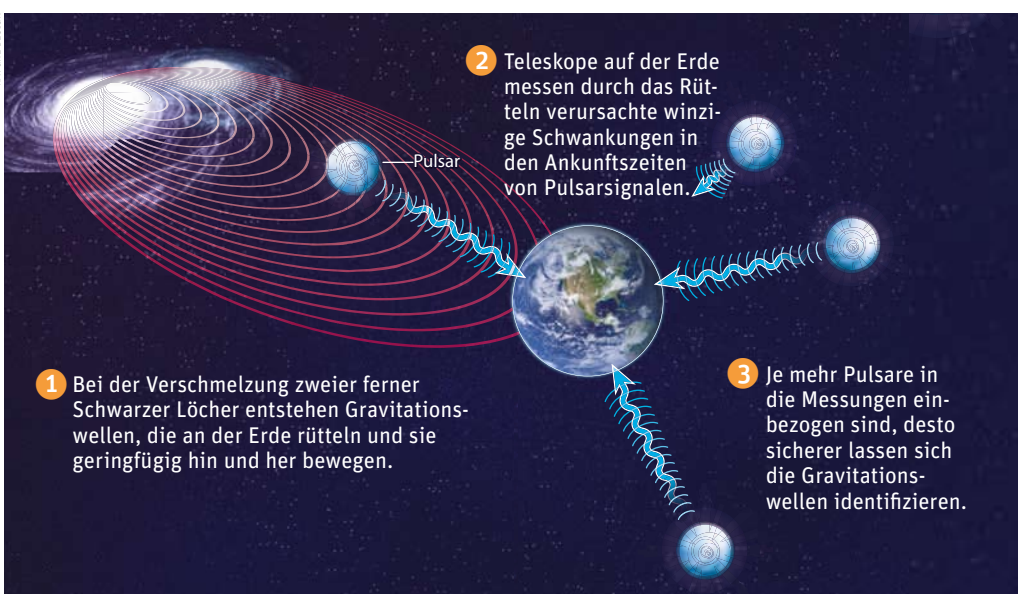
**Ein internationales Projekt**

Für die Suche danach wurde inzwischen das International Pulsar Timing Array Project gegründet. Seine Teilnehmer sind optimistisch, innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre die erste Gravitationswelle zu entdecken. Auch Europa spielt hier eine wichtige Rolle: Das LEAP-Projekt (*Large European Array for Pulsars*) kombiniert die Signale von fünf großen europäischen Radioobservatorien, womit die Genauigkeit eines 200-Meter-Teleskops erreicht wird. 2018 soll das neue internationale Square Kilometer Array Radioteleskop mit einer Ausdehnung von einem Quadratkilometer in Betrieb gehen.

Allerdings lassen sich per Pulsar-GPS nur Gravitationswellen mit sehr niedrigen Frequenzen im Bereich von etwa  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$  Hertz nachweisen. Auslöser dafür könnte die Verschmelzung extrem massereicher schwarzer Löcher in den Zentren entfernter Galaxien sein. In Frage kommen aber auch Phasenübergänge im frühen Universum, insbesondere die Vereinigung von Quarks und Gluonen zu den Hadronen – stark wechselwirkenden Teilchen, aus denen die Kerne der Atome aufgebaut sind.

Damit ergänzt das Pulsar Timing auf ideale Weise die anderen Möglichkeiten zum Nachweis von Gravitationswellen. Bei noch niedrigeren Frequenzen bis hinunter zu  $10^{-18}$  Hertz erwarten Kosmologen Signale von Fluktuationen der Gravitation, die verstärkt wurden, als der Kosmos in der Inflationsphase kurz nach

**Gravitationswellen, wie sie beispielsweise bei der Verschmelzung extrem massereicher Schwarzer Löcher in entfernten Galaxien erzeugt werden, können die Position der Erde verschieben. Das wirkt sich auf die Ankunftszeiten von Pulsarsignalen auf unserem Planeten aus: Sie variieren periodisch, was zum direkten Nachweis der Gravitationswelle dienen kann.**



dem Urknall rasch expandierte. Sie könnten sich in der Polarisation des kosmischen Mikrowellenhintergrunds zu erkennen geben.

Bei Frequenzen von  $10^{-4}$  bis 1 Hertz wird das Weltraumobservatorium LISA operieren, das jedoch frühestens 2018 starten soll. Es eignet sich beispielsweise zum Nachweis von Gravitationswellen, die eng umeinanderkreisende stellare Schwarze Löcher aussenden. Deren Verschmelzung wenige Wochen später sollte Signale bei höheren Frequenzen bis  $10^4$

Hertz liefern, die sich mit erdgebundenen Interferometern und Resonatoren messen lassen – insbesondere mit dem amerikanischen LIGO-Detektor und im Rahmen der europäischen Projekte VIRGO und GEO600. In diesem Frequenzbereich gibt es noch viele andere astrophysikalische Quellen für Gravitationswellen wie etwa Supernova-Explosionen.

Bisher erwartete man den ersten direkten Nachweis einer Gravitationswelle von den Detektoren am Erdboden und im All. Nach der überraschenden Viel-

zahl neuer Millisekunden-Pulsare, die mit Hilfe von Fermi entdeckt wurden, kommt ihnen nun womöglich die Pulsar-Timing-Methode zuvor. Doch selbst in diesem Fall werden die anderen Nachweisverfahren keineswegs obsolet, sondern bleiben die Voraussetzung für eine alle Frequenzbänder umfassende Gravitationswellen-Astronomie der fernen Zukunft.

**Georg Wolschin** lehrt als Privatdozent an der Universität Heidelberg theoretische Physik.

## IMMUNOLOGIE

# Abwehrzellen mit Schaltgetriebe und Stemmeisen

Die Torwächter des Immunsystems eilen nach Feindberührung zu den Lymphknoten, um die Körperabwehr zu alarmieren. Unterwegs passen sie nach jüngsten Erkenntnissen die Übersetzung ihres Motors dem Untergrund an und stemmen winzige Poren in Gefäßwänden auf.

Von Thorsten Braun

Die dendritischen Zellen stehen an vorderster Front der menschlichen Immunabwehr. Sie sitzen in großer Zahl auf dem Epithelgewebe, das alle äußeren und inneren Oberflächen des menschlichen Körpers bedeckt, und warten dort auf Eindringlinge. Sobald feindliche Mikroben in ihre Nähe kommen, verschlucken sie diese und begeben sich auf

Wanderschaft. Über die Lymphgefäße gelangen die amöbenartigen Abwehrzellen so schließlich in die Lymphknoten. Dort präsentieren sie die Bestandteile des Eindringlings wie ein Fahndungsfoto und aktivieren dadurch so genannte T-Lymphozyten für einen Angriff auf die fremden Keime.

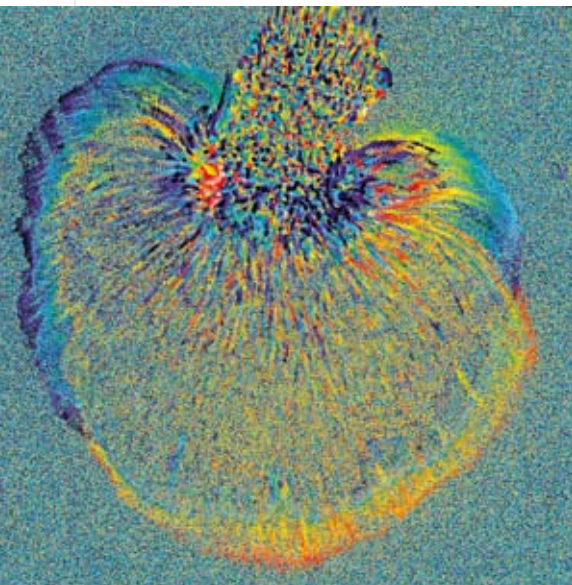
Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts (MPI) für Biochemie in Martinsried bei München haben nun im Detail untersucht, wie sich die dendritischen Zellen fortbewegen und Zugang zu den Lymphgefäßen verschaffen. Dazu brauchen die Immunwächter zunächst einmal eine Art Motor für den Antrieb.

Diese Aufgabe übernimmt, wie man schon länger weiß, das Zytoskelett: ein die Zelle durchspannendes Gespinnst aus Ketten des Proteins Aktin. »Einzelne Aktinmoleküle werden am hinteren Ende der Ketten abgebaut und vorne wieder angefügt«, sagt Michael Sixt, der die For-

schungsgruppe Leukozyten-Migration am Martinsrieder MPI leitet. Dadurch bildet die Zelle fingerartige Ausstülpungen.

Doch diese Verformung allein reicht noch nicht aus für die Fortbewegung. Sixt: »Wie bei einem Auto muss die Energie des zellulären Motors auf die Umgebung übertragen werden.« Dazu dienen spezielle Zellanker auf der Oberfläche dendritischer Zellen. Diese gleichfalls schon länger bekannten Integrine durchspannen die Zellmembran und sind mit dem Zytoskelett über mehrere Kuppelungsproteine verbunden. Auf der Außenseite treten sie mit dem umliegenden Gewebe in Kontakt. Von dessen Beschaffenheit hängt es ab, wie gut sie dabei Halt finden. »Je eiweißhaltiger der Untergrund ist, desto besser haften die Integrine«, sagt Sixt. »Sie können aber auch wie die Räder eines Autos durchdrehen.«

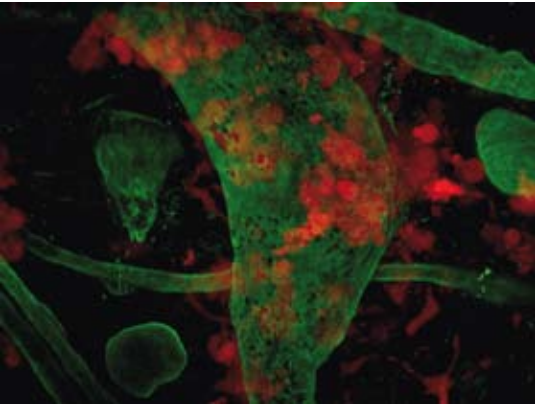
Um diesen Vorgang genauer zu erkunden, unternahmen die Max-Planck-Forscher Versuche mit aus Mäusen isolierten dendritischen Zellen. In deren Zytoskelett bauten sie mit gentechnischen Methoden einen Fluoreszenzfarbstoff ein, um das Geschehen visuell verfolgen zu können. Anschließend setzten Sixt und seine Mitarbeiter die Zellen in Glasschälchen auf verschiedene Untergrundmaterialien und



MICHAEL SIXT, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOCHEMIE

**Immunzelle bei der Wanderung: Die farbig markierten Strukturen zeigen das Zellskelett – ein Netz aus Aktinfasern – zu verschiedenen Zeiten und machen so sichtbar, wie sich eine Ausstülpung von oben nach unten ausdehnt.**





MICHAEL SIXT, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOCHEMIE

**Immunzellen dringen in ein Lymphgefäß ein. Fluoreszenzfarbstoffe lassen die Gefäßwände grün und die Abwehrzellen rot leuchten.**

dass es unabhängig von der Beschaffenheit der Unterlage immer gleich blieb (*Nature Cell Biology*, Bd. 11, S. 1438). »Die Zelle ist in der Lage, sich rutschigem Untergrund anzupassen, indem sie einfach die Geschwindigkeit erhöht, mit der neue Aktinmoleküle an die Vorderseite des Zytoskeletts angebaut werden«, erklärt Sixt. »Die Integrine rutschen zwar nach hinten weg, dafür verlagert sich das Zytoskelett schneller nach vorne.« Der Motor dreht also auf höheren Touren. Allerdings hat dies seinen Preis, weil mehr Energie verbraucht wird.

Auch lokale Unterschiede in der Bodenhaftung kann eine Zelle ausgleichen. Befindet sie sich mit einer Hälfte auf rutschigem und mit der anderen auf griffigem Untergrund, schaltet das Zytoskelett nur auf der Seite mit der schlechten Haftung in den höheren Gang.

Noch kompliziertere Bedingungen, so Sixt, müssten dendritische Zellen bei der

Wanderung im Körper meistern. Meistens stünden nur wenige Stellen ihrer Oberfläche in Kontakt mit den dünnen Kollagenfasern des Bindegewebes, alle anderen Teile ihrer Membranhülle seien von interzellulärer Flüssigkeit umgeben. »Wahrscheinlich gelingt es der Zelle nur unter großem Energieaufwand, nicht wegzurutschen und ihre hohe Geschwindigkeit ständig beizubehalten«, spekuliert der Wissenschaftler. Damit sie im komplexen Kollagengerüst nicht vom Weg abkommt, setzen die Lymphgefäße Lockstoffe frei, die ihr die Richtung weisen.

Am Ziel schließlich wartet die nächste Herausforderung: das Eindringen in die Lymphgefäße. Diese haben zwei Wände – eine so genannte Basalmembran außen und eine Endothelschicht innen. Beide stellen für andere Zellen eine unüberwindliche Barriere dar. Um herauszufinden, wie die Immunwächter hindurchgelangen, entfernten Sixt und seine Kollegen von frisch explantierten Mäuseohren die oberste Hautschicht und legten so die darunter befindliche Dermis frei, die von zahlreichen Lymph- und Blutgefäßen durchflochten ist. In zwei aufeinander

beobachteten ihre Bewegung mit der so genannten TIRF-Mikroskopie (nach englisch *total internal reflection fluorescence*, interne Totalreflexionsfluoreszenz). Dabei beleuchtet man die Probe von unten in flachem Winkel mit einem Laserstrahl. Dieser wird vom Glas fast vollständig reflektiert; nur ein kleiner Teil dringt mit exponentiell abfallender Amplitude in die Zelle ein und regt in den obersten 100 Nanometern die Fluoreszenz an.

Als Sixt und seine Mitarbeiter auf diese Weise das Tempo der Zellen maßen, stellten sie zu ihrer Überraschung fest,

ANZEIGE

# Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.\*

Die täglichen Aufgaben im Beruf und privat stellen mit den Jahren wachsende Anforderungen an die Konzentration und Gehirnleistung. Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit kommt es darauf an, die Kraftwerke der Gehirnzellen zu aktivieren. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion in den Gehirnzellen. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.



**Tebonin®**

**\* Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.**

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe**



## Tebonin® stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.\*

Ginkgo-Spezialextrakt  
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



Mit der Natur.  
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG

[www.tebonin.de](http://www.tebonin.de)

folgenden Versuchen markierten die Forscher die Basalmembran und die Endothelschicht der Lymphgefäße jeweils mit spezifischen Antikörpern, die an einen grün fluoreszierenden Farbstoff gekoppelt waren. Anschließend gaben sie auf die derart präparierten Ohren dendritische Zellen, in die sie vorher einen rot fluoreszierenden Farbstoff eingebaut hatten.

Mit Hilfe der konfokalen Fluoreszenzmikroskopie machten Sixt und seine Mitarbeiter dann das Hindurchschlüpfen der Zellen in die Lymphgefäße sichtbar. Ein Laserstrahl regte dabei die Farbstoffe des Präparats zum Leuchten an, und eine Lochblende ließ jeweils nur das Fluoreszenzlicht einer einzigen Schärfeebene in das Mikroskop fallen. Nachdem das Team um Sixt so die Dermis Schicht für Schicht gescannt hatte, konnte es durch Zusammenfügen der Einzelaufnahmen im Computer dreidimensionale Bilder erstellen, die im Detail zeigten, wie die Immunwächter die Wände der Lymphgefäße durchdringen (*Journal of Experimental Medicine*, Bd. 206, S. 2925).

Demnach weist die Basalmembran kleine Löcher auf, an die sich die dendri-

tische Zelle mit ihren Fortsätzen herantasten kann. »Sie schiebt sozusagen einen Fuß in die Tür«, beschreibt Sixt das Geschehen. »Dann dehnt sie die Öffnung in der Basalmembran immer weiter aus und zwingt ihren Zellkörper nach und nach hindurch.« Es handle sich dabei, so der Forscher, um einen rein mechanischen Vorgang: Die Zellen benötigen keine Hilfsproteine oder andere Substanzen, um die Gefäßwand aufzulösen oder Poren zu erweitern.

Nach der äußeren Basalmembran gilt es noch, die innere Endothelschicht zu durchdringen. Diese ist mit zahlreichen Ventilen ausgestattet, die wie Falltüren funktionieren. Sobald die dendritische Zelle sie weit genug aufgedrückt hat, kann sie hindurchschlüpfen und so in das Gefäß gelangen. Dort angekommen, wird sie zum Lymphknoten gespült.

Diese neuen Erkenntnisse haben weit reichende Bedeutung, weil sie vermutlich nicht nur für dendritische Zellen gelten. Diese können sich nämlich nicht als einzige gezielt im Körper bewegen. Auch neu entstandene Zellen im Embryo wandern zu ihrem Bestimmungsort, wo sie

Organe bilden. Desgleichen eilen bei einer Verletzung Bindegewebszellen zur Wunde, um sie rasch zu verschließen. Und leider können auch Krebszellen aus dem Primärtumor ausbrechen, um an anderen Stellen Tochtergeschwülste zu bilden. Wenn sie sich in Lymphknoten ansiedeln, reagieren sie auf die gleichen Lockstoffe wie die dendritischen Zellen.

Das macht es schwierig, gezielt Therapieansätze zu entwickeln, um diese Art der Metastasierung zu verhindern. »Sehr wahrscheinlich wird gleichzeitig die Wanderung von dendritischen Zellen unterdrückt, und die Gefahr von Infektionen steigt«, sagt Klemens Rottner, Leiter der Arbeitsgruppe Zytoskelett-Dynamik am Helmholtz-Zentrum für Infektionsforschung in Braunschweig. »Aber je genauer bekannt ist, wie Zellen es schaffen, sich zu bewegen, desto größer ist die Chance, in solche Prozesse selektiv einzugreifen.« Die Grundlagenforschung von Sixt und seinem Team, findet Rottner, sei ein wichtiger Schritt in diese Richtung.

**Thorsten Braun** ist freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

## POLARFORSCHUNG

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

# Invasion der Drohnen

Zur Erkundung der unwirtlichen Polargebiete setzen Wissenschaftler zunehmend unbemannte Flugzeuge ein.

Von Davide Castelvocchi

Eine multinationale Armada von robotischen Fluggeräten erobert heimlich, still und leise die irdischen Polarregionen. Einige werden per Katapult von Schiffen aus abgeschossen, andere heben von fahrenden Lastwagen ab, und manche starten auch auf altmodische Weise von vereisten Landepisten. Ihre Palette reicht von simplen ferngesteuerten Propellermaschinen, wie man sie in Spielwarenläden findet, bis zu hoch entwickelten Düsenjets. Alle tragen sie eine spezielle Ausrüstung – nicht etwa Waffen, sondern wissenschaftliche Instrumente. Dazu gehören Radargeräte oder deren Laser-Gegenstücke namens Lidar sowie Infrarotsensoren, Apparate für chemische Luftanalysen und Kameras.

Unbemannte Drohnen machten letzthin Schlagzeilen in den Bergen Afghanistans, doch ihr Potenzial hat sich auch unter Wissenschaftlern herumgesprochen, die nach relativ preiswerten, ungefährlichen Wegen zur Erkundung der lebensfeindlichen Eiswüsten an den Polkappen unseres Planeten suchen. Immer mehr Polarforscher gehen dazu über, »unbemannte Aerosysteme« (UAS) für eine Vielzahl von Aufgaben einzusetzen – vom Überwachen der Ozonschicht bis zum Zählen von Seehundpopulationen.

Dank geringer Kosten und technischer Fortschritte haben sich solche Fluggeräte in den polaren Lufträumen »in jüngster Zeit geradezu explosionsartig vermehrt«, berichtet die Umweltforscherin Elizabeth Weatherhead von der Uni-

versity of Colorado in Boulder. Letztes Jahr zählte sie auf einer einzigen norwegischen Insel mindestens sechs unabhängige Forscherteams, die damit operierten.

Ihre eigene Gruppe hat eine umgerüstete Aufklärungsdrohne bei zwei verschiedenen Grönlandmissionen benutzt. Im einen Fall zählte das Team Populationen von Hundsrobben; im anderen kartierte es Schmelzwassertümpel, um herauszufinden, »warum die Ränder des grönländischen Eisschildes so schnell abschmelzen«, wie Weatherhead erläutert. Mit ihrem kleinen UAS konnte sie in wenigen Tagen zwei solche Wasserflächen vermessen. »Zu Fuß hätten wir Wochen für einen einzigen See gebraucht«, erzählt sie.

Viele der Flugzeuge kosten mehrere Millionen Dollar, sind also nicht gerade Wegwerfware. Aber wenn eines abstürzt, verliert zumindest kein Mensch sein Leben; denn bei Havarien in entlegenen Polarregionen »besteht oft nicht die Möglichkeit für einen Rettungseinsatz«, betont Weatherhead.

Einige Teams haben gelernt, ihre eigenen Flugzeuge zu entwerfen und zu bauen. Richard Hale vom Zentrum für die

Unbemannte Drohnen wie die »Meridian«, hier bei einem Testflug, sind für Polarforscher eine preiswerte und weniger riskante Alternative zu gewöhnlichen Flugzeugen.

Fernerkundung der Eisschilde an der University of Kansas in Lawrence war in diesem Südsommer auf der Antarktis, um die »Meridian« zu testen – eine unbemannte Einpropellermaschine, die ein Team von Studenten an seiner Universität gebaut hat. Bei einem Gewicht von einer halben Tonne und einer Flügelspannweite von acht Metern kann sie mit einer Tankfüllung 1750 Kilometer weit fliegen. Sie soll die Eismassen und deren Untergrund per Radar kartieren.

Kleine UAS sind sehr verbrauchsarm. Das ist an einem Ort wie der Antarktis besonders wichtig, weil jeglicher Treibstoff hier teuer eingeflogen werden muss. »Wir verbrennen nur ein Zwanzigstel der Menge eines normalen Flugzeugs«, sagte Hale im Januar bei einem Satellitentelefonat von der McMurdo-Station der National Science Foundation der USA. Viele der Drohnen fliegen per Au-

topilot vorprogrammierte Routen und werden nur bei Start und Landung ferngesteuert.

Auch im Zeitalter einer flächendeckenden Satellitenüberwachung sind Flugzeuge durchaus noch nötig. Sie kön-

nen zum Beispiel »Eispanzer mit viel höherer Auflösung vermessen, so dass Klimamodellierer anhand dieser Daten wirklich verstehen, welche Gefahren uns drohen«, meint Atmosphärenforscher David Braaten von der University of

UNIVERSITY OF KANSAS SCHOOL OF ENGINEERING, AEROSPACE ENGINEERING, FLIGHT TEST TEAM

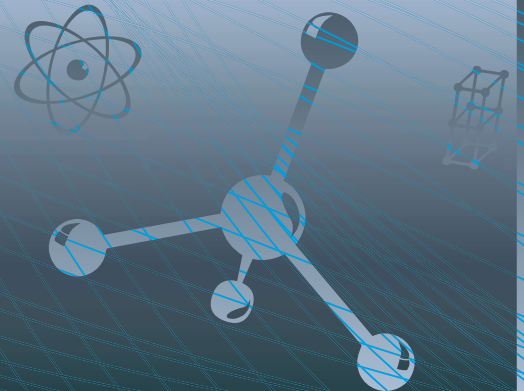


# www.spektrum.de/aboplus

## Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft

Treue **Spektrum der Wissenschaft**-Leser profitieren nicht nur von besonders günstigen Abo-Konditionen, exklusiv auf sie warten unter [www.spektrum.de/aboplus](http://www.spektrum.de/aboplus) auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote:

- alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- jeden Monat ein neuer Bonusartikel – und das Archiv mit allen Bonusartikeln
- ausgewählte Ausgaben anderer Zeitschriftentitel aus dem Programm der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH als kostenlose Downloads
- ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält
- das **spektrumdirekt**-Premiumabo sowie das »Produkt des Monats« – jeweils zum exklusiven Vorteilspreis





Kansas. Er gehörte einem Team an, das im vergangenen Jahr das antarktische Gamburzew-Gebirge kartierte: eine Bergkette von der Größe der Alpen, die unter einer kilometerdicken Eisschicht verborgen ist. Die Vermessung erfolgte mit einem Radargerät, das an einer gewöhnlichen, bemannten Zweipropellermaschine angebracht war. Hätte damals ein UAS zur Verfügung gestanden, wäre das Projekt wohl »um einiges billiger« gewesen, vermutet Braaten.

Eine Drohne mit entsprechender Reichweite könnte die Antarktis sogar von Chile aus erkunden. Vielleicht wird

das in wenigen Jahren schon Realität. Vergangenen Oktober hat die NASA die ersten Testflüge mit ihrem neu erworbenen »RQ-4 Global Hawk« der Firma Northrop Grumman durchgeführt. Diese weltweit größte Drohne kann mit ihrem Düsentriebwerk nicht nur mehr als 30 Stunden am Stück fliegen, sondern auch Höhen von über 20 Kilometern erreichen und so den rauen Wetterbedingungen an den Polen entfliehen. Theoretisch wäre mit einer Tankfüllung ein Flug von einem Ende der Welt zum anderen möglich.

Die NASA hat im März erste wissenschaftliche Projekte mit der Drohne ge-

startet. Laut Paul Newman, Atmosphärenforscher bei der Behörde, geht es zunächst darum, die Satellitenmessungen der Ozonschicht zu kalibrieren. »Wir haben aber auch eine Reihe von Instrumenten, die Aerosole messen«, fügt Newman an. »Damit wollen wir Informationen über den Transport von Luftschadstoffen und Schwebeteilchen über den Pazifik hinweg gewinnen«. Keine Frage also: Fliegende Roboter für die Wissenschaft sind wirklich dabei, abzuheben.

**Davide Castelvecchi** ist Redakteur bei »Scientific American«.

## EXOPLANETEN

# Kosmische Kohlekugeln

Ob terrestrische Planeten um ferne Sonnen wirklich der Erde gleichen, scheint zunehmend fraglich. Vielleicht ähneln sie eher riesigen Brocken aus Koks, Diamant und Teer.

Von George Musser

Die Astronomie liefert Einblicke in ferne, exotische Welten, doch was viele Himmelforscher in den Weiten des Alls vor allem zu finden hoffen, ist das Vertraute: eine Schwester der Erde, ein bewohnbarer Ort im lebensfeindlichen Kosmos. Die vor einem Jahr gestartete Raumsonde Kepler bietet die besten Chancen dazu. Sie könnte endlich erdähnliche Planeten um sonnenähnliche Sterne aufspüren – im Unterschied zu den Gasriesen, die bisher hauptsächlich entdeckt wurden. Viele glauben an einen Erfolg noch vor Ende dieses Jahres. Doch wenn es wie bei den Riesenplaneten geht, von denen viele ganz anders sind als von den Astronomen erwartet, könnten auch jene fernen Geschwister der Erde nicht unbedingt so vertraut aussehen wie erhofft.

Theoretikern ist in den vergangenen Jahren aufgegangen, dass Exoplaneten mit der Masse unseres Globus diesem nicht unbedingt gleichen müssen. Es könnten auch gigantische Wassertropfen, Stickstoffbälle oder Eisenklumpen sein. Nennen Sie ein geläufiges chemisches Element oder eine einfache Verbindung, und die Wahrscheinlichkeit ist groß, dass irgendjemand eine hypothetische ferne

Erde beschrieben hat, die hauptsächlich daraus besteht.

Eine wichtige Rolle für die Beschaffenheit erdähnlicher Planeten spielt das Verhältnis von Sauerstoff zu Kohlenstoff. Nach Wasserstoff und Helium sind das die beiden häufigsten Elemente im Universum. In einem werdenden Sonnensystem verbinden sie sich zu Kohlenmonoxid. Das Element, das übrig bleibt, dominiert schließlich die Chemie erdähnlicher Planeten.

In unserem Sonnensystem ist das der Sauerstoff. Auch wenn es uns so vorkommt, als ob Kohlenstoff als Basis des Lebens auf der Erde die Hauptrolle spiele, ist sein Mengenanteil gering. Die terrestrischen Planeten bestehen zum großen Teil aus sauerstoffreichen Silikaten. Im äußeren Sonnensystem liegt eine andere sauerstoffreiche Verbindung im Überschuss vor: Wasser.

## Die Exoten sind wir selbst

Wodurch ist der Kohlenstoff ins Hintertreffen geraten? Das haben Jade Bond, Dante Lauretta und David O'Brien von der University of Arizona und dem Planetary Science Institute (PSI) in Tucson nun im Detail untersucht. Am Computer simulierten sie die räumliche Verteilung der chemischen Elemente bei der

ILLUSTRATION: LYNETTE COOK



**Erdähnliche Planeten um andere Sterne haben vermutlich in vielen Fällen eine Kruste aus Graphit statt Silikatgestein und einen Mantel aus Diamant.**

Bildung des Sonnensystems. Demnach lag Kohlenstoff in der protoplanetaren Scheibe in gasförmigem Zustand vor und wurde schließlich in die Weiten des Alls davongebblasen. Die junge Erde bekam zunächst gar nichts von ihm ab. Der Grundbaustein des irdischen Lebens muss später auf unseren Planeten gelangt sein – durch aufprallende Asteroiden und Kometen, die sich unter geeigneten Bedingungen für den Einbau dieses Elements gebildet hatten.

Bei umgekehrtem Kohlenstoff-Sauerstoff-Verhältnis sähe die Erde heute völlig anders aus. Wie schon 2005 Marc Kuch-

ner, damals an der University of Princeton (New Jersey), und Sara Seager, seinerzeit an der Carnegie Institution of Washington, dargelegt haben, würde sie nicht aus Silikaten bestehen, sondern aus Kohlenstoffverbindungen wie Siliziumkarbid und auch aus Kohlenstoff selbst in reiner, elementarer Form. Der läge nahe der Oberfläche als Graphit vor – und einige Kilometer tiefer wegen des hohen Drucks als Diamant. Wenn es Ozeane gäbe, enthielten sie statt Wasser vermutlich petroleumartige Kohlenwasserstoffe.

Die Milchstraße könnte voll von solchen bizarren Objekten sein. Nach einer Himmeldurchmusterung, die Bond zitiert, haben Sterne mit Planeten meist ein höheres Kohlenstoff-Sauerstoff-Verhältnis als die Sonne. Diejenigen mit dem höchsten Wert sollten den Simulationen ihres Teams zufolge Kohlenstoff-Planeten hervorbringen. Nach anderen Himmeldurchmusterungen unterscheidet sich die Sonne allerdings in nichts von durchschnittlichen Sternen ihrer Größenklasse.

Die Raumsonde Kepler dürfte diesen Widerspruch auflösen helfen; denn selbst das wenige, was sie an Informationen über Exoplaneten liefern kann – nämlich ihre Masse und ihren Radius –, reicht aus, um Rückschlüsse auf die Zusammensetzung dieser Objekte zu ziehen.

Kohlenstoff-Erden könnten am häufigsten in exotischen Systemen vorkommen – etwa als Begleiter von weißen Zwergen und Neutronensternen. Bereiche der Milchstraße, die wie ihr Zentrum besonders reich an schweren Elementen sind, haben generell ein höheres Kohlenstoff-Sauerstoff-Verhältnis. Da Sterne mit zunehmendem Alter des Universums immer mehr schwere Elemente erzeugen, wird sich die Waage schließlich überall zum Kohlenstoff hin neigen.

Diese astronomischen Entdeckungen verkehren zusammen mit anderen neuen Erkenntnissen unsere Sicht dessen, was im Kosmos normal und was ausgefallen ist. Der größte Teil der Milchstraße besteht aus unsichtbarer Dunkler Materie, die meisten Sterne sind schwächer und rötlicher als unsere Sonne, und nun scheinen sich auch die meisten anderen Erden im All als nicht besonders erdähnlich zu erweisen. Wenn also etwas von der Norm abweicht und die Bezeichnung exotisch verdient, sind wir das selbst.

**George Musser** ist Redakteur bei »Scientific American«.

## Springers Einwürfe

### Es grünt nicht grün ...

... wenn Taten im Verborgenen blüh'n.

**Beim Bananenkauf im Supermarkt** habe ich die Wahl zwischen zwei unterschiedlich beschrifteten Sorten: Chiquita und Bio. Über Chiquita, vormals United Fruit, las ich öfter politisch Nachteiliges; von dem alternativen Bioprodukt weiß ich nur, dass es mehr kostet und rasch schwarze Flecken bekommt. In der Regel wähle ich die Biobanane und lasse mich den politisch-ökologisch korrekten Kaufakt ein paar Cent kosten.

Bin ich deshalb ein besserer Mensch? Immerhin, ich opfere ein bisschen Geld auf dem Altar des Umweltbewusstseins und hoffe außerdem, dass die teureren Biofrüchte unter halbwegs anständigen Arbeitsbedingungen geerntet wurden. Mein einsamer Kaufentschluss mag nicht viel ausmachen – aber wenn zahllose Konsumenten ebenso handeln, hat das schon Wirkung, denke ich.

Trotzdem: Zum besseren Menschen macht mich mein in bescheidenem Umfang »grünes« Verhalten leider nicht – eher im Gegenteil. Das haben jetzt die Marketingforscherin Nina Mazar und der Organisationspsychologe Chen-Bo Zhong von der University of Toronto (Kanada) nachgewiesen (»Psychological Science«, im Druck). Sie ließen ihre Probanden für 25 Dollar online einkaufen. Den einen präsentierten sie dabei einen üblichen Warenkorb, während sie die anderen unter mehrheitlich »grünen« Produkten wählen ließen. Gleich anschließend mussten die Teilnehmer Aufgaben lösen, die – ihnen unbewusst – ihr moralisches Verhalten testeten. Sie sollten einen Geldbetrag nach eigenem Gutdünken mit einem Unbekannten teilen sowie einen einfachen Wahrnehmungstest ausführen, bei dem für ein bestimmtes Ergebnis eine kleine finanzielle Belohnung winkte.

**Das deprimierende Ergebnis:** Wer soeben umweltfreundlich eingekauft hatte, neigte eher dazu, nur wenig von seinem Geld abzugeben und beim Wahrnehmungstest zum eigenen Vorteil zu mogeln. Wollten die »grünen« Einkäufer sich damit einen Ausgleich für den Erwerb der teuren Ökoprodukte verschaffen? Das wäre eine naheliegende Erklärung, doch in diesem Fall zieht sie nicht; denn die Tester hatten Energiespar- und Glühlampen, Biojogurt und normalen Jogurt und so fort zu jeweils exakt gleichen Preisen angeboten.

Demnach scheint es, als hätte der Mensch unabhängig davon, was ein Kaufakt in Heller und Pfennig kostet, so etwas wie ein moralisches Budget, das er nicht überziehen mag. Mit dem Erwerb eines Ökoprodukts meinen wir ein gutes Werk zu tun. So stufen die Testpersonen in einer Vorbereitungsrunde solche Waren als moralisch höherwertig ein und neigten angesichts »grüner« Werbung verstärkt zu ihrem Kauf. Nur: Nach einem solchen »moralischen«, also selbstlosen Akt fühlen wir uns, wie die kanadischen Tests zeigen, eher legitimiert, zum Ausgleich unserem Egoismus freien Lauf zu lassen und uns für das hehre Opfer ziemlich schäbig schadlos zu halten.

Ähnliche Kompensationsmechanismen, welche die Entwicklung eines wünschenswerten Sozialverhaltens konterkarieren, gibt es vielfach. Wer auf vermeintlich nikotinarme Zigaretten umsteigt, raucht dafür mehr. Wer Energiesparlampen einschraubt, lässt dann gern das Licht länger brennen. Offenbar ist es nicht einfach, ein erwünschtes Verhalten durch rein individuell-moralische Anreize herbeizuführen. Oft bleibt es bei einem billigen Ablasshandel, der nur das Gewissen beruhigt, ohne wirklich viel zu ändern.

Mit meinen Biobananen im Einkaufswagen ignoriere ich souverän alle Fair-Trade-Angebote und greife, bis ich an der Kasse bin, nur noch nach Dutzendware. Einmal ist genug, oder wie es in einem gängigen Werbeslogan heißt: Ich bin doch nicht blöd.



Michael Springer

# Leben im MULTIVERSUM

Nach manchen kosmologischen Theorien ist unser Universum nicht das einzige. Könnte auch in einem Paralleluniversum mit anderen Naturgesetzen Leben entstehen?

## In Kürze

- ▶ Aus dem primordialen Vakuum könnten neben unserem Universum **viele andere Welten** – mit jeweils eigenen physikalischen Gesetzen – hervorgehen.
- ▶ Nach neuen Überlegungen ist unser Universum nicht so »fein abgestimmt« auf **das Ermöglichten intelligenten Lebens** wie früher angenommen.
- ▶ Folglich sollten auch Universen existieren, die **komplexe Strukturen** und vielleicht sogar **exotische Organismen** enthalten.

Von Alejandro Jenkins und Gilad Perez

**D**er Actionheld eines typischen Hollywoodstreifens lebt extrem gefährlich. Immer wieder schießen Scharen von Gangstern aus allen Rohren auf ihn und verfehlen nur um Haaresbreite ihr Ziel. Vor dem Feuerball eines explodierenden Autos entkommt er mit knapper Not durch einen halbschweren Sprung. Als der Bösewicht ihm schon das Messer an die Kehle setzt, retten ihn Freunde in letzter Sekunde. Wäre auch nur eines dieser Ereignisse ein klein wenig anders verlaufen – unser Held hätte das Happy End nicht erlebt. Doch obwohl wir den Film zum ersten Mal sehen, wissen wir, dass er davonkommen wird.

In mancher Hinsicht gleicht die Geschichte unseres Universums dem Actionfilm. Mehrere Physiker meinen, schon die kleinste Änderung eines einzigen physikalischen Gesetzes

hätte die normale Entwicklung des Universums derart empfindlich gestört, dass es uns gar nicht gäbe. Wäre zum Beispiel die starke Kraft, welche die Atomkerne zusammenhält, nur ein wenig stärker oder schwächer, so hätten die Sterne nur wenig Kohlenstoff und andere Elemente gebildet, die offenbar nötig sind, damit Planeten entstehen – von Leben ganz zu schweigen. Wäre das Proton nur 0,2 Prozent schwerer, so zerfiel der gesamte uranfängliche Wasserstoff fast sofort zu Neutronen, und nie wären Atome entstanden. Die Liste ist lang.

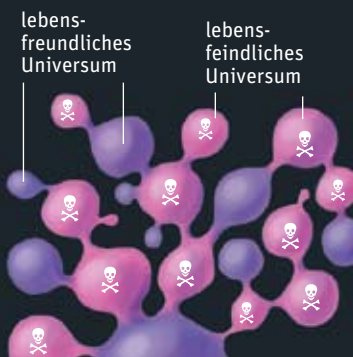
Anscheinend sind die physikalischen Gesetze – insbesondere die darin enthaltenen Naturkonstanten für die Stärke der fundamentalen Kräfte – fein darauf abgestimmt, unsere Existenz zu ermöglichen. An Stelle einer übernatürlichen Erklärung, die per definitionem den Rahmen der Wissenschaft sprengen würde, stellten Physiker und Kosmologen in den 1970er Jahren die Hypothese auf, un-





## DAS MULTIVERSUM

Alternative Universen sind heute ein seriöses Forschungsfeld. Gemäß der vorherrschenden kosmologischen Theorie entstand unser Universum durch Inflation – exponentielle Expansion – einer winzigen Region im uranfänglichen Vakuum. Dieses Vakuum vermag unentwegt weitere Universen hervorzubringen. Jedes Universum gehorcht eigenen Naturgesetzen; manche ermöglichen Leben, andere nicht.



ser Universum sei nur eines von vielen, in denen jeweils eigene Gesetze herrschen. Nach dem »anthropischen Prinzip« bewohnen wir just dasjenige Universum, dessen Bedingungen zufällig Leben ermöglichen.

Erstaunlicherweise besagt die seit den 1980er Jahren dominierende Theorie der modernen Kosmologie, dass es solche Paralleluniversen wirklich gibt: Aus dem primordialen Vakuum entspringt unentwegt eine Vielzahl von Universen, jedes mit seinem eigenen Urknall. Unser All ist demnach nur eine von vielen Blasen innerhalb eines umfassenden Multiversums. In fast all diesen Universen erlauben die physikalischen Gesetze wahrscheinlich weder die Bildung von Materie in unserem Sinn noch von Galaxien, Sternen, Planeten und Leben. Nur wegen der überwältigenden Anzahl von Möglichkeiten hatte die Natur eine Chance, einmal die »richtige« Kombination von Gesetzen zu treffen.

Doch wie wir kürzlich entdeckt haben, müssten einige dieser anderen Universen – sofern sie überhaupt existieren – gar nicht so unwirtlich sein. Wir haben Beispiele für alternative Werte der fundamentalen Konstanten und somit für abgewandelte physikalische Gesetze gefunden, die zu sehr interessanten Welten und vielleicht sogar zu Leben führen können. Die Grundidee dabei ist: Man ver-

ändert einen Aspekt der Naturgesetze und passt andere Aspekte entsprechend an.

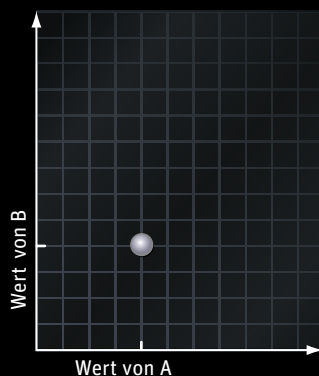
Allerdings ignoriert unsere Arbeit das größte Abstimmungsproblem der theoretischen Physik – den kleinen Wert der kosmologischen Konstante, dank dessen unser All weder Sekundenbruchteile nach dem Urknall sofort wieder kollabierte noch durch eine exponentiell beschleunigte Expansion zerrissen wurde. Dennoch werfen unsere Beispiele für alternative, möglicherweise bewohnbare Universen die interessante Frage auf, wie einzigartig unser eigenes Universum wohl sein mag.

## Leben ohne schwache Kraft

Um herauszufinden, ob eine gewisse Naturkonstante fein abgestimmt ist, behandeln die Forscher üblicherweise diese »Konstante« als einen variablen Parameter, während sie alle übrigen Konstanten festhalten. Auf Grundlage der entsprechend modifizierten Physik spielen die Forscher dann sozusagen den Film des Universums ab – mittels Berechnungen, Szenarien oder Computersimulationen –, um zu sehen, welche Katastrophe zuerst eintritt. Aber es gibt gar keinen Grund, immer nur einen einzigen Parameter zu variieren. Das ist, als würde man versuchen, ein Auto zu steuern, indem man nur entweder seine geografische Länge oder seine geografische Breite

## SUCHE NACH BEWOHNBAREN UNIVERSEN

**Viele Eigenschaften** der physikalischen Gesetze sind anscheinend fein abgestimmt: Schon geringfügige Veränderungen einer einzelnen Naturkonstante wirken sich katastrophal aus. Zum Beispiel entstehen dann keine Atome, oder die Materie wird so dünn im Raum verteilt, dass sie niemals zu Galaxien, Sternen und Planeten kondensieren kann. Doch manchmal führt das gleichzeitige Variieren von zwei Konstanten zu Wertekombinationen, welche die Bildung komplexer Strukturen oder gar intelligenter Lebensformen zulassen. Das Verändern von drei oder mehr Konstanten eröffnet noch mehr Möglichkeiten.



### 1 ZWEI KONSTANTEN

Physiker können die beobachteten Werte von zwei Konstanten A und B als Koordinaten eines bestimmten Punkts darstellen. Jeder Punkt in der Ebene repräsentiert ein anderes Wertepaar.



### 2 VARIIEREN EINER KONSTANTE

Das bloße Verändern der Konstante A – während B fest bleibt – entspricht einer horizontalen Verschiebung. Meist führen schon kleine Verschiebungen zu einer Katastrophe, und das Universum wird für Leben ungeeignet.



### 3 VARIIEREN DER ANDEREN KONSTANTE

Verändern der Konstante B bei festem A entspricht einer vertikalen Verschiebung. Auch das führt rasch zu einer Katastrophe.



### 4 VARIIEREN BEIDER KONSTANTEN

Das gleichzeitige Verändern von A und B – beispielsweise längs einer Diagonalen – kann zu neuen Wertekombinationen führen, die Leben ermöglichen. Außerhalb dieser Werte liegen vielleicht noch weitere lebensfreundliche Inseln.

ILLUSTRATIONEN DIESER DOPPELSEITE (OBEN NICHT ANDERS ANGELEBEND): LUCY READINGS/KANADA



verändert, aber niemals beide zugleich. Falls man nicht ausnahmsweise auf einem Gradnetz entlangfährt, wird man unweigerlich von der Straße abkommen. Besser ist es, mehrere Parameter gleichzeitig zu variieren.

Um alternative Regelkombinationen aufzuspüren, die dennoch komplexe, für Leben taugliche Strukturen zulassen, hat einer von uns (Perez) mit seinem Team nicht nur ein bisschen an den physikalischen Gesetzen herumgespielt, sondern eine der vier fundamentalen Naturkräfte komplett eliminiert.

Wie schon der Name sagt, gelten die vier Grundkräfte als unentbehrlich für jedes halbwegs respektable Universum. Ohne die starke Kernkraft, die Quarks zu Protonen und Neutronen verbindet und diese wiederum zu Atomkernen, gäbe es keine Materie, wie wir sie kennen. Ohne die elektromagnetische Kraft gäbe es kein Licht, keine Atome und keine chemischen Bindungen. Ohne Gravitation gäbe es keine Kraft, die Materie zu Galaxien, Sternen und Planeten zusammenballt.

Die vierte Grundkraft, die schwache Kernkraft, macht sich zwar im Alltag weniger bemerkbar, hat aber in der Geschichte unseres Universums eine wichtige Rolle gespielt. Unter anderem ermöglicht sie die Umwandlung von Neutronen in Protonen und umgekehrt. Nachdem sich in den ersten Augenblicken des Urknalls je drei Quarks zu Protonen oder Neutronen vereinigt hatten, konnten Vierergruppen von Protonen durch Kernfusion zu Helium-4-Kernen verschmelzen, die aus zwei Protonen und zwei Neutronen bestehen. Diese Urknall-Nukleosynthese fand statt, als es im wenige Sekunden alten Universum nicht mehr zu heiß für die Bildung von Baryonen war, aber noch heiß genug für deren Kernfusion. Dabei entstanden zunächst Wasserstoff und Helium, die später Sterne bildeten, in denen wiederum durch Kernfusion und andere Prozesse fast alle natürlich vorkommenden Elemente erzeugt wurden. Noch heute läuft die Fusion von vier Protonen zu Helium-4 im Inneren unserer Sonne ab und liefert den Großteil der Energie, die wir von ihr empfangen.

Könnte ein Universum ohne schwache Kernkraft eine komplexe Chemie oder gar Leben hervorbringen? Tatsächlich entdeckten Perez und sein Team im Jahr 2006 eine Gruppe physikalischer Gesetze, die nur auf den übrigen drei Naturkräften beruht und dennoch zu anscheinlichen Universen führt. Dafür musste freilich das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik, das alle Kräfte außer der Gravitation beschreibt, mehrfach modifiziert werden. Wie das Team zeigte, verhalten sich dann die übrigen drei Kräfte – sowie die Quarkmassen und andere Parameter – wie in unserer Welt.

Wir möchten betonen, dass wir dabei möglichst konservativ vorgehen, um die Berechnungen zu erleichtern. Es könnte durchaus viele andere Welten ohne schwache Kraft geben, die bewohnbar, aber von unserem Universum völlig verschieden sind.

Ohne schwache Kraft können Protonen nicht zu Helium fusionieren, denn dafür müssen sich zwei Protonen in Neutronen verwandeln. Doch für die Erzeugung der Elemente stünden andere Wege offen. Zum Beispiel enthält unser All ungeheuer viel mehr Materie als Antimaterie, und eine kleine Anpassung des Parameters, der diese Asymmetrie kontrolliert, reicht schon aus, damit die Urknall-Nukleosynthese eine gehörige Menge von Deuteriumkernen hinterlässt. Deuterium ist ein Wasserstoffisotop, dessen Kern zusätzlich zum üblichen Proton ein Neutron enthält. Die Sterne strahlen dann, indem aus der Fusion eines Protons und eines Deuteriumkerns ein Helium-3-Kern – zwei Protonen und ein Neutron – hervorgeht.

Solche »schwachlosen« (*weakless*) Sterne wären kälter und kleiner als in unserer Welt. Nach Computersimulationen von Adam Burrows von der Princeton University könnten sie rund sieben Milliarden Jahre lang – das entspricht dem Alter unserer Sonne – mit einigen Prozent der solaren Leistung strahlen.

### Wie entstehen schwere Elemente?

Auch schwachlose Sterne könnten durch Kernfusion weitere Elemente bis hin zu Eisen synthetisieren. Doch die typischen Reaktionen, die in unseren Sternen zu noch schwereren Elementen führen, wären blockiert, weil zu wenige Neutronen für die Bildung neuer Isotope zur Verfügung stünden. Höchstens könnten durch andere Mechanismen kleine Mengen schwerer Elemente bis zu Strontium entstehen.

In unserem Universum synthetisieren zwei Typen von Supernova-Explosionen schwere Elemente und verstreuen sie in den Weltraum. Der eine Supernova-Typ, der vom Kollaps extrem massereicher Sterne verursacht wird, kommt im schwachlosen Universum nicht vor, denn dafür ist die Emission von Neutrinos auf Grund der schwachen Wechselwirkung nötig; sie transportieren aus dem Sterninneren die Energie für die Stoßwelle, welche die Explosion verursacht. Hingegen ist der andere Supernova-Typ, bei dem die thermonukleare Explosion eines Sterns durch Akkretion – Einsammeln von Materie – statt durch Gravitationskollaps ausgelöst wird, auch ohne schwache Kraft möglich. Auf diese Weise könnten Elemente in den interstellaren Raum verteilt werden und dort zum Aufbau neuer Sterne und Planeten beitragen.

## ANDERE PARALLELUNIVERSEN

Physiker und Kosmologen – aber auch Sciencefiction-Autoren – meinen mit »Paralleluniversum« oft nicht das Gleiche. Es gibt mindestens drei Bedeutungen, die sich vom Multiversum dieses Artikels unterscheiden:

### HUBBLE-BLASE

Unser Universum ist wahrscheinlich viel größer als der Teil, den wir beobachten können – unsere Hubble-Blase. Wenn es unendlich groß ist, müssen unendlich viele separate Hubble-Blasen existieren, in deren Zentrum weit entlegene Beobachter sitzen. Einige könnten mit unserer Blase identisch sein; dort lesen Sie gerade genau diesen Artikel.



### BRANEN

Falls der Raum mehr als drei Dimensionen hat, könnte unser Universum eine von vielen dreidimensionalen Membranen oder »Branen« in einem multidimensionalen Raum sein. Diese Paralleluniversen können einander beeinflussen – und sogar kollidieren.



parallele Branen

### VIELWELTEN-HYPOTHESE

In der Quantenphysik kann dasselbe Objekt in mehreren Zuständen existieren – wie die berühmte Katze, die zugleich lebendig und tot ist –, und erst ein äußerer Einfluss erzwingt einen eindeutigen Zustand. Manche Physiker meinen, dass dennoch alle möglichen Zustände weiter bestehen, jeweils in einer separaten Verzweigung des Universums.



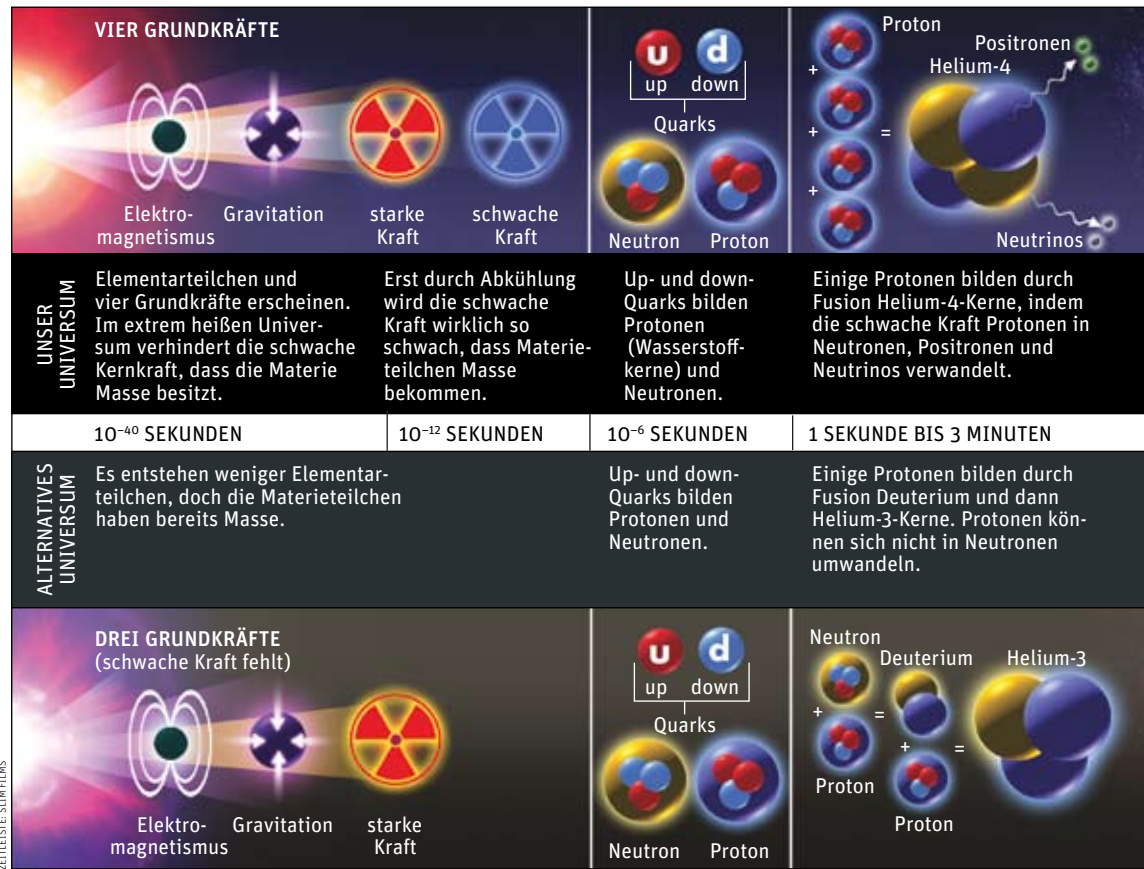
Schrödinger-Katze



**Ein Universum mit drei Grundkräften** statt der üblichen vier könnte überraschend vertraut anmuten. Dazu sind folgende Anpassungen nötig:

- Modifiziere mehrere Konstanten im Standardmodell der Teilchenphysik, um die schwache Kraft zu entfernen.
- Behalte die übrigen drei Kräfte unverändert bei.
- Verändere andere Parameter, um die Kernfusion in Sternen zu erleichtern.

Das Resultat ist eine Welt mit komplexen Strukturen, die ähnliche Lebensformen wie auf der Erde ermöglichen.



## IST DA DRAUSSEN JEMAND?

Aus dem primordialen Vakuum könnten unzählige Gruppen von Naturgesetzen hervorgehen. In den meisten Fällen ist ungewiss, ob diese Universen Leben zulassen.

### HELIUM DOMINIERT

Bestimmte Varianten eines Universums ohne schwache Kraft lassen nach dem Urknall praktisch keinen Wasserstoff übrig. Sterne enthalten fast nur Helium.

### MULTIQUARK

In unserem Universum bestehen Teilchen aus zwei oder drei Quarks, doch in anderen Welten könnten auch vier, fünf oder mehr Quarks Teilchen bilden.

### HÖHERE DIMENSIONEN

Gemäß der Stringtheorie hat der Raum zehn Dimensionen. In unserem Universum haben sich alle bis auf drei eng zusammengerollt und wurden unsichtbar. Was wäre, wenn vier oder mehr Dimensionen sichtbar blieben?

Da schwachlose Sterne relativ kalt sind, muss ein erdähnlicher Himmelskörper sich rund sechsmal näher an seiner Sonne aufhalten, um so warm zu bleiben wie unsere Erde. Für die Bewohner eines solchen Planeten sieht die Sonne viel größer aus. Auch sonst gibt es gewaltige Unterschiede. In unserer Welt werden Plattentektonik und Vulkanismus durch den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium im Erdinneren angetrieben. Ohne diese schweren Elemente hat eine schwachlose Erde wohl eine eher langweilige und strukturarme Geologie, sofern nicht Gravitationsprozesse wie auf einigen Saturn- und Jupitermonden als alternative Wärmequelle dienen.


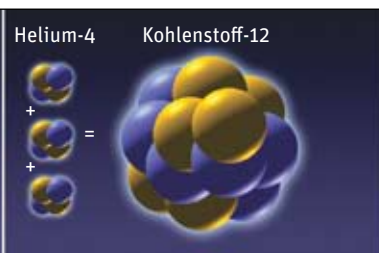



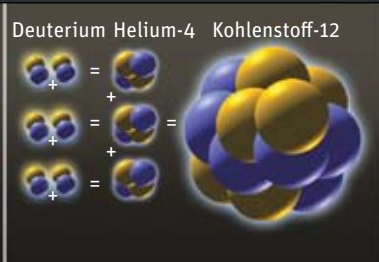
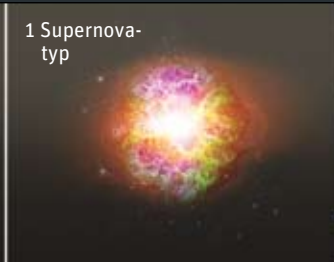

Andererseits ist die Chemie der unsrigen sehr ähnlich. Zwar endet das Periodensystem – bis auf winzige Spuren anderer Elemente – schon bei Eisen, aber das schließt die Evolution von Lebensformen nicht aus. Somit könnte auch ein Universum mit nur drei Grundkräften Leben zulassen.

Einen anderen Ansatz verfolgt einer von uns (Jenkins) mit seinen Mitarbeitern: Sie verändern das Standardmodell nicht so radikal wie beim schwachlosen Universum, drehen aber ebenfalls an mehreren Parametern gleichzeitig. Im Jahr 2008 untersuchte Jenkins, wie weit die Massen der drei leichtesten Quarks – up, down und strange genannt – variieren

dürfen, ohne die organische Chemie unmöglich zu machen. Eine Veränderung der Quarkmassen beeinflusst unweigerlich die Stabilität: Welche Baryonen und welche Atomkerne können überhaupt existieren, ohne gleich zu zerfallen? Das veränderte Angebot an Atomkernen beeinflusst wiederum die Chemie.

## Eine Chemie mit anderen Quarks

Vermutlich erfordert intelligentes Leben, wenn es nicht allzu sehr von uns verschieden sein soll, eine Form von organischer Chemie, das heißt Kohlenstoffverbindungen. Die chemischen Eigenschaften von Kohlenstoff folgen aus der Tatsache, dass sein Kern die elektrische Ladung 6 trägt, weshalb ein neutrales Kohlenstoffatom sechs Hüllenelektronen hat. Damit vermag das Element eine Unzahl komplexer Moleküle zu bilden. Sciencefiction-Autoren spekulieren zwar gern über Lebensformen auf der Basis von Silizium, einem Verwandten im Periodensystem, aber offensichtlich gibt es keine einigermaßen komplexen Siliziummoleküle. Für komplexe organische Moleküle müssen außerdem Elemente mit dem chemischen Verhalten von Wasserstoff (Ladung 1) und Sauerstoff (Ladung 8) vorhanden sein. Also musste Jenkins berechnen, ob Kerne mit Ladung 1, 6 oder 8 radio-

	<p>Helium-4 Kohlenstoff-12</p> 	<p>2 Supernova-typen</p> 	<p>bewohnbare Erde</p> 
<p>Die ersten Sterne entstehen, dann Galaxien und weitere Sterne. Die Sterne strahlen vor allem mittels Fusion von Wasserstoff zu Helium-4.</p>	<p>In den Sternen werden durch Fusion aus Helium-4 Kohlenstoff und weitere Elemente bis zu Eisen gebildet. Andere Prozesse erzeugen noch schwerere Elemente.</p>	<p>Manche Sterne werden durch Gravitationskollaps oder Einsammeln von Materie zu Supernovae, die schwere Elemente im Weltraum verstreuen.</p>	<p>Das Sonnensystem entsteht, darunter die Erde als drittnächster Planet der Sonne. Intelligente Wesen erscheinen und fragen sich, warum ihr Universum so beschaffen ist.</p>
<p>150 000 JAHRE BIS 7 MILLIARDEN JAHRE</p>	<p>7 MILLIARDEN JAHRE</p>	<p>8 MILLIARDEN JAHRE</p>	<p>13,7 MRD. JAHRE</p>
<p>Die ersten Sterne entstehen, dann Galaxien und weitere Sterne. Die Sterne brennen weniger heiß, vor allem durch Fusion von Deuterium und Wasserstoff zu Helium-3.</p>	<p>Die Sterne erzeugen durch Fusion von Deuterium zunächst Helium-4 und dann Kohlenstoff und Elemente bis zu Eisen. Schwerere Elemente fehlen.</p>	<p>Supernovae können nicht durch Gravitationskollaps entstehen, sondern nur durch Akkretion von Materie. Sie verstreuen Elemente in den Weltraum.</p>	<p>Das Sonnensystem entsteht. Eine bewohnbare Erde müsste die kühle Sonne innerhalb unserer Merkurbahn umkreisen. Intelligente Wesen erscheinen und fragen sich, warum ihr Universum so beschaffen ist.</p>
	<p>Deuterium Helium-4 Kohlenstoff-12</p> 	<p>1 Supernova-typ</p> 	<p>bewohnbarer Planet</p> 

aktiv zerfallen, bevor sie an chemischen Reaktionen teilnehmen können (siehe den Kasten auf der nächsten Seite).

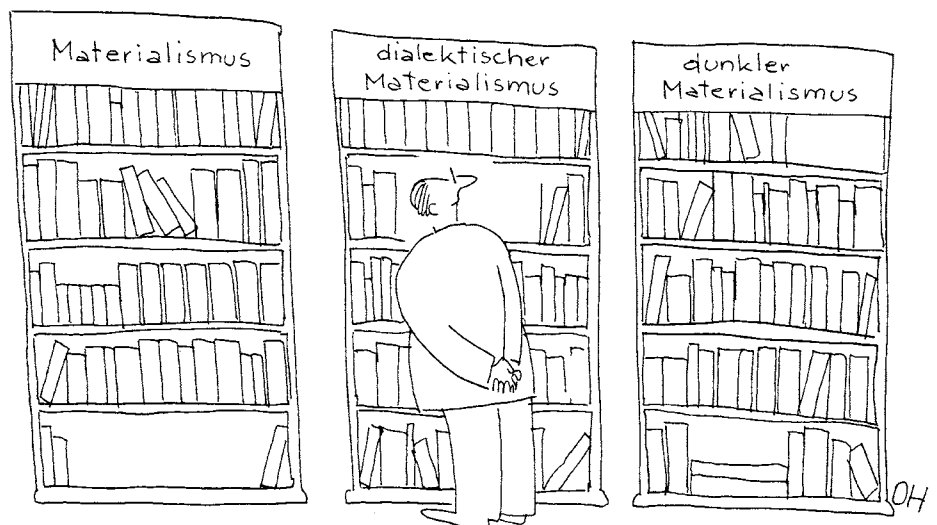
Die Stabilität eines Kerns hängt teilweise von seiner Masse ab und diese wiederum von den Massen der beteiligten Baryonen. Das Berechnen der Baryonen- und Kernmassen aus den Massen der Quarks ist schon in unserem Universum extrem kompliziert. Doch nachdem man die Intensität der Wechselwirkung zwischen den Quarks abgeändert hat, kann man aus den in unserer Welt gemessenen Baryonenmassen abschätzen, wie eine kleine Änderung der Quarkmassen die Massen der Kerne beeinflussen würde.

In unserer Welt ist das Neutron rund 0,1 Prozent schwerer als das Proton. Wenn man die Quarkmassen so verändert, dass das Neutron um zwei Prozent schwerer wird als das Proton, gibt es keine langlebige Form von Kohlenstoff oder Sauerstoff. Bei Quarkmassen, die das Proton schwerer machen als das Neutron, fängt der Wasserstoffkern – ein Proton – das Hüllenelektron ein und verwandelt sich in ein Neutron, so dass Wasserstoffatome nicht lange existieren. Aber Deuterium oder Tritium – das Isotop Wasserstoff-3 – sowie einige Formen von Sauerstoff und Kohlenstoff können dennoch stabil sein. Wie wir herausfanden, bleibt eine Form von Wasserstoff sta-

bil, solange das Proton nicht mehr als ein Prozent schwerer wird als das Neutron.






















Wenn Deuterium oder Tritium an die Stelle von Wasserstoff tritt, bestehen die Ozeane aus schwerem Wasser, das sich physikalisch und chemisch ein wenig von gewöhnlichem Wasser unterscheidet. Dennoch gibt es in solchen Welten anscheinend kein prinzipielles Hindernis für die Evolution organischen Lebens.

In unserer Welt ist das strange-Quark zu schwer, um an der Kernphysik teilzunehmen. Doch wenn seine Masse um einen Faktor von



SPIELE MIT SUBSTANZ

**Angenommen, wir verändern die Massen der leichten Quarks**, die stabile Baryonen – Neutronen und Protonen – bilden können. Würden daraus trotzdem Elemente entstehen, die Leben ermöglichen? Zumindest sollte das resultierende Universum stabile Kerne mit Ladung 1, 6 und 8 enthalten, damit sie sich ähnlich verhalten wie Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff. Hier werden einige Beispiele durchgespielt.

	leichte Quarks	stabile Baryonen	leichteste stabile Elemente	organische Chemie?
UNSER UNIVERSUM	up down  down-Quark ist doppelt so schwer wie up-Quark	Neutron Proton  Neutron ist 0,1 Prozent schwerer als Proton	Wasserstoff  Kohlenstoff-12 und andere Elemente sind stabil; Leben ist möglich	 Kohlenstoff-12
ALTERNATIVES UNIVERSUM 1	up down  down-Quark ist leichter	Neutron Proton  Proton ist 0,1 Prozent schwerer als Neutron	Deuterium-Atom  Kohlenstoff-14 und andere Elemente sind stabil; Leben ist möglich	 Kohlenstoff-14
ALTERNATIVES UNIVERSUM 2	strange up down  ein leichtes Quark mehr (strange); down-Quark ist ultraleicht	Neutron Sigma  einige Kerne mit Ladung 6 (mit kohlenstoffähnlicher Chemie) und andere Kerne sind stabil; Leben ist möglich	Sigma-Wasserstoff  einige Kerne mit Ladung 6 (mit kohlenstoffähnlicher Chemie) und andere Kerne sind stabil; Leben ist möglich	 Sigma-Kohlenstoff
ALTERNATIVES UNIVERSUM 3	up  nur ein leichtes Quark	Delta (Ladung 2) 	Delta-Helium 	 keine weiteren stabilen Elemente; kein Leben möglich
ALTERNATIVES UNIVERSUM 4	strange up down  drei ultraleichte Quarks mit ungefähr gleicher Masse	 acht unterschiedliche Typen	Sigma-Wasserstoff  Wasserstoff 	 keine stabile Form von Kohlenstoff oder Sauerstoff; kein Leben möglich

mehr als zehn reduziert wird, könnten Kerne nicht nur aus Protonen und Neutronen entstehen, sondern auch aus anderen Baryonen, die strange-Quarks enthalten.

Zum Beispiel identifizierte Jenkins ein Universum, in dem up- und strange-Quark ungefähr die gleiche Masse haben, während das down-Quark viel leichter ist. Dann bestehen Atomkerne nicht aus Protonen und Neutronen, sondern aus Neutronen und einem Baryon namens  $\Sigma^-$  (Sigma minus). Erstaunlicherweise enthält selbst ein derart fremdartiges Universum stabile Formen von Wasserstoff, Kohlenstoff und Sauerstoff und somit organische Verbindungen. Ob diese Elemente allerdings reichlich genug zur Verfügung stehen, um Leben zu ermöglichen, bleibt eine offene Frage.

Doch falls Leben entstehen kann, geht das sehr ähnlich vor sich wie in unserer Welt. Physiker in einem solchen Universum würden sich wohl wundern, warum up- und strange-Quarks fast identische Massen haben. Vielleicht kämen sie sogar auf eine anthropische Erklärung, die sich auf die Notwendigkeit organischer Chemie beriefe. Allerdings wissen wir, dass diese Erklärung nicht zutrifft, denn unsere Welt besitzt organische Chemie, obwohl die Massen von up- und strange-Quark ganz verschieden sind.

Andererseits gäbe es in Universen, in denen die drei leichten Quarks ungefähr gleiche Massen hätten, vermutlich keine organische Chemie: Jeder Kern mit mehr als zwei elektrischen Ladungseinheiten würde fast sofort zerfallen. Leider ist es sehr schwer, die Geschichte von Welten, deren physikalische Parameter von unseren abweichen, im Detail zu beschreiben. Diese Frage erfordert weitere Forschung.

**Ein Multiversum ohne Feinabstimmung?**

Manche theoretische Physiker sehen in der Feinabstimmung ein indirektes Indiz für das Multiversum. Ziehen unsere Befunde deshalb die Idee eines Multiversums in Zweifel? Das meinen wir nicht – aus zwei Gründen. Den ersten Grund liefern theoretische Folgerungen aus astronomischen Daten. Sie stützen die Hypothese, dass unser Universum als ein winziges Fleckchen Raumzeit begann – vielleicht so winzig wie ein milliardstel Proton –, das dann eine Phase rapiden, exponentiellen Wachstums durchmachte, die so genannte Inflation. Zwar besitzen die Kosmologen noch kein definitives Modell der Inflation, doch theoretisch können verschiedene Flecken unterschiedlich schnell expandieren und separate Blasen bilden, aus denen jeweils ein eigenes, durch spezielle Werte der Naturkonstanten



charakterisiertes Universum hervorgeht (siehe »Das selbstreproduzierende inflationäre Universum« von Andrei Linde, Spektrum der Wissenschaft 1/1995, S. 32). Der Raum zwischen den Blasenuniversen expandiert so rasch weiter, dass Nachrichten oder gar Reisen von einer Blase zu anderen – selbst mit Lichtgeschwindigkeit – ausgeschlossen sind.

Der zweite Grund für die Existenz des Multiversums ist, dass jedenfalls eine Größe extrem fein abgestimmt zu sein scheint: die kosmologische Konstante, welche die Energie des Vakuums angibt. Gemäß der Quantenphysik muss selbst der leere Raum Energie enthalten. Einsteins allgemeine Relativitätstheorie fordert, dass jede Energieform Gravitation ausübt. Wenn diese Energie positiv ist, verursacht sie eine exponentiell beschleunigte Expansion der Raumzeit. Ist sie negativ, kollabiert das Universum in einem großen Zermalmern (*big crunch*). Die Quantentheorie liefert eine – in positiver oder negativer Richtung – viel zu große kosmologische Konstante: Entweder expandiert der Raum so schnell, dass sich niemals Galaxien und andere Strukturen bilden können, oder das Universum kollabiert schon nach Sekundenbruchteilen wieder.

Um zu erklären, warum unser Universum diesen Katastrophen entgeht, muss eine andere Größe die Wirkung der kosmologischen Konstante kompensieren – und zwar mit ungenau präziser Feinabstimmung. Schon eine Abweichung in der hundertsten Stelle nach dem Komma würde zu einem völlig strukturalosen Universum führen.

Im Jahr 1987 schlug der Nobelpreisträger Steven Weinberg an der University of Texas in Austin eine anthropische Erklärung vor. Er berechnete eine mit der Existenz von Leben vereinbare Obergrenze für die kosmologische Konstante. Wäre ihr Wert größer, würde der Raum so rasch expandieren, dass keine für Leben unerlässlichen Strukturen entstehen könnten. In gewissem Sinn folgt der niedrige Wert aus unserer bloßen Existenz.

Wie Astronomen Ende der 1990er Jahre entdeckten, expandiert das Universum tatsächlich beschleunigt, angetrieben von einer mysteriösen »Dunklen Energie«. Aus den Beobachtungsdaten folgt, dass die kosmologische Konstante positiv und winzig klein ist – innerhalb der Grenzen von Weinbergs Vorhersage.

Somit ist die Konstante anscheinend außerordentlich fein abgestimmt. Außerdem scheinen die Methoden, die unsere Teams auf die schwache Kraft und die Quarkmassen angewandt haben, in diesem Fall zu versagen, denn es ist offenbar unmöglich, lebensfreundliche Universen zu finden, in denen die kosmologische Konstante wesentlich größer ist

als der beobachtete Wert. In einem Multiversum dürfte die übergroße Mehrzahl der Universen kosmologische Konstanten haben, die mit der Bildung irgendeiner Struktur unvereinbar sind.

Als Vergleich mit einer realen Situation – an Stelle eines Actionfilms – mögen unzählige Wanderer dienen, die in eine gebirgige Wüste aufbrechen. Die wenigen, die lebend durchkommen, erzählen von halsbrecherischen Klettertouren, Begegnungen mit Giftschlangen und anderen lebensgefährlichen Abenteuern, die samt und sonders extrem unwahrscheinlich anmuten.

Theoretische Argumente, die auf der Stringtheorie beruhen – einer spekulativen Erweiterung des Standardmodells, die alle Naturkräfte als Vibrationen mikroskopischer Fäden zu beschreiben sucht –, scheinen ein solches Szenario zu stützen. Demnach könnten die kosmologische Konstante und andere Parameter während der Inflation praktisch alle möglichen Werte annehmen; sie bildeten die so genannte Landschaft der Stringtheorie.

Unsere eigene Arbeit zieht allerdings den Nutzen des anthropischen Prinzips – außer für den Fall der kosmologischen Konstante – etwas in Zweifel. Zum Beispiel: Wenn in einem Universum ohne schwache Kraft wirklich Leben möglich ist, warum hat dann unsere Welt überhaupt eine schwache Kraft? In der Tat halten die Teilchenphysiker die schwache Kraft in unserem Universum in gewissem Sinn für nicht schwach genug. Ihr beobachteter Wert erscheint innerhalb des Standardmodells als unnatürlich stark. Die gängige Erklärung für dieses Rätsel erfordert die Existenz neuer Teilchen und Kräfte, welche die Physiker mit dem neuen Large Hadron Collider am CERN bei Genf zu entdecken hoffen.

Infolgedessen erwarten viele Theoretiker, dass in den meisten Universen die schwache Kraft so gering ist, dass sie praktisch gar nicht vorkommt. Dann stellt sich allerdings erst recht das Problem, warum wir nicht in einem Universum ohne schwache Kraft leben.

Letztlich vermag nur tieferes Wissen über die Entstehung von Universen solche Fragen zu beantworten. Insbesondere werden wir vielleicht noch fundamentalere physikalische Prinzipien entdecken, aus denen hervorgeht, dass die Natur bestimmte Gruppen von Gesetzen bevorzugt.

Direkte Indizien für die Existenz anderer Universen lassen sich wohl nie finden, und gewiss werden wir niemals eine dieser Welten – so es sie gibt – besuchen können. Doch wenn wir unsere eigene Wirklichkeit besser verstehen wollen, müssen wir mehr über entlegene Möglichkeiten nachdenken. ◀



**Alejandro Jenkins** (links) stammt aus Costa Rica und gehört der High Energy Physics Group der Florida State University an. Nach dem Studium an der Harvard University und am California Institute of Technology untersuchte er am Massachusetts Institute of Technology mit Bob Jaffe und Itamar Kimchi alternative Universen. **Gilad Perez** ist Theoretiker am Weizmann Institute of Science in Rehovot (Israel), wo er 2003 promovierte. Am Lawrence Berkeley National Lab erforschte er das Multiversum mit Roni Harnik von der Stanford University und Graham D. Kribs von der University of Oregon. Außerdem war er an den Universitäten Stony Brook, Boston und Harvard tätig.

**Busso, R., Polchinski, J.:** Die Landschaft der Stringtheorie. In: Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2005, S. 54–63.

**Harnik, R. et al.:** A Universe without Weak Interactions. In: Physical Review D 74(3), S. 035006-1–035006-15, 2006.

**Jaffe, R. L. et al.:** Quark Masses: An Environmental Impact Statement. In: Physical Review D 79(6), S. 065014-1–065014-33, 2009.

**Tegmark, M.:** Paralleluniversen. In: Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34–45.

**Weinberg, S.:** A Designer Universe? In: Conference on Cosmic Design of the American Association for the Advancement of Science. Washington, D. C., April 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1026687](http://www.spektrum.de/artikel/1026687).

## SKALIERUNGSFEHLER

### Zu Gast bei Liliputanern

Ein Floh ist bewundernswert – aber nicht für seine Sprunghöhe. Und Gulliver war nicht entfernt so verfressen, wie die Liliputaner glaubten.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

Von Norbert Treitz

Als der schiffbrüchige Gulliver auf der Insel Liliput strandet, binden ihn deren Bewohner sicherheitshalber mit Fäden am Boden fest, denn sie sind nur sechs Zoll groß, also etwa ein Zwölftel der Größe heutiger Menschen. Da sie ihren Gefangenen nicht verhungern lassen wollen, bringen sie ihm aus ihrer Küche einige Portionen. Wie viele?

Wir rechnen: Bei maßstäblicher Vergrößerung im Längenverhältnis 12 verhalten sich die Volumina wie  $12^3 = 1728$ . Der Mensch hat damit die etwa 1728-fache Masse eines Liliputaners. Also vermuten wir, dass Gulliver 1728 Liliput-Mahlzeiten essen sollte.

In dem satirischen Roman von Jonathan Swift, der entgegen seiner ursprünglichen Intention heute vorwiegend als Kinderbuch genutzt wird, beklagen in der Tat die Günstlinge des Kaisers, dass ihr Gast so viel verzehre wie 1724 Einheimische. Anscheinend wollte Friedrich Kottenkamp, der Übersetzer der deutschen Ausgabe von 1843, diesen kleinen Rechenfehler korrigieren – und schrieb 1824 statt 1724.

»Tatsächlich« – was immer dieses Adverb in der erfundenen Variante einer erfundenen Geschichte bedeuten mag – genügten Gulliver schon rund 270 Portionen, um satt zu werden. Wieso? Das soll nun etwas näher beleuchtet werden.

Wozu müssen wir überhaupt essen? »Damit du groß und stark wirst«, sagen die Eltern den Kindern. Aber das kann nur die halbe Wahrheit sein; denn Erwachsene essen nicht viel weniger als Heranwachsende. Wie wir alle wissen, wird der nahrhafte Teil der Nahrung mit Sauerstoff aus der Luft oxidiert und liefert dabei Energie, beim erwachsenen und wenig körperlich arbeitenden Menschen rund ein Watt pro Kilogramm Körpermasse.

Was machen wir mit der Energie? Der unfeine Ausdruck »kaltmachen« für »ermorden« macht es klar: Wir – Säugtiere und Vögel – halten einen großen Teil unseres Körpers, insbesondere unser ganzes Gehirn, auf einer optimalen Betriebstemperatur, bei der die Nervenleitung sehr schnell ist, aber die Proteine noch nicht degenerieren.

Als die Menschen noch keine Baumaschinen hatten, war die körperliche Arbeit gelegentlich ungefähr so groß wie

der Grundumsatz, und Schwerarbeiter mussten deutlich mehr »Sättigungsbeilage« essen. Die Physik verwendet das Wort »Arbeit« immer noch mit diesem Hintergrund.

Grob gesagt, essen und atmen wir also heutzutage hauptsächlich, um die Abkühlung auszugleichen. Bei gegebener Temperaturdifferenz ist diese im Wesentlichen proportional der Körperoberfläche, und die hängt bei gleicher Gestalt quadratisch von der Länge ab. Gulliver hat also die 144-fache Oberfläche eines Liliputaners. Demnach sollte er nur die 144-fache Essensportion und nicht die 1728-fache brauchen.

Aber auch dieses Argument wird von der Wirklichkeit nicht bestätigt. Lebewesen mit Temperaturregulation (sprich Säugtiere und Vögel) gibt es in sehr verschiedenen Größen: von weniger als zwei Gramm bei der Schweinsnasenfledermaus bis zu über 130 Tonnen beim Blauwal, also fast acht Zehnerpotenzen bei der Masse. Der tägliche Energieumsatz hängt außer von der Oberfläche noch von der Umgebungstemperatur und von Merkmalen wie der Behaarung, kompaktem oder feingliedrigem Körperbau und Kühl-

organen wie der Hundezunge oder den Elefantenhoren ab. All diese Einflüsse zusammen ergeben eine erstaunliche Regelmäßigkeit: Im doppelt-logarithmischen Diagramm (Kasten unten) liegen die Einträge recht gut auf einer Geraden mit der Steigung  $3/4$ . Demnach folgt die Leistung als Funktion der Masse einem Potenzgesetz mit dem Exponenten  $3/4$ .

Wenn die Abkühlung über die Oberfläche der allein entscheidende Effekt wäre, gäbe es die Steigung  $2/3$ , wie wir sie in einem ganz anderen Zusammenhang bei Keplers 3. Gesetz vorfinden (Spektrum der Wissenschaft 11/2006, S. 104). Wäre die Leistung gemäß der naiven Vermutung proportional zur Masse, so hätte die Gerade die Steigung 1, und es gäbe auch bei linearer Auftragung eine Gerade und nicht eine Parabel der einen oder anderen Sorte. Die Wahrheit liegt also zwischen diesen beiden Möglichkeiten, aber näher bei der mit der dominierenden Auskühlung.

Das zunächst empirisch gefundene Gesetz ist nach dem Schweizer Biologen Max Kleiber (1893–1976) benannt. Für die Größe dieses »allometrischen Exponenten« gibt es verschiedene theoretische Erklärungen, die vor allem die Fließeigenschaften des Bluts und die fraktale Geometrie des Adergeäfts heranziehen (Spektrum der Wissenschaft 9/1997, S. 25, und 7/2000, S. 72).

Dass es für gleichwarme Tiere (also Säugetiere und Vögel) eine Mindestgröße gibt, nämlich die von Kolibris und

Zwergspitzmäusen (Bild S. 34), ergibt sich daraus, dass der Anteil der Nahrungsaufnahme an der Zeit nicht 100 Prozent überschreiten kann. Tatsächlich sind die kleinsten Vögel, die Bienenelfen (eine Kolibriart), und die kleinsten Säugetiere, die Schweinsnasenfledermäuse, ungefähr gleich schwer, nämlich knapp zwei Gramm, und der Größe nach ziemlich wörtlich Däumlinge. Das kleinste Säugetier kann fliegen und der kleinste Vogel sogar in der Luft stehen!

Es war übrigens günstig, dass die Lilitupaner nur über sehr geringe Mengen an Wein verfügten. Hätten sie Gulliver vor dem Transport in ihre Hauptstadt von dem Schlaftrunk so viel verabreicht, wie ihren Vorstellungen entsprach, hätten sie ihn wahrscheinlich umgebracht. Das jedenfalls widerfährt großen Tieren wie Elefanten, wenn man Betäubungsmittel proportional zur Körpermasse und nicht zur Nahrungsaufnahme dosiert.

### Ameisenstark?

Es gibt viele Sprichwörter über Tiere, und fast alle sind falsch und beruhen auf schlechten Beobachtungen und noch schlechteren Deutungen. Man denke nur an die Vogel-Strauß-Politik, die lebensmüden Lemmings, die entweder nur bellenden oder nur beißenden Hunde, die genügsamen Kanarienvögel, die nicht landwirtschaftlich tätigen Vögel, die der Herr trotzdem ernährt, die stummen Fische, denen es im Wasser immer gut geht, und noch viele mehr.

Fabelerzähler und frühe Zoologen haben Charaktereigenschaften aus vermeintlichen Gesichtsausdrücken (der freundlich grinsende Delfin!) abgeleitet oder einfach aus der Luft gegriffen. Immerhin gibt es ein wirklich zutreffendes Sprichwort: Bei mangelnder Beleuchtung erscheinen einem Menschen alle Objekte grau, darunter auch Katzen.

Ameisen gelten als fleißig, neuerdings auch als sehr stark oder sogar – neben anderen Insekten oder Milben – als ernst gemeinte Antwort auf die Frage nach den stärksten Tieren. So können Exemplare einiger Arten tatsächlich das 50-Fache ihres Eigengewichts tragen. Das können wir Menschen bei Weitem nicht. Aber Büroklammern können noch viel mehr, wie Sie leicht ausprobieren können. Als Kinder konnten wir uns mühelos gegenseitig huckepack tragen, bei etwa gleichen Massen. Erwachsene müssen dazu schon sportlich trainiert sein.

Gleichwohl finden sich in sonst seriösen Büchern oder Fernsehsendungen – leider auch solchen für Kinder – Aussagen der Art »Wenn die Ameise so groß wie ein Mensch wäre, könnte sie einen Lastwagen tragen«. Heiner Geißler sagte einmal sehr treffend: »Wenn Eichhörnchen Pferde wären, könnte man die Bäume hinaufreiten.« Das leuchtet jedem ein, vermutlich auch den Autoren, die den Unsinn über die Ameisen verbreiten. Aber dieser Unsinn ist viel größer.

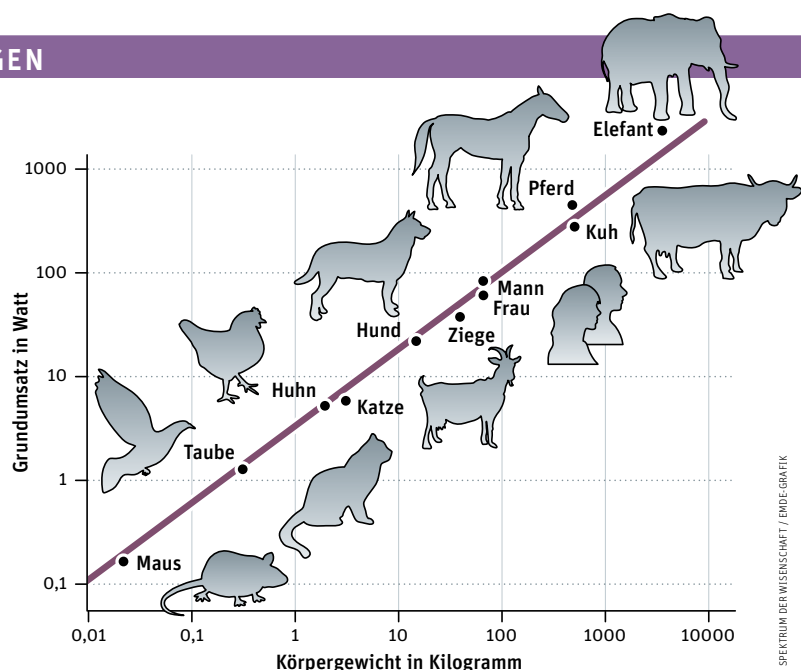
Wenn man von den Büroklammern absieht, geht es beim Halten und erst

## ELEMENTARE DIMENSIONSBEACHTUNGEN

**Bei geometrischer Ähnlichkeit** verhalten sich Flächen wie die Quadrate und Volumina wie die 3. Potenzen (»Kuben«) der Längen. Die meisten Lebewesen haben etwa die Dichte von Wasser, ihre Massen verhalten sich daher nahezu wie die Volumina.

Die Energie, die ein Muskel bei einer Kontraktion umsetzt (die »Arbeit, die er leistet«), ist gleich Kraft mal Weg. Dabei ist die Kraft proportional der Querschnittsfläche des Muskels und der (Kontraktions-)Weg proportional seiner Länge. Der Energieumsatz eines Muskels pro Arbeitszyklus ist also seinem Volumen proportional – eine Anwendung der Sätze über Reihen- und Parallelschaltung bilanzierbarer mengenartiger Größen (Spektrum der Wissenschaft 9/2009, S. 26).

Die von den Muskeln produzierte Wärme wäre demnach gleichfalls dem Volumen proportional, ebenso die Wärme, die bei der Aktivität der inneren Organe frei wird – wenn große und kleine Tiere sich ansonsten gleich verhalten würden. Das ist jedoch nicht der Fall; denn sonst hätte die Ausgleichsgerade im Kleiber-Diagramm (rechts) die Steigung 1 statt ungefähr 0,75.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDEGRAFIK





Die Etruskerspitzmaus *Suncus etruscus* war bis 1974 mit 2,5 Gramm das leichteste bekannte Säugetier. Wie die Fledermaus ist sie ihrem Namen zum Trotz keine Maus, sondern gehört zur Ordnung der Insektenfresser (Eulipotyphla).

(wirklich langsame) Faultiere sind bewundernswert. Das gilt eigentlich für jede Spezies, der es gelungen ist, ihr Aussterben bis heute hinauszuzögern. Allerdings muss ich persönlich zugeben, dass bei gewissen natürlichen Grausamkeiten meine Bewunderung der unschuldigen Natur Grenzen hat, angefangen beim Brutparasitismus.

Mit anderen Worten: Die Natur ist so wundervoll, dass man auf hypothetische Behauptungen, die auf ziemlich dummen Trugschlüssen beruhen, verzichten sollte. Im Vergleich sind Tiere zum Reiten auf die Bäume (vielleicht geeignete zahme Großkatzen?) viel weniger unrealistisch als die vermeintlichen Insekten-Superathleten.

### Gehupft wie gesprungen

Ein ähnliches Wundertier eines falschen Rechenansatzes ist der auf einen Meter vergrößert gedachte Floh, der über den Eiffelturm springt. An sich müsste er es gut haben, denn beim Springen kommt ihm der Faktor der Hubvergrößerung zugute: Ein 100-mal so langer Floh hat das millionenfache Muskelvolumen und kann daher in einem Satz die millionenfache Energie in Bewegungsenergie umsetzen. Allerdings kommt er damit nur so hoch wie sein Artgenosse in Originalgröße, denn er hat ja die millionenfache Masse. Es bleibt also bei wenigen Dezimetern, wie sie auch einem Menschen nicht schwer fallen, sogar aus dem Stand.

Jenseits dieser Abschätzung hat der große Floh einen Vorteil gegenüber dem kleinen: Ihm macht die Luftreibung weniger beim Springen zu schaffen. Aber sie mildert das Fallen nicht so gut ab.

Riesige Insekten wären also beim Sport oder auf einem altertümlichen Arbeitsmarkt keine ernsthaften Konkurrenten für Menschen – wenn es sie denn gäbe. Dass es in unserer Körpergröße aber in Wirklichkeit keine Arthropoden, wohl aber Wirbeltiere gibt, hat sehr viel mit unserem leistungsfähigen Blutkreislauf- und Atmungssystem zu tun: Wir kommen nicht mit Diffusion aus, sondern setzen beachtliche Hydraulik ein, und dabei sind Giraffen besonders hervorzuheben.

recht beim aktiven Heben um die Kraft der Muskeln. Wenn wir eine Ameise um den Faktor 100 im Längenmaßstab vergrößert denken, wird das Muskelvolumen und damit die pro Bewegungszyklus geleistete Arbeit zwar millionenfach so groß. Aber die Muskelquerschnitte und damit auch die Kräfte wachsen nur mit dem Faktor 10000 (Kasten S. 33). Unsere Monsterameise könnte also 500000 gewöhnliche Ameisen tragen, aber von ihresgleichen nur eine halbe, denn die wiegt so viel wie eine Million gewöhnliche.

Es ist nicht von vornherein falsch, eine Größe mit einer anderen in eine beliebig willkürlich gewählte Relation zu setzen, Kraft mit Masse, Schallwellenlänge mit Körpergröße, Geschwindigkeit mit Körperlänge oder Intelligenz mit Schuhgröße. Für ein zu Fuß laufendes und nur wenige Millimeter langes Insekt sind vier Kilometer pro Stunde ein beachtliches Tempo. Es ist jedoch albern, deshalb die Wüstenameise zum schnellsten Lebewesen zu ernennen. Denn wenn man Geschwindigkeiten in »eigenen Längen pro Sekunde« angibt, kommt man schnell zu absurden Ergebnissen.

So würde ein joggender Mensch einen ICE mühelos übertreffen, denn der ist zwar 100-mal so lang wie ein Mensch, aber keineswegs 100-mal so schnell! Eigentlich müssten dann auch zwei gleiche Eisenbahnzüge doppelt so schnell fahren, wenn man sie aneinanderkoppelt. Für solch ein Wunder würde der Windschatten wohl kaum reichen. Und wenn man nur die Zahl der Waggon verdoppelt und nicht auch die der Lokomotiven, wird es noch schlechter.

Das wirklich Ärgerliche ist, dass Behauptungen wie die von der starken Ameise mit scheinbar wissenschaftlicher Autorität daherkommen und ein absurdes Bild verbreiten. Dabei sind ganz gewöhnliche Ameisen auch ohne diese Trugschlüsse sehr staunenswerte und wunderbare Tiere. Auch (angeblich faule) Grillen oder

Nach den obigen Abschätzungen der Sprungenergie sollten nun alle Tiere etwa gleich hoch springen können, soweit sie überhaupt springen und nicht wegen ihrer Kleinheit von der Luft ausgebremst werden. In der Tat findet sich eine Sprunghöhe von grob einem Meter für fast alle Säugetiere: Pferde, Hunde, Springmäuse, aber – noch etwas abgeschwächt – auch für Insekten wie Flöhe. Der Weltrekord für Menschen liegt bei 2,45 Meter. Da der Leichtathlet nicht aus dem Liegen am Boden, sondern aus dem aufrechten Laufen heraus hochspringt, zählt physikalisch nur die Hebung seines Schwerpunkts, und selbst dabei sind die Sportregeln noch gnädig. Es müssen nur alle Teile des Körpers – notfalls nacheinander – über die Latte wandern, der Schwerpunkt darf dabei außerhalb des Körpers sein.

Wenn wir wie beim Stabhochsprung die Bewegungsenergie des Anlaufs in elastischer Form im gebogenen Stab zwischenlagern und dann weit gehend zum Springen nutzen (und durch Armarbeit noch ergänzen) können, kommen wir auf rund fünf Meter Schwerpunktshebung, was der Bewegungsenergie des Sprinters nahekommt, wie man leicht nachrechnet. Beim gewöhnlichen Hochsprung sind wir dagegen fast so schlecht wie bei einem Sprung aus dem Stand, da wir keine so speicherfähigen Achillessehnen haben wie die Kängurus.

Wer ohne einen externen Energiespeicher höher hinaus will, sollte sich auf den Mond begeben. Bekanntlich kann man dort sechsmal so hoch springen, weil die Fallbeschleunigung rund 1/6 von unserer beträgt (Überschlagsrechnung: Der Mond hat 1/4 des Durchmessers der Erde und 2/3 ihrer Dichte). Aber für sechs mal 2,45 Meter wird es nicht reichen: Es zählt nur die Hebung des Schwerpunkts. <



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

**Swift, J.:** *Travels into Several Remote Nations of the World in Four Parts.* By Lemuel Gulliver, first a Surgeon, and then a Captain of Several Ships. London 1726; nachgedruckt zum Beispiel bei Wordsworth Classics, Ware (Hertfordshire) 1992.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1023397](http://www.spektrum.de/artikel/1023397).

# Sphärische Irrwege

Zu Kreisen mutierende Linien, sich bewegende Muster und aufscheinende Farben – ein Parfümflakon stellt die Gesetze der geometrischen Optik zur Schau.

Von H. Joachim Schlichting

Tatsächlich wird hier ein Parfüm angepriesen, doch angelockt werden soll der Kunde zunächst durch die Optik. Der im oberen Foto gezeigte Flakon, entdeckt in der Auslage einer Parfümerie, hat in dieser Hinsicht allerhand zu bieten: Vor allem fallen die vielen regenbogenfarbenen, konzentrischen Kreise auf, und wenn interessierte Passanten – in diesem Fall stand ich gemeinsam mit meinen Studenten vor dem Schaufenster – den Kopf leicht hin- und herbewegen, scheinen weitere Kreise aus dem Zentrum herauszuwachsen oder ebendort zu verschwinden.

Um herauszufinden, was hier eigentlich geschieht, hilft nur von physikalischem Verständnis geleitetes genaueres Hinsehen. So fällt auf, dass die Kreise zum Zentrum der Kugel hin immer mehr in parallele Linien übergehen. Macht man sich außerdem klar, dass das Fläschchen wie eine Sammellinse wirkt, also nahe Gegenstände vergrößert, kommt die Unterlage des Flakons in den Blick: Offenbar sehen wir das Streifenmuster dieses locker drapierten Tuchs durch das zur Lupe mutierte Gefäß hindurch stark vergrößert. Weil die an sich monochrome Textur des Tuchs zudem von einem irisierenden Farbschimmer überhaucht zu sein scheint (mittleres Bild) und auch diese Farben mit jeder Bewegung des Beobachters changieren, waren sich meine Studenten einig: Ursache der farbigen Ringe im Glas sind die irisierenden Muster.

Die Hypothese lässt sich leicht widerlegen, wenn man die Szenerie mit einer Glaskugel oder einem bauchigen wassergefüllten Weinglas nachstellt. Hält man es vor ein liniertes Blatt Papier, sieht man ganz ähnliche vergrößerte Streifen, und auch diese laufen der Kugelgeometrie folgend zu den Rändern hin immer mehr auseinander und zuletzt in sich selbst ringförmig zurück (Bild unten). Ursache ist die Lichtbrechung an der Grenzschicht zwischen Luft und Glas beziehungsweise Glas und Wasser, wie man sie von einer Sammellinse kennt. (Die Glaswand ist so dünn, dass die Brechung an ihr kaum eine Rolle spielt, das Gefäß *mus*s also flüssigkeitsgefüllt sein.)

**Bewegung im Parfümflakon: Wer am Schaufenster vorüberschlendert, sieht wandernde Farbringe.**

Um aber auch die Farbeffekte zu verstehen, muss man wissen, dass die Brechung für unterschiedliche Farben (Wellenlängen) unterschiedlich stark ist (etwa für das kurzwellige Blau stärker als für das langwellige Rot). Und da sich das nahezu weiße Licht, das von den erhabenen Stellen des Tuchs ausgeht, aus allen Spektralfarben zusammensetzt, kommt es zur Zerlegung in seine farblichen Bestandteile.

Doch warum zeigt sich diese Farbzerlegung nicht, wenn man durch die Kugel hindurch auf ein weißes Blatt Papier blickt? Weil die Farben, kaum getrennt, sich auf dem Papier mit benachbarten Lichtstrahlen wieder zu Weiß mischen. Entscheidend ist nämlich der Wechsel aus hellen und dunklen Streifen auf der Unterlage. Letztere sorgen für Lücken, in denen die Farben nicht von anderen überlagert werden, sich also auch nicht zu Weiß vereinigen. Und da die Stärke der Ablenkung des Lichts mit dem Winkel wächst, unter dem es vom Tuch auf die Linse fällt, sorgt die Form des Flakons überdies dafür, dass an dessen Rändern die Farbaufspaltung besonders ausgeprägt ist. In Bewegung gerät das Muster schließlich, weil ein sich bewegendes Passant Licht registriert, das jeweils unter anderem Einfallswinkel in die Linse gelangt.

Vom optischen Standpunkt aus stellen diese Phänomene nichts anderes als unerwünschte »Abirrungen« dar: sphärische ebenso wie chromatische Aberrationen, wie man sie bei den hochwertigen Linsensystemen etwa einer Kamera mit einigem Aufwand zu vermeiden versucht. Vom Standpunkt des Parfümeurs aus sind sie aber ausgesprochen nützliche Effekte. Selbst wenn die ganz alltägliche Physik meist unverstanden bleibt: Von ihrer oft faszinierenden Ästhetik lassen wir uns gerne fesseln. ◀



ALLE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

**Was tragen die irisierenden Streifen in der Unterlage (vergrößerte Darstellung) zum Geschehen bei?**

**Bei der Aufklärung des Rätsels assistiert – ausnahmsweise – eine Glaskugel.**



**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.

# DER HERR DER FISCHE

Axel Meyer erforscht eine der ältesten Fragen der Biologie: Wie entwickelte sich die Vielfalt des Lebens? Buntbarsche verhelfen dem Evolutionsbiologen zu Einsichten darüber, wie es der Natur gelingt, immer wieder Neues entstehen zu lassen.



Von Claudia Eberhard-Metzger

**W**arum ich Evolutionsbiologe geworden bin? Axel Meyer geht zur Bücherwand, zieht ein Buch heraus und legt es auf den Schreibtisch: »Vielleicht deshalb!«, ruft der 49-jährige Professor der Universität Konstanz und lächelt. Auf dem zerfledderten Schutzumschlag steht »Die Vergangenheit steigt aus dem Meer«. Das sei das absolute Lieblingsbuch seiner Jugendtage, gesteht der Biologe und beginnt sogleich begeistert zu erzählen: von dem Wesen, das am 23. Dezember 1938 in das Fangnetz südafrikanischer Fischer geriet – ein stahlblauer, über ein Meter langer und mehr als 50 Kilogramm schwerer Fisch mit auffallend großen Schuppen und fleischigen Flossen. Das war der legendäre Quastenflosser, wie sich herausstellte, ein Meeresbewohner, von dem die Wissenschaftler angenommen hatten, dass er das große Massensterben am Ende der Kreidezeit vor 65 Millionen Jahren nicht überstanden habe und der ihnen bis dahin nur als Fossil bekannt war. »Dieses Buch und die unglaubliche Geschichte, von der es berichtet, haben mich nachhaltig fasziniert.«

Meyers Naturerkundungen begannen in seiner norddeutschen Heimat, als er Käfer und Vogelgewölle sammelte. Der Junge hielt sich eine zahme Elster als nur eines von vielen Haustieren. Mit zehn Jahren bekam Meyer sein erstes Aquarium, bald standen die Wände seines Zimmers vom Boden bis zur Decke voller Fischbecken. Sein Vater, ein Ingenieur, habe eines Tages einen Stromzähler vor seinem Zimmer installiert. »Damit ich sehe, wie viel Strom ich so verbrauche.«

Auch während des Biologiestudiums in Marburg hielt Axel Meyers Liebe zu den Fischen an. Selbst dann noch, als seine Vermieterin drohte, ihn aus dem Haus zu werfen, nachdem sie entdeckt hatte, dass ihr Student in seiner Bude nicht allein, sondern mit 80 selbst gebauten Glaskästen voller Fische lebte.

Ohne seine Lieblinge geht es bei dem Evolutionsforscher bis heute nicht: Kleine Buntbarsche aus dem Victoriasee schwimmen putzmunter in einem Aquarium, das seinem Schreibtisch direkt gegenüber steht. »Das Erbgut der Buntbarsche wird gerade am Broad Institute des MIT entschlüsselt. Daran ist auch meine Arbeitsgruppe hier in Konstanz beteiligt.«

Nicht eine Hand voll, sondern Tausende von Buntbarschen schwimmen in den Rolls-Royce-Aquarien, wie Axel Meyer die Edelfischbecken in der Tierforschungsanlage der Universität nennt. Der Professor klopft leise an die Beckenwand. Ein Männchen mit imponierendem Stirnbuckel schwimmt heran und blickt uns mit großen Augen an. »Amphilophus ist sehr selbstbewusst und durchsetzungsfähig. Wenn ich jetzt meinen Finger ins Wasser steckte, würde er kräftig zubeißen.«





ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PETER SCHMIDT

## ZUR PERSON

**Axel Meyer** zählt zu den international bedeutendsten Evolutionsbiologen. Er wurde 1960 in Mölln in Schleswig-Holstein geboren, besuchte in Lübeck die Schule und studierte Biologie in Marburg und Kiel. Nach dem Vordiplom ging er im Jahr 1982 in die Vereinigten Staaten, zunächst an die University of Miami, Florida, dann nach Berkeley und Harvard. Als Postdoc arbeitete er an der University of California in Berkeley im Fachbereich für Biochemie bei Allan Wilson.

**Ab 1990** war Axel Meyer Assistant Professor der State University in New York. Im Jahr 1997 kehrte er nach Deutschland zurück und übernahm als Nachfolger von Hubert Markl den Lehrstuhl für Zoologie und Evolutionsbiologie der Universität in Konstanz. Sein derzeitiges Forschungsinteresse gilt insbesondere der evolutionären Entwicklungsbiologie.

**Spektrum der Wissenschaft:** Herr Professor Meyer, was würden Sie tun, wenn es keine Buntbarsche gäbe?

**Axel Meyer:** Wir würden dann eben mit anderen Tieren forschen. Das haben wir auch schon getan, beispielsweise mit Vögeln, Walen oder Insekten. Buntbarsche sind nicht das einzige System, das mich interessiert. Aber ich gebe gerne zu, dass ich sie liebe. Es sind sehr intelligente Tiere, die Männchen verteidigen ihre Territorien, etablieren oft eine Rangordnung und zeigen ein komplexes Sozialverhalten. Das zeigt mir jeder Blick in das Aquarium hier vor meinem Schreibtisch. Hinzu kommt, dass Buntbarsche neben Darwin-Finken, Anolis-Eidechsen oder Fruchtfliegen längst zu den klassischen Modellsystemen der Evolutionsforschung zählen und heute in den meisten Lehrbüchern vertreten sind.

**Spektrum:** Was macht die Buntbarsche so interessant für Evolutionsforscher?

**Meyer:** Dass es so viele von ihnen gibt. Die Familie der Buntbarsche umfasst rund 2700 Arten. Sie zählen damit zu den artenreichsten Wirbeltierfamilien und haben sich in der Evolution sehr erfolgreich durchgesetzt – sofern man evolutionären Erfolg an der Artenzahl

messen kann, was durchaus noch debattiert wird. Jedenfalls kann man an Buntbarschen sehr gut die zentrale Frage der Evolutionsforschung stellen.

**Spektrum:** Und die wäre?

**Meyer:** Wie entstehen neue Arten?

**Spektrum:** Wann haben Sie beschlossen, Ihr Forscherleben dieser Frage zu widmen?

**Meyer:** Dass ich Biologe werden wollte, wusste ich schon mit zehn Jahren. Wirklich. Es gab nichts, was mich mehr interessierte als die Natur und die fantastische Variation von Lebewesen um uns herum. Ich habe Käfer gesammelt, pulte die kleinen Mäuseschädel aus Gewöllen von Greifvögeln und steckte sie in Streichholzschachteln. In Lübeck kannte ich jede Vitrine im Naturkundemuseum auswendig. Der Amtstierarzt war mein bester Freund, und am liebsten sah ich im Fernsehen Grzimek und Cousteau. Das war prägend. Ich habe dann in Kiel und Marburg Biologie studiert und wollte zunächst Meeresbiologe werden. Zur eigentlichen Evolutionsforschung kam ich später, während meiner Zeit in den USA.

**Spektrum:** Sie waren recht lange dort.

**Meyer:** Ein Fulbright-Stipendium gab mir

»Als Kind besaß ich eine zahme Elster – ein innigeres Verhältnis hatte ich aber stets zu meinen Fischen«

## BUNTBARSCH

Buntbarsche (Cichliden) sind wichtige Modellorganismen zur Erforschung der Evolutionsmechanismen. Mit rund 2700 Arten zählen sie zu den artenreichsten Familien bei den Wirbeltieren. Ihr natürliches Verbreitungsgebiet erstreckt sich über Afrika, Mittel- und Südamerika sowie Madagaskar. Zwei Arten leben auf der Spitze des indischen Subkontinents und auf Sri Lanka. Rund 500 Buntbarsch-Arten leben ausschließlich im ostafrikanischen Victoriasee. Evolutionsbiologen haben dort gleichsam eine Bühne der Evolution vor sich und können die Prozesse und Geschwindigkeit der Artenbildung untersuchen.

»Die Evolution ist ein Thema – wo jeder glaubt, etwas davon zu verstehen«

Anfang der 1980er Jahre nach dem Vordiplom in Marburg die Gelegenheit, in die USA zu gehen. Ich war zunächst für ein Semester in Miami und habe mich dann entschlossen, nach Berkeley an die University of California zu wechseln. Vorgesehen war ein Aufenthalt von insgesamt einem Jahr. Dann sind es fast 16 Jahre geworden.

**Spektrum:** Was hat Ihnen so gut gefallen?

**Meyer:** Ich war zur richtigen Zeit am richtigen Ort – es war intellektuell unglaublich stimulierend.

**Spektrum:** Wie das?

**Meyer:** Ich hatte George Barlow, einem bedeutenden amerikanischen Fischforscher und Schüler von Konrad Lorenz, einen Brief nach Berkeley geschrieben und gefragt, ob ich bei ihm arbeiten könne. Er hatte nichts dagegen, zumal ich ihn nichts kostete, weil ich ein Stipendium mitbrachte. Ich kannte ihn bereits aus der Literatur als Buntbarsch-Spezialisten. Er forschte seinerzeit an Midas-Buntbarschen, die immer noch zu unseren Modellorganismen zählen. Barlow hatte, als ich zu ihm kam, bereits rund zwei Dutzend Doktoranden, die an verschiedenen Aspekten forschten. Beispielsweise, ob es für die männlichen Fische besser ist, schwarz oder golden zu sein, wenn sie die Gunst eines Weibchens gewinnen wollen. Damals habe ich mir nicht vorstellen können, dass man noch lange an diesen Buntbarschen forschen würde. Denn was sollte es nach 20 Doktoranden noch Neues zu entdecken geben? Prägend waren in diesen ersten Jahren meiner Doktorarbeit auch meine Doktormutter Marvalee Wake und der berühmte Evolutionsbiologe David Wake aus Berkeley. Diese beiden Forscher sind für mich menschlich und wissenschaftlich immer noch große Vorbilder.

**Spektrum:** Was war Ihr erstes größeres Forschungsthema?

**Meyer:** Im Labor von George Barlow beschäftigte ich mich mit einer Raubfischart und verarbeitete den Jungfischen verschiedene Futtersorten. Daraufhin stellte sich heraus, dass die Fische ihre Zahn- und Kieferform abhängig von der jeweiligen Futtersorte veränderten. In weiteren Versuchen habe ich dann geprüft, ob die beobachtbaren morphologischen Veränderungen wieder rückgängig gemacht werden können und wenn ja, zu welchem Zeitpunkt. Das war Teil meiner Doktorarbeit.

**Spektrum:** Ehrlich gesagt, ob ich einen Fisch jetzt so oder so füttere, ist sicherlich ganz interessant. Aber nach einer großen Frage der Biologie klingt das nicht gerade.

**Meyer:** Das mag auf den ersten Blick so aussehen, diese Kapitel meiner Doktorarbeit wurden jedoch hunderte Male zitiert.

**Spektrum:** Und warum?

**Meyer:** Es ging um das Verhältnis von Ontogenese und Evolution. Ontogenese meint die genetisch vorbestimmte individuelle Entwicklung eines Lebewesens, und meine Fragen lauteten: Was ist auf Grund der Genetik entwicklungsbiologisch vorgegeben? Was ist durch äußere Einflüsse veränderbar? Welche Rolle spielt dieses Zusammenwirken makroevolutionär für die Evolution eines Lebewesens? Das Konzept der so genannten phänotypischen Plastizität war damals ein wichtiges Thema – und ist es bis jetzt geblieben (siehe Kasten S. 42).

**Spektrum:** Was bedeutet für Sie Evolution?

**Meyer:** Nehmen wir einmal an, bei einem Lebewesen besteht eine große phänotypische Plastizität; also beeinflussen äußere Faktoren, etwa Ernährung, seine individuelle Entwicklung stark. Interessant ist nun, ob die Lebewesen dadurch einen Überlebensvorteil haben: Überstehen sie längere Zeiträume, weil es ihnen wegen ihrer größeren Plastizität besser gelingt, sich rasch wechselnden Umweltbedingungen anzupassen? Verringert die größere Plastizität ihr Risiko auszusterben? Bleibt eine Art deshalb länger erhalten, und wird es dadurch wahrscheinlicher, dass neue Arten aus ihr hervorgehen? Diese Fragen begleiten mich und die Evolutionsforschung bis heute.

**Spektrum:** Haben Sie ein Beispiel für eine aktuelle Arbeit?

**Meyer:** Einige unserer Midas-Buntbarsche können mit ihren Kiefern Schneckengehäuse knacken, die sehr hart sind. Es kommt zu einem evolutionären Wettrennen zwischen den immer härter werdenden Schneckengehäusen und den immer stärkeren Schneckenknackern. Die Buntbarsche knacken die Schneckengehäuse mit einem eigens dafür umgebil-





deten Kiemelement, einem zweiten funktionellen Kiefer.

Wir haben hier in Konstanz ein Experiment gemacht, das ich in kleinerem Rahmen schon in Berkeley während meiner Doktorarbeit unternommen habe: Wir teilen die Bruten der Schnecken knackenden Fische und ziehen sie getrennt voneinander auf. Die eine Fischbaby-Gruppe muss selbstständig Schnecken knacken; die zweite Gruppe füttern wir mit Schnecken, die wir für sie geknackt haben – wir nehmen ihnen also gleichsam die Arbeit des Schneckenknackens ab.

In beiden Fällen erhalten die Fische die gleiche Menge an Kalzium, das in den Schneckengehäusen steckt, und die gleiche Menge an Schneckenfleisch. Wenn man sich die unter diesen Bedingungen herangezüchteten Jungfische als erwachsene Fische anguckt, erkennt man, dass sie unterschiedliche Zahnformen entwickelt haben: Bei den Schnecken knackenden Fischen sind die Zähne breit und kräftig. Bei den Fischen aber, die die Schnecken schon geknackt serviert bekommen haben, sind die Zähne jetzt schmäler und spitzer. Man kann also den Phänotyp der Fische – in diesem Fall die Zahnform – durch äußere Einflüsse in relativ kurzer Zeit verändern.

**Spektrum:** Warum ist das so wichtig?

**Meyer:** Es hat eben außerordentlich viele Implikationen, weil es von der Form der Zähne abhängt, was die Fische fressen oder welche Nische sie besetzen. Letztlich wollen wir verstehen, was für die phänotypische Plastizität verantwortlich ist. Also: Welche Gene werden angeschaltet, während der »Evolutions«-Schneckendruck herrscht? Welche Proteine werden daraufhin gebildet und auf welche inneren und äußeren molekularen Signale reagiert eine zahnbildende Zelle? Schließlich muss sich die Zelle ja irgendwann entscheiden – für die Konstruktion eines flachen oder eines spitzen Zahns.

Das sind fundamentale Fragen der modernen Evolutionsbiologie – es gilt zu verstehen, welche Genetik hinter den Adaptationen und damit auch hinter den Unterschieden zwischen Arten steckt. Welche Gene und welche Mutationen bringen neue Arten hervor? Um diese Fragen zu beantworten, nutzen wir Methoden der Molekularbiologie, der Genomik und Transkriptomik sowie neue Verfahren zur DNA-Sequenzierung.

**Spektrum:** Sie haben auch bei dem berühmten deutschstämmigen Evolutionsbiologen Ernst Mayr gearbeitet. Wie kam es dazu?

**Meyer:** Nachdem sich mit Hilfe unterschiedlicher Fütterungsweisen die verschiedenen Fischkieferformen entwickelt hatten, wollte ich wissen, was das für deren Funktion bedeutet.



Dazu arbeitete ich für ein Jahr während meiner Doktorarbeit in dem Labor des Fischforschers Karel Liem an der Harvard University. Dort traf ich Ernst Mayr wieder, den ich schon ein Jahr zuvor in Berkeley kennen gelernt hatte. Er hielt wöchentlich so eine Art privates Seminar ab, wo er zwölf handverlesene Studenten und Postdocs einlud, um mit ihnen evolutionsbiologische Fragen zu diskutieren.

Man saß an einem großen Holztisch, an der Stirnseite thronte Ernst Mayr. Wir waren umgeben von Vitrinen mit Fossilien, die der berühmte amerikanische Paläontologe Alfred Romer gesammelt hatte. Es war eine große Ehre, einer der zwölf »Jünger« zu sein, die Mayr als würdig und interessant genug ausgewählt hatte, um mit ihm zu diskutieren. Aber es war auch eine Art Mutprobe – Mayr war nicht gerade zurückhaltend mit seinen Urteilen und Meinungen. Man musste sich gut überlegen, was man sagte, sensible Charaktere waren an seinem Tisch falsch platziert. Mayr war, als ich ihm begegnete, schon Anfang 80, aber er kletterte noch immer auf Bäume, um Vogelnester auszunehmen.

Er war in vielerlei Hinsicht ein phänomenaler Mensch und Wissenschaftler. Ich lernte ihn später noch besser kennen, als ich einen Sommer lang in seinem Haus in Cambridge wohnte. Er blieb mir in den letzten 20 Jahren

**»Evolutionsbiologe bin ich quasi aus dem Bauch heraus geworden. Ich versuche lediglich, die Welt ein bisschen besser zu verstehen«**





**VORBILDER**

**ALLAN WILSON (1934 – 1991)** nutzte als einer der ersten Wissenschaftler die modernen Methoden der Molekularbiologie, um Evolutionsprozesse zu verstehen. Er forschte an der University of California in Berkeley. Seine Gruppe gehörte auch zu den ersten, die vorgeschichtliche DNA analysierten, beispielsweise Nukleotidsequenzen aus dem Trockenpräparat eines Quagga, einer Ende des vorletzten Jahrhunderts ausgestorbenen Zebra-Art.

**ERNST MAYR (1904 – 2005)** war Professor an der Harvard University. Er zählt zu den bedeutendsten Biologen der Welt und hat in die Evolutionsbiologie zahlreiche neue Ideen eingebracht. Er entwickelte das Konzept der biologischen Art als Fortpflanzungsgemeinschaft. Nach seiner »allopatrischen Artbildung« sind geografische Separationen die Voraussetzung für das Aufspalten einer Art in zwei Tochterarten.

seines sehr langen Lebens stets als Mentor und Freund verbunden. Er war auch derjenige, der mich drängte, nach Deutschland zurückzukehren. Ich verdanke ihm sehr viel. Aber wir waren nicht immer einer wissenschaftlichen Meinung – trotz meiner großen Bewunderung für seine Leistungen.

**Spektrum:** Und wie haben Sie sich mit ihm auseinandergesetzt?

**Meyer:** Ich war ja jemand, der am Beispiel der Kratersee-Buntbarsche in Nicaragua gezeigt hatte, dass Arten manchmal auch ohne geografische Barrieren – also durch so genannte sympatrische Artbildung – entstehen können.

**Spektrum:** Und das passte nicht in Mayrs Konzept?

**Meyer:** Nach Mayr entstehen die allermeisten Arten durch allopatrische Artbildung, also sozusagen passiv durch geografische Barrieren, die den Genfluss, der durch Fortpflanzung zwischen Populationen entsteht, verhindern. Mayr sagt: Eine Art besteht aus Individuen, die sich erfolgreich miteinander fortpflanzen können. Das nannte er das biologische Artkonzept – es ist das Artenkonzept, wie man es in Schule und Universität lernt. Man kann Arten aber auch ganz anders definieren. Und Mayr wusste sehr wohl, dass sein biologisches Artkonzept theoretische wie operative Probleme hatte.

**Spektrum:** Welche?

**Meyer:** 10 bis 15 Prozent aller Vogelarten hybridisieren, pflanzen sich also über die Artgrenzen hinweg fort. Heißt das, dass es damit 10 bis 15 Prozent weniger Vogelarten gibt? Und was ist mit Lebewesen, die sich nicht oder nur gelegentlich sexuell fortpflanzen? Sind das etwa keine Arten? Mayr hat ein wenig versucht, solche Beobachtungen unter den Teppich zu kehren, und gemeint, dass es

sich um eine Art Grundrauschen des Systems handle.

**Spektrum:** Wie lässt sich denn nun eine Art moderner definieren?

**Meyer:** Mayr hatte mit seiner Definition der Art sicherlich nicht Unrecht. Aber man muss eben auch wissen, dass nicht alles erklärt wird. In der Praxis wird das biologische Artkonzept weit weniger benutzt, als man glauben mag. Es geht ja fast kein Forscher durch den tropischen Regenwald und schaut, wer sich mit wem fortpflanzt, um eine Art zu definieren.

Stattdessen sammelt er beispielsweise alle Käfer ein, die auf einem Baum leben, und sortiert sie, zumindest anfänglich, nach morphologischen Merkmalen, genau so, wie es schon Carl von Linné gemacht hat. Heute erfolgt dieses Sortieren mehr und mehr zusätzlich mit Hilfe der DNA, so dass Arten heute auf Grund ihrer genetischen Gemeinsamkeiten und Unterschiede definiert werden. Das könnte man – je nachdem, wie genau methodisch vorgegangen wird – ein phylogenetisches oder evolutionäres Artkonzept nennen.

**Spektrum:** Der Artbegriff ist also immer noch recht unklar?

**Meyer:** Ja, genau. Jeder ernsthafte Doktorand der Evolutionsbiologie beißt sich am Artbegriff erneut fest – und meist die Zähne aus. Wir verfügen inzwischen aber über Methoden, mit denen wir im Unterschied zu früher bis hin zur molekularen Ebene im Prinzip abgrenzen können, was eine Art ist und was nicht. Und aus diesen Datensätzen können wir auch besser ableiten, wie neue Arten entstehen.

**Spektrum:** Und was sagen die molekularen Daten über das Entstehen der Artenvielfalt?

**Meyer:** Ernst Mayr hat behauptet, dass die allopatrische Artenbildung der Hauptmechanismus sei. Er hat sein Leben lang gegen die Idee gekämpft, dass Arten auch sympatrisch, ohne geografische Barrieren, entstehen können. Die Buntbarsche in den Kraterseen Nicaraguas und vielleicht auch im Victoriasee in Afrika zeigen uns indes, dass neue Arten sehr wohl auch dann entstehen können, wenn sie in einem gemeinsamen Lebensraum ohne offensichtliche Barrieren existieren. Was wir mit unseren modernen Methoden feststellen, ist in gewisser Weise kontra Mayr.

**Spektrum:** Klingt ziemlich unwahrscheinlich! Wie sollen denn neue Arten ohne geografische Isolierung entstehen können?

**Meyer:** Das lässt sich mit genetischen Unterschieden erklären. Wenn bei einem Fisch, sagen wir in einem Kratersee, ein Gen mutiert, das eine morphologische Veränderung bedingt, die es ihm erlaubt, besser zwischen den Steinen in Ufernähe zu manövrieren, kann das ein Selektionsvorteil für ihn sein. Der

Fisch findet zwischen den Steinen vielleicht mehr zu fressen und wird sich künftig eher in dieser ökologischen Nische aufhalten.

Wenn dann auch noch die Partnerwahl mit der ökologischen Spezialisierung einhergeht in dem Sinn, dass Partner dort gesucht werden, wo auch gefressen wird, können neue Arten ohne geografische Barrieren entstehen. Vorausgesetzt, die Genetik stimmt, wenn also die beiden genetischen Loci für ökologische Spezialisierung und Partnerwahl nahe beieinander auf demselben Chromosom liegen.

Im Victoriasee beispielsweise, dem größten tropischen See der Welt, leben etwa 500 Buntbarsch-Arten. Interessanterweise wohnt keine dieser 500 im ganzen See. Sie sind fast immer nur in meist relativ kleinen Teilen des Sees zu finden. Das weist schon darauf hin, dass die Artbildung lokal stattfindet, also zum Beispiel in einem kleinen Seeabschnitt in Uganda, Kenia oder Tansania.

**Spektrum:** Zurück zu Ihren Vorbildern: Sie haben auch bei Allan Wilson gearbeitet, einem weiteren legendären Evolutionsbiologen.

**Meyer:** In gewisser Weise hat mich Allan Wilson in Berkeley noch mehr beeinflusst als Ernst Mayr. Wilson war ein fantastischer Forscher mit brillanten Ideen. Und er scheute sich nicht, auch einmal falschzuliegen. Ich glaube, genau das hat diesen Wissenschaftler besonders ausgezeichnet. Außerordentlich war auch sein Gespür für Menschen und sein Geschick, die unterschiedlichsten Talente zueinanderzubringen.

In seinem Labor in Berkeley arbeiteten damals Leute, die sich für nichts anderes als Gene interessierten, aber keine Kröte von einem Fisch unterscheiden konnten. Daneben gab es dann noch Leute wie mich – Spezialisten für Fische, Vögel oder ausgestorbene Lebewesen. Das ergab eine einzigartige Mischung von hoch motivierten und ambitionierten jungen Forschern. Hinzu kam eine technische Revolution, die PCR (siehe Kasten rechts). Im Labor von Allan Wilson ist 1987 eines der ersten Geräte für die Polymerase-Kettenreaktion selbst gebaut worden. Und wir waren die Ersten, die die PCR auf evolutionäre Fragen angewandt haben.

**Spektrum:** Wie darf man sich das vorstellen?

**Meyer:** Das kam zu Stande, weil einige der Doktoranden aus dem Wilson-Labor bei der ehemaligen Biotechfirma Cetus in der Nähe in Emeryville forschten, also bei dem Unternehmen, wo Kary Mullis arbeitete, der Erfinder der PCR. Das erste, noch selbst gebastelte PCR-Gerät bestand aus einem alten Wasserbad und Teilen einer Waschmaschine, die von einem Apple-IIe-Computer gesteuert wurden. Als neue Methode brachte die PCR dem

Wilson-Labor einen enormen Forschungsvorsprung. Es gab Zeiten, wo aus dem Labor alle zwei Monate eine Publikation in »Nature« erschien, von Jungstars wie Russ Higuchi, Svante Pääbo, Mark Stoneking oder Linda Vigilant. Jedem war klar, dass wir alle gerade Wissenschaftsgeschichte schrieben.

**Spektrum:** Wie hat die PCR die Biologie verändert?

**Meyer:** Allan Wilson hat die PCR einmal die »Demokratisierung des genetischen Kodes« genannt. Denn damit konnte man DNA schneller und billiger sequenzieren. Das ist wesentlich, um das Erbgut verschiedener Lebewesen vergleichen zu können und auf genetischer Ebene Einblick in das Entstehen der Artenvielfalt zu erhalten. Eine unserer Publikationen aus dem Jahr 1989 wurde über 2500-mal zitiert, weil wir auch so genannte PCR-Primer-Sequenzen entwickelt hatten, die in sehr vielen Tierarten funktionieren.

**Spektrum:** Und was beschäftigt Sie heute?

**Meyer:** Das sind die molekularbiologischen Fragen. Was ist die genetische Basis von Anpassungen? Welche genetischen Veränderungen bewirken evolutionäre Innovationen? Gibt es bestimmte Mutationen, die häufiger als andere Mechanismen für die Artbildung verantwortlich sind? Kurzum: Wir wollen heute auf genetischer und genomischer Ebene verstehen, welche Faktoren für das Entstehen von evolutionären Innovationen und neuen Arten verantwortlich sind.

**Spektrum:** Welche genetischen Einflüsse stehen als Motor der Evolution besonders in Verdacht?

**Meyer:** Generell werden heute Duplikationen oder Vervielfältigungen von einzelnen Genen,

## EVO-DEVO

Die »Evolutionary Developmental Biology« (evolutionäre Entwicklungsbiologie), kurz Evo-Devo, ist eine neue Disziplin, welche die Ansätze der Evolutions- und die der Entwicklungsbiologie kombiniert. Die Evo-Devo-Forschung versucht zu verstehen, wie morphologisch unterschiedliche, aber sonst übereinstimmende Strukturen – wie etwa die Flügel bei Vögel und Fledermäusen – entwicklungsbiologisch und molekular-genetisch entstehen.

## PCR

Die Polymerase-Kettenreaktion (PCR) ist eine Methode, um die Erbsubstanz DNA in vitro zu vervielfältigen.

Gruppenbild mit Elch: Axel Meyer (Mitte) im Gespräch mit Claudia Eberhard-Metzger und Chefredakteur Reinhard Breuer





## PHÄNOTYPISCHE PLASTIZITÄT

Das Konzept beschreibt, in welchem Maß das äußere Erscheinungsbild (der Phänotyp) eines Lebewesens von seinen Genen (dem Genotyp) vorherbestimmt wird. Eine hohe Plastizität bedeutet, dass äußere Einflüsse die individuelle Entwicklung eines Lebewesens stark beeinflussen.



**Claudia Eberhard-Metzger** ist Biologin und Germanistin und freie Medizinjournalistin. Die Fragen stellten sie und Chefredakteur Reinhard Breuer.

**Meyer, A.:** Evolution ist überall. Gesammelte Kolumnen »Quantensprung« des »Handelsblatt«. Böhlau, Wien, Köln, Weimar 2008.

**Meyer, A.:** Algenraspler, Schneckenknacker, Schuppenfresser: Axel Meyer über den evolutionären Erfolg der Buntbarsche. Audio-CD, Supposé-Verlag, Berlin 2008.

**Meyer, A., Van de Peer, Y. (Hg.):** Genome Evolution: Gene and Genome Duplications and the Origin of Novel Gene Functions. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2003.

[www.evolutionbiologie.uni-konstanz.de](http://www.evolutionbiologie.uni-konstanz.de)

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/1026688](http://www.spektrum.de/1026688).

von Genfamilien oder gar von kompletten Genomen als wichtiger evolutionärer Mechanismus angesehen. Aber auch die regulatorische Evolution, transposable Elemente und andere molekulare Mechanismen sind sicher wichtig.

**Spektrum:** Wie lassen solche genetischen Veränderungen neue Arten entstehen?

**Meyer:** Sie helfen zunächst einmal grundsätzlich zu verstehen, wie sich aus einfachen komplexe Formen entwickeln. Wichtig waren Gen- und Genomduplikationen wahrscheinlich vor allem für die großen Schritte in der Evolution. Das betrifft den Schritt vom Einzeller zum Vielzeller, aber auch die Entstehung der Wirbeltiere, etwa für den Übergang des Lebens vom Wasser auf das Land.

Der erste Wissenschaftler, der das Konzept der Genduplikation als Motor der Evolution explizit vorschlug, war übrigens Susumu Ohno, ein in den USA lebender japanischer Biologe. Er veröffentlichte 1970 ein Buch (»Evolution by Gene Duplication«), worin er sagt: »*Duplication created, while natural selection merely modified.*«

Ohnos Ideen wären fast in Vergessenheit geraten, weil es zunächst nicht möglich war, seine Hypothese zu testen. Ende der 1990er Jahre erlebte sein Gedankengut eine Renaissance. Doch noch immer wurde darüber gestritten, ob genetische Duplikationen tatsächlich als evolutionäres Prinzip bedeutend sind und wie häufig sie sich während der Evolution ereignet haben. Im letzten Jahrzehnt hat es sich jedoch immer deutlicher gezeigt, dass Ohnos Ideen richtig und extrem wichtig sind. Diese Erkenntnis verdanken wir den neuen genomischen Methoden, die es erlauben, nicht nur einzelne Gene, sondern auch vollständige Genome zu entziffern und miteinander zu vergleichen.

**Spektrum:** Aber welchen Vorteil könnte ein mehrfacher Satz an Genen bieten?

**Meyer:** Mit den zusätzlichen Genen ergeben sich neue Gestaltungsmöglichkeiten. Duplizierte Gene oder Genome erlauben es, Mutationen in der zweiten Kopie anzusammeln. Der zweite Erbgutsatz bietet gleichsam Gelegenheit für Experimente.

Da lassen sich neue Eigenschaften ausprobieren; sie können beibehalten, sofern sie sich bewähren, oder wieder verworfen werden. Die Experimente mit dem zweiten Gensatz können also zu neuen Genfunktionen führen, während die Sicherheitskopie weiterhin die ursprüngliche Aufgabe erfüllt und die Lebensfunktionen aufrechterhält. Aus den neuen Genen können komplexere morphologische Strukturen und schließlich neue Arten hervorgehen.

**Spektrum:** Welche Arten sind das?

**Meyer:** Ohno postulierte bereits in den 1970er Jahren, dass zwei große Verdopplungsrunden, die sich im Abstand von vielen Millionen Jahre ereigneten, zur Entwicklung der Wirbeltiere geführt haben. Wir konnten vor etwa zehn Jahren zeigen, dass sich alle modernen Fische auf einen Vorfahren zurückführen lassen, der sogar eine dritte Genomduplikation durchgemacht hat. Darüber hinaus haben wir vorgeschlagen: Duplikationen, welche sich in ökologischen Umbruchzeiten ereignen, beschleunigen die Artbildung enorm.

Das ist das Ergebnis von Arbeiten, die wir zusammen mit meinem ehemaligen Mitarbeiter Yves Van de Peer durchführten, der jetzt Professor im belgischen Gent ist. In direkter Konkurrenz mit bisher gut angepassten Arten könnten Organismen mit duplizierten Genomen in Krisenzeiten eine Nische erobern, weil sie aus ihrem vergrößerten Genreservoir schöpfen, daraus nützliche Gene gewinnen und sich schneller an die veränderten Bedingungen anpassen können.

**Spektrum:** Und wie schnell ist die Evolution?

**Meyer:** Wir müssen uns davon verabschieden, dass Evolution etwas ist, was sehr langsam und nur in Jahrmillionen voranschreitet. Veränderungen können sehr rasch eintreten, oft geradezu im Zeitraster. Das zeigt uns ja beispielsweise die Artenvielfalt der Buntbarsche im Victoriasee; die hat sich in kaum mehr als 100 000 Jahren herausgebildet. Aktuell zeigt sich die Evolutionsgeschwindigkeit auch am Beispiel des Vogelzugs; der verändert sich gerade infolge des Klimawandels.

Ein anderes Beispiel für die enorme Geschwindigkeit, in der sich Organismen verändern können, sind Fische, die in einem kleinen Kratersee in Nicaragua leben. Es gibt sie einmal mit und einmal ohne Lippen. Mit populationsgenetischen Modellen konnten wir zurückrechnen, dass der See vor gerade einmal 100 Jahren besiedelt wurde. Innerhalb dieser kurzen Zeitspanne haben sich also die unterschiedlichen Lippenformen und vielleicht sogar neue Arten entwickelt.

**Spektrum:** Zuletzt die Zukunftsfrage – was dürfen wir auf Ihrem Gebiet noch erwarten?

**Meyer:** Ich weiß nur, was man nicht erwarten darf – man sollte keine Naturgesetze erwarten, wie sie vor allem die Physik liefert. Wenn wir viel Glück haben, werden wir vielleicht so etwas wie Regeln entdecken. Biologische Systeme sind eben komplexer als physikalische.

*Biology is messy!* Ebenso komplex sind daher die Forschungsfragen, die man stellen muss. Und auf komplexe Fragen darf man bekanntlich nicht immer einfache Antworten erwarten. <





# Der merkwürdige FARBENSINN DER PRIMATEN

Im Vergleich zu vielen anderen Wirbeltieren erkennen die meisten Säugetiere nur wenige Farben. Die Primaten haben diese Wahrnehmung wieder verbessert – auf unterschiedliche Weisen.

## In Kürze

- ▶ Menschen und viele andere Primaten sehen die Welt farbiger als die übrigen Säugetiere.
- ▶ Unser Farbensinn beruht auf drei lichtempfindlichen Pigmenttypen in der Netzhaut: Wir sind **so genannte Trichromaten** – im Gegensatz zu den dichromaten Säugern mit nur zwei Pigmenttypen.
- ▶ **Die Gene für diese Pigmente** erzählen von der Evolution unserer Farbwahrnehmung.
- ▶ Mäuse, die **ein zusätzliches menschliches Pigmentgen** erhielten, erkennen mehr Farben als ihre Artgenossen. Offenbar ist ein Säugerhirn plastisch genug, um mit einer mutationsbedingten neuen Sinnesdimension umgehen zu können.

Von Gerald H. Jacobs und Jeremy Nathans

Die Welt erscheint uns in einer schier unermesslichen Farbvielfalt: vom Dottergelb der Ringelblume bis zum Silbergrau eines Autos, vom fahlblauen Winterhimmel bis zum grün funkelnenden Smaragd. Umso erstaunlicher ist, dass nur drei verschiedene Lichtwellenlängen genügen, um daraus jede von uns wahrgenommene Farbe zu mischen. Sinnesphysiologen sprechen vom trichromatischen Sehen. Tatsächlich benutzt unsere Netzhaut (Retina) für das Farbsehen lediglich drei unterschiedliche Licht absorbierende Sehpigmente oder -farbstoffe. (Ein weiteres Pigment, das Rhodopsin, dient dem Helldunkelsehen bei Dämmerlicht.) Deswegen lässt sich auch auf einem Bildschirm allein mit roten, grünen und blauen Punkten oder Pixeln unser gesamtes Farbenspektrum darstellen.

Auch viele Affen sehen trichromatisch, doch Gleiches gilt für das übrige Tierreich keineswegs. Andere Säugetiere besitzen gewöhnlich nur zwei Pigmente zum Farbenerkennen – sie sind so genannte Dichromaten. Ein paar nachtaktive Arten haben sogar nur ein einziges Farbsehpigment. Reicher ausgestattet als wir sind dagegen Vögel, Fische und Reptilien: Viele von ihnen verfügen über gleich vier

Farbsehpigmente; sie sehen damit auch im Ultravioletten (siehe SdW 1/2007, S. 96).

Folglich erscheint der trichromatische Farbensinn der Primaten als etwas Ungewöhnliches. In jahrzehntelangen genetischen, molekularbiologischen und neurophysiologischen Studien haben wir und andere Forscher vieles über seine Evolution, aber auch Flexibilität entdeckt.

Über 50 Jahre ist es her, seit Wissenschaftler erstmals untersuchten, auf welche Anteile des Lichtspektrums die Farbsehpigmente des Menschen reagieren. Heute kennen wir ihre jeweilige spektrale Empfindlichkeit sehr genau (siehe Kasten S. 47). Jedes der drei Pigmente absorbiert nur Licht eines bestimmten Spektralbereichs, und jedes lässt sich anhand derjenigen Wellenlänge charakterisieren, auf die es am stärksten anspricht. Eines dieser Pigmente reagiert besonders gut auf ungefähr 430 Nanometer, eines auf annähernd 530, das dritte

**Schimpanzen erkennen wie wir mehr Farben als die meisten Säugetiere. Was wir bei einem Kandinsky sehen, beruht auf Eigenschaften der Malfarben, den Lichtverhältnissen – und auf unserem Sehsystem.**

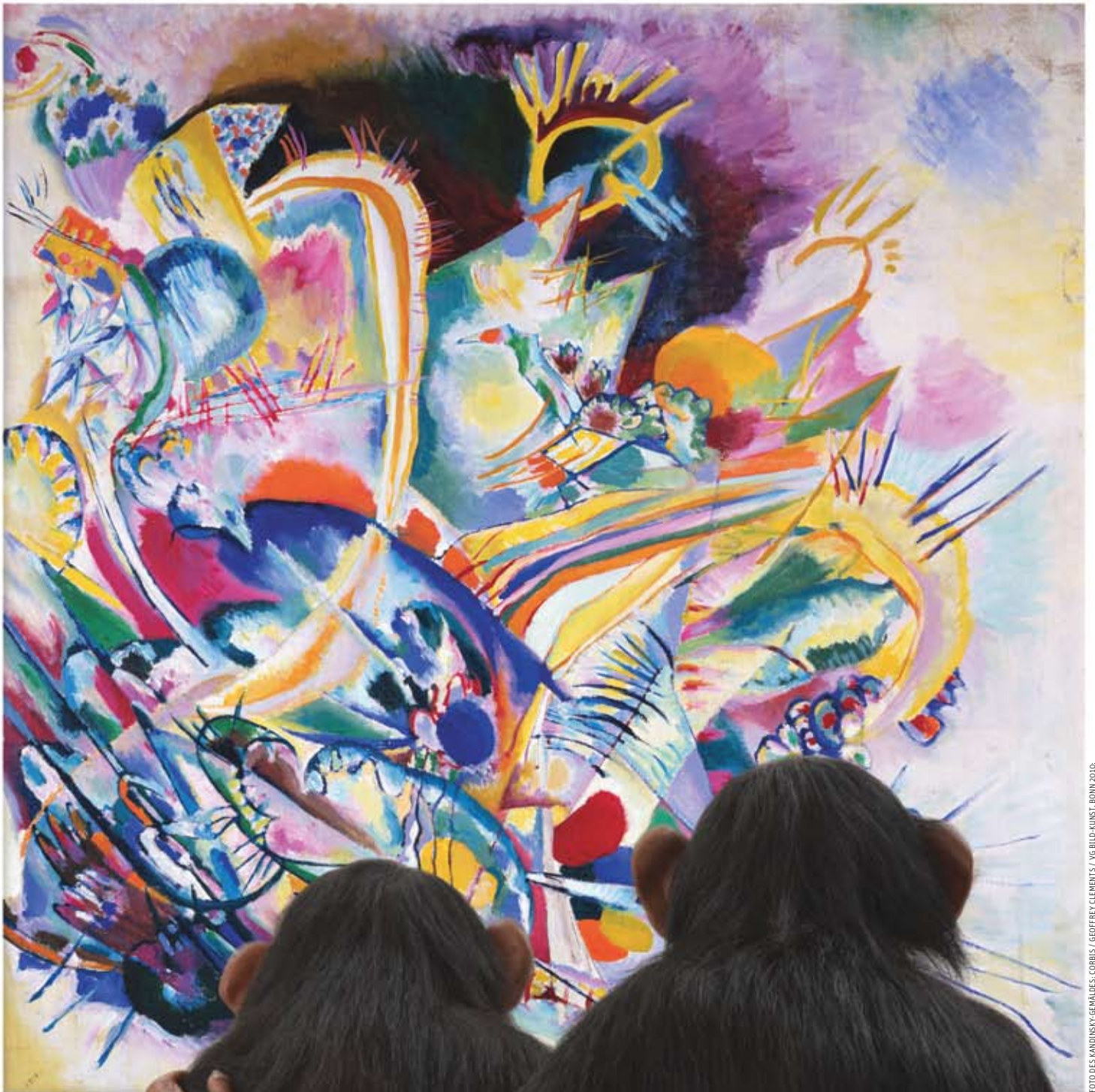
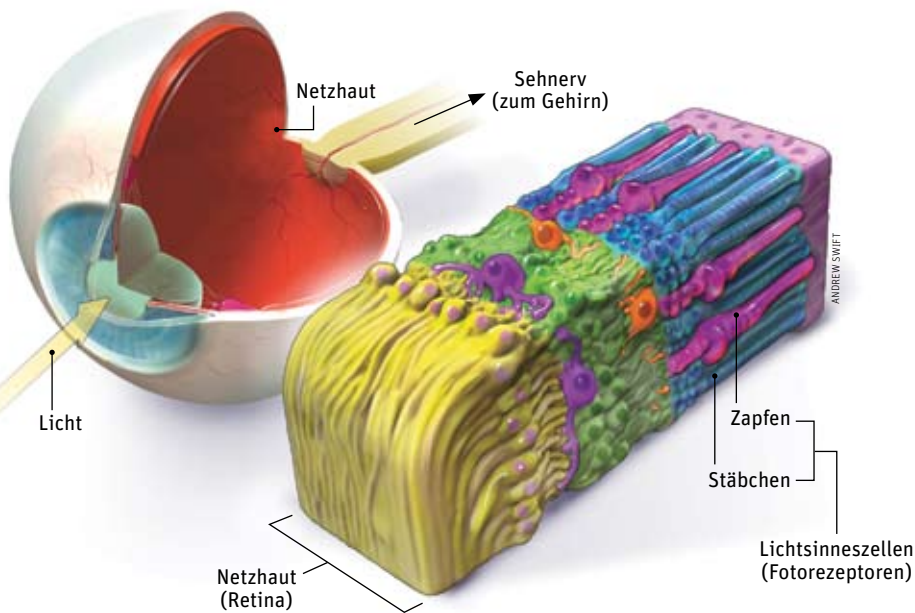


FOTO DES KANDINSKY-GEMÄLDES: CORBIS / GEOFFREY CLEMENTS / V&G BILD-KUNST, BONN 2019; SCHIMPANSEN: BOB ELSDALE; COMPOSING: LUCY READING/IKKANDA





Die Netzhaut mit ihren verschiedenen Nervenzelltypen liefert dem Gehirn über den Sehnerv visuelle Informationen. Als Sinneszellen zum Farben sehen dienen die so genannten Zapfen. Sie besitzen Pigmente, die jeweils von Licht eines bestimmten Wellenlängenbereichs aktiviert werden. Die Stäbchen arbeiten dagegen bei schwachem Licht; am Farben sehen sind sie in der Regel nicht beteiligt.

auf 560. Physiologen sprechen von Pigmenten für kurz-, mittel- und langwelliges Licht oder abgekürzt von S-, M- und L-Pigmenten (S nach englisch *short* für kurz). Als »normales« Blau, Grün und Gelb empfinden viele Menschen übrigens die Wellenlängen 470, 520 und 580 Nanometer.

Solch ein Farbspigment besteht aus einem Protein, das mit einem Licht absorbierenden Vitamin-A-Abkömmling in einem Komplex verbunden ist. Es liegt in der Außenmembran der so genannten Zapfen – einer Sorte von lichtempfindlichen Zellen oder Fotorezeptoren in der Netzhaut. Der Name bezeichnet ihre sich verjüngende Gestalt (siehe Bild oben; dem Dämmerungssehen dienen die so genannten Stäbchen). Absorbiert ein Sehfärbstoff Licht, löst das eine Kaskade molekularer Ereignisse aus und versetzt die betreffende Zelle in Erregung. Das wiederum aktiviert andere Neurone in der Netzhaut. Über sie entsteht schließlich ein Signal, welches über den Sehnerv ins Gehirn gelangt.

Zwar waren die Absorptionsspektren der drei Zapfenpigmente des Menschen schon länger bekannt, nicht aber die Pigmente selbst. Erst in den 1980er Jahren hat einer von uns (Nathans) die Gene für diese drei Proteine identifiziert. Anhand von deren DNA-Sequenzen (Nukleotidsequenzen) erstellte er dann die Abfolge der Aminosäuren (also die Kette der Bausteine) dieser Proteine. Die M- und L-Pigmente (für mittel- und langwelliges Licht) gleichen sich demnach fast völlig. Weiteren Studien zufolge beruht ihre unterschiedliche spektrale Sensitivität auf nur drei – von insgesamt 364 – ausgetauschten Aminosäuren (siehe SdW 4/1989, S. 68).

Wie sich auch herausstellte, liegen die Gene für diese beiden Sehfärbstoffe nebeneinander auf dem X-Chromosom. Letzteres überraschte die Forscher nicht – schließlich tritt die recht häufige so genannte Rotgrünblindheit bei Männern (die nur ein X-Chromosom besitzen) viel öfter auf als bei Frauen. Zudem spricht der Erbgang für eine solche Lokalisation. (Bei Frauen kann das Gen des anderen X-Chromosoms den Ausfall kompensieren, sie können die Farbschwäche aber vererben.) Das Gen für das S-Pigment (für kurze Wellenlängen) liegt dagegen auf dem Chromosom 7. Dessen Sequenz deutet nur auf eine entfernte Verwandtschaft mit den beiden anderen Sehfärbstoffen hin.

Viele Anhaltspunkte zur Geschichte dieser drei Farbspigmente hatten Forscher bis Mitte der 1990er Jahre durch Vergleiche mit der Ausstattung anderer Tiere gewonnen. So wussten wir damals schon, dass fast alle Wirbeltiere Gene aufweisen, die der menschlichen Erbsequenz für das S-Pigment auf dem Chromosom 7 stark ähneln. Demnach dürfte ein Sehfärbstoff für kürzere Wellenlängen ein altes Element des Farbsehens sein. Ebenso tauchen bei den Wirbeltieren verbreitet Sehfärbstoffe auf, die verwandt sind mit den beiden (ihrerseits ja ganz nah verwandten) Primatenpigmenten für längere Wellenlängen, deren Gene auf dem X-Chromosom sitzen. Auch solche Pigmente haben also wohl einen frühen Ursprung. Auffälligerweise besitzt unter den Säugetieren aber offenbar kein einziger Nichtprimat sowohl ein M- wie ein L-Pigment. Diese Differenzierung müsste demnach neuer sein.

**Zuerst eine falsche Fährte**

Der einzige Sehfärbstoff für längerwelliges Licht, mit dem sich die Mehrheit der Säugetiere begnügen muss, gleicht stark den M- und L-Pigmenten der Primaten, und das Gen dafür liegt bei ersteren ebenfalls auf dem X-Chromosom. Die Forscher erklärten sich die zwei X-Chromosom-Gene bei den Primaten mit einer Genverdoppelung in ihrer frühen Evolution: Infolge einer Mutation hätte ein X-Chromosom versehentlich zwei Gene für ein L-Pigment erhalten. Anschließend wäre eines dieser Gene mehrmals mutiert, oder vielleicht sogar beide. So könnten schließlich zwei Pigmente mit zwei leicht verschiedenen spektralen Fenstern entstanden sein.

Das ist ein gängiger Evolutionsmechanismus. Genverdoppelungen kommen vor, wenn Ei- oder Samenzellen entstehen und gleiche Chromosomen Abschnitte untereinander austauschen. Das geschieht nicht immer ganz sauber: Manchmal erhält ein Tauschpartner zu viel Material; unter Umständen besitzt er

**EVOLUTIONSVORTEIL**



Reife Früchte heben sich für uns oft schon durch ihre Farbe vom Hintergrund ab. Offenbar nützte das den Primaten so sehr, dass sich der verbesserte Farbsinn schnell durchsetzte.

nun ein oder sogar mehrere Gene doppelt. Sofern die Extragene günstig mutieren, können Selektionskräfte für ihren Fortbestand sorgen, und die neuen Gene verbreiten sich in der Population. Hierfür gibt es eine Menge Beispiele: Die Gene für das fetale Hämoglobin und den roten Blutfarbstoff von Erwachsenen etwa dürften auf eine Genverdopplung mit anschließenden Mutationen zurückgehen. (Das fetale Blut muss Sauerstoff stärker binden, um es dem mütterlichen zu entreißen.) Oder die so genannten Immunglobuline – die Proteine für die Vielfalt der Antikörper: Ihre Gene entstammen vermutlich einem einzigen Gen, das sich duplizierte.

Für die Lebensweise der Primaten müssten drei Farbsehpigmente statt zweien mancherlei Vorteil gebracht haben. Die Affen entdeckten nun etwa viele reife Früchte leichter schon an der Farbe. Vermutlich, so überlegten die Forscher, setzte sich die neue Anpassung darum bald durch.

So plausibel der beschriebene Evolutionsweg zunächst wirkte – neuere Entdeckungen scheinen diesem Ablauf zu widersprechen. Bei genauerem Hinsehen verlief die Evolution komplizierter und damit noch interessanter. Denn erstaunlicherweise benutzen die Primaten zwei verschiedene Methoden, um mehr Farben unterscheiden zu können. Die Genverdopplung passt ganz gut auf die so genannten Altweltaffen – die Arten Afrikas und Asiens, also unter anderem Paviane, Makaken, Meerkatzen und Menschenaffen –, und damit auch auf den Menschen. Die Neuweltaffen in Mittel- und Südamerika – Krallenaaffen, Tamarine, Totenkopffaffen – verwenden zur Verblüffung der Forscher eine andere Lösung.

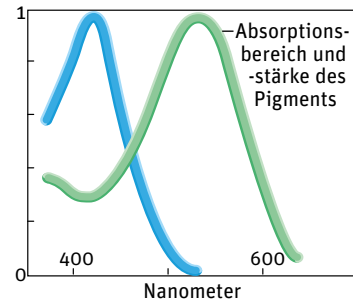
Bei den Altweltaffen können gewöhnlich alle Individuen trichromatisch sehen, auch die Männchen. Doch die Neuweltaffen sind schlechter dran, wie einer von uns (Jacobs) in den letzten Jahrzehnten entdeckte: Trichromatisch sehen bei ihnen nur etwa zwei Drittel der Weibchen; den übrigen Weibchen sowie allen Männchen fehlt das Differenzierungsvermögen im Rotgrünbereich. Sie sind offenbar nur Dichromaten.

Wie erklärt sich ein so gemischtes Bild? Verschiedene Forscher haben sich die verantwortlichen Gene der Neuweltaffen genauer angeschaut. Demnach besitzen die meisten ihrer Arten wirklich nur zwei Gene für Farbsehpigmente, und zwar eines für ein Pigment für kurze Wellenlängen und ein zweites für längere. Ersteres dürfte auf einem Nichtgeschlechtschromosom liegen. Das andere Gen, das hier interessiert, befindet sich auf dem X-Chromosom. Wieso sehen manche Neuweltaffenweibchen trotzdem trichromatisch?

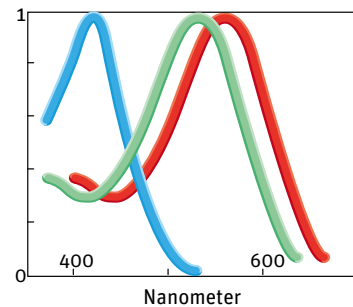
## ROTGRÜNBLINDE UND -STARKE SÄUGETIERE

**Die meisten Säugetiere sehen dichromatisch:** Zum Farbenerkennen verwenden sie zwei verschiedene Sehpigmente mit überlappendem Empfindlichkeitsbereich, eines für Licht kurzer, das andere für längere Wellenlängen (obere Bilder). Der Mensch und viele andere Primaten haben für Farben drei Sehpigmente: Sie können trichromatisch sehen – und dadurch viel mehr Farben unterscheiden (untere Bilder).

### DICHROMATISCH SEHEN



### TRICHROMATISCH SEHEN

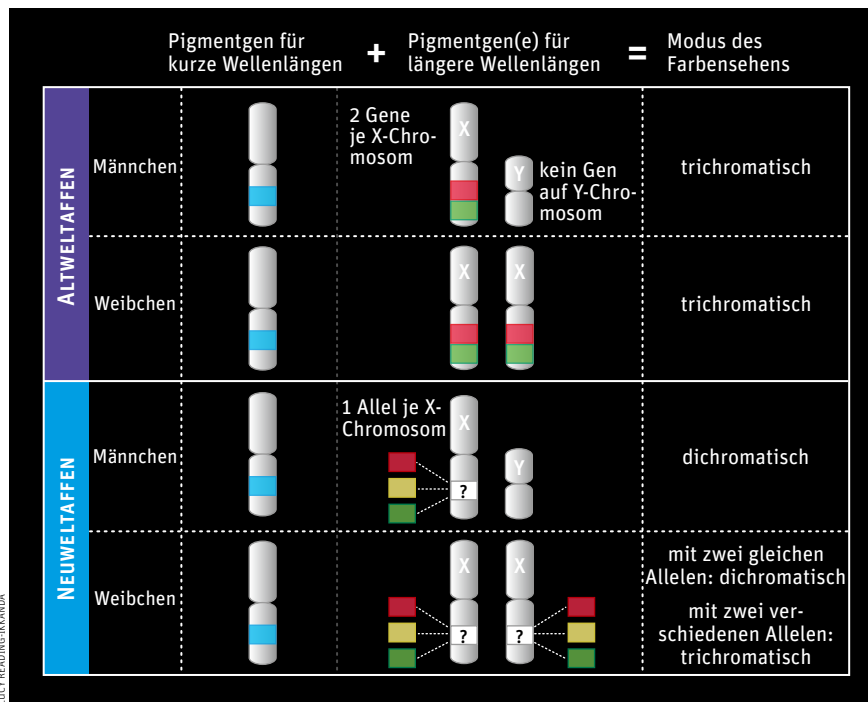


BEIDE FROSCH: BETTY IMAGES / GAIL SHIRWAY

FARBSPETREN: LUCY READING-IRKANDA



ZWEI VERSCHIEDENE LÖSUNGEN



**Trichromatik ist bei Alt- und Neuweltaffen** genetisch unterschiedlich geregelt. Bei beiden liegt auf einem Nichtgeschlechtschromosom ein Gen (blau dargestellt) für ein Pigment, das auf kurze Wellenlängen reagiert. Die Altweltaffen tragen außerdem auf jedem X-Chromosom zwei verschiedene Pigmentgene (rot und grün dargestellt), deren Proteine versetzte Bereiche von längerwelligem Licht erfassen. So erkennen auch die Männchen, trotz nur eines X-Chromosoms, Rot und Grün.

Das X-Chromosom der Neuweltaffen weist dagegen nur ein solches Pigmentgen auf. Allerdings gibt es dieses Gen in verschiedenen Varianten (Allelen; rot, gelb und grün dargestellt). Auf ihren beiden X-Chromosomen können Weibchen zwei verschiedene Allele tragen – und dann trichromatisch sehen.

**ALTWELTAFFEN (SCHMALNASEN)**

Sie entwickelten sich in Afrika und Asien, seit Südamerika und Afrika vor rund 40 Millionen Jahren getrennte Kontinente wurden. Hierzu gehören neben dem Menschen die Menschenaffen sowie unter anderem Makaken und Paviane. (Der Mandrill, ein Hundsaffe, ist mit den Meerkatzen verwandt.)



Mandrill

Die Antwort mag erstaunen: Von dem Gen auf dem X-Chromosom existieren in den Populationen mehrere Varianten, sprich Allele, mit leicht voneinander abweichenden DNA-Sequenzen. So etwas ist an sich nicht ungewöhnlich, bewirkt aber selten Funktionsunterschiede der Genprodukte. Doch in diesem Fall ist das anders, denn die einzelnen Varianten ergeben Pigmente mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit. Der Genpool etwa von Totenkopffaffen oder anderen typischen amerikanischen Arten enthält drei verschiedene Allele vom X-Chromosom-Gen. Eines der resultierenden Pigmente ähnelt dem mittleren des Menschen, ein anderes unserem für langwelliges Licht, das Absorptionsvermögen des dritten liegt ziemlich in der Mitte zwischen diesen beiden.

Jetzt wird klar: Mit ihren zwei X-Chromosomen haben nur die Weibchen eine Chance, zwei verschiedene Allele dieses Gens zu erben, die dann beide in Funktion treten und ihnen ermöglichen, Farben besser aufzulösen (siehe Kasten oben). Alle anderen Artgenossen müssen sich als Dichromaten durchs Leben schlagen. Gewissermaßen sind die Neuweltaffen nur mit einer Sparversion für trichromatisches Sehen ausgestattet.

Als Afrika und Südamerika in der Erdgeschichte auseinanderwichen, trieb das Meer einen Keil zwischen die beiden Kontinente. Seit vermutlich rund 40 Millionen Jahren

sind die Alt- und Neuweltaffen genetisch voneinander isoliert. Zunächst lag es nahe, anzunehmen, dass die Primaten bis zur Trennung noch Dichromaten waren und erst danach ihre jeweilige Farbenkompetenz erwarben – die eine Gruppe durch Genverdoppelung mit anschließender Auseinanderentwicklung der beiden Gene, die andere durch einfachere kleine Mutationen im gleichen Gen, was mehrere Varianten herbeiführte. Doch offenbar verlief die Evolution anders.

Denn ein molekularer Vergleich der Pigmente der X-Chromosom-Gene beider Gruppen erzählt eine neue Geschichte. Erstaunlicherweise haben die Pigmente für mittlere Wellenlängen sowohl bei den Alt- wie bei den Neuweltaffen ihre höchste Empfindlichkeit bei 530 Nanometern. Noch erstaunlicher ist, dass dies auf dem gleichen Set von drei geänderten Aminosäuren in den Proteinen beruht. Auch die L-Pigmente weisen bei beiden Primatengruppen drei – andere – übereinstimmende Aminosäuren auf, die dieses Pigment für 560 Nanometer höchst empfänglich machen. So viel Gleichheit wäre an sich gar nicht nötig, denn Forscher haben ausgetüfelt, dass ein Austausch etlicher anderer Aminosäuren ebenfalls Verschiebungen der spektralen Fenster bewirken würde. Dass die beiden Affengruppen jede für sich dieses gleiche Muster unabhängig voneinander entwickelten, ist somit unwahrscheinlich.



Plausibler wäre eine gemeinsame Basis. Vielleicht besitzen die Neuweltaffen noch das ursprüngliche System mit mehreren Genvarianten, das schon gemeinsame Vorfahren beider Primatengruppen benutzten – damals der erste Schritt zum trichromatischen Sehen (siehe Kasten unten). Die Varianten des X-Chromosom-Gens wären dann schon vor der Trennung durch wiederholte kleinere Mutationen entstanden und mit ihnen eine differenziertere Wahrnehmung im längerwelligen Bereich. (Auch das »mittlere« Allel der Neuweltaffen könnte schon dazugehört haben. Das Pigment trägt einige von den entscheidenden Aminosäuren, durch die sich die M- und L-Pigmente unterscheiden; und sein Absorptionsspektrum liegt gewissermaßen auf halbem Weg dazwischen.)

### Gleichberechtigung für Männer

Erst nach der Spaltung der Primaten in zwei Gruppen hätte sich bei den Altweltaffen die vermutete Genduplikation ereignet, mit einem wichtigen Unterschied zum weiter vorn beschriebenen Verlauf: Bei einem Affenweibchen der Alten Welt trat ein Fehler bei der Chromosomenpaarung auf, woraufhin ein X-Chromosom nun zwei Pigmentgene aufwies. Allerdings muss dieses Tier davon schon vorher zwei verschiedene Varianten besessen haben, denn das neue X-Chromosom trug nun von vornherein ein M- und ein L-Allel. Diese besondere Mutation ermöglichte fortan auch Männchen trichromatisches Sehen, wenn sie das Chromosom erbten. Die verbesserte Farbwahrnehmung erwies sich offenbar als dermaßen günstig, dass X-Chromosomen mit nur einem Pigmentgen mit der Zeit aus dem genetischen Repertoire der Altweltaffen verschwanden. Lediglich die Neuweltaffen behielten das einfachere System.

Zufälle halfen nicht nur bei der Evolution des Farbsinns. Der Zufall greift noch auf einer ganz anderen Ebene – bei jedem von uns, und sogar bei jeder sich entwickelnden Zapfenzelle in der Netzhaut. Das ist für eine differenzierte Farbwahrnehmung sogar wesentlich. Hierzu muss man sich klarmachen, welche Informationen die einzelnen Zapfen dem neuronalen Verrechnungsapparat überhaupt liefern.

Drei Pigmenttypen für unterschiedliche Spektralbereiche sind für trichromatisches Sehen nur eine Grundvoraussetzung. Mittels dieser Pigmente reagieren die Zapfen in der Netzhaut jeweils auf spezifische Anteile des Lichts und erzeugen Signale, denn jeder besitzt nur einen Pigmenttyp. Ein einzelner Zapfen liefert aber keine spezifische Information über die Wellenlänge, somit über die Farbe. Schwaches Licht in ihrem höchsten Empfindlich-

keitsbereich löst in der Sinneszelle unter Umständen ein gleich starkes Signal aus wie starkes Licht im Grenzbereich. Gleiches gilt für bestimmte Werte ober- und unterhalb des Maximums. Die Farbwahrnehmung kommt nur zu Stande, wenn das visuelle System die Signale benachbarter verschiedener Zapfentypen vergleichen kann.

Damit dies sauber funktioniert, muss gewährleistet sein, dass jeder Zapfen wirklich nur einen Pigmenttyp aufweist. Andererseits müssen unterschiedliche Zapfentypen wie in einem Mosaik dicht nebeneinander positioniert werden. Solche Bedingungen sind in der Primatennetzhaut tatsächlich erfüllt – obwohl jede der Sinneszellen bei den trichromaten Altweltaffen natürlich alle drei Pigmentgene besitzt. Wie sich die einzelne Zelle für einen einzigen Pigmenttyp entscheidet, ist noch nicht völlig geklärt. Aber wir kennen Mechanismen, die das ermöglichen.

Zum Anschalten von Genen bedienen sich Zellen so genannter Transkriptionsfaktoren: spezieller Proteine, die sich in der Nähe von Promotoren (Regulationsabschnitten) an die DNA anlagern. Über verschiedene weitere Schritte wird das Gen dann abgelesen und das Protein (hier das Pigment) hergestellt. Bei Zapfen für kurzweiliges Licht scheinen Tran-



Goldstirnklammeraffe

MINDEN PICTURES / PETER OXFORD

## NEUWELTAFFEN (BREITNASEN)

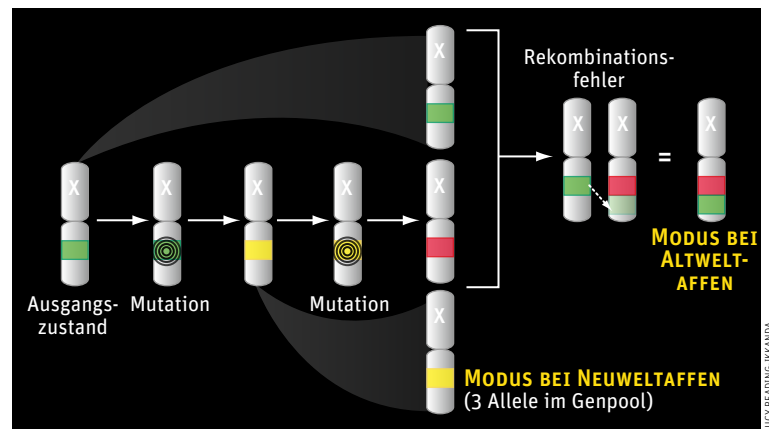
Sie sind in Mittel- und Südamerika zu Hause. Im Schnitt sind sie eher klein, einige Arten sogar sehr klein. Hierzu gehören unter anderem Krallenaffen, Kapuziner- und Totenkopffaffen, Springtamarine, Klammer- und Brüllaffen.



MAPPING SPECIALISTS

## DAS NEUE EVOLUTIONSMODELL

**Genvergleiche lassen annehmen**, dass die Trichromatie der Altweltaffen aus einer Situation heraus entstand, wie sie bei den Neuweltaffen noch heute herrscht.



LUCY READING/IRKANDA

**Ein gemeinsamer Vorfahr der Alt- und Neuweltaffen** trug auf dem X-Chromosom ein einziges Gen für ein Farbpigment im langwelligen Bereich (links). Dieses Gen mutierte verschiedentlich und trat schließlich in mehreren Varianten (Allelen) auf, deren Pigmente auf versetzte Wellenlängen ansprachen: die Situation der Neuweltaffen bis heute (Mitte). Bei den Altweltaffen trafen später – durch einen Fehler beim Herstellen von Keimzellen – zwei der Allele auf einem X-Chromosom zusammen (rechts). Offenbar war das so vorteilhaft, dass sich dieser Zustand bei diesen Affen durchsetzte.



RITA WROGH, UCSD

Diese Maus verfügt dank eines Menschengens über zwei verschiedene Proteine für längerwelliges Licht. Dadurch lernte sie, bestimmte Orangetöne von Blau zu unterscheiden. Erstaunlicherweise verarbeitet das Gehirn die Information.

skriptionsfaktoren das gewünschte Gen (für das S-Pigment) schon beim Fetus zu aktivieren. Zugleich werden in diesen Zellen die Pigmentgene des X-Chromosoms auf noch nicht verstandene Weise gehemmt.

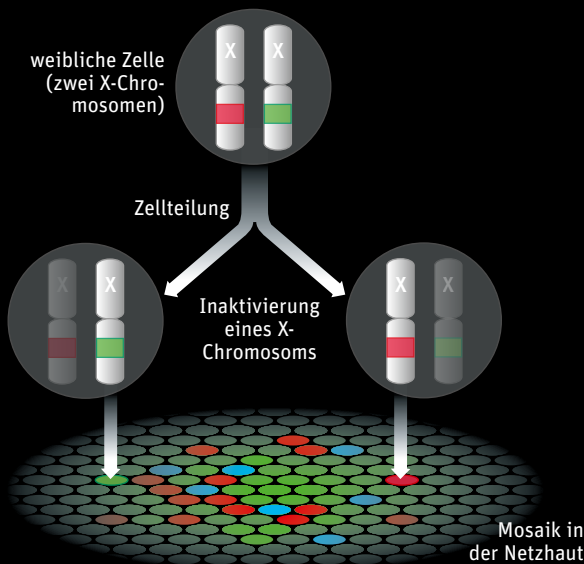
Bei Zapfen für längere Wellenlängen wird es komplizierter. Zunächst zu den Neuweltaffen: Auch bei Weibchen, deren X-Chromosomen zwei verschiedene Allele tragen, enthält trotzdem jeder Zapfen für längerwelliges Licht nur einen Pigmenttyp. Der Hintergrund dafür ist: Generell wird in weiblichen Zellen eines der beiden X-Chromosomen stillgelegt (durch so genannte X-Inaktivierung) – welches, entscheidet sich im Einzelfall in der frühen Embryonalentwicklung in einem Zufallsprozess. Infolgedessen bildet jeweils ungefähr die Hälfte

te jener Zapfen entweder die eine oder die andere Pigmentsorte, und beide Zellsorten verteilen sich dicht gemischt auf der Netzhaut (siehe Kästen unten, links).

Bei den Altweltaffen genügt die Stilllegung eines X-Chromosoms allein nicht, denn jedes trägt ja zwei Gene für längerwelliges Licht. Studien von einem von uns (Nathans) lassen ahnen, wie die Zelle eines der beiden Gene auswählt: Eine nahe gelegene DNA-Sequenz, als Locus-Kontrollregion bezeichnet, bestimmt darüber, wahrscheinlich schon während der Embryonalentwicklung. Die Locus-Kontrollregion steuert dann ausschließlich einen der beiden benachbarten Promotoren für diese beiden Gene an. So wird nur eines der Gene angeschaltet (Kasten unten, rechts). Noch ist

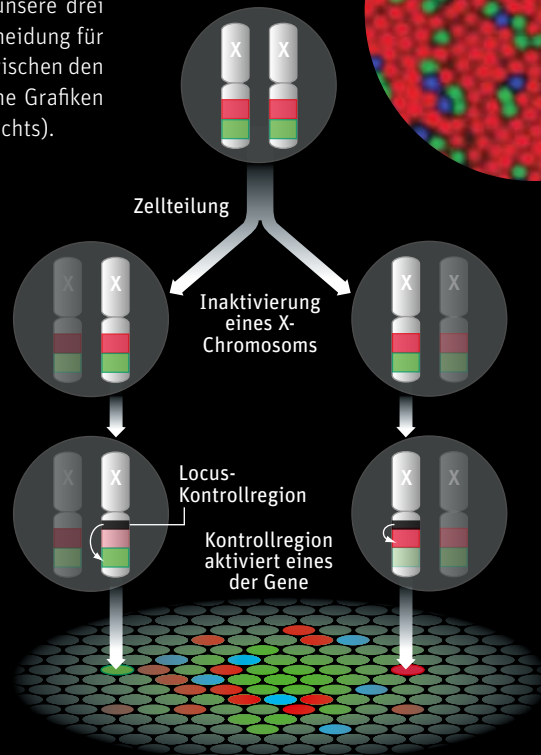
## DAS MOSAIK DER NETZHAUT

Bei den unterschiedlichen Zapfentypen in der Netzhaut spielen Zufallsprozesse mit. Jede dieser Sinneszellen enthält ja alle drei Gene für unsere drei Farbsehpigmente – doch nur je eines darf arbeiten. Über die Entscheidung für den Typ für kurzwelliges Licht ist nicht viel bekannt. Die Auswahl zwischen den beiden anderen Typen scheint Zufallsmechanismen zu folgen (siehe Grafiken unten), ebenso deren Verteilung in der Netzhaut (Computergrafik rechts).



### NEUE WELT: zufällige Chromosomenwahl

Bei den Neuweltprimaten fällt die Entscheidung für eines der Allele für langwelliges Licht mit der zufallsgesteuerten Ausschaltung eines der beiden X-Chromosomen (X-Inaktivierung genannt) bei einzelnen Zellen. Das geschieht schon in der frühen Embryonalentwicklung der Weibchen. Trägt das Weibchen auf seinen beiden X-Chromosomen unterschiedliche Pigmentallele, entsteht durch die Inaktivierung jeweils eines X-Chromosoms ein Mosaik aus beiden Zapfentypen.



### ALTE WELT: außerdem Zufallsentscheidung für ein Gen

Auch in weiblichen Zellen von Altweltaffen ist eines der beiden X-Chromosomen stillgelegt. Doch jedes X-Chromosom – auch in männlichen Zellen – besitzt zwei Pigmentgene, darum muss sich die Zelle für eines davon entscheiden. Dafür sorgt ein Genregulator, die Locus-Kontrollregion. Er schaltet jeweils nur eines der Gene ein. Wiederum entsteht nach einem Zufallsprinzip ein Typenmosaik in der Netzhaut.

RETINA: DAVID WILLIAMS, UNIVERSITY OF ROCHESTER; GEN-ILLUSTRATION: LUCY READING-IRKANDA

der Vorgang nicht in allen Einzelheiten erforscht, es scheint sich aber wiederum um ein Zufallsprinzip zu handeln.

Wenn diese Überlegungen stimmen, sollten bei Altweltaffen die beiden Zapfensorten für längerwelliges Licht auf jedem kleinen Fleck der Netzhaut in einem Zufallsmuster verteilt sein. Untersuchungen von David Williams von der University of Rochester (New York) und seinen Kollegen deuten genau hierauf hin, zumindest soweit sich die Zapfenverteilung mit derzeit verfügbaren Methoden erfassen lässt.

### Unerwartet plastisches Gehirn

Und was geschieht weiter mit den Zapfensignalen? Studien zum neuronalen Hintergrund der Farbwahrnehmung bei Primaten sprechen dafür, dass sich bestimmte Mechanismen in Netzhaut und Gehirn höchst plastisch verhalten. Das betrifft die differenzierte Wahrnehmung von längerwelligem Licht. Zwar sind Schaltkreise vorgegeben, in denen Signale (visuelle Informationen) von Zapfen für kurzwelliges Licht pauschal mit Signalen verglichen werden, die von beiden Zapfentypen für den längerwelligen Bereich stammen. Aber wenn es um den Vergleich zwischen M- und L-Zapfen geht, scheinen Netzhaut und Gehirn mehr zu improvisieren. Genauer gesagt muss das visuelle System anscheinend erst aus der Erfahrung lernen, um welchen der beiden Typen es sich im Einzelnen jeweils handelt.

Überdies sieht es so aus, als ob der wichtigste Verrechnungsweg, der Informationen von diesen beiden Zapfentypen übermittelt, gar nicht allein für Farbsehen zuständig ist. Möglicherweise kam er zu dieser Aufgabe durch einen glücklichen Zufall. Den Rahmen dafür bot ein altes neuronales System für hochauflösendes räumliches Sehen. Es entwickelte sich, damit die Abgrenzungen von Gegenständen und ihre Entfernung vom Betrachter präzise wahrgenommen werden können. Wie John Mollon von der University of Cambridge deutlich machte, sind bei Primaten die Zapfen für längerwelliges Licht zugleich für scharfes räumliches Sehen zuständig. Die Information wird sogar nach dem gleichen Prinzip verarbeitet wie bei der Farbwahrnehmung im längerwelligen Bereich: Auch beim räumlichen Sehen wird die Erregung eines M- oder L-Zapfens damit verglichen, wie stark seine vielen M- und L-Nachbarn durchschnittlich ansprechen. Bisher fanden die Neurophysiologen keinen eigenen Schaltkreis für dieses Farbsehen. Vielleicht ist überhaupt keiner notwendig. Dann wäre unser trichromatisches Sehen ein erfreuliches Nebenprodukt des genauen räumlichen Sehens.

Uns verführte das zu einem spannenden Experiment. Die Frage dahinter war: Konnte jenes frühe Affenweibchen, das erstmals zwei verschiedene Allele für längerwelliges Licht besaß, damit überhaupt etwas anfangen? Konnte das damalige Primatenhirn genügend improvisieren, um diese Informationsquelle gleich zu nutzen, ohne dass erst ein neuer Nervenschaltkreis evolvieren musste? Genügte also ein dritter Pigmenttyp, um dem Farbsehen eine weitere Dimension hinzuzufügen?

Das wollten wir an einem dichromaten Säugetier ausprobieren – an Labormäusen. Wir erstellten gentechnisch ein Maus-X-Chromosom, welches statt für das mauseigene M-Pigment nun für ein menschliches L-Pigment kodierte. Somit gab es in der Zuchtpopulation jetzt zwei verschiedene Allele (auf verschiedenen X-Chromosomen) für längere Lichtwellen, ähnlich wie wir es für frühe Primaten vermuten. Mäuse mit dem menschlichen Gen benutzten dieses, wie sich zeigte, tatsächlich in Zapfenzellen der Netzhaut. Auch fanden wir, dass der von ihnen gebildete menschliche Sehfärbstoff Signale vergleichbar gut übermittelte wie das Maus-M-Pigment. Zudem nahmen die manipulierten Mäuse erwartungsgemäß ein breiteres Lichtspektrum wahr als ihre normalen Artgenossen.

Was würde geschehen, wenn ein Mausweibchen zwei verschiedene Allele besaß – wenn die Netzhaut ein Mosaik mit M- und L-Zapfen aufwies (weil mal das eine, mal das andere X-Chromosom ausgeschaltet war)? Benutzt solch ein Tier die beiden Zellsorten nur undifferenziert zum Sehen oder vermag es im längerwelligen Licht zwischen mehr Farben zu differenzieren? Kurz gesagt: Ja, die Maus sieht mehr Farben.

Es gelang uns, solche Mäuseweibchen darauf zu dressieren, grüne, gelbe, orange und rote Scheiben auseinanderzuhalten (Bild links oben). Normale Mäuse lernen das nicht, denn für sie wirken die Scheiben völlig gleich. Mit dem L-Pigment erwarben die Tiere anscheinend eine zusätzliche Dimension des Sehens. Demnach ist das Säugerhirn offensichtlich fähig, auch neuartige, qualitativ andere Formen visueller Eindrücke auszuwerten.

Dieser Schluss hat einige Tragweite für unsere Vorstellungen zur Evolution von Sinnessystemen generell. Es könnte bedeuten, dass ein veränderter »Anfang«, ein veränderter »Eingang« eines Sinnessystems die Evolution des gesamten Systems voranzutreiben vermag. Wenn Gene für Sinnesrezeptoren mutieren, schlägt der Effekt womöglich schnell durch. Vielleicht sah gleich das erste Affenweibchen mit zwei Pigmenten für längerwelliges Licht die Welt in ganz neuen Farben. ◀

### FRAUEN MIT SUPERFARBSINN?



GETTY IMAGES / GEORGE DEBOLD

Manche Frauen besitzen wegen einer Mutation in einem der Gene für den längerwelligen Bereich sogar vier verschiedene Farbpigmente. Dadurch verschiebt sich die spektrale Empfindlichkeit der Netzhaut nachweislich. Ob diese Frauen mehr Farbtöne erkennen – also Tetrachromaten sind –, ist noch strittig.



**Gerald H. Jacobs** (links) ist Forschungsprofessor an der Abteilung für Psychologie und am Institut für neurowissenschaftliche Forschung an der University of California in Santa Barbara. **Jeremy Nathans** hat an der medizinischen Fakultät der Johns Hopkins University in Baltimore eine Professur für Molekularbiologie und Genetik, und er forscht am Howard Hughes Medical Institute in Chavy Chase (beides Maryland).

**Jacobs, G. H.:** Primate Color Vision: A Comparative Perspective. In: *Visual Neuroscience* 25(5–6), S. 619–633, September 2008.

**Jacobs, G. H. et al.:** Emergence of Novel Color Vision in Mice Engineered to Express a Human Cone Pigment. In: *Science* 315, S. 1723–1725, 23. März 2007.

**Nathans, J.:** The Evolution and Physiology of Human Color Vision: Insights from Molecular Genetic Studies of Visual Pigments. In: *Neuron* 24(2), S. 299–312, Oktober 1999.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1026689](http://www.spektrum.de/artikel/1026689).



# Fatale Darmkrankheit

# ZÖLIAKIE

Gluten, ein Bestandteil von Brotgetreide, ist für Betroffene tabu, weil ihr Immunsystem sonst den Darm angreift. Allmählich schälen sich die Ursachen der schweren Autoimmunkrankheit heraus.

Von Alessio Fasano

## In Kürze

- ▶ Zöliakie ist **eine Autoimmunkrankheit des Darms**, die Verdauungsbeschwerden und Ernährungsdefizite verursacht. Ausgelöst wird sie durch den Verzehr von Gluten, dem »Klebereiweiß« in Weizen, und ähnlichen Proteinen in anderen Brotgetreidearten.
- ▶ Damit eine Zöliakie entsteht, muss offenbar auch **eine genetische Disposition** dafür vorliegen und zudem die Darmschleimhaut ungewöhnlich durchlässig sein.
- ▶ Die gleichen drei Gegebenheiten – ein Umweltfaktor, eine genetische Veranlagung und ein zu durchlässiger Darm – scheinen auch anderen Autoimmunkrankheiten zu Grunde zu liegen. **Neue Therapien der Zöliakie** könnten darum vielleicht auch bei ihnen helfen.

Für die größte wissenschaftliche Revolution überhaupt halte ich die Geburtsstunde des Ackerbaus – die Umwälzungen vor 10 000 Jahren, als Menschen im Nahen Osten erkannten: Neue Pflanzen wachsen aus Samen, und die müssen dazu auf den Boden fallen. Vorher hatte sich der Mensch hauptsächlich von wild wachsenden Früchten, Nüssen und Wurzelknollen ernährt, bei Gelegenheit auch von Fleisch. Er war den Launen der Natur ausgeliefert und musste sich dorthin begeben, wo es für ihn Nahrung gab. Auf Dauer am selben Ort siedeln konnte er nicht.

Doch als jene Menschen begriffen, was es mit Samen auf sich hat, lernten sie schnell, Pflanzen zu kultivieren und zu domestizieren. Bald kreuzten sie verschiedene Gräser und züchteten wichtige Getreide wie Weizen, Roggen und Gerste – nahrhafte, lagerfähige, vielfältig nutzbare Grundnahrungsmittel, die auch gut für den Handel geeignet waren. Jetzt konnten Menschen sesshaft werden und sogar Städte bauen. Zufall ist es sicher nicht, dass die Gegend des ersten Ackerbaus auch zur Wiege unserer Zivilisation wurde.

Der Fortschritt hatte jedoch seinen Preis – mit einer verheerenden Darmkrankheit, die wir heute Zöliakie nennen (bei Erwachsenen auch einheimische Sprue). Sie wird, wie erst seit wenigen Jahrzehnten bekannt, durch den Verzehr von Gluten hervorgerufen, die übliche Sammelbezeichnung für die so genannten Kleberproteine der Brotgetreide. Ursprünglich waren Glutene und verwandte Substanzen kein Bestandteil der menschlichen Kost. Vor Jahrtausenden erlaubte der Anbau von Weizen, Roggen oder Gerste zwar immer größere

festen Siedlungen, doch gleichzeitig dürfte Gluten viele Menschen gequält, oft sogar umgebracht haben, vor allem Kinder. Denn wenn dafür anfällige Personen diese Proteine öfter aßen, schädigte das den Darm so schwer, dass ihr Körper nicht mehr genug Nährstoffe aufnehmen konnte. Betroffene litten unter Bauchschmerzen, Durchfällen und einem aufgeblähten Hungerbauch, und sie magerten ab. Die Krankheit mit all ihren Auswirkungen bedeutete oft frühes Siechtum.

Falls die Menschen diese Todesfälle damals überhaupt eigens wahrnahmen, begriffen sie die wahre Ursache wohl nicht. Ein genaueres Verständnis der Zöliakie gewannen Forscher sogar erst in den letzten 20 Jahren. Demnach handelt es sich um eine Autoimmunkrankheit – das eigene Immunsystem greift Darmgewebe an. Doch Gluten trägt daran nicht allein die Schuld. Vielmehr müssen als weitere Faktoren eine besondere genetische Veranlagung und abnorme Strukturen des Dünndarmgewebes hinzukommen.

Auch bei vielen anderen Autoimmunkrankheiten könnte ein entsprechendes Zusammenspiel dreier Komponenten und Ebenen vorliegen – ein äußerer Einfluss, bestimmte Gene sowie eine Anomalie der Darmstruktur. Deswegen erbrachten die Forschungen zur Zöliakie nicht nur für diese Krankheit neue Behandlungsideen, sondern auch für eine Reihe anderer Autoimmunleiden: darunter rheumatoide Arthritis, multiple Sklerose und Typ-1-Diabetes (der so genannte jugendliche Diabetes, bei dem das Immunsystem die Insulinzellen der Bauchspeicheldrüse zerstört).

Die Bezeichnung Zöliakie geht auf den griechischen Arzt Aretaios (Aretäus) von Kappadokien (etwa 80–138) zurück. Er hinterließ die erste wissenschaftliche Beschreibung der

**Normales Brot sowie alle Lebensmittel, die Weizen, Roggen oder Gerste enthalten, bringen das Immunsystem bei Zöliakie dazu, den Darm zu attackieren. Die Darmschäden beeinträchtigen die Nährstoffaufnahme und erhöhen das Krebsrisiko.**



FOTO: JUPITERIMAGES; BEARBEITUNG: JEN CHRISTIANSEN

Krankheit, die er *koiliakos* nannte (nach griechisch *koilia* für »Bauch«). Als Vater der modernen Zöliakieforschung gilt jedoch der englische Mediziner und Kinderarzt Samuel Gee (1839–1911). 1887 beschrieb er die Krankheit als »eine chronische Verdauungsstörung, die in jedem Alter vorkommt, aber besonders Kinder zwischen ein und fünf Jahren trifft«. Als eine Ursache dafür verdächtigte er zwar schon Ernährungsfehler. Bei aller Scharfsicht erkannte er den wahren Hintergrund aber noch nicht, sondern empfahl als Diät für solche Kinder ausgerechnet dünne, beidseits geröstete Brotscheiben.

Erst nach dem Zweiten Weltkrieg fand der niederländische Kinderarzt Willem-Karel Dicke (1905–1962) den Auslöser. Er beobachtete, dass Kinder mit Zöliakie während der kriegsbedingten Brotknappheit so gut wie gar nicht mehr an der Krankheit starben. Vorher war ihr gut jedes dritte erlegen. Nach dem Krieg aber stieg die Todesrate mit dem erneut verfügbaren Weizenmehl auf die frühere Höhe. Andere Forscher überprüften dann die verschiedenen Bestandteile im Weizenkorn und fanden den Schuldigen: Gluten, das Hauptprotein in diesem Getreide.

Die Mediziner erkannten endlich, dass die wiederholte Aufnahme von Gluten chronische Entzündungen und Schäden im Dünndarm bewirkt. Und zwar werden die so genannten Zotten (Villi) lädiert, jene unzähligen fingerförmigen Ausstülpungen der Dünndarmschleimhaut. Sie erfüllen nun nicht mehr ihre Funktion, Nahrung weiter abzubauen und die Nährstoffe ins Blut zu schleusen (siehe Kasten rechts). Glücklicherweise erholt sich der Dünndarm bei glutenfreier Kost fast immer wieder, wenn die Erkrankung früh genug erkannt wird. Dann regeneriert

sich die Schleimhaut weit gehend oder vollständig, und die Verdauungsbeschwerden verschwinden.

Die Entzündungen und Schäden am Dünndarm kommen zu Stande, weil Gluten bei entsprechender Veranlagung verschiedene Immunzellen aktiviert. Diese greifen daraufhin gesundes Darmgewebe an, als müssten sie Infektionserreger vernichten. Das Geschehen im Einzelnen wird noch untersucht. Besonders eine Beobachtung erweist sich aber bereits jetzt als nützlich: Bei der irregeleiteten Immunantwort auf Gluten werden Antikörper gegen die so genannte Gewebs-transglutaminase gebildet. Dieses Enzym tritt in entzündeten Dünndarmarealen aus geschädigten Zellen aus und hat die Aufgabe, Reparaturmaßnahmen in der Umgebung zu unterstützen.

### Keine seltene Krankheit

Jene Antikörper kommen bei Zöliakie so regelmäßig vor, dass sie heute zur Diagnose herangezogen werden können. Meine eigene Arbeitsgruppe und andere Forscher verwenden sie zudem, um die Verbreitung des Leidens abzuschätzen. Früher gab es keine spezifischen Tests auf die Krankheit. Ärzte erstellten die Diagnose anhand der Symptome, konnten allenfalls Gewebeproben vom Dünndarm hinzuziehen und mussten abwarten, ob glutenfreie Kost half. (Antikörper gegen Gluten selbst eignen sich nicht zum Nachweis, weil diese auch bei gesunden Menschen vorkommen können.)

Noch vor wenigen Jahren galt Zöliakie als eine außerhalb Europas seltene Krankheit. So hieß es bisher, in Nordamerika habe nicht einmal jeder Zehntausendste die klassischen Symptome. (Für manche europäischen Länder waren die Angaben schon damals viel höher.) In der bislang umfangreichsten Breitenstudie testeten wir über 13 000 Nordamerikaner, darunter viele scheinbar nicht Betroffene. Zu unser aller Erstaunen wiesen wir Zöliakie beinahe 100-mal öfter nach als gedacht, nämlich auch bei jedem 133. scheinbar Gesunden. Ähnlich hohe Fallzahlen fanden Kollegen dann in vielen anderen Ländern – und ganz entgegen den Erwartungen auf allen Kontinenten.

Wieso also blieben bisher 99 Prozent der Fälle unerkannt? Der Grund dürfte sein, dass die klassischen, deutlichen Symptome – anhaltende Verdauungsstörungen und chronischer Durchfall – erst auftreten, wenn ausgedehnte und kritische Darmabschnitte erkrankt sind. Kleinere oder leichtere Darmentzündungen fallen oft nicht so auf oder verursachen atypische Beschwerden.

### WISSENSWERT

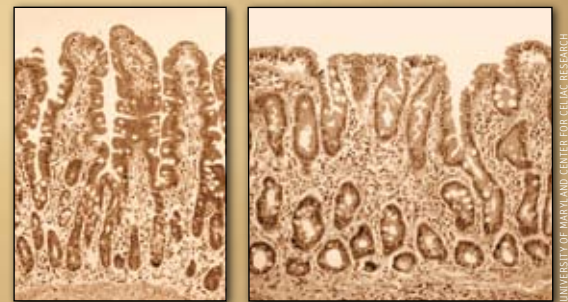
- Nach neueren Erkenntnissen leidet fast jeder Hundertste an Zöliakie. Die meisten Betroffenen wissen es nicht einmal.
- Typische Symptome bei Kindern sind unter anderem Bauchschmerzen, Blähungen, Verstopfung, Durchfall, Gewichtsverlust und Erbrechen.
- Etwa jeder zweite betroffene Erwachsene leidet bei Diagnosestellung nicht unter Durchfall.
- Anzeichen einer Zöliakie bei Erwachsenen sind: Blutarmut, Arthritis, Osteoporose, Depression, Müdigkeit, Unfruchtbarkeit, Gelenksbeschwerden, Krämpfe oder Taubheitsgefühl in Händen und Füßen.
- Einer neueren Studie zufolge sind die Fallzahlen von Zöliakie in den letzten 50 Jahren erheblich gestiegen – aus noch unbekannter Ursache.





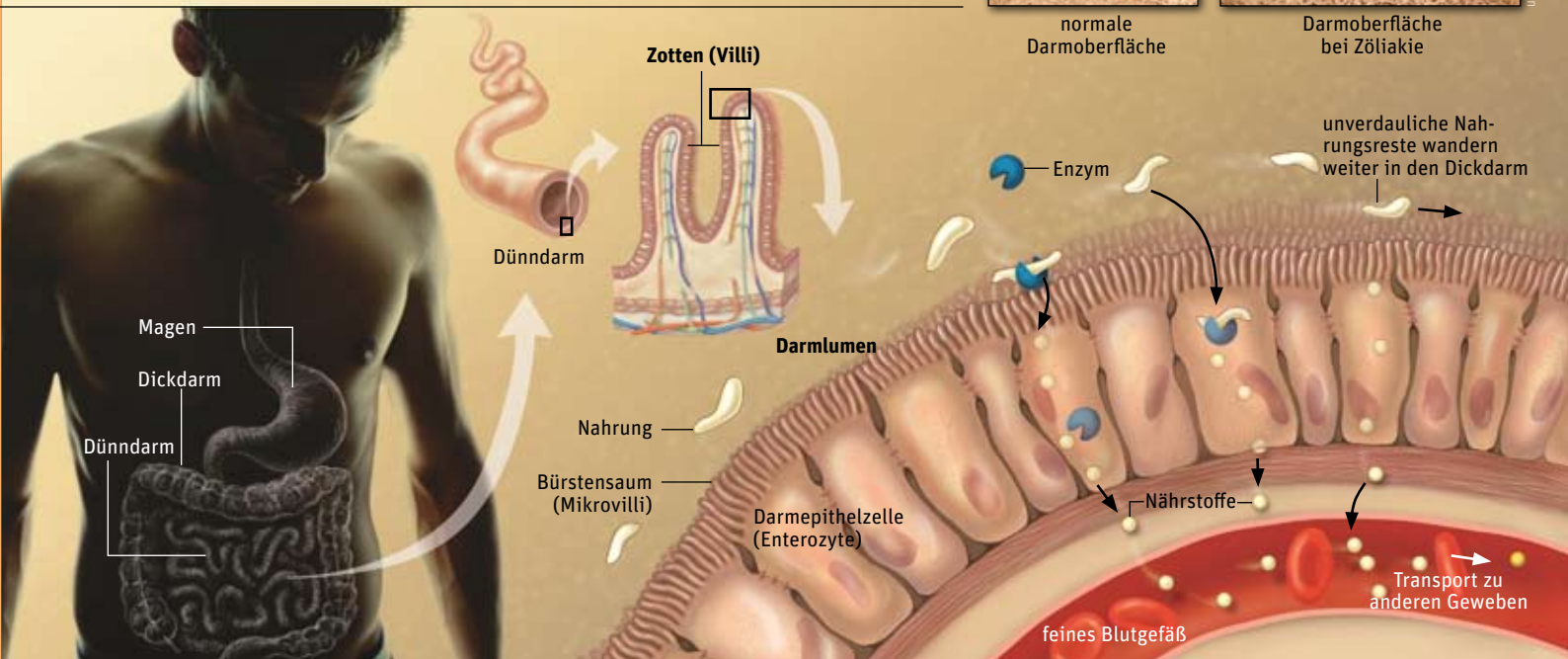
## IM DÜNNDARM

**Die unverdaute Nahrung**, die den Dünndarm erreicht, wird dort weiter bis in Grundbestandteile zerlegt – Proteine etwa zu wenigen oder einzelnen Aminosäuren, Kohlenhydrate zu kleinen Zuckermolekülen. Das besorgen insbesondere Sekrete der Bauchspeicheldrüse und auch Enzyme an der Oberfläche der Darmepithelzellen (Enterozyten). Bei Gesunden hat der Dünndarm dafür – und zur Aufnahme der Nährstoffe – eine stark vergrößerte Oberfläche, was wesentlich auch auf unzählige fingerförmige Ausstülpungen der Darmschleimhaut zurückgeht, Zotten oder Villi genannt (kleines Bild Mitte), sowie auf den »Bürstensaum« (Mikrovilli) der Epithelzellen. Zöliakie beeinträchtigt die Nahrungsaufnahme, denn dabei erleiden die Epithelzellen Schaden und die Zotten verflachen (Fotos).



normale Darmoberfläche

Darmoberfläche bei Zöliakie



VERDAUUNGSSYSTEM: GETTY IMAGES; FOTOMONTAGE: JEN CHRISTIANSEN; INNENDARM-ILLUSTRATIONEN: KIM MOSS, ELECTRONIC PUBLISHING SERVICES INC.

Wir kennen mittlerweile eine Reihe von Symptomen, die man früher nicht auf Zöliakie bezog, die aber von dadurch bedingten Resorptionsstörungen verursacht sein können. Eine mangelhafte Eisenaufnahme etwa kann eine Anämie (Blutarmut) hervorrufen oder zu wenig Folsäure verschiedenste neurologische Probleme erzeugen. Desgleichen kann eine Zöliakie zu Osteoporose, Gelenkschmerzen oder chronischer Müdigkeit führen, ja sogar Minderwuchs, Hautschäden, Epilepsie, Demenz, Schizophrenie oder Krampfanfälle auslösen. Wegen des oft untypischen Verlaufs werden noch immer längst nicht alle Fälle erkannt. Doch im Prinzip lassen sich die verschiedenen Erscheinungsformen der Krankheit heute in Frühstadien diagnostizieren. Eine glutenfreie Ernährung bewahrt Betroffene dann vor schlimmeren Folgeschäden.

Derzeit stellt die Zöliakie das einzige Beispiel einer Autoimmunkrankheit dar, die sich durch Gabe oder Wegnehmen einer Umweltkomponente – in dem Fall Gluten – quasi ein- und abschalten lässt. Sie ist damit ein höchst wertvolles Modell, um Autoimmunerkrankun-

gen zu ergründen. (Zwar vermuten Forscher auch bei anderen solchen Leiden eine Beteiligung von Umweltfaktoren, doch konnten sie noch keinen definitiv identifizieren.)

Wieso werden manche Menschen von Gluten krank, andere nicht? Der Organismus von Gesunden reagiert darauf schlicht nicht, der von Kranken sehr wohl! Aber warum? Normalerweise tritt das Immunsystem erst dann in Aktion, wenn es im Blut oder in den Geweben erhebliche Mengen an Fremdproteinen entdeckt. Die könnten ja von Krankheitserregern stammen. Einen Hauptweg, über den wir fremden Proteinen und anderen Fremdstoffen begegnen, stellt die Nahrungsaufnahme dar. Darum sitzen unter den Schleimhautzellen, die den Darm auskleiden – den Enterozyten –, angriffsbereite Immunzellen, die notfalls sofort Verstärkung herbeirufen. Nur löst der Proteinschub durch Mahlzeiten gewöhnlich keinen Alarm aus. Denn an sich zerlegt das Verdauungssystem Proteine – wenigstens die meisten – in ihre Grundbausteine, die Aminosäuren. Erst diese werden dann über den Darm aufgenommen.

**Mediziner wiesen Zöliakie fast 100-mal öfter nach als gedacht. Das gilt wahrscheinlich weltweit**

Bei Gluten ist das anders. Es enthält ungewöhnlich viel der beiden Aminosäuren Glutamin und Prolin, weswegen die Verdauungsenzyme manche Abschnitte nicht genügend zerkleinern können. Unzerteilte Fragmente, so genannte Peptide, bleiben übrig. Die werden bei gesunden Menschen weitgehend im Darm zurückgehalten und ausgeschieden, bevor das Immunsystem sie bemerkt. Sollten doch einmal einige wenige Fragmente die Darmbarriere

re überwinden, stört sich ein normal funktionierendes Immunsystem meist nicht daran.

Doch Zöliakiepatienten besitzen eine Genmixtur, die zu einer erhöhten Empfindlichkeit für die Glutenfragmente beiträgt. Mitwirkende sind beispielsweise Varianten von Genen, deren Proteine zu den so genannten HLAs gehören (Gewebsverträglichkeitsantigene; »H« steht für Histokompatibilität). 95 Prozent der Zöliakiekranken, aber nur 30 bis 40 Prozent in der gesamten Bevölkerung tragen entweder das Gen für HLA-DQ2 oder das für HLA-DQ8. Zusammen mit anderen Befunden lässt dies vermuten, dass jene Genversionen zwar nicht allein schuld sind, dass die Immunüberaktivität ohne sie aber kaum je auftritt. Die Mitwirkung an zentraler Stelle wird deutlich, wenn man sich die Funktion der von ihnen kodierten Proteine ansieht.

Die HLAs werden von so genannten antigenpräsentierenden Immunzellen hergestellt. Solche Wächterzellen greifen Mikroorganismen und fremde Proteine auf. Sie zerkleinern sie und passen dann ausgewählte feindliche Proteinfragmente in spezielle Furchen ihrer HLA-Moleküle ein. Anschließend präsentieren sie die entstandenen Antigenkomplexe an ihrer Oberfläche, wo so genannte T-Helferzellen darauf aufmerksam werden. Sofern Letztere einen HLA-Komplex samt Antigen erkennen und sich daran anlagern, schlagen sie Alarm.

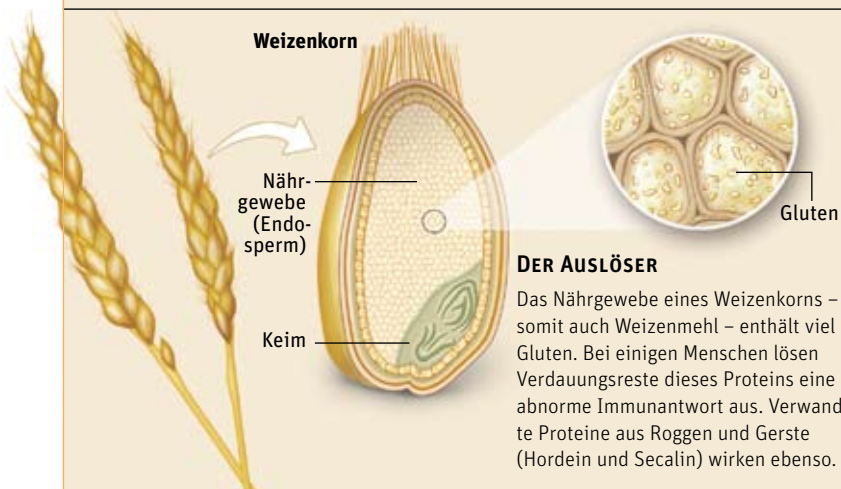
Bei Zöliakiepatienten nun bindet sich die erwähnte (von kranken Darmzellen zur Schadensbehebung ausgeschüttete) Gewebstransglutaminase an unverdaute Glutenreste und modifiziert diese so, dass sie sich besonders fest an DQ2- beziehungsweise DQ8-Proteine zu setzen vermögen. Das bedeutet: Wenn antigenpräsentierende Zellen, die hinter den Darmzellen Wache schieben, Molekülkomplexe aus Glutaminasen und Glutenfragmenten erwischen, gelangen auch die Glutenstücke in die zusammengesetzten Moleküle, die den T-Zellen vorgezeigt werden (siehe Kasten links, Mitte). Und derart aktivierte T-Zellen setzen Zytokine und Chemokine frei (Signalstoffe, die weitere Immunreaktionen induzieren). Gegen Krankheitserreger wäre das sinnvoll. Aber auf die Darmzellen wirkt solch ein Angriff verheerend.

Oft haben Zöliakiepatienten weitere ungünstige genetische Voraussetzungen. Sie neigen etwa dazu, das Immunstimulans Interleukin-15 (IL-15) übermäßig zu bilden. Und sie horten vielfach hyperaktive Immunzellen, welche die Abwehr angesichts von Gluten zur Attacke gegen die Darmschleimhaut anspitzen.

Die Rolle der Antikörper gegen die Gewebstransglutaminase dabei verstehen wir bisher nur teilweise. Möglich wäre Folgendes: Wenn

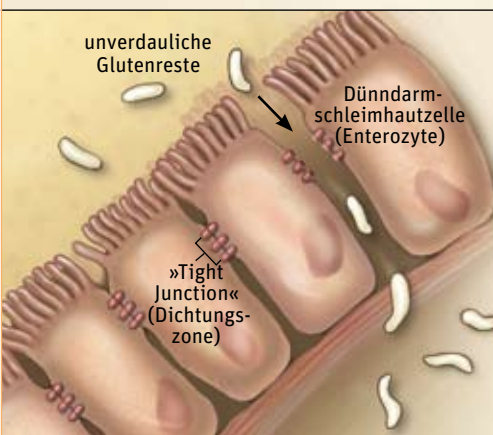
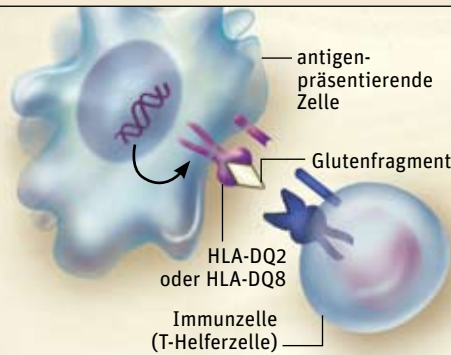
URSACHEN-TERZETT

**Für Zöliakie muss dreierlei zusammenkommen:** ein Umweltfaktor als Auslöser, eine genetische Disposition und ein abnorm durchlässiger Darm. Der Autor vermutet, dass auch andere Autoimmunkrankheiten auf solch einer Trias beruhen, nur mit eigenen Auslösern und Genkonstellationen.



GENETISCHE VERANLAGUNG

Fast alle Patienten tragen Gene für mindestens eines der Proteine HLA-DQ2 oder HLA-DQ8. Die HLA-Moleküle präsentieren Glutenfragmente. Immunzellen, die diese Fragmente erkennen, veranlassen dann einen Angriff auf die Darmschleimhaut. Wahrscheinlich wirken noch mehr Gene mit, doch die könnten bei jedem verschieden sein.



ZU DURCHLÄSSIGER DÜNNDARM

Normalerweise halten Dichtungszone (»Tight Junctions«) die Darmschleimhautzellen wie Kitt zusammen. Bei Zöliakie lockert sich der Kitt. Unverdauliche Glutenreste gelangen in das darunterliegende Gewebe, was das Immunsystem alarmiert. Therapien gegen einen lecken Dünndarm könnten auch bei anderen Autoimmunkrankheiten helfen.

KIM MOSS, ELECTRONIC PUBLISHING SERVICES INC.



Darmepithelzellen das Enzym freisetzen, nehmen so genannte B-Immunkzellen es auf – allein oder im Verbund mit Glutenstücken. Die B-Zellen bilden nun gegen das Enzym gerichtete Antikörper. Stoßen jene Antikörper an oder nahe bei Darmepithelzellen auf mehr Glutaminase, dann könnten sie den Darmzellen entweder selbst Schaden zufügen oder andere aggressive Prozesse in Gang setzen.

Ein weiterer Faktor, den meine Kollegen und ich in den letzten zehn Jahren erkannten, kommt wohl hinzu: eine ungewöhnlich durchlässige Darmwand. Gleiches scheint auch für andere Autoimmunerkrankungen zu gelten. Immer mehr weist darauf hin, dass den meisten, wenn nicht allen dieser Leiden im Prinzip die erwähnten drei Einflussgrößen zu Grunde liegen: eine Umweltschubstanz, gegen die das Immunsystem kämpft, eine Veranlagung für eine überschießende Immunreaktion darauf – und ein zu durchlässiges Darmepithel.

### Hilfreicher Rückschlag

Zugegeben, viele Fachleute hielten das zunächst für Unsinn. Es passte so gar nicht zu den gängigen Vorstellungen vom Darm. Als ich in den 1970er Jahren Medizin studierte, lernte ich, der Dünndarm sei quasi eine Röhre aus einer einzigen Schicht Epithelzellen, die wie Kacheln zusammengefügt seien, verfügt mit einem undurchlässigen Kitt, den so genannten »Tight Junctions«, dichten Verbindungen zwischen den Zellen. Es hieß, alles bis auf wirklich kleine Moleküle würde von den lauernenden Immunkomponenten ferngehalten. Mit einer so simplen Struktur wollten Wissenschaftler sich nicht befassen, mich eingeschlossen.

Erst ein frustrierender Rückschlag lehrte mich eines Besseren. In den späten 1980er Jahren arbeitete ich mit meinem Team an einem Impfstoff gegen Cholera. Damals hielten Mediziner das Cholera-Toxin für den alleinigen Auslöser der verheerenden Durchfälle. Also entfernten wir das betreffende Gen aus dem Genom von *Vibrio cholerae*. Das entwaffnete Bakterium müsste, so frohlockten wir, einen hervorragenden, gut verträglichen Impfstoff abgeben, weil die restlichen, nach unserer Einschätzung harmlosen Proteine nur eine ausgeprägte Immunreaktion auslösen würden. Doch weit gefehlt: Freiwillige, die sich für Impfstests zur Verfügung stellten, bekamen immer noch so starken Durchfall, dass wir den Forschungsansatz aufgeben mussten. Jahrelange Arbeit landete im wahrsten Sinn des Wortes im Klo. Uns blieb nur, uns entweder etwas ganz anderem zuzuwenden – oder aber, nach der Ursache für unser Scheitern zu su-

chen. Wir entschieden uns für die zweite Option, denn irgendetwas musste das Desaster doch erklären. So entdeckten wir schließlich ein neues Durchfalltoxin und einen bis dahin unbekanntem Wirkmechanismus. Dieser Giftstoff des Bakteriums lockert die Tight Junctions im Dünndarm, so dass Flüssigkeit aus Geweben ins Darmlumen gelangt. Plötzlich war der »Kitt« interessant.

Gerade damals wurde die Struktur von Tight Junctions genauer aufgeklärt. Sie bestehen aus einem komplexen Proteinnetzwerk. Doch wie das reguliert wird, verstanden die Forscher nicht recht. Das neue Toxin führte weiter. Wir nannten es Zot (*Zonula-occludens*-Toxin, nach dem lateinischen Ausdruck für die Struktur). Wie sich herausstellte, vermag schon ein einziges Zot-Molekül das Netz zu lockern. Jedoch erwies sich der Kontrollmechanismus dafür als so kompliziert, dass er sicherlich nicht für den Choleraerreger entstanden war. Vielmehr schien das Bakterium ein vorhandenes Funktionssystem der Darmdurchlässigkeit zu nutzen.

Mit dieser These dauerte es weitere fünf Jahre, bis wir endlich Zonulin entdeckten, quasi das Pendant zu Zot beim Menschen und bei höheren Tieren. Zonulin funktioniert auf gleiche Weise und wird unter anderem vom Darmepithel ausgeschüttet. Noch wissen wir nicht, was unser Organismus davon hat, Tight Junctions lockern zu können. Aber solche festen Zellverbindungen kommen an vielen Stellen im Körper vor und sind sehr wichtig – man denke nur an die Blut-Hirn-Schranke. Wahrscheinlich erfüllt Zonulin mehrere Funktionen. Eine dürfte sein, zu regulieren, wie Flüssigkeiten, große Moleküle und Immunkzellen zwischen den verschiedenen Körperbereichen verschoben werden.

Wir durchforsteten die medizinische Literatur nach anderen Krankheiten des Menschen, für die eine erhöhte Darmdurchlässigkeit typisch ist. Erstaunt erfuhr ich, dass dies für viele

### SCHWIERIGER ERSATZ

Hauptsächlich wegen des Glutens – dem Kleber – im Mehl geraten Backwaren feinporig-locker und halten in sich zusammen. Glutenstränge, die sich bilden, fangen Wasser und von Treibmitteln freigesetztes Gas ein und dehnen sich aus. Ersatzprodukte sind aufwändig herzustellen und in Geschmack und Eigenschaften oft unbefriedigend.



Zeichen für glutenfreie Produkte

### NICHT IMMER VON KINDHEIT AN

Auch wenn eine Veranlagung für Zöliakie besteht, macht sich die Krankheit nicht immer gleich in der Kindheit bemerkbar. Nach neueren Erkenntnissen muss das nicht daran liegen, dass die Symptome zunächst schwach waren. Es sieht so aus, als könnte eine veränderte Bakterienbesiedlung des Darms plötzlich die bisherige Glutentoleranz aufheben. Die Darmflora ist in jeder menschlichen Bevölkerung und bei jedem Einzelnen eine andere und verändert sich auch im Lauf des Lebens. Offensichtlich können die Darmbakterien beeinflussen, welche Gene des Wirts jeweils gerade aktiv sind. Möglicherweise werden so plötzlich »Zöliakiegene« angeschaltet. Das hieße aber auch: Verabreichen geeigneter Mikroben – ausgewählter Probiotika – könnte sich zur Behandlung eignen, wenn nicht sogar vor Zöliakie schützen.



Autoimmunkrankheiten gilt, darunter Typ-1-Diabetes, multiple Sklerose, rheumatoide Arthritis sowie den Reizdarm – und eben auch Zöliakie. Tatsächlich rührt der »undichte« Darm bei vielen dieser Erkrankungen von einem zu hohen Zonulinlevel her. Wie wir heute wissen, treibt bei Zöliakie das Gluten selbst die Sekretion des Stoffs an, möglicherweise bedingt durch eine genetische Veranlagung.

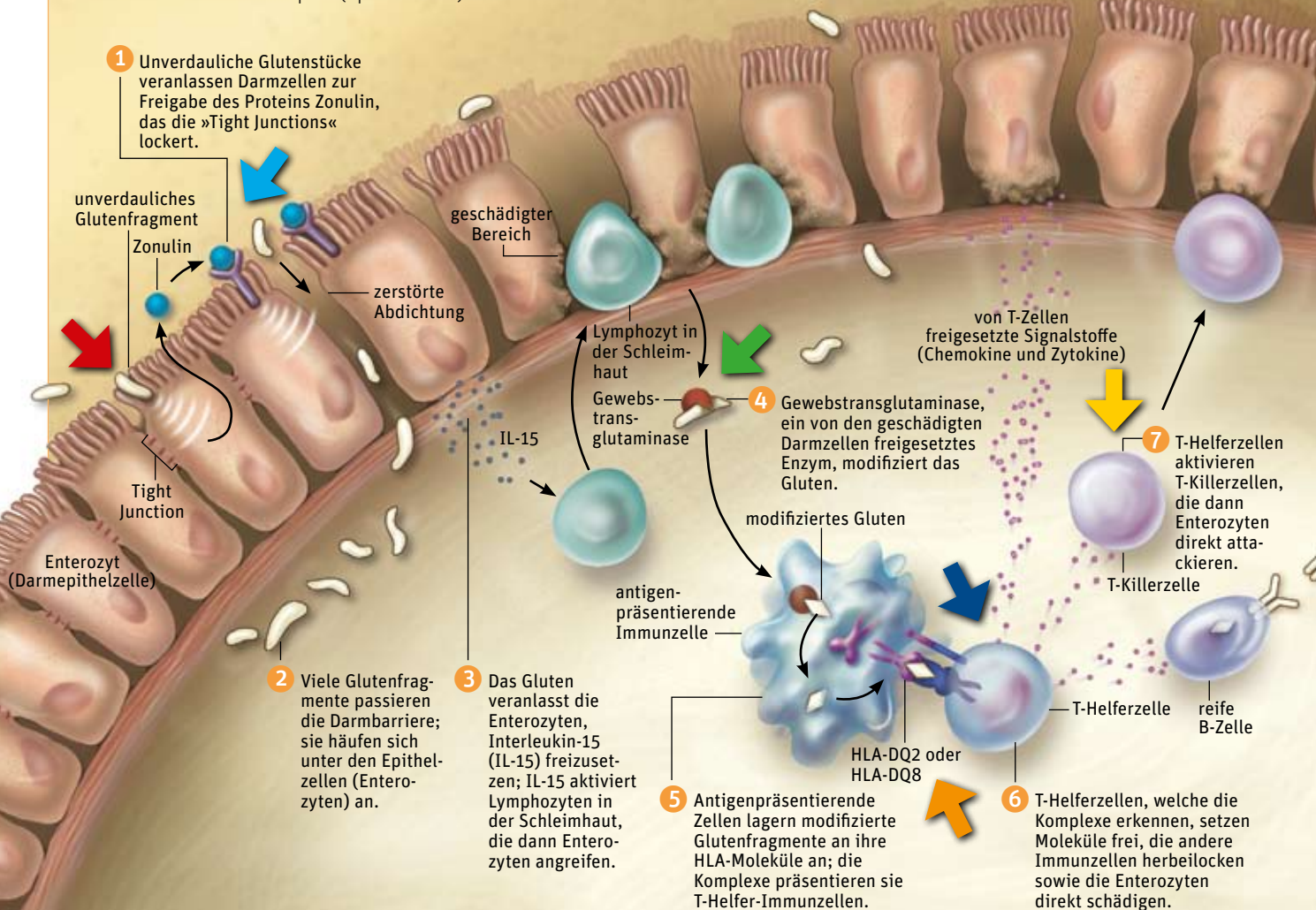
So kamen wir darauf, dass bei dieser Krankheit wegen der größeren Darmdurchlässigkeit Glutenfragmente die Darmwand passieren und dann mit dafür sensiblen Immunelementen interagieren. Falls das stimmt, müsste man die Zöliakie beherrschen können, indem man an einem der drei ihr zu Grunde liegenden Faktoren ansetzt – entweder am Umweltfaktor, der überstarken Immunreaktion oder

der zu hohen Permeabilität des Darms. Tatsächlich hilft ja bereits eine glutenfreie Ernährung. Doch dies das ganze Leben hindurch streng einzuhalten, ist mehr als mühsam. Gluten steckt in sehr vielen Nahrungsmitteln, und schon kleinste Spuren können Betroffenen erheblich zusetzen. In zahlreichen Ländern wird es nicht einmal ausgewiesen. Meist erhält man glutenfreie Produkte nur in bestimmten Geschäften. Überdies kosten sie mehr. Darum wäre eine anderweitige Hilfe zu wünschen.

Verschiedene Alternativen werden bereits erforscht und teils in ersten Schritten erprobt. So testet die Firma Alvine Pharmaceuticals in San Carlos (Kalifornien) ein enzymhaltiges Medikament zum Einnehmen. Es vermag die verheerenden Glutenpeptide vollständig zu zerlegen. Andere Forschergruppen möchten

**DAS KRANKHEITSGESCHEHEN**

In allen Einzelheiten sind die Immunvorgänge bei Zöliakie noch nicht erforscht, aber etliche werden schon deutlich. Die Farbpfleile bezeichnen Abläufe, bei denen derzeit entwickelte Therapien (Spalte rechts) ansetzen sollen.



KIM MOSS, ELECTRONIC PUBLISHING SERVICES INC.

die Gewebstransglutaminase daran hindern, die unverdaulichen Glutenfragmente für Immunvorgänge aufzubereiten.

**Impfen gegen Zöliakie?**

Eine sichere und ethisch vertretbare Gentherapie ist nicht in Sicht. Doch Forscher arbeiten daran, einige der genetisch kontrollierten Mechanismen für die überhöhte Immunempfindlichkeit zu dämpfen. Das australische Unternehmen Nexpep visiert beispielsweise einen Impfstoff an. Er soll das Immunsystem mit kleinsten Mengen stark immunogener Glutenformen konfrontieren, in der Hoffnung, dass das Immunsystem sie bei wiederholter Konfrontation toleriert.

Um einen Zonulinhemmer – Larazotide – genauer zu erforschen und zu testen, gründete

ich mit anderen die Firma Alba Therapeutics. (Inzwischen fungiere ich nur noch als wissenschaftlicher Berater.) Bisherige Studien verliefen viel versprechend hinsichtlich Verträglichkeit und Nebenwirkungen. Wie es aussieht, vermag das Mittel wohl tatsächlich die von Gluten verursachte verstärkte Darmdurchlässigkeit zu vermindern. Ebenso treten weniger Entzündungsmoleküle auf, und die Verdauungsbeschwerden nehmen ab. In einer Vergleichsstudie bildeten Zöliakiepatienten unter dem Medikament keine Antikörper gegen die Gewebstransglutaminase, wohl aber Patienten, die nur ein Placebo erhielten.

Meines Wissens gelang es hiermit erstmals, einen Autoimmunvorgang durch Hemmung der Immunreaktion gegen ein definiertes körpereigenes Molekül gezielt medikamentös aufzuhalten. Sonst wirken Immunsuppressiva unspezifischer. Die Firma darf die Studien mit dem Medikament inzwischen auch auf andere Autoimmunleiden ausweiten, so auf Typ-1-Diabetes und Morbus Crohn (eine andere entzündliche Darmerkrankung).

Trotz der Aussichten auf neue Therapien werden Zöliakiebetreffene nicht so bald auf ihre strenge Diät verzichten können. Andererseits fragen wir uns, ob glutenfreie Kost in der frühen Kindheit den Ausbruch einer Zöliakie verzögert oder sogar davor zu schützen vermag. Unter der Leitung von Carlo Catassi hat mein Team an der University of Maryland dazu eine Langzeitstudie begonnen. Daran nehmen Kinder mit einem hohen Erkrankungsrisiko teil, die eine genetische Veranlagung für Zöliakie tragen und in deren nächster Verwandtschaft das Leiden vorkommt. Sie erhalten bis nach dem ersten Lebensjahr glutenfreie Nahrung.

Die Maßnahme könnte nützen, weil das Immunsystem in den ersten zwölf Lebensmonaten immens reift. Es gibt auch Hinweise aus der Forschung an gefährdeten Kindern, wonach Glutenenthaltsamkeit im ersten Lebensjahr für das reifende Immunsystem eine Art Trainingseffekt darstellt, so dass es die Substanz später toleriert. Nach unseren ersten noch vorläufigen Ergebnissen scheint Zöliakie durch die Diät nur ein Viertel so oft aufzutreten. Genaues werden wir aber erst in einigen Jahrzehnten wissen.

Wegen der neu entdeckten Gemeinsamkeiten bei verschiedenen Autoimmunkrankheiten interessieren sich die Forscher jetzt stark dafür, ob auch einige der neuen Therapieansätze gegen Zöliakie übertragbar sind – vor allem wenn noch keine guten Behandlungsmöglichkeiten existieren. Was die Zöliakie selbst betrifft, so dürfen wir vorsichtig hoffen, dass eine fatale Krankheit, welche die Menschheit seit Beginn der Zivilisation begleitet, ihr letztes Jahrhundert erlebt.

**Erstmals gelang es, einen Autoimmunvorgang durch immunologische Hemmung eines definierten körpereigenen Moleküls gezielt aufzuhalten**

**9** Die vielfältigen Attacken schädigen und töten die Enterozyten.

**8** B-Immunzellen setzen Antikörper gegen Gluten und Gewebstransglutaminase frei; wenn die Antikörper ihr Zielmolekül bei Enterozyten antreffen, verursachen sie an den Darmzellen weiteren Schaden; ihre Funktion bei Zöliakie ist aber noch unklar.

**THERAPIEMÖGLICHKEITEN**

Als Einziges bleibt Patienten bisher eine strikt glutenfreie Ernährung. Doch die Forscher visieren schon verschiedene Alternativen und vorbeugende Maßnahmen an.

- glutenfreie Nahrung im ersten Lebensjahr
- unverdauliche Glutenreste von speziellen Enzymen abbauen lassen
- Zonulin blockieren
- Gewebstransglutaminase daran hindern, die Glutenfragmente zu modifizieren
- HLA-DQ2 daran hindern, sich an Glutenpeptide zu binden und sie T-Helferzellen zu präsentieren
- mit ausgewählten Glutenfragmenten impfen, um eine Toleranz der T-Helferzellen zu induzieren
- verhindern, dass T-Killerzellen in die Darmschleimhaut wandern
- Darm mit Hakenwurm besiedeln, weil der Parasitenbefall die Immunreaktionen im Darm dämpft

QUELLEN: WWW.CLINICALTRIALS.GOV UND L.M. SOLLID UND K.E.A. LUNDIN, "DIAGNOSIS AND TREATMENT OF CELIAC DISEASE", IN: MUCOSAL IMMUNOLOGY, 2009, BB 2



**Alessio Fasano** ist an der University of Maryland in Baltimore Professor für Pädiatrie, Medizin und Physiologie. Er leitet in der medizinischen Fakultät das Mucosal Biology Research Center und das Center for Celiac Research (das Forschungszentrum für Schleimhautbiologie und das Zentrum für Zöliakieforschung).

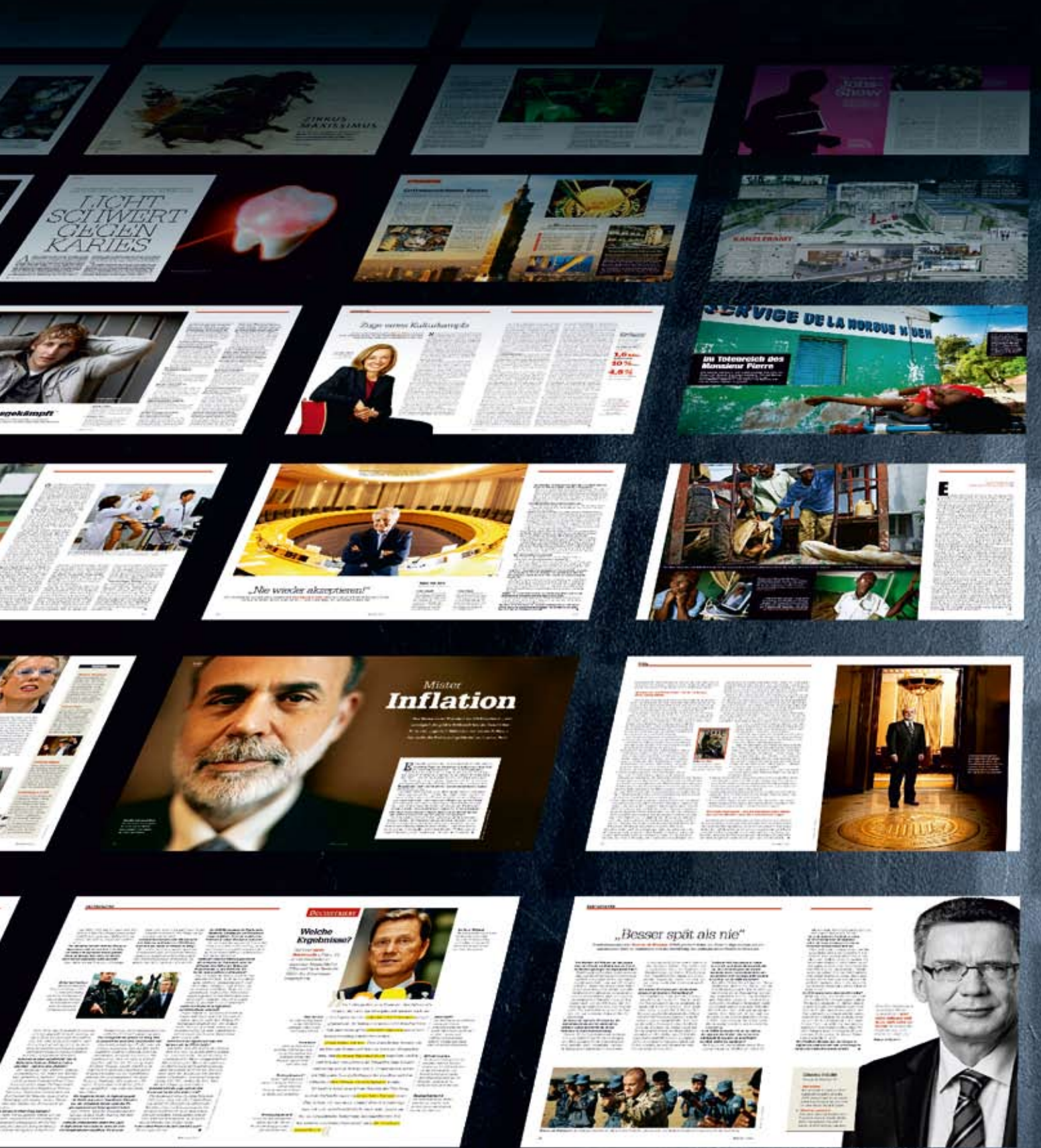
**Fasano, A., Shea-Donohue, T.:** Mechanisms of Disease: The Role of Intestinal Barrier Function in the Pathogenesis of Gastrointestinal Autoimmune Diseases. In: Nature Clinical Practice Gastroenterology & Hepatology 2(9), S. 416 – 422, September 2005.

**Sollid, L. M., Lundin, K. E. A.:** Diagnosis and Treatment of Celiac Disease. In: Mucosal Immunology 2(1), S. 3 – 7, Januar 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1026690](http://www.spektrum.de/artikel/1026690).



# Entdecken Sie die neu





# en Seiten von FOCUS.



**Der neue FOCUS bietet Ihnen einfach mehr:**

**Mehr Analysen.**

FOCUS beleuchtet kritisch und schafft Transparenz.

**Mehr Haltung.**

FOCUS bezieht Stellung, auch in kritischen Diskussionen.

**Mehr Orientierung.**

FOCUS erklärt Hintergründe und ordnet die Ereignisse für Sie ein.

**Mehr Perspektive.**

FOCUS blickt auf die Themen der Zukunft.

**FOCUS**

Das Nachrichtenmagazin.



# Die Entschlüsselung eines antiken Computers

Ein internationales Team von Wissenschaftlern hat das Geheimnis des »Mechanismus von Antikythera« gelüftet, eines antiken astronomischen Rechenwerks von erstaunlicher Komplexität.

**Die Griechen vermochten die sich wiederholenden Intervalle zwischen Mondfinsternissen zu berechnen – dank Jahrhunderten der Himmelsbeobachtung in Babylonien. Der Antikythera-Mechanismus erledigte solche Kalkulationen automatisch. (Das hier gezeigte Gerät wie auch alle weiteren in diesem Beitrag basieren auf Rekonstruktion des Antikythera-Forschungsteams.)**

Von Tony Freeth

Für die Besatzung war es eine Katastrophe, für Archäologen und Technikhistoriker ein Glücksfall: Vor mehr als zwei Jahrtausenden geriet ein römisches Handelsschiff in einen Sturm und sank nahe der kleinen Insel Antikythera, zwischen Kreta und dem griechischen Festland gelegen (siehe Karte S. 64). Im Jahr 1900 bedrohte schweres Wetter eine Gruppe von Schwammtauchern. Sie flohen auf jenes Eiland, erkundeten später die umliegenden Gewässer und entdeckten den antiken Schatz. Mit einer offiziellen Genehmigung ausgestattet bargen sie in den folgenden Monaten kostbare Bronzen und Gläser, Keramiken und Schmuck.

Das wertvollste Fundstück blieb dabei lange unbeachtet: ein unscheinbarer, stark verkalkter Klumpen, etwa so groß wie ein Telefonbuch. Erst als er Monate nach der Bergung auseinanderbrach und die Überreste stark korrodierter, miteinander verbackener Bronzezahnräder zum Vorschein kamen, kein Zahn länger als etwa eineinhalb Millimeter, dazu Ziffernblätter mit Skalen und Beschriftungen, war die Sensation perfekt. Man wusste bereits, dass griechische Erfinder mitunter Getriebe genutzt hatten, beispielsweise soll Ktesibios

von Alexandria (3. Jahrhundert v. Chr.) die Rotation des Zylinders einer Wasseruhr mittels Zahngetriebe auf einen Stundenanzeiger übertragen haben. Doch die Komplexität des nun entdeckten Apparats erstaunte die Experten, damals wie heute.

Vor zehn Jahren hörte ich zum ersten Mal davon. Damals arbeitete ich als Dokumentarfilmer. Der Astronom Mike Edmunds von der Cardiff University (Wales) rief an, weil er glaubte, der Antikythera-Mechanismus sei ein spannendes Thema für das Fernsehen. Also begann ich zu recherchieren, was Forscher seit der Entdeckung herausgefunden hatten. Offenbar herrschte zwar Einigkeit darüber, dass die Maschine einst zur Berechnung astronomischer Daten taugte, doch wie genau sie das bewerkstelligt haben sollte, verstand niemand so recht. Nicht nur meine Neugier als Filmmacher war geweckt. Von Haus aus eigentlich Mathematiker, wollte ich mithelfen, das Geheimnis des Geräts zu lüften.

Gemeinsam mit Edmunds stellte ich eine internationale Arbeitsgruppe aus Historikern, Astronomen und anderen Experten zusammen. Innerhalb der letzten Jahre konnten wir tatsächlich Aufgaben und Funktionsweisen beinahe aller bekannten Komponenten ergründen, nicht zuletzt dank der engen Zusam-



## In Kürze

► Der »Mechanismus von Antikythera« ist **eine Art astronomischer Taschenrechner** aus dem 2. Jahrhundert v. Chr. 1900 am Meeresgrund vor der Insel Antikythera entdeckt, beschäftigt er bis heute Wissenschaftler verschiedener Disziplinen.

► Mittels bildgebender Verfahren wurden die inneren Strukturen der **insgesamt 82 Fragmente** in den letzten Jahren aufgeklärt. Dabei hat man bislang unbekannte Inschriften entdeckt. Dank dieser neuen Informationen lässt sich nun besser verstehen, welche Berechnungen der Apparat vornehmen konnte. Dazu gehören offenbar die Prognose von Mond- und Sonnenfinsternissen, aber auch **die Berechnung der Daten panhellenischer Spiele**.

► Einige Beschriftungen deuten auf die griechische Stadt **Syrakus auf Sizilien als Entstehungsort** hin.

menarbeit mit dem Archäologischen Nationalmuseum in Athen, das alle Bruchstücke des Artefakts archiviert. Demnach vermochte der Antikythera-Mechanismus Mond- und Sonnenfinsternisse vorauszuberechnen, ebenso die scheinbare Bewegung des Mondes am Himmel sowie die Daten wichtiger panhellenischer Spiele. Hätte jener Sturm ihn nicht untergehen lassen, Historiker würden dergleichen für das 1. Jahrhundert v. Chr. kategorisch ausschließen, denn andere bekannte, vergleichbar ausgetüfelte Maschinen sind mehr als ein Jahrtausend jünger.

Der deutsche Philologe Albert Rehm sprach 1905 als Erster von einer astronomischen Rechenmaschine. Und der amerikanische Wissenschaftshistoriker Derek J. de Solla Price postulierte ein halbes Jahrhundert später in »Scientific American«, der Benutzer habe ein Datum mittels einer Kurbel einstellen können; diese Drehung sei von Getrieben verarbeitet worden, bis Resultate auf diversen Ziffernblättern angezeigt wurden. Auf der Vorderseite habe sich zum einen der in der Antike gebräuchliche ägyptische Kalender befunden, der das Jahr in 365 Tage einteilte (durch Verdrehen der Metallscheibe ließ sich alle vier Jahre ein Schalttag einfügen), außerdem eine 360-Grad-Skala mit den zwölf Tierkreiszeichen. Vor dem Hinter-

grund dieser Sternbilder (Zodiakus) beziehungsweise in der von ihnen aufgespannten Ebene vollzieht sich der Jahreslauf der Sonne – für einen irdischen Beobachter, der die Erde im Zentrum des Kosmos wähnt. De Solla Price vermutete deshalb, dass ein heute nicht mehr erhaltener Zeiger die Position unseres Zentralgestirns bezüglich der scheinbaren Sonnenbahn (Ekliptik) zum eingestellten Datum markierte.

In den erhaltenen Fragmenten konnte er zunächst ein Dutzend Zahnräder ausmachen, fast alle beschädigt und unvollständig. Nachdem der griechische Radiologe Charalambos Karakalos das Artefakt durchleuchtet hatte, beschrieb de Solla Price 1974 insgesamt 30 Zahnräder und schätzte die Zahl ihrer Zähne. Demnach hatte das Hauptrad, dessen vollständige Umdrehung einem Jahr entsprach, 64 Zähne, zwei Nebenräder verfügten über je 38. Jede Drehung des Hauptrads ließ diese beiden also 64/38-mal rotieren. Und so pflanzte sich die Bewegung des Hauptrads im Mechanismus fort, stets entsprechend der Zahnverhältnisse übersetzt. Auf diese Weise modellierte die Maschine periodisch wiederkehrende Himmelsereignisse.

Michael Wright, Kurator des Science Museum in London, rekonstruierte gemeinsam mit dem Computerspezialisten Allan Bromley





## WOHER STAMMT DER APPARAT?

**Der Antikythera-Mechanismus** entstand vermutlich um die Mitte des 2. Jahrhunderts v. Chr., als sich das römische Imperium auf Kosten der hellenistischen Königreiche (braun) im Mittelmeerraum ausdehnte. Als Teil der Ladung eines Handelsschiffs sank er um 65 v. Chr. nahe der Insel Antikythera. Schwammtaucher bargen die verwitterten Überreste (darunter auch das Fragment auf der linken Seite) Anfang des 20. Jahrhunderts. Das Schiff war mit griechischen Kunst- und Gebrauchsgegenständen vermutlich auf der Fahrt von Pergamon nach Rom. Möglicherweise hatte man den Apparat bei einem Zwischenstopp auf Rhodos an Bord gekommen, denn dort befand sich ein Zentrum griechischer Astronomie. Ebenso wahrscheinlich aber wäre, dass der Mechanismus schon eine wechselvolle Geschichte hinter sich hatte und – darauf verweisen sprachliche Eigenheiten der Beschriftung – in einer korinthischen Kolonie gefertigt wurde. Dafür käme Syrakus in Frage, die Heimat des genialen Erfinders Archimedes.

Während des 1. Jahrtausends v. Chr. notierten die Babylonier Hunderttausende von Beobachtungen des Nachthimmels

von der University of Sydney erstmals aus Röntgendaten räumliche Darstellungen des Apparats. Er korrigierte und ergänzte das Price-Modell. Wright erkannte etwa, dass ein Blech der Rückseite, das nach den bisherigen Vorstellungen aus konzentrischen Ringen bestand, in Wirklichkeit eine spiralförmige Struktur hatte. Außerdem entdeckte er einen Mechanismus für die Mondphasenkalkulation auf der Vorderseite.

Wie Price postulierte auch Wright, ein Ziffernblatt auf der Rückseite sei ein Mondkalender gewesen, der auf dem nach dem griechischen Astronomen Meton von Athen (5. Jahrhundert v. Chr.) benannten Zyklus basiert habe: 19 Sonnenjahre entsprechen bis auf zwei Stunden 235 Monaten.

Tatsächlich war dies schon den Babyloniern bekannt. Deren Gelehrte hatten jahrhundertlang den nächtlichen Himmel beobachtet, überzeugt davon, in den Gestirnen das Wirken der Götter erkennen zu können – und so günstige und gefährliche Wendungen des Geschicks vorherzusehen. Da sich der Mond und die Planeten mit geringen Abweichungen in derselben Ebene bewegen wie die Erde, erscheinen sie einem Beobachter stets in der Nähe der Ekliptik. Die Babylonier überzogen daher den Him-

mel mit einem Gradnetz vergleichbar dem, das wir für die Erdoberfläche verwenden und wie Astronomen es heute noch benutzen.

Die Rolle des Äquators kommt dabei der Ekliptik zu. Die ekliptische Länge 0 ist durch den so genannten Frühlingspunkt definiert, der Position der Sonne zur Frühlings-Tag-und-Nachtgleiche. Der Winkelabstand eines astronomischen Objekts von der Ekliptik ist seine ekliptische Breite. Als Bezugspunkt diente oft ein Stern mit schon bekannter Position. So notierte ein babylonischer Astronom beispielsweise 419 v. Chr.: »Erste Nachthälfte, Venus war acht Finger unter Beta Tauri und bewegte sich vier Finger gen Osten.« Ein Finger entsprach etwa einem Zwölftel eines Bogengrads, Beta Tauri ist der heute gebräuchliche Name für die zweithellste Sonne im Sternbild Stier.

Während des 1. Jahrtausends v. Chr. notierten die Babylonier Hunderttausende solcher Beobachtungen und versuchten darin Gesetzmäßigkeiten zu entdecken. Sie wussten deshalb, dass der Mond je nach gewähltem Bezugspunkt verschieden lange für einen vollen Umlauf benötigt. Beispielsweise erreicht er nach 27 Tagen, 7 Stunden und 43 Minuten dieselbe Position bezüglich des Fixsternhimmels (siderischer Monat), benötigt etwa 5,5

Stunden länger zwischen zwei Durchgängen durch den erdnächsten Punkt (anomalistischer Monat), aber 29 Tage, 12 Stunden und 44 Minuten zwischen gleichen Mondphasen (mittlerer synodischer Monat). Dank »Data Mining« entdeckten sie selbst lang dauernde Perioden wie den erwähnten Meton-Zyklus – der genauer gesagt 235 synodische beziehungsweise 254 siderische Monate umfasst – und die Saros-Periode, auf die ich noch zu sprechen kommen werde. Auf dieses Wissen konnten griechische Astronomen wie der Konstrukteur des Antikythera-Mechanismus zurückgreifen.

Die Datenlage unserer eigenen Forschungen war zu Beginn des Unternehmens weit schlechter, denn wir verfügten weder über gute Fotografien der Fragmente noch über die bereits gemachten Röntgenbilder; es bestand auch keine Möglichkeit, diese Quellen zu erschließen. Deshalb suchten wir Experten in Sachen Bildgebung und kontaktierten das amerikanische Unternehmen Hewlett-Packard sowie die britische Firma X-Tek. Bei HP fanden wir Spezialisten für die Oberflächenfotografie, X-Tek erstellt 3-D-Röntgenaufnahmen technischer Produkte, meist von Turbinenschaufeln. Es erforderte noch vier Jahre diplomatischer Bemühungen, bis meine Kollegen John Seiradakis von der Aristoteles-Universität in Thessaloniki und Xenophon Moussas von der University of Athens alle Genehmi-

gungen in Händen hielten, den höchst fragilen Antikythera-Mechanismus im Museum mit den genannten technischen Mitteln analysieren zu dürfen. Nun musste nur noch der Transport der Geräte organisiert werden.

### Neue Funde in alten Kisten

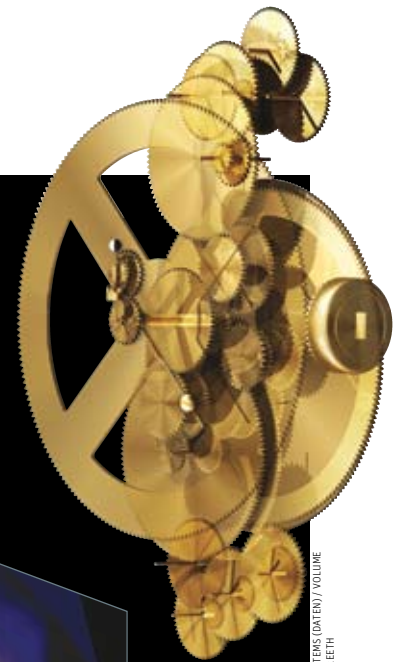
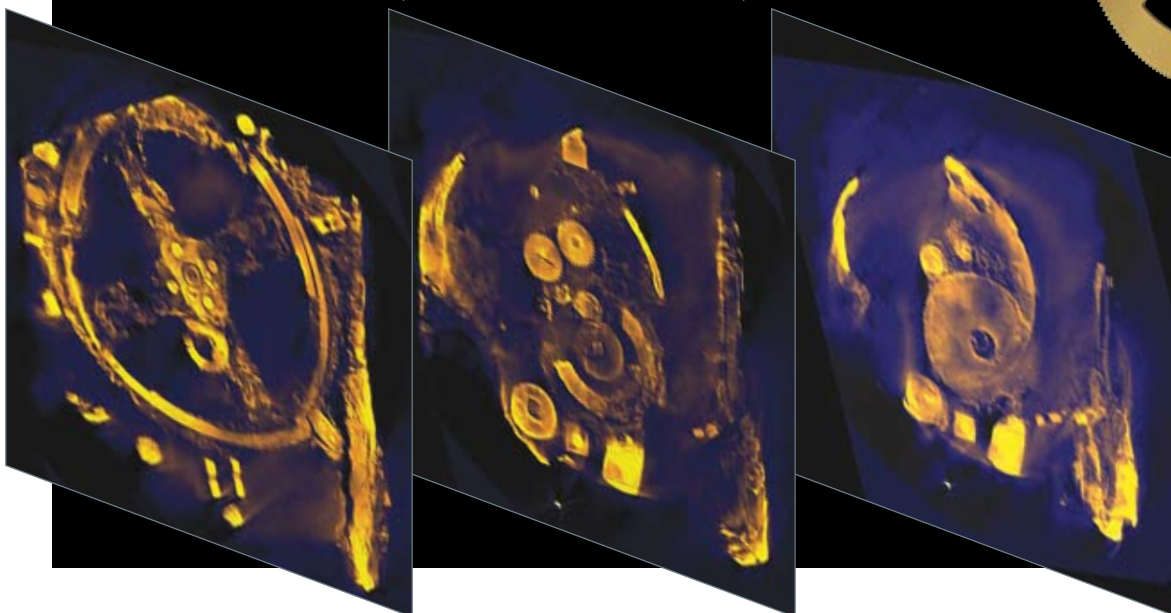
Unsere Aufregung war groß, umso mehr, als uns ein Anruf von Mary Zafeiropoulou, Kuratorin der Bronzen-Sammlung des Museums, erreichte: Sie hatte im Kellerarchiv Kisten mit der Beschriftung »Antikythera« entdeckt. Deren Inhalt war eine Sensation: Die Zahl der zu untersuchenden Fragmente hatte sich mit einem Mal von gut 20 auf 82 erhöht, nämlich 7 große und 75 kleine Stücke.

Wissenschaftler von Hewlett-Packard hatten ein Verfahren entwickelt, Oberflächen sehr viel plastischer und detailreicher abzubilden als bisher möglich. Dazu errichtete das Team unter der Leitung von Tom Malzbender zunächst eine Kuppel von 1,5 Meter Durchmesser und stattete diese so mit elektronisch gesteuerten Blitzlichtern aus, dass sich jedes noch so kleine Fragment aus unterschiedlichen Winkeln ausleuchten ließ. Die so gewonnenen Aufnahmen wurden zu so genannten Polynomial Texture Maps (PTM) verarbeitet. Diese Dateien enthalten für jeden Bildpunkt außer den Werten der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau auch Informationen zur Be-

Auf das babylonische Wissen konnten griechische Astronomen wie der Konstrukteur des Antikythera-Mechanismus zurückgreifen

## DER NACHBAU: ANATOMIE EINES RELIKTS

Mittels Computertomografie (CT) erhielt das Antikythera-Team Einblick in das Innere der Fragmente. Nicht anders als in der medizinischen Diagnostik wurden virtuelle Schnitte aus dem Datensatz berechnet, hier durch das Hauptfragment. Solche Informationen lieferten Anhaltspunkte dafür, welche Zahnräder zu einem Getriebe gehörten und wie viele Zähne sie jeweils trugen. Auf Grundlage aller Informationen rekonstruierten die Forscher die räumliche Gestalt der Räderwerke – und was mit ihnen zu berechnen war (rechts und auf den nächsten Seiten).



CT-SCANS: © 2005 ANTIKYTHERA MECHANISM RESEARCH PROJECT / X-TEK SYSTEMS (DATEN) / VOLUME GRAPHICS (SOFTWARE); REKONSTRUKTION: OBEN: GRIFF WASON UND TONY FREETH



leuchtungssituation, so dass sich die Aufnahmen später verschieden ausgeleuchtet betrachten und analysieren lassen. Dank des größeren Detailreichtums der Oberflächendarstellung konnte unser Team auf diese Weise Inschriften auf den äußeren Platten lesen, die frühere Forscher nur schwer bis gar nicht entziffern konnten (siehe Bild links). Im Wesentlichen handelte es sich um eine Bedienungsanleitung.

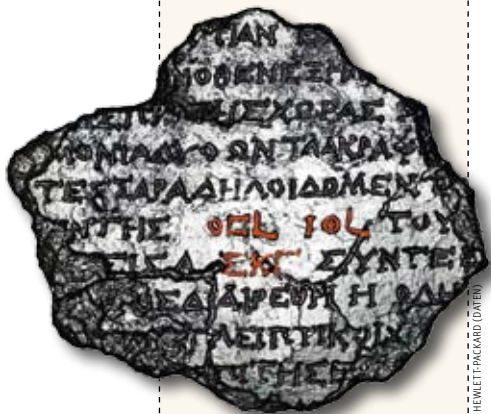
**Schweres Gerät für ein fragiles Artefakt**

Einen Monat später sperrte die Polizei die Straßen im Zentrum Athens für den BladeRunner, den acht Tonnen schweren X-Tek-Computertomografen. Roger Hadland und sein Team erhöhten die Strahlleistung des Geräts, das normalerweise in der industriellen Materialprüfung und Qualitätskontrolle eingesetzt wird, um die bronzenen Artefakte vollständig zu durchleuchten. Wie in der medizinischen Diagnostik machte das Gerät Röntgenaufnahmen der Artefakte in verschiedenen Ebenen und aus unterschiedlichen Blickwinkeln, um daraus räumliche Ansichten des Innenlebens zu konstruieren. Wo andere nur miteinander verbackene Zahnräder gesehen hatten, vermochten wir nun einzelne Elemente deutlich zu unterscheiden und feine Details zu erkennen.

Dazu gehörten auch gut 2000 Buchstaben, die über 2000 Jahre verborgen geblieben waren (bekannt waren bereits 15000). Moussas und Yanis Bitsakis von der University of Athens sowie Agamemnon Tselikas, Direktor des Center for History and Palaeography in Athen, begannen sogleich mit der Übersetzung. Ein Text lautet »spiralförmige Untereinteilungen 235 ...«, was Prices und Wrights Annahme unterstützt, jenes Ziffernblatt im oberen Bereich der Rückseite habe den Meton-Zyklus mit seinen 235 synodischen Monaten abgebildet.

Zu den Überraschungen gehörte auch die Entdeckung einer kleinen Nebenuhr innerhalb dieses Ziffernblatts. Sie ist in vier Quadranten unterteilt. »NEMEA« las ich unterhalb eines davon. Alexander Jones, Historiker an der New York University, erklärte mir dazu, im Heiligtum von Nemea seien alle zwei Jahre Wettkämpfe ausgetragen worden, die zu den panhellenischen Spielen zählten und jeweils ein Jahr vor beziehungsweise nach den Olympischen Spielen stattfanden. Und tatsächlich fanden wir entlang der vier Sektoren noch weitere solche Hinweise: »ISTHMIA« steht offenbar für Spiele in Korinth, »PYTHIA« weist auf Delphi hin, »NAA« auf kleinere Wettkämpfe im Zeus-Heiligtum von Dodona und natürlich »OLYMPIA« für die wichtigste Veranstaltung. Das verlieh dem Apparat eine unerwartete, gesellschaftliche Funktionalität.

**ANS LICHT GEBRACHT**



Die »Polynomial Texture Map« ist eine von Hewlett-Packard-Forschern entwickelte Form der Oberflächenfotografie. Indem ein Objekt aus verschiedenen Richtungen ausgeleuchtet wird und die Richtungsabhängigkeit des sich ergebenden Bilds in die Pixelmatrix eingeht, lassen sich auch feinste Details sichtbar machen. So wurden auf einem der kleineren Fragmente eine Reihe von Inschriften deutlich lesbar: »19 Jahre«, »76 Jahre« und »223«. Zwar hatte einer der Pioniere der Erforschung des Mechanismus, Derek J. de Solla Price, die beiden ersten Texte schon erkannt, über den letzten aber herrschte Unsicherheit.

© 2005 ANTIKYTHERA MECHANISMUS RESEARCH PROJECT / THE MET FRACKING (GUTEN)

**IM INNEREN DES ANTIKYTHERA-MECHANISMUS: EIN ASTRONOMISCHES UHRWERK**

**DIE ZWÖLF TIERKREISZEICHEN** dienten als Bezugssystem; sie definieren die Ebene der Ekliptik, auf der die Sonne über den Himmel wandert

**EIN ÄGYPTISCHER KALENDER** zeigte die 365 Tage eines Jahres an



Datumszeiger  
Sonnenzeiger

Kurbel

Vermutlich gaben Zeiger **DIE POSITIONEN DER DAMALS BEKANNTEN PLANETEN** auf der Ekliptik an

**EIN MONDZEIGER** verortete den Erdtrabanten auf der Ekliptik

**AUF- UND UNTERGÄNGE WICHTIGER STERNE** im Lauf eines Jahres wurden auf der vorderen Abdeckplatte aufgelistet

GRIF WASON UND TONY FREETH



**Die Explosionszeichnung zeigt bis auf eines** alle der 30 erhaltenen Zahnräder – die in 7 große und 75 kleinere Fragmente zerbrochen waren – sowie einige weitere, die den Forschern notwendig erscheinen, um alle angenommenen Funktionen zu erfüllen. Drehen der seitlichen Kurbel setzte alle Räderwerke in Bewegung (farbige Pfeile veranschaulichen die Bewegungsketten der verschiedenen Getriebe). Der Benutzer stellte ein Datum entweder auf der Vorderseite ein, nämlich auf dem ägyptischen Kalender des Sonnenjahrs, oder an der Meton-Zyklus-Uhr auf der Rückseite, einem Mondkalen-

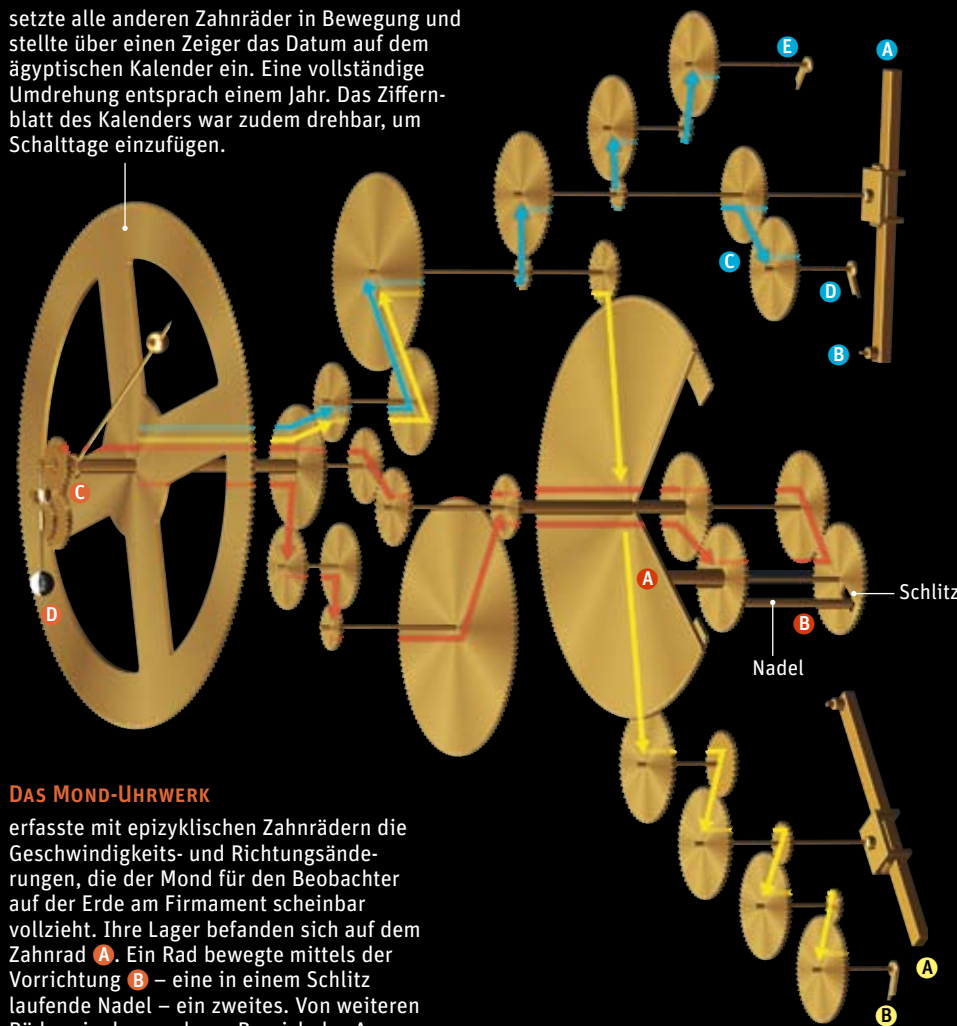
der (ein solcher Zyklus dauerte 235 synodische Monate). Die verschiedenen Räderwerke errechneten daraus die zugehörigen astronomischen Ereignisse und stellten sie auf anderen Ziffernblättern dar, beispielsweise Position und Phase des MONDS. Umgekehrt konnte der Benutzer mit der Kurbel auch ein solches Ereignis auswählen, um dessen Datum zu ermitteln. Vermutlich dienten weitere, leider nicht erhaltene Zahnräder dazu, die Position der Sonne und der in der Antike bekannten fünf Planeten relativ zu den Sternbildern des Tierkreises anzuzeigen.

**DAS RÄDERWERK DES METON-ZYKLUS**

berechnete den jeweiligen Monat im Meton-Zyklus, der 235 synodische Monate umfasste. Zeiger **A** zeigte das Resultat auf der Rückseite des Apparats an. Die Nadel **B** an seiner Spitze lief in einem Schlitz auf dem spiralförmigen Ziffernblatt und zog den Zeiger so auf die erforderliche Länge aus. Hilfszahnräder **C** bewegten einen kleineren Zeiger **D** entlang einer zweiten Skala, die dem vierjährigen Zyklus der Olympischen Spiele und anderer antiker Spiele entsprach. Wieder andere Zahnräder waren für die Uhr **E** zuständig, die vermutlich einem 76-jährigen Zyklus folgte.

**DAS VON DER KURBEL ANGETRIEBENE HAUPTTRAD**

setzte alle anderen Zahnräder in Bewegung und stellte über einen Zeiger das Datum auf dem ägyptischen Kalender ein. Eine vollständige Umdrehung entsprach einem Jahr. Das Ziffernblatt des Kalenders war zudem drehbar, um Schalttage einzufügen.

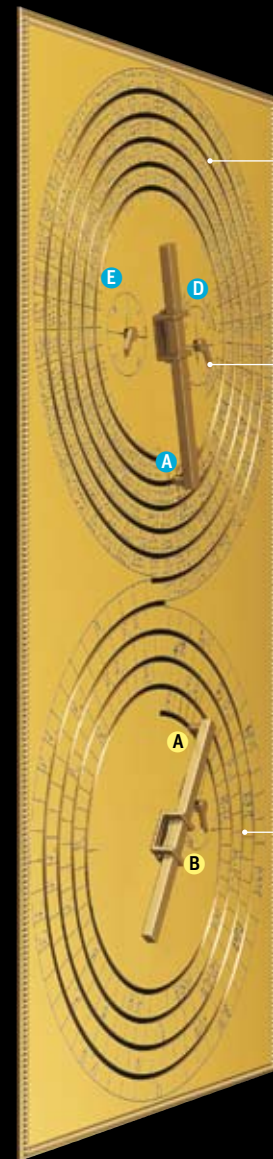


**DAS MOND-UHRWERK**

erfasste mit epizyklischen Zahnrädern die Geschwindigkeits- und Richtungsänderungen, die der Mond für den Beobachter auf der Erde am Firmament scheinbar vollzieht. Ihre Lager befanden sich auf dem Zahnrad **A**. Ein Rad bewegte mittels der Vorrichtung **B** – eine in einem Schlitz laufende Nadel – ein zweites. Von weiteren Rädern in den vorderen Bereich des Apparats übertragen, drehte vermutlich ein weiteres epizykisches System **C** eine schwarz-weiße Kugel **D**, um die Phase des MONDS anzuzeigen; Zeiger **E** verwies auf die Position des MONDS im Tierkreis.

**DAS RÄDERWERK ZUR BERECHNUNG VON SONNEN- UND MONDFINSTERNISSEN**

ermittelte den Monat einer Finsternis (Eklipse) innerhalb einer Saros-Periode, die 223 synodische Monate umfasst. Wie bei der Meton-Uhr war der Zeiger **A** ausziehbar und das Ziffernblatt spiralförmig angelegt. Zusätzlich bewegten Hilfsräder einen weiteren Zeiger **B** auf einer kleinen Uhr. Er vollführte nur eine Drittelumdrehung je Saros-Periode, um anzuzeigen, dass sich die nächste Finsternis um acht Stunden verschob.



**METON-ZYKLUS-UHR**

Anzeige der Olympiaden und anderer Spiele der Antike

**OLYMPIADEN-UHR**

Auf diesem Ziffernblatt waren die Jahre ablesbar, in denen panhellenische Spiele wie die Olympiaden stattfanden

**FINSTERNIS-UHR** nach der Saros-Periode

Wieder zurück in London, machte ich mich ebenfalls an die Analyse der Röntgenaufnahmen. Ich erkannte einige Bruchstücke, die fraglos zu einem weiteren spiralförmigen Ziffernblatt der Rückseite gehörten. Seine vier Windungen trugen Unterteilungen, deren Zahl ich auf 220 bis 225 schätzte. Die Primzahl 223 war ein naheliegender Kandidat, denn sie spielt bei der Voraussage von Sonnen- und Mondfinsternissen (Eklipsen) eine große Rolle. Das Zusammenspiel der Himmelskörper ist sehr komplex, und deshalb unterscheiden sich Finsternisse je nach der genauen Konstellation, doch schon die Babylonier vermochten Zyklen ausfindig zu machen. Insbesondere wiederholen sich vergleichbare Eklipsen im Abstand von 223 synodischen Monaten beziehungsweise 18 Jahren – dies ist die schon erwähnte Saros-Periode.

Dass jenes Ziffernblatt damit zu tun hatte, bestätigte ein weiterer Befund: Zwischen den Skaleneinteilungen waren Blöcke von Symbolen zu lesen, die fast in allen Fällen die griechischen Buchstaben Σ (sigma), Η (eta) oder beide enthielten. Ersteres stand wohl für Σελήνη (selene), griechisch für Mond, deutete also vermutlich auf eine Eklipse des Erdtrabanten hin. Η war wohl das Kürzel für Ηλιος (helios), griechisch für Sonne, mit analoger Bedeutung. Das Symbolmuster lässt sich leicht verstehen: Finsternisse finden innerhalb einer Saros-Periode nur alle fünf bis sechs synodischen Monate statt.

Wie sah nun das Getriebe aus, das auf dieser Uhr die Eklipsen berechnete? Karakalos, der die ersten Röntgenbilder des Apparats aufgenommen hatte, veranschlagte für ein großes Exemplar im Konglomerat des Hauptfragments 222 Zähne, Wright und Edmunds hingegen 223. Dies war wohl das Hauptrad des Saros-Uhrwerks. Ich überlegte, welche Komponenten ihr Werk noch benötigte, und entdeckte eines nach dem anderen – bis auf ein kleineres Exemplar, das meinen Berechnungen nach über 27 Zähne verfügt haben musste.

Doch nun stellte sich ein neues Problem. Price hatte auf dem großen Saros-Rad zwei Lager für kleinere Zahnräder identifiziert, die wiederum jedes ein weiteres Rad antrieben. Dass die Griechen solche »epizyklischen Mechaniken« erdachten hatten, wäre schon erstaunlich, denn Vergleichbares wurde erst 1500 Jahre nach dem Untergang des Schiffs vor Antikythera wieder entwickelt. Nicht minder verwunderlich war, dass die vier Räder über jeweils 50 Zähne verfügten. Welchen Sinn aber sollte eine daraus resultierende Übersetzung von eins machen?

Nach Monaten fruchtloser Überlegungen erinnerte ich mich einer Anmerkung Wrights:

## EIN BENUTZERHANDBUCH: WIE MAN EINE FINSTERNIS VORHERSAGT

**Theoretisch verlangte der Antikythera-Mechanismus** wohl nur Grundkenntnisse in der Astronomie seiner Zeit. Nach einer Kalibrierung – für die allerdings ein Experte erforderlich war – ließen sich zurückliegende oder künftige Ereignisse innerhalb eines Zeitraums von mehreren Jahrzehnten vorhersagen. Der Berechnung einer Sonnen- oder Mondfinsternis lag zum einen die so genannte Saros-Periode zu Grunde: Alle 223 synodischen Monate (ein solcher Monat entspricht der Zeit zwischen gleichen Mondphasen) wiederholt sich eine geeignete Konstellation von Erde, Sonne und Mond. Zudem ereignen sich Sonnenfinsternisse nur bei Neumond, Mondfinsternisse nur bei Vollmond, was die Kalkulation des genauen Tages ermöglicht. Eine Anleitung nach Art heutiger »Manuals« hätte wie nebenstehend lauten können.

Eines der beiden auf dem Saros-Rad gelagerten, also epizyklischen Räder habe über einen Stift in einen Schlitz gegriffen, der sich in einem weiteren Rad befand. Gesetzt den Fall, die so miteinander gekoppelten Zahnräder hätten sich nicht um die gleiche Achse gedreht, sondern um zwei kaum mehr als einen Millimeter gegeneinander versetzte. Dann wäre der Drehwinkel des Rads, das nicht direkt, sondern über den Stift angetrieben wurde, nicht konstant gewesen. Oder konkreter: Rotierte das erste Zahnrad mit konstanter Geschwindigkeit, drehte sich das zweite mal geringfügig schneller, mal etwas langsamer mit.

Wright hatte das überlegt, aber wieder verworfen, doch ich war mir sicher, dass der Erfinder des Antikythera-Mechanismus auf genau diese Weise eine periodisch variierende Geschwindigkeit erreichen wollte. Sein Ziel war es, gemäß der fortschrittlichsten Theorie seiner Zeit die Bewegung des Mondes zu modellieren. Gelehrte wie Hipparchos postulierten im 2. Jahrhundert v. Chr. so genannte Epizyklen: kleinere Kreise, die ihrerseits auf den großen abrollten und an denen die Himmelskörper befestigt waren. Während also der Mond gemäß dieser Theorie insgesamt eine große Kreisbewegung um die Erde vollzog, hätte er gleichzeitig auch kleinere Umläufe vollführt.

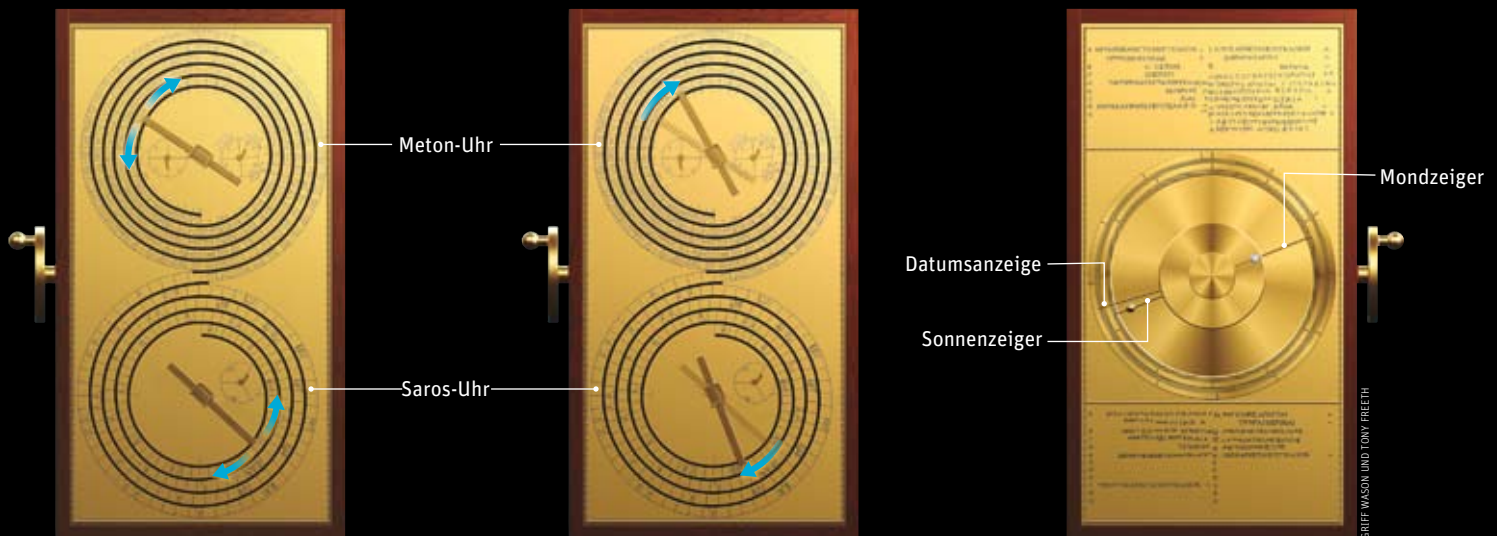
Das Ergebnis hätte den Beobachtungen der antiken Astronomen durchaus entsprochen: Der Trabant veränderte auf seiner Bahn kontinuierlich die Geschwindigkeit. Erst Jo-

### INSCRIFTEN



Mit bloßem Auge war auf diesem Fragment nur das Wort »ELIKI« (oben links), griechisch für Spirale, erkennbar. Die Röntgenaufnahme machte weiteren Text sichtbar: »235 Unterteilungen der Spirale.« Dies bestätigt die Annahme, dass die betreffende Uhr Berechnungen gemäß des 235 Mondmonate umfassenden Meton-Zyklus vornehmen sollte und spiralförmig angeordnet war.





### EINSTELLEN DES DATUMS

Drehe den Apparat, so dass du auf die Rückseite schaust. Wähle den aktuellen Monat und Jahr auf dem Meton-Kalender (oben) mittels Kurbel. Wie du siehst, bewegt sich dabei auch der Zeiger des Saros-Uhrwerks (unten).

### BERECHNUNG DES MONATS

Drehe die Kurbel nun so lange, bis der Zeiger des Saros-Uhrwerks laut Beschriftung des Ziffernblatts auf eine Finsternis weist. Die Beschriftung gibt Auskunft über Monat und Tageszeit sowie darüber, ob es sich um eine Sonnen- oder Mondfinsternis handelt.

### BERECHNUNG DES TAGS

Um auch den Tag zu ermitteln, richte Mond- und Sonnenzeiger mit der Kurbel so aus, dass sie übereinanderstehen (für eine Sonnenfinsternis) oder um 180 Grad versetzt sind (für eine Mondfinsternis). Der Zeiger auf dem ägyptischen Kalender (Vorderseite) dreht sich entsprechend mit und gibt den Tag der Finsternis an.

hannes Kepler (1571–1630) erkannte die wahren Gründe dafür: dass nicht Kreise, sondern Ellipsen unser Sonnensystem beherrschen (1. keplersches Gesetz) und dass der Fahrstrahl eines Himmelskörpers in gleichen Zeiten gleiche Flächen überstreicht (2. keplersches Gesetz), weshalb sich der Mond in Erdnähe (dem Perigäum) schneller auf seiner Bahn bewegt als im erdfernsten Punkt (dem Apogäum). Auch wenn die Astronomen des Altertums solche Zusammenhänge nicht verstehen konnten, waren ihnen die resultierenden Phänomene bekannt. Dem trugen die epizyklischen Zahnräder Rechnung.

### Astronomie und Feinmechanik

Betrachtet man nämlich die Antriebskette des Uhrwerks vom kurbelbetriebenen Haupttrad, dessen volle Umdrehung einem Jahr entspricht, bis zum ersten der epizyklischen 50-Zähne-Räder, ergibt sich eine Übersetzung von  $254/19$ . Das aber ist die mittlere Länge eines siderischen Monats im Meton-Zyklus. Diese Drehzahl wurde nun auf das zweite epizyklische Rad übertragen. Es gab sie an das dritte weiter, jedoch variiert durch den Nadel-Schlitz-Mechanismus. Das nun mal schneller, mal langsamer rotierende Rad trieb Nummer vier an, und das verstellte eine Mondphasen-Anzeige sowie einen Zeiger auf dem Tierkreis-Ziffernblatt der Vorderseite. All das erforderte enorme feinmechanische Fertigkeiten, zumal manche Achsen mittels Röhren durch andere Räder hindurchgeführt werden mussten.

Doch damit wäre diese Uhr noch nicht korrekt gelaufen, denn die astronomischen Verhältnisse sind verzwickter: Apogäum und Perigäum bleiben nicht auf ihren Positionen, weil die Achse des Mondorbits im Schwerfeld der Sonne rotiert. Die babylonischen und griechischen Astronomen gewahrten deshalb nicht nur scheinbar Richtungswechsel des Mondes, dieser benötigte offenbar auch etwas länger für einen Umlauf zwischen zwei Perigäen verglichen mit der Anzahl von Tagen, Stunden und Minuten, um relativ zum Fixsternhimmel wieder dieselbe Position zu erreichen. Der Unterschied zwischen den Umläufen des längeren »anomalistischen« und des siderischen Monats beträgt pro Jahr 0,112579655 Rotationen.

Hatte der geniale Konstrukteur auch jenes Phänomen berücksichtigt? Sicher kam es nicht von ungefähr, dass er das epizyklische Getriebe auf dem 223-Zähne-Rad der Saros-Periode montiert hatte. Schließlich entsprechen deren gut 18 Jahre 223 synodischen, aber auch 239 anomalistischen Monaten. Hier bot sich eine Möglichkeit, die verschiedenen Mondperioden zu verknüpfen. Offenbar hatte der Erfinder des Apparats Meton- und Saros-Periodisierung miteinander gekoppelt, doch das Wie bereitete mir Kopfzerbrechen. Denn wenn mein Modell des Saros-Werks stimmte, bewegte sich das 223-Zähne-Rad für das epizyklische Getriebe um genau den minimalen Unterschied zwischen siderischem und anomalistischem Monat zu schnell. Nun hatte

**Rotierte das erste Zahnrad mit konstanter Geschwindigkeit, drehte sich das zweite mal geringfügig schneller, mal etwas langsamer**

**Warum wurde eine derart ausgetüftelte Technologie so wenig genutzt, dass sie wieder in Vergessenheit geriet?**



Der promovierte Mathematiker und Dokumentarfilmer **Tony Freeth** forscht seit zehn Jahren über den Antikythera-Mechanismus. Er ist Geschäftsführer der Film- und Fernsehgesellschaft Imaging First – und dreht zurzeit eine Dokumentation über den Mechanismus.

**Freeth, T. et al.:** Calendars with Olympiad Display and Eclipse Prediction on the Antikythera Mechanism. In: *Nature* 454, S. 614 – 617, 31. Juli 2008.

**De Solla Price, D. J.:** An Ancient Greek Computer. In: *Scientific American* 200(6), S. 60 – 67, Juni 1959.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1026691](http://www.spektrum.de/artikel/1026691).

ich, wie erwähnt, für das Saros-Uhrwerk ein kleines Element mit 27 Zähnen postuliert, welches das große Rad direkt angetrieben haben muss. Also verringerte ich die Zahl seiner Zähne auf 26. Nun lief das große Rad zu langsam, der Unterschied zwischen siderischem und anomalistischem Monat wurde zu groß. Während eines Flugs nach Athen versuchte ich es spaßeshalber mit 26,5, auch wenn das keinen Sinn zu machen schien – und erhielt bis zur neunten Stelle hinter dem Komma die richtige Zahl. Ich saß aufrecht in meinem Sitz, als hätte mich ein elektrischer Schlag getroffen – das konnte kein Zufall sein!

Dann erinnerte ich mich, dass Wright in seiner Beschreibung des Meton-Getriebes zwei Räder mit je 53 Zähnen erwähnt hatte. Das hatte für mich damals keinen Sinn ergeben, mir schienen 54 Zähne wahrscheinlicher. Nun aber verstand ich: Das Produkt aus 54 und 26,5 entspricht dem Produkt aus 53 und 27. Indem der Konstrukteur Meton-Zyklus und Saros-Periode über das 27-Zähne-Rad gekoppelt hatte, war es ihm gelungen, die Drehrate des großen Saros-Rads um genau den minimalen Betrag zu drosseln, der erforderlich war, um in dem darauf epizyklischen Getriebe den anomalistischen Monat zu modellieren.

**Führt die Spur zu Archimedes?**

29 der erhaltenen 30 Zahnräder dienten unseren Forschungen nach der Berechnung von Sonnen- und Mondzyklen, die Funktion des 30. ist unklar. Es könnte zu einem verloren gegangenen Mechanismus zur Planetenberechnung gehören: Inschriften auf der Vorderseite legen nahe, dass der ursprüngliche Apparat wohl auch die Auf- und Untergänge von Planeten – Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn waren in der Antike schon bekannt – sowie besonderer Sterne kalkulierte. Darüber hinaus gibt es auch Überreste von Achslagern auf dem kurbelgetriebenen Hauptrad. Dieses nicht mehr erhaltene epizyklische System erfasste vielleicht analog der Mondphasenberechnung die Variationen der Planeten- und Sonnenbahn auf der Ekliptik.

Wie viele Zahnräder dafür zusätzlich benötigt wurden, lässt sich kaum abschätzen. Schon Price wusste von den uns bekannten 30 Stück, zudem identifizierten er und Wright ein weiteres in einem der großen Fragmente. Nach den neuesten Daten handelt es sich dabei aber lediglich um ein abgebrochenes Stück jenes Rads, dessen Bedeutung sich uns noch entzieht. Wright entwarf ein komplettes System für die mutmaßliche Berechnung der fünf Planeten und der Anomalien in der Sonnenbahn. Dazu benötigte er aber 40 weitere Räder. Angesichts des Einfallsreichtums, mit

dem der unbekannt Konstrukteur die verschiedenen Getriebe aufgebaut und verkoppelt hatte, erscheint mir diese Annahme aber deutlich zu hoch.

Unser derzeitiges Modell arbeitet mit 39 Zahnrädern und umfasst neben den beschriebenen Funktionen auch drei Räder für eine Variante des Meton-Zyklus. Der eignet sich gut, um die Länge des Sonnenjahrs mit dem Mondmonat abzugleichen. Der Astronom Kallippos von Kyzikos entdeckte im 4. vorchristlichen Jahrhundert, dass sich der dabei entstehende Fehler verringert, betrachtet man vier Meton-Zyklen, also 76 Jahre, und zieht einen Tag davon ab. Wright hatte bereits in dem Fragment, welches das Meton-Ziffernblatt enthält, noch ein kleineres entdeckt, das in vier Quadranten eingeteilt war. Zwar konnten wir inzwischen zeigen, dass es nicht zum Kallipischen Zyklus, sondern zum Olympiade-Uhrwerk gehörte, doch eine Inschrift »76 Jahre« legt die Annahme nahe, dass der Trick des Kallipos tatsächlich im Antikythera-Mechanismus umgesetzt worden ist.

Um auch die Sonnenanomalien sowie die Bahnen von Merkur, Venus und Mars zu berechnen, benötigt man meines Erachtens nur acht weitere Zahnräder. Leider ist es mir bislang nicht gelungen, auf Grundlage der vorliegenden Maschine auch Kalkulationen zu Jupiter und Saturn auf elegante Weise, also auch mit wenigen Ergänzungen, zu modellieren. Die wahre Zahl aller Teile werden wir wohl niemals herausfinden.

Offen bleibt auch die Frage, woher der Mechanismus eigentlich kam und wer ihn entworfen hat (siehe Kasten S. 64). Einige Monatsnamen des Meton-Kalenders waren nur in Korinth und seinen Pflanzstädten gebräuchlich. Möglicherweise wurde der Mechanismus also in Syrakus auf Sizilien gefertigt und stand in einer von dem griechischen Erfinder Archimedes begründeten Schule des Instrumentenbaus.

Rätsel über Rätsel. Darunter mag dieses das größte sein: Warum wurde eine derart ausgetüftelte Technologie so wenig genutzt, dass sie wieder in Vergessenheit geriet? Einmal ganz abgesehen davon, dass der Mechanismus von Antikythera nicht nur eine raffinierte Konstruktion war, die Kenntnisse der Astronomie und der Mathematik erforderte, sondern darüber hinaus auch eine enorm entwickelte Feinmechanik voraussetzte. Price schrieb 1959 in »Scientific American«: »Es ist ein wenig beängstigend, dass die alten Griechen kurz vor dem Fall ihrer großartigen Zivilisation unserer heutigen Zeit so nahe gekommen waren – nicht nur in ihrem Denken, sondern auch in ihrer wissenschaftlichen Technik.« Und dabei kannte Price noch nicht einmal die volle Wahrheit. <





# ASTEROIDEN

## als Geburtshelfer für erste Kontinente?

Große Himmelskörper, die auf der frühen Erde einschlugen, hatten möglicherweise einen paradoxen Effekt: Sie begünstigten die Entstehung der ersten Kontinente, statt sie, was naheläge, zu behindern.

Von Sarah Simpson

**B**rodelndes, weiß glühendes Magma bedeckte die Urerde vor 4,6 Milliarden Jahren. Teile davon erstarrten beim langsamen Abkühlen schließlich zu Gesteinsfetzen, die wie dünne Schlacke auf dem Feuermeer trieben. Diese ersten irdischen Krustenstücke waren jedoch grundverschieden vom heutigen Festland mit seinen tief reichenden Wurzeln. Auf welche Weise genau – und wie schnell – echte Kontinente entstanden und wuchsen, ist noch nicht endgültig geklärt.

Lange gingen Geologen jedoch selbstverständlich davon aus, dass für die Bildung des Festlands nur Vorgänge in und auf der Erde verantwortlich sein sollten. Jüngere Erkennt-

nisse wecken nun Zweifel daran. Demzufolge könnten Einschläge großer Himmelskörper einen wesentlichen Beitrag zur Entstehung der Kontinente geleistet haben.

Eine Grundannahme lautete bisher, dass sich das Bombardement mit Asteroiden, die zunächst in großer Zahl auf unseren Planeten niederprasselten, bis vor etwa 3,8 Milliarden Jahren großenteils gelegt hatte. Damals war die Erdoberfläche so weit abgekühlt, dass sich flüssiges Wasser in Seen und Ozeanen sammeln und als Lebensraum für die ersten Mikroorganismen dienen konnte. Später krachten, so die herrschende Meinung, nur noch sehr wenige größere Himmelskörper auf unseren Planeten – mit durchweg verheerender Wirkung; man denke nur an das Aussterben der Dinosaurier.





In den letzten zwei Jahrzehnten fanden sich jedoch Spuren einer unerwarteten Serie gewaltiger Einschläge in der Zeit vor 3,8 bis 2,5 Milliarden Jahren – einem Erdzeitalter namens Archaikum. Beim Aufprall eines großen Asteroiden wird das Gestein im weiten Umkreis verdampft, aufgeschmolzen oder zertrümmert – also Krustenmaterial zerstört. Allerdings bildete sich im Archaikum gerade besonders viel kontinentale Kruste. Einigen Schätzungen zufolge entstanden damals bis zu 65 Prozent der heutigen Festlandmasse.

Um diesen offensichtlichen Widerspruch aufzuklären, durchforsten Geologen seit einiger Zeit die alten Gesteinsschichten nach Hinweisen darauf, welche Auswirkungen die gewaltigen Einschläge von Himmelskörpern

auf die archaische Erde hatten. Zu ihnen gehört Andrew Y. Glikson von der Australian National University in Canberra. Seine Untersuchungen brachten ihn jetzt zu der Überzeugung, dass der Aufprall von Asteroiden – darunter solchen, deren Spuren in den alten Kernen (»Kratonen«) von Südafrika und Westaustralien nachweisbar sind – das Wachstum der ersten irdischen Kontinente keineswegs behindert, sondern im Gegenteil sogar gefördert hat.

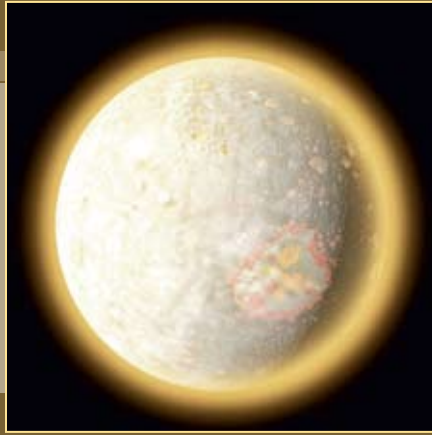
Viele seiner Kollegen bleiben allerdings skeptisch. Sie wenden ein, dass verwertbare Spuren der Vorgänge im Archaikum mehr als spärlich sind und ein widersprüchliches Bild ergeben. Doch Computersimulationen der potenziellen Auswirkungen gewaltiger Einschläge stützen Gliksons Hypothese. Es



VOR 4,6 MILLIARDEN JAHREN

## WEISS GLÜHENDER MAGMAOZEAN

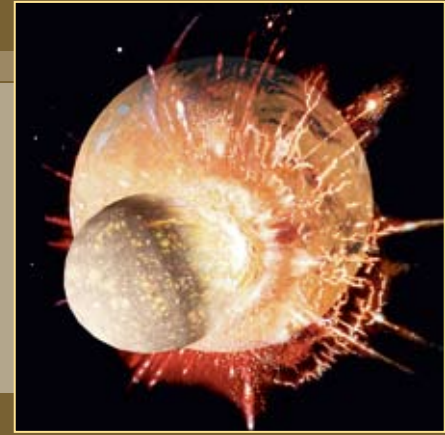
Als die Erde sich aus Material des solaren Urnebels zusammenballt, ist sie eine von glühend heißem, geschmolzenem Gestein bedeckte Feuerkugel.



VOR 4,5 MILLIARDEN JAHREN

## UNTER SCHWEREM BESCHUSS

Im Verlauf der Abkühlung überzieht sich die Erde mit einer dünnen Kruste. Doch Einschläge riesiger Asteroiden, einer davon wahrscheinlich so groß wie der Mars, zerstören diese Haut immer wieder.



## In Kürze

► Die **frühe Erde** stand viel länger unter schwerem **kosmischem Beschuss** als bisher gedacht. So schlugen nach neuen Erkenntnissen noch vor 3,8 bis 2,5 Milliarden Jahren **mindestens neun große Asteroiden** ein.

► Im gleichen Zeitraum bildeten sich aber auch **die ersten irdischen Kontinente**. Einer neuen Theorie zufolge leisteten die Bomben aus dem Weltall einen Beitrag zur Entstehung des Festlands.

► Demnach beeinflussten die einschlagenden Asteroiden die **Zirkulation im Erdmantel** und lenkten **aufsteigende Magmaströme** in einer Weise um, dass die Anreicherung und Auskristallisation leichter Komponenten begünstigt wurde.

mag zu früh sein, die Lehrbücher in puncto Kontinentbildung umzuschreiben. Doch selbst Skeptiker halten es für angebracht, sich mit der Asteroidentheorie näher zu befassen.

### Land in Sicht

Schon seit Jahrzehnten rätseln Geologen, wie die ersten irdischen Kontinente entstanden sind. Das Problem ist vertrackter, als es auf den ersten Blick scheinen mag. Kontinente bestehen aus riesigen Gesteinsblöcken, die dick und leicht genug sind, um nicht in das heiße Erdinnere zurückzusinken. Das unterscheidet sie von der basaltischen Kruste unter den Ozeanen. Diese entsteht stetig neu aus erstarrendem Magma und taucht, weil sie relativ dünn und wegen des hohen Eisengehalts von Basalt ziemlich schwer ist, nach dem Erkalten immer wieder ab; derzeit geschieht das nach spätestens 200 Millionen Jahren. Kontinentale Kruste hingegen enthält vorwiegend weniger dichte Gesteine wie Granit. Stücke davon treiben – ähnlich wie Eisberge im Meer – schon seit fast vier Milliarden Jahren auf dem zähflüssigen Erdinneren.

Jedes Geologielehrbuch erzählt die Geschichte von den ersten Kontinenten ein wenig anders, doch in den Grundzügen gleicht sich das Bild. Demnach überzog sich in kurzen Atempausen zwischen den heftigen Asteroidenbombardements unmittelbar nach der Entstehung unseres Planeten dessen langsam abkühlende Oberfläche wiederholt mit einer dünnen Kruste. Diese umschloss allerdings nicht als zusammenhängende Decke die gesamte Erde, sondern bestand aus mehreren Dutzend Einzelstücken, die auf dem wallenden Magma schwammen.

Ähnlich wie in einer Lavalampe flüssiges Wachs aufsteigt, drang heißes, geschmolzenes Mantelgestein pilzartig empor – Geologen sprechen von einem Plume –, kühlte unter der Oberfläche ab und sank zurück in die Tiefe, wobei es die ersten, noch sehr dünnen und

schweren Krustenstücke mit hinabzog. Unterdessen stießen Vulkane Gase aus und erzeugten eine primitive Atmosphäre. Wasserdampf kondensierte darin und fiel als Regen vom Himmel. Dieser sammelte sich, sobald die dünne Kruste aus erstarrtem Magma kalt genug geworden war, in flachen Ozeanen.

Der Keim eines Kontinents bildete sich, wenn ein heißer Plume beim Aufstieg ein Stück der schweren Kruste teilweise aufschmolz, bevor es absinken konnte. Dadurch entzog er diesem leichtere Minerale, die einen niedrigeren Schmelzpunkt haben. Das erhöhte den Auftrieb des Plumes, so dass er weiter nach oben vorstieß und die Kruste durchdrang. Unmittelbar an der Oberfläche erstarrte sein Magma dann zu etwas leichterem Gestein, das nicht wieder absank. Im Verlauf mehrerer solcher Zyklen aus partiellem Schmelzen und Abtrennen von Magma geringerer Dichte bildete sich schließlich Granit.

Es ist unmöglich, den genauen Zeitablauf dieses Prozesses zu ermitteln. Doch zumindest einen Anhaltspunkt gibt es: Bei der Erosion eines frühen Granits blieben winzige Zirkonkristalle übrig, die in jüngere Sedimentgesteinsformationen im heutigen Australien eingelagert wurden (Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 70). Ihre Datierung ergab ein Alter von 4,4 Milliarden Jahren.

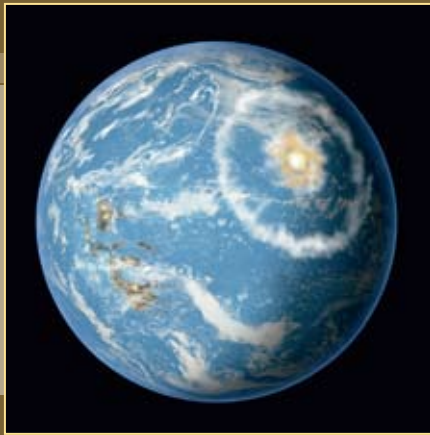
Spätestens 160 Millionen Jahre nach der Entstehung der Erde muss also eine granitische Gesteinsmasse mächtig genug gewesen sein, um aus der umgebenden basaltischen Kruste herauszuragen. Dennoch gab es damals nichts, was dem heutigen Festland gleicht, das mehr als 30 Prozent der Erdoberfläche bedeckt und im Durchschnitt 35 Kilometer mächtig ist. Die ersten Protokontinente nahmen wahrscheinlich nur allmählich Gestalt an, so wie sich auch in der Gegenwart neue Landmassen nur sehr langsam bilden. Bei Zusammenstößen verschmolzen sie zu größeren Gebilden aus verdicktem Krustenmaterial, und aufstei-



VOR 3,2 MILLIARDEN JAHREN

### FRISCH GEBACKENE LANDMASSEN

Durch teilweises Aufschmelzen und Fusion älterer Krustenteile entstehen die ersten echten Kontinente. Immer noch gibt es heftige Einschläge, allerdings seltener.



VOR 1,1 MILLIARDEN JAHREN

### FRÜHER SUPERKONTINENT

Bei Zusammenstößen vereinigen sich die Landmassen zum ersten gut dokumentierten Superkontinent auf der Erde: Rodinia.



ALLE DOKUMENTE

gende Plumes aus heißem Mantelmaterial sorgten für Nachschub von frischem Magma aus der Tiefe.

Vor etwa drei Milliarden Jahren, darüber sind sich die meisten Geologen einig, verfügte die Erde erstmals über einen richtigen Kontinent: ein ödes, mit Vulkanen übersätes Stück Land, das sicherlich kleiner war als das heutige Australien. Vielleicht existieren sogar noch Reste davon. Als solche betrachten manche Geologen den Pilbara-Kraton in Westaustralien und den Kaapvaal-Kraton mit den malerischen Barberton Mountains in Südafrika. Die beiden Formationen »sind sich geologisch erstaunlich ähnlich«, konstatiert Bruce M. Simonson vom Oberlin College (Ohio), der Anfang der 1990er Jahre einige Monate damit verbrachte, die an trockenen, von Gebüsch überwucherten Hängen zu Tage tretenden Gesteinsschichten beider Regionen zu untersuchen. »Ich glaube fest daran, dass Barberton und Pilbara einst zusammengehörten«, sagt der Geologe.

Wo auf der Erde der erste Kontinent lag, ist nicht bekannt. Doch da es dicht unter der Kruste immer noch heftig brodelte, zerbrach er wieder, während anderswo neue Landmassen entstanden. Es folgte eine gut dokumentierte Serie aus Aufspaltungen und Vereinigungen von Kontinenten, die schließlich zur heutigen Festlandverteilung führte.

### Gewusst wo

Dieser »Tanz« der Krustenplatten erklärt den Übergang der Kontinente vom Jugendstadium zur Reife. Doch was davor passierte, liegt noch größtenteils im Dunkeln. Deshalb suchen Geologen in den alten Landformen in Südafrika und Australien nach Hinweisen auf das Geburtsstadium. Im Vergleich zu den Kratonen anderer heutiger Kontinente wurden Kaapvaal und Pilbara später relativ wenig durch Metamorphose (mineralogische Umwandlung unter hohen Temperaturen und

Drucken) verändert. Die beiden Formationen zählen deshalb zu den am besten erhaltenen Krustenrelikten aus dem Archaikum. Ihr interessantester Teil sind Grünsteingürtel: 3,5 bis 2,4 Millionen Jahre alte Gesteinsformationen, die just zur Entstehungszeit der ersten Kontinente Gestalt annahmen.

Seit den 1970er Jahren deuten die meisten Geologen solche Grünsteingürtel als alte Gesteinstücke zu den Vulkaninselnketten, die an so genannten Subduktionszonen entstehen. Dort kollidiert eine ozeanische Krustenplatte mit einer kontinentalen und taucht dabei unter diese ab. Als Folge davon entsteht ein tiefer Graben. Wenn nun die Inseln der Vulkankette, die auf der abtauchenden Platte sitzen, mit ihr zu dem Graben hinwandern, werden sie dort, weil sie zu sperrig sind, nicht auch nach unten gezogen, sondern regelrecht von ihrer Unterlage abgekratzt und auf den Rand des entgegenkommenden Kontinents geschoben. Die Sierra Nevada und andere Gebirgsketten im Westen der USA sind derart am westlichen Nordamerika gestrandet (Spektrum der Wissenschaft 1/1983, S. 66).

Doch diese moderne Art des Kontinentalwachstums erkläre nicht alle geologischen Merkmale der Grünsteingürtel, behauptet Glikson. Als er diejenigen in Südafrika und Australien detailliert untersuchte, stieß er schon vor längerer Zeit auf eine unerwartete Besonderheit: Die ältesten, vor 3,5 bis 3 Milliarden Jahren entstandenen Abschnitte waren anscheinend durchweg vertikal gewachsen – durch schichtweise Ablagerung erodierten Materials zwischen domförmigen Kuppen aus Granit bildendem Magma, das sich von unten emporgedrückt hatte. Das unterscheidet sich grundlegend von der Situation an heutigen Subduktionszonen. Dort werden Sedimente und vulkanisches Material horizontal zusammengeschoben und seitlich aneinandergesetzt.

Das Fehlen von Hinweisen auf Subduktion überrascht allerdings nicht wirklich. Die meis-

### ÄLTESTE ERHALTENE KONTINENTALE KRUSTE

Lange galt der so genannte Isua-Gneis an der Südwestküste Grönlands, der vor etwa 3,8 Milliarden Jahren entstand, als die älteste Gesteinsformation auf der Erde. In jedem Fall handelt es sich um den größten erhaltenen Überrest sehr früher kontinentaler Kruste.

Als noch älter stellte sich inzwischen der Acasta-Gneis-Komplex im Nordwesten Kanadas heraus. Er enthält Gesteine, die sich vor etwas mehr als 4 Milliarden Jahren gebildet haben. Ein noch höheres Alter von 4,3 Milliarden Jahren ergaben neueste Untersuchungen für den Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel an der Hudson Bay im nördlichen Kanada. Allerdings ist diese Datierung umstritten.

Die ältesten bekannten Zeugnisse der ersten Kontinente sind keine Gesteine, sondern mineralische Bestandteile davon, die bei der Verwitterung erhalten blieben, aber in eine andere Umgebung gelangt sind. Es handelt sich um Zirkonkristalle, die auf 4,404 Milliarden Jahre vor heute datiert wurden. Damit sind sie nur unwesentlich jünger als die älteste bekannte Mondgesteinsprobe.

**LEXIKON**

- **OZEANISCHE KRUSTE:**  
unter dem Meer gelegener, nur fünf bis zehn Kilometer dicker Teil der Erdkruste, der an mittelozeanischen Rücken durch Erstarren von Magmen aus dem Erdmantel entsteht und wegen seiner basaltischen, kieselsäurearmen Zusammensetzung eine relativ hohe Dichte hat
- **KONTINENTALE KRUSTE:**  
aus dem Meer herausragender, bis zu 80 Kilometer dicker Teil der Erdkruste; er hat eine relativ geringe Dichte, weil er aus Material granitischer, kieselsäurereicher Zusammensetzung besteht, in dem durch fraktionierte Kristallisation von Magma leichtere Elemente angereichert wurden
- **KRATONE:**  
sehr alte Festlandskerne von Kontinentalplatten
- **ARCHAIKUM:**  
Erdzeitalter, das von 3,8 bis 2,5 Milliarden Jahren vor der Gegenwart reicht. In ihm war die Erde erstmals durchgängig von einer festen Kruste bedeckt, deren Oberflächentemperatur unter dem Siedepunkt von Wasser lag, so dass sich die ersten Meere bildeten. Damals entstanden bis zu zwei Drittel der heutigen Kontinentalmassen
- **PLUME:**  
Aufstrom heißen Gesteinsmaterials aus dem unteren Erdmantel, der in der Tiefe eine schlauchartige Form hat und sich zur Erdkruste hin pilzartig verbreitert

ten Forscher sind sich einig, dass die Platten-tettonik im frühen Archaikum noch nicht richtig in Gang gekommen war, falls es sie überhaupt schon gab. Auf der sehr heißen Erde herrschte damals eine geringere Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, so dass die Konvektion à la Lavalampe, welche die Plattenbewegung antreibt, schwächer ausgeprägt war. Wie sich aus der Datierung verschiedener Gesteine in den ältesten Teilen der archaischen Grünsteingürtel ergibt, wurden mächtige Granitkörper jeweils in einer Serie kurzer, klar definierter Zeiträume eingebaut. Irgendein schnell ablaufender Vorgang müsse also diesen raschen Einbau vermittelt haben, meint Glikson. Wenn es nicht die Subduktion war, was dann?

Dieses Problem brachte den Forscher schon vor Jahrzehnten dazu, nach neuen Erklärungen für die Kontinentbildung im Archaikum zu suchen. Konnte der Aufprall von Himmelskörpern, den die Geologen bis dahin ignoriert hatten, eine Rolle gespielt haben? Das Asteroidenbombardement begann vor etwa 3,9 Milliarden Jahren stark abzuflauen; doch Untersuchungen von Kratern auf dem Mond deuten auf größere Einschläge noch bis vor etwa 3,2 Milliarden Jahren hin. Demnach könnte auch die Erde um diese Zeit noch von gewaltigen kosmischen Geschossen getroffen worden sein. Gab es Spuren davon, die Geologen bisher nur übersehen hatten?

**Unerwartete Einschlagspuren**

Zwei US-Forscher konnten diese Frage 1986 beantworten. Bei ihrer alljährlichen Exkursion in den Grünsteingürtel der Barberton Mountains stießen Donald R. Lowe von der Stanford University (Kalifornien) und Gary R. Byerly von der Louisiana State University in Baton Rouge auf eine dünne Lage alten Meeres-sediments mit ungewöhnlicher Zusammensetzung: Die Schicht enthielt Hunderte kleiner Hohlkugeln, die an Glasperlen erinnerten. Bei genauerer Untersuchung erschienen diese sandkorngroßen Gebilde fast identisch mit jenen so genannten Sphäruhlen, die einen der wichtigsten Belege für den Asteroideneinschlag bildeten, der am Ende der Kreidezeit die Dinosaurier auslöschte. Die 3,2 Milliarden Jahre alten Hohlkugeln aus den Barberton Mountains waren der erste Beleg dafür, dass ein großer Himmelskörper während des Archaikums auf die Erde traf. Später entdeckten Lowe und Byerly zwei weitere Sphäruhlenbetten in Südafrika, die ungefähr aus derselben Zeit stammen.

Außerdem fanden sich in Barberton Spuren eines Einschlags vor 3,5 Milliarden Jahren, den die beiden Forscher mit einem gleich

alten Sphäruhlenbett im australischen Pilbara-Kraton in Verbindung brachten; denn auch die Hohlkugeln von dem Einschlag, der den Untergang der Dinosaurier besiegelte, sind nicht auf dessen Umgebung begrenzt, sondern über den gesamten Erdball verstreut. Simonson traf bei seinen Untersuchungen an Eisenformationen in der Pilbara-Region ebenfalls unerwartet auf Schichten mit Glassphäruhlen. Diese waren deutlich jünger und bewiesen, dass die erstaunliche Serie von Asteroideneinschlägen bis knapp über das Ende des Archaikums vor 2,5 Milliarden Jahren hinausreichte.

Als Lowe und Byerly die von ihnen entdeckten Sphäruhlen analysierten, fanden sie einen relativ hohen Gehalt an Magnesium und Eisen. Daraus leiteten sie ab, dass die Himmelskörper höchstwahrscheinlich in das basaltische Gestein am Grund eines Ozeanbeckens einschlugen – wohl ein gutes Stück von den Regionen entfernt, wo die erhalten gebliebenen Kugeln herabregneten. Zu diesem Szenario passen in Südafrika entdeckte Hinweise auf Tsunamis, die synchron zur Ablagerung der Sphäruhlenschichten auftraten.

Wie Glikson feststellte, fiel der Zeitpunkt einiger Asteroideneinschläge mit der Bildung »eines großen Vorkommens eckiger Felsblöcke« in den Pilbara-Gesteinen zusammen, »einige davon bis zu 250 Meter breit«. Diese durcheinandergewürfelten Quader entstanden durch Hebung und Einsturz der Erdoberfläche an größeren seismischen Verwerfungen. Tatsächlich wären weit reichende Schwärme starker Erdbeben eine der unmittelbarsten Folgen eines gewaltigen Asteroideneinschlags.

Zweifellos steckte die frühe Erde solche Treffer aus dem All nicht so einfach weg. Anhand der Verbreitung der Sphäruhlen und durch Vergleiche mit anderen Ablagerungen von jüngeren Einschlägen schätzten Lowe und Byerly den Durchmesser der damals niedergegangenen Asteroiden auf 20 bis 50 Kilometer (der Himmelskörper, der die Dinosaurier aussterben ließ, maß schätzungsweise nur 15 Kilometer). Angesichts solcher Dimensionen fühlt sich Glikson in seiner Theorie bestätigt, die kosmischen Geschosse könnten eine Rolle bei der Bildung der Kontinente gespielt haben. Als Nächstes richtete er seine Aufmerksamkeit deshalb auf abrupte stratigrafische Veränderungen zur Zeit der drei von ihm als besonders aufschlussreich erachteten Einschläge, die Lowe und Byerly in 3,2 Milliarden Jahre alten südafrikanischen Sedimenten nachgewiesen hatten.

Wie Glikson in einem aktuellen Fachartikel schreibt, fällt dieses Bombardement zeitlich mit dem erstmaligen Anstieg der betreffenden Regionen über den Meeresspiegel zusammen, der vermutlich die Geburt eines neuen Konti-



## WIEDERHOLTE EINSCHLÄGE AUF FRÜHEM KONTINENT

**Alte Landformen in Südafrika und Australien** verraten am meisten über den Ursprung der Kontinente. Einige Geologen halten Teile der südafrikanischen Barberton Mountains (rechts oben) und der Region Pilbara im Nordwesten Australiens (unten) für Relikte ein und

derselben ursprünglichen Landmasse. Dort gab es vor 3,5 bis 2,5 Milliarden Jahren mindestens neun gewaltige Asteroideneinschläge. Das belegen Schichten aus so genannten Glassphärülen (oben links), die in den beiden Formationen entdeckt wurden.



BRUCE M. SIMONSON, OBERLIN COLLEGE

DONALD R. LOVE, STANFORD UNIVERSITY

Diese als Sphärülen bezeichneten sandkorngroßen Glaskügelchen zeugen vom Einschlag eines Asteroiden vor 2,5 Milliarden Jahren. Die Aufprallenergie war so groß, dass Gestein verdampfte. Diesen Dampf verteilte der Wind rund um den Erdball. Beim Abkühlen kondensierten daraus kleine Tropfen, die erstarrten und zu Boden fielen. Einige wurden dann in marine Sedimente eingebettet, die heute in der Region Pilbara zu Tage treten.



CAT WILSON



SCOTT HASSLER, OBERLIN COLLEGE



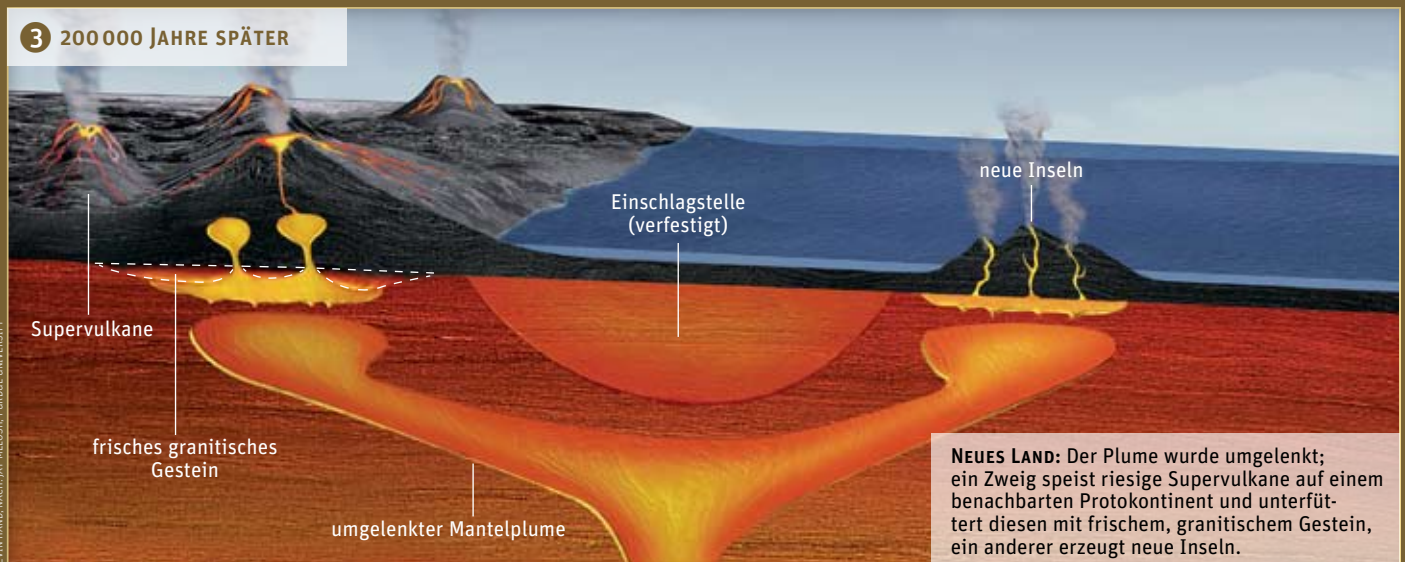
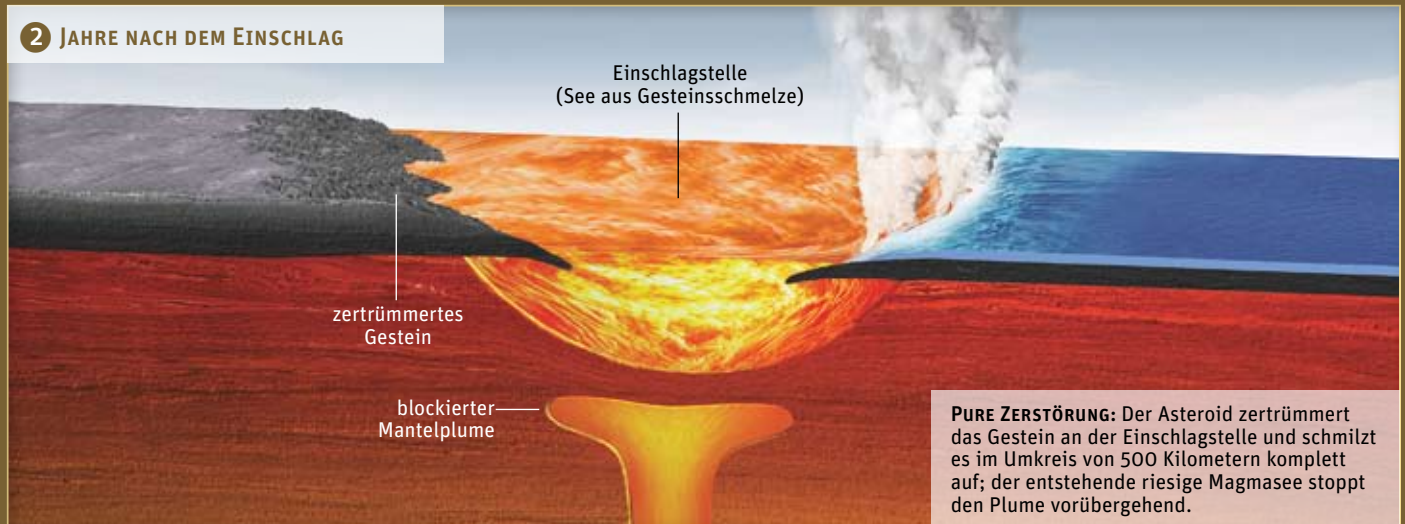
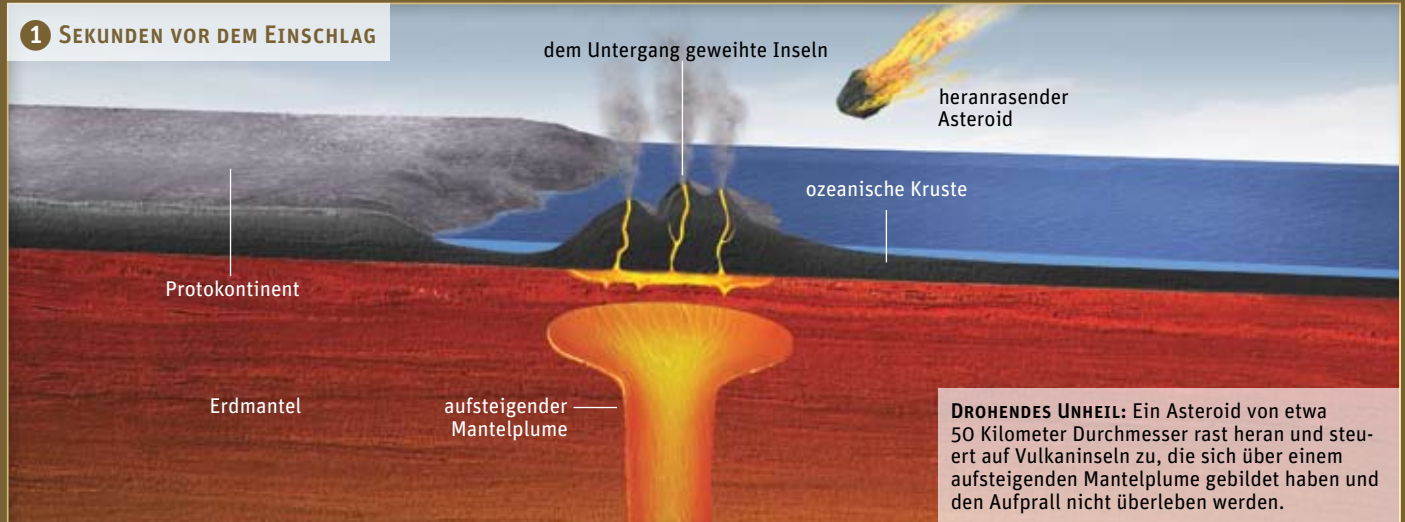
CAT WILSON



# WIE KOSMISCHE BOMBEN LAND HERVORBRINGEN KONNTEN

Vor Jahrmilliarden ließen Strömungsvorgänge im Erdinneren ähnlich wie heute neue Landmassen über aufsteigenden Mantelplumes entstehen. Das heiße, nach oben dringende Material schmolz das darüberliegende Gestein auf und speiste Vulkane, die mit ihren Eruptionsmassen

die Kruste verdickten (1). Ein heftiger Asteroideneinschlag unterbrach diesen Vorgang vorübergehend (2). Doch auf lange Sicht könnte das Ereignis auch konstruktiv gewirkt haben, indem es den Plume in benachbarte Regionen umlenkte (3).





nents markiert. Die Bodenschichten aus der Zeit vor den Einschlägen bestehen aus basaltischer ozeanischer Kruste sowie Meeresbodensedimenten. Vor rund 3,2 Milliarden Jahren wurden diese Gesteine deformiert, angehoben und erodiert – Vorgänge, die sich laut Glikson leicht durch die Erschütterungen beim Aufprall von Himmelskörpern erklären lassen. Bei den Schichten aus späterer Zeit handelt es sich dagegen durchweg um Erosionsprodukte von Gesteinsmassen, die nur an Land entstanden sein können. Demnach sorgten kurz nach den Asteroideneinschlägen starke Kräfte im Erdinneren für eine Anhebung der Kruste über den Meeresspiegel. Zugleich bildeten sich Granit und andere Gesteine vom kontinentalen Typus, die schließlich erodierten.

Glikson sieht in den Asteroideneinschlägen auch die Ursache der Krustenhebung. Dabei stützt er sich vor allem auf die großen Massen granitischen Magmas, die vor etwa 3,2 Milliarden Jahren beim australischen Pilbara ebenso wie beim südafrikanischen Kaapvaal-Kraton von unten eindrangen. Dass die Asteroideneinschläge und die Bildung dieser frischen Gesteinsschmelze zeitlich zusammenfallen, ist in Gliksons Augen kein Zufall, sondern Ausdruck einer Kausalbeziehung. Die ungeheure Wucht des Aufpralls, so seine Erklärung, »verursachte eine starke Anhebung eines im Werden begriffenen Kontinents sowie die Intrusion von granitischem Magma, was belegt, dass zumindest Teile der kontinentalen Kruste gewaltsamen Ursprungs sind«. Die entscheidende Frage lautet: Welcher Vorgang erhitzte das Magma? Gliksons Antwort: Durch die Gewalt der Asteroideneinschläge vor 3,2 Milliarden Jahren veränderte sich das Muster der Konvektionsströmung im Mantel. Das führte zum Aufstieg neuer Magmaplumes, welche die Kruste von unten aufheizten.

### Konstruktive Kritik

Gliksons Theorie steht und fällt mit der Größe des aufprallenden Himmelskörpers. Was die Konvektion im Erdmantel betrifft, wäre der Einschlag eines Körpers von den Ausmaßen des Asteroiden, der die Ära der Dinosaurier beendete, wenig mehr als das »Klatschen eines Insekts gegen eine Windschutzscheibe« gewesen, spottet Simonson. Doch wenn die Geschosse, die im frühen Archaikum die Erde trafen, wirklich doppelt so groß waren, könnten sie tiefere Spuren hinterlassen haben. Asteroiden mit einem Durchmesser von 50 Kilometern wären durchaus im Stande, die Muster der Wärmeströmung im Erdinneren zu verändern, meint der Geophysiker Jay Melosh von der Purdue University in West Lafayette (Indiana). Computersimulationen, die er und seine Kol-

legen für andere Zwecke durchgeführt haben, lassen erkennen, wie der Einschlag eines ausreichend großen Himmelskörpers in der Tat zur Entstehung eines Kontinents beitragen könnte.

Melosh betrachtete einen Asteroiden mit 50 Kilometer Durchmesser, der mit einer Geschwindigkeit von etwa 20 Kilometern pro Sekunde in ein Ozeanbecken kracht. Dabei entsteht kein Krater, sondern nur ein »See« aus geschmolzenem Gestein, der rund 500 Kilometer breit und fast ebenso tief ist. Wenn sich eine solche Lavalache über einem Mantelplume bildet, hindert sie diesen durch ihre enorme Hitze am weiteren Aufstieg und lenkt ihn in Nachbarregionen um. Unter ozeanischer Kruste ließe der abgelenkte Magmastrom vielleicht neue Inseln entstehen, die irgendwann an einer Subduktionszone angetrieben und einem Kontinent seitlich angefügt werden. Stiege der umdirigierte Plume dagegen unter einem Protokontinent auf, der schon aus leichterem Gestein besteht, könnte die neue Wärmequelle ausreichen, um frische, aufwärtsgerichtete Ströme granitischen Magmas zu erzeugen. Dabei erhielte der Kontinent Zuwachs von unten, wie das die Untersuchungen in den Grünsteingürteln von Pilbara und Kaapvaal dokumentiert haben.

Doch dieses Szenario sei mit vielen Fragezeichen versehen, warnt Melosh. Anhand von Spuren in Gesteinsformationen zu beweisen, dass ein bestimmter Himmelskörper Mantelplumes umlenkte und dabei die Bildung ganz bestimmter Protokontinente förderte, ist praktisch unmöglich. Die Narben, welche die Asteroideneinschläge in der Erdkruste hinterließen, wurden schon vor langer Zeit durch Subduktion oder Erosion getilgt. Und selbst wenn ein Plume wirklich für die Entstehung von Granit verantwortlich wäre – wer wollte entscheiden, ob sein Magma nicht schon vor dem Einschlag des Asteroiden mit dem Aufstieg unter einem Protokontinent begonnen hatte?

Dennoch bleibt es Gliksons Verdienst, eine verblüffende zeitliche Übereinstimmung zwischen Asteroideneinschlägen im frühen Archaikum und dem Eindringen frischen granitischen Magmas in alte Teile heutiger Kontinente festgestellt zu haben. Ferner lieferte er einen plausiblen Mechanismus für die Art und Weise, wie der Aufprall eines Himmelskörpers die Magmabildung initiieren könnte. »Es handelt sich um ein durchaus plausibles Modell der damaligen Vorgänge«, sagt Lowe. »Doch ist es nur eine der möglichen Interpretationen.« Auf jeden Fall beeinflussten Asteroideneinschläge, die das Gesicht des Planeten veränderten, auch die Dynamik im Erdinneren. Vielleicht war ihre Wirkung wirklich nicht nur destruktiv. ◀



GETTY IMAGES / PETER SCOTTES

PHOTO RESEARCHERS / ERICH SCHREMP

**Basalt (oben) ist die wichtigste Gesteinsart am Boden der Ozeanbecken. Der spezifisch leichtere Granit (unten) bildet einen Hauptbestandteil des Festlands. Dank seiner geringeren Dichte lässt er die Kontinente auf dem Erdmantel schwimmen, während ozeanische Kruste an Subduktionszonen wieder in das heiße Erdinnere absinkt.**



**Sarah Simpson** ist freie Mitarbeiterin bei »Scientific American«.

**Glikson, A. Y.:** Field Evidence of Eros-Scale Asteroids and Impact Forcing of Precambrian Geodynamic Episodes, Kaapvaal (South Africa) and Pilbara (Western Australia) Cratons. In: *Earth and Planetary Science Letters* 267, S. 558–570, 2008.

**McLennan, S. M., Taylor, S. R.:** Ursprung und Entwicklung der kontinentalen Kruste. In: *Spektrum der Wissenschaft* 11/1996, S. 46–52.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1026692](http://www.spektrum.de/artikel/1026692).

Absolute

# VERTRAULICHKEIT

## im Quanten-Internet

Die seltsamen Gesetze der Quantenmechanik sind geeignet, Big Brother in die Schranken zu weisen. Vielleicht können wir uns eines Tages im Internet bewegen und dabei sicher sein, dass niemand uns überwachen kann.

### In Kürze

- ▶ Allein die Fragen, die ein Mensch an eine Internet-Suchmaschine stellt, verraten viel über seine Person, selbst wenn sein Name nirgendwo genannt wird.
- ▶ Über das zurzeit in der Entwicklung befindliche Quanten-Internet könnte eine Suchmaschine jedem Anfrager seine Frage samt Antwort zurückgeben – mit der Gewissheit, dass niemand diese Daten gespeichert oder kopiert hat.
- ▶ Diese Technik erfordert einen neuartigen, auf Prinzipien der Quantenmechanik basierenden Datenspeicher. Ein Demonstrationsmodell im Labormaßstab ist bereits funktionsfähig.

Von Seth Lloyd

Es ist heutzutage nicht einfach, seine persönlichen Eigenschaften und Vorlieben für sich zu behalten. Jedes Mal, wenn ich die Suchmaschine Google im Internet aufrufe, wird mein Begehren für die Nachwelt aufgezeichnet – oder zumindest für die Anzeigenkunden.

Den vielfach vorgetragenen Datenschutzbedenken entgegen die Suchmaschinenbetreiber, dass sie die persönlichen Daten ihrer Nutzer verschlüsseln und an Stelle ihrer Klarnamen nur die Kundennummern verwenden. Das hilft nicht immer, wie durch ein unfreiwilliges Experiment drastisch demonstriert wurde. Der Anbieter AOL hatte 2006 zu Forschungszwecken eine Liste mit 20 Millionen Suchanfragen von 657 000 Kunden ins Netz gestellt. Daraufhin brauchten die Reporter der »New York Times« nicht lange, um den Kunden Nummer 4417749 allein durch Analyse seiner Fragen als die 62-jährige, verwitwete Thelma Arnold aus Lilburn (Georgia) zu identifizieren. Nun konnte alle Welt nachlesen, welche Art Männerbekanntschaften sie suchte und dass ihr Hund überall hinpinkelte. Die

derart Ausgespähte nahm das einigermaßen gelassen; aber wer könnte Gleiches von sich behaupten?

Rettung kommt von den Gesetzen der Physik, genauer der Quantenmechanik. Schon heute verschlüsseln mit ihrer Hilfe Banken und andere Institutionen ihre Nachrichten auf praktisch unknackbare Weise. Es ist also bereits möglich, meine Frage an Google vor Lauschern auf dem Weg zu schützen. Aber mit dem »Quanten-Internet« der Zukunft könnte ich sogar eine Frage an Google stellen und eine Antwort erhalten, ohne dass irgendjemand die Frage kennt – auch Google nicht. Mit denselben technischen Mitteln wäre nicht nur die Suchanfrage, sondern mein gesamter Besuch im Internet so gestaltbar, dass niemand anders ihn nachvollziehen kann.

Da die Suchmaschinenbetreiber – über den Verkauf von Anzeigen, die dem Nutzer abhängig von seinem Suchverhalten präsentiert werden – ihr Geld mit der Analyse der Nutzerdaten verdienen, werden sie bei deren Wegfall andere Einnahmequellen erschließen müssen. Für den Nutzer würde sich dann die Alternative stellen, ob er wie bisher den Inhalt





seiner Suchanfragen preisgeben oder für die Suche bezahlen will.

Im Frühjahr 2004 hatte ich das Vergnügen, am Festbankett einer Tagung in Monterey (Kalifornien) teilzunehmen. Anscheinend war ich als Bestandteil des Unterhaltungsprogramms dazu ausersehen, den Gästen etwas über Quantentechnologie zu erzählen. Ich kam mir zwar leicht deplatziert vor unter lauter Milliardären; aber zwei von ihnen, die Google-Gründer Sergey Brin und Larry Page, erwiesen sich als interessierte und überraschend sachkundige Gesprächspartner. Wir spekulierten wild drauflos, wie sich die Quantenmechanik wohl auf den Umgang des Menschen mit dem Internet auswirken würde, und schließlich versprach ich ihnen, mit meinen Kollegen das Thema Quanten-Internet-Recherche zu erforschen. Was genau das heißen sollte, würde sich dabei erst herausstellen.

### Kopierschutz für Quantenzustände

Dass die Quantenmechanik perfekte Vertraulichkeit bereitstellen kann, beruht letztlich auf der quantenmechanischen Unbestimmtheit: Alles, was nicht größer ist als ein kleines Molekül, existiert nicht in einem definierten Zu-

stand, sondern in mehreren zugleich. Zu jedem Zeitpunkt ist ein Atom zugleich hier und dort, ein Photon zugleich horizontal und vertikal polarisiert, das magnetische Moment eines Elektrons zugleich auf- und abwärts gerichtet und so weiter. Während ein klassisches Datenbit entweder im Zustand 1 oder im Zustand 0 ist, kann sich sein quantenmechanisches Gegenstück (ein »Qubit«) in einer Überlagerung beider Zustände befinden (Spektrum der Wissenschaft 8/1998, S. 54, und 8/2002, S. 82).

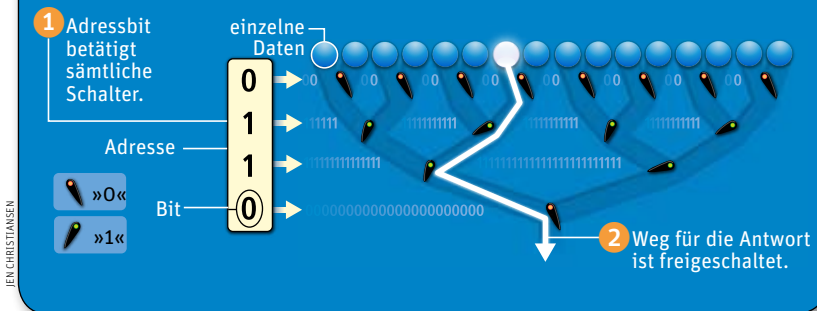
Einen solchen überlagerten Zustand kann man nicht exakt kopieren; wer es dennoch versucht, verändert damit bereits den Zustand, den er kopieren will. Dieser Kopierschutz, das so genannte *no-cloning theorem*, gilt nicht nur für einzelne Qubits, sondern zum Beispiel auch für eine ganze Nachricht, was nichts anderes ist als eine Folge von Qubits. Ein Lauscher an der Datenleitung – typischerweise einer Glasfaser, in der Photonen in überlagerten Zuständen wandern – könnte also nicht zuhören, ohne den Fluss der Nachrichten zu stören und sich damit selbst zu verraten.

Dank dem Kopierschutz kann man Nachrichten mit garantierter Vertraulichkeit ver-

**Eine Quanten-Datenbank könnte eine Anfrage korrekt beantworten, ohne sie in irgendeinem Sinn zur Kenntnis zu nehmen**

## STAND DER TECHNIK: DER HERKÖMMLICHE RAM

Die Daten sind in der Struktur eines (binären) Baums organisiert. Jede Astgabel enthält einen Schalter. Die Adresse (das heißt die Suchanfrage) besteht aus einer Folge von Bits; jedes Adressbit betätigt sämtliche Schalter des ihm zugeordneten Niveaus – viel zu viele, als dass Quanten-Schalter mit ihrer hohen Fehleranfälligkeit zuverlässig funktionieren könnten.



Mit der »Eimerkette« sind für einen Speicherzugriff nicht mehr eine Milliarde Schalter umzulegen, sondern nur noch 30

senden – aber natürlich so, dass der Empfänger sie lesen kann. Es bringt also noch nichts, wenn ich Google meine Suchanfragen nur verschlüsselt schicke. Der Kopierschutz macht aber auch die verschärfte Form der vertraulichen Suchanfrage möglich, also die, bei der Google mir eine Frage korrekt beantwortet, aber weder meine Identität noch den Inhalt der Frage erfährt. Gemeinsam mit meinen Kollegen Vittorio Giovannetti von der Scuola Normale Superiore in Pisa und Lorenzo Maccone von der Università degli studi di Pavia (Italien) habe ich ein Protokoll entwickelt, nach dem der Nutzer der Suchmaschine eine »Quanten-Anfrage« schickt: eine Folge von Quantenbits, die sowohl die echte Frage als auch eine andere enthält. (Auf den Inhalt der zweiten Frage kommt es nicht an; es genügt,

wenn der Computer des Absenders automatisch per Zufall eine auswählt.)

Die Suchmaschine zieht aus ihrer Datenbank Antworten auf beide Fragen, macht daraus eine neue Folge von Qubits und schickt sie mitsamt der Frage dem Nutzer zurück. Der könnte erkennen, wenn die Suchmaschine eine Kopie der Frage angefertigt hätte, weil dadurch der Quantenzustand der Frage in erkennbarer Weise verändert worden wäre. Entscheidend ist, dass die Suchmaschine Antworten liefern kann, ohne die Bitfolge, in der die Frage enthalten ist, in irgendeinem Sinn physikalisch zu messen, geschweige denn zu kopieren. Sie weiß also – für den Nutzer nachprüfbar – nicht, was die Frage war.

Solche Wunderwerke sind zwar mit herkömmlichen Computern, Datenbanken und Leitungsnetzen offensichtlich unmöglich, aber nicht prinzipiell außer Reichweite. Drei technische Innovationen würden den Weg zur QPQ (*quantum private query*, quantenphysikalisch vertrauliche Suchanfrage) ebnen.

### Leitungsnetz, Rechner, Server: alles in Quantenversion

Die erste ist ein rudimentäres Quanten-Internet, das heißt nicht nur eine Verbindung zum Austausch von Qubits zwischen zwei Punkten, sondern ein ganzes Netz mit Knoten, die Datenpakete von jedem angeschlossenen Computer zu jedem beliebigen anderen übermitteln können. Das ist nicht einfach; denn die Schaltstellen (»Router«) im Internet müssen bislang jede Nachricht vor dem Weiterversand zwischenspeichern, also eine Kopie von ihr anfertigen, was mit Qubit-Nachrichten wegen des Kopierschutzes nicht möglich ist. Ein Quanten-Router, der diese Beschränkung umgeht, ist zurzeit im Versuchsstadium. Bis zum Prototyp eines betriebsfähigen Quanten-Internets werden wohl noch fünf bis zehn Jahre vergehen.

Zweitens müssen die Beteiligten über rudimentäre Quantencomputer verfügen, das heißt Geräte, die Qubits verarbeiten und speichern können. Leider sind Qubits bekanntermaßen äußerst empfindliche Gebilde. Ihr überlagerter Zustand neigt dazu, binnen Sekundenbruchteilen zusammenzubrechen. Was die Experimentierkunst gegenwärtig mit Mühe erreicht, sind ungefähr acht Qubits auf einmal zu speichern, zum Beispiel in den magnetischen Zuständen einzelner Ionen im Vakuum. Auf einen richtigen Quantencomputer mit Hunderten oder eher Tausenden von Qubits werden wir noch viele Jahrzehnte warten müssen, selbst im Labormodell. Glücklicherweise kommt man für den Spezialzweck der vertraulichen Anfrage mit weniger aus. Mit ei-

### NEUE ANWENDUNGEN

Ein Quanten-Internet würde Formen der Zusammenarbeit erlauben, die mit gegenwärtiger Technik schlicht nicht möglich sind.

- **Quanten-Wahlverfahren:** Jeder Wähler gibt seine Stimme über das Quanten-Internet ab und erhält eine Bestätigung, der er entnehmen kann, dass sein Votum korrekt übermittelt und gezählt wurde. Weder der auszählende Computer noch ein Lauscher unterwegs kann jedoch das einzelne Votum in Erfahrung bringen. Auch der Wähler hat keine Möglichkeit, nachzuweisen, wie er abgestimmt hat, was jedem Bestechungsversuch die Grundlage entzieht.
- In einer **Quanten-Auktion** geben mehrere Interessenten für mehrere gleichartige Waren Gebote ab. Das Verfahren maximiert sodann die Anzahl der Bieter, deren Kaufwünsche befriedigt werden, ohne dass die Präferenzen irgendeines Bieters erschließbar wären.
- In der Zukunft werden auch **Programme für Quantencomputer** zum Download bereitstehen. Mit ihnen sind gewisse Probleme (prominentestes Beispiel: Faktorisierung großer Zahlen) um Größenordnungen schneller lösbar als mit konventionellen Programmen.
- In ferner Zukunft könnte **die Teleportation materieller Gegenstände** (Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 30) über das Quanten-Internet möglich sein.



ner Folge aus 30 Qubits kann man schon eine Frage formulieren, die aus einer Datenbank mit reichlich einer Milliarde Einträge den gewünschten herausholt. Ein solcher 30-Qubit-Quanten-Mikroprozessor scheint ebenfalls in den nächsten fünf bis zehn Jahren machbar.

Bis jetzt sind die technischen Anforderungen noch einigermaßen gemäßigt; aber die dritte Innovation hat es in sich. Auf zwei überlagerte Fragen des Nutzers muss die Suchmaschine zwei überlagerte Antworten geben. Dazu benötigt sie einen Speicher neuer Art, einen so genannten Quanten-RAM (*quantum random access memory*, Quantenspeicher mit wahlfreiem Zugriff).

Ein gewöhnlicher RAM, zum Beispiel der Arbeitsspeicher jedes Computers, ist vergleichbar einem Schrank mit lauter nummerierten Postfächern. Man gibt die Nummer des Fachs an (seine »Adresse«) und erhält daraufhin dessen Inhalt. Da die Adresse, wie alles, mit dem ein Computer umgeht, eine Binärzahl (eine Folge von Einsen und Nullen) ist, kann man sich den RAM auch wie einen großen Baum vorstellen. Man steigt an der Wurzel in ihn ein. Das erste Bit der Adresse bestimmt, ob man an der ersten Astgabel nach links oder nach rechts steigt, das zweite entscheidet über den Weg an der nächsthöheren Verzweigung und so weiter (Kästen links und rechts). Von einem Niveau zum nächsten verdoppelt sich die Anzahl der Astgabeln. Am Ende der kleinsten Ästchen sitzen die begehrten Daten (die »Blätter« des Baums). Realisiert ist jede Astgabel als elektrischer Schalter. Jedes Bit der Adresse legt sämtliche Schalter des zugehörigen Niveaus um, mit dem Effekt, dass genau ein Weg, nämlich der zum richtigen Blatt, freigeschaltet ist. Bei einem herkömmlichen RAM mit 30-Bit-Adressierung müssen für einen Speicherzugriff  $2^{30}$  (mehr als eine Milliarde) Schalter betätigt werden.

Im Prinzip könnte man diese Bauweise auch in einen Quanten-RAM umsetzen. An Stelle der Schalter wären Bauteile einzusetzen, welche die Information nicht entweder nach rechts oder nach links, sondern nach beiden Seiten zugleich fließen lassen. Ein solcher Quantenschalter wäre heute schon realisierbar, zum Beispiel als halb durchlässiger Spiegel (»Strahlteiler«). Ein Photon, das auf ihn auftrifft, folgt hinterher zwei verschiedenen Wegen zugleich. Da aber die Bauteile eines Quantencomputers sehr störungsanfällig sind und eine Störung in nur einem Schalter die Geheimhaltung des zugehörigen Bits ruiniert, ist die Vorstellung, ein Quanten-RAM mit dieser Bauweise könnte funktionieren, völlig illusorisch.

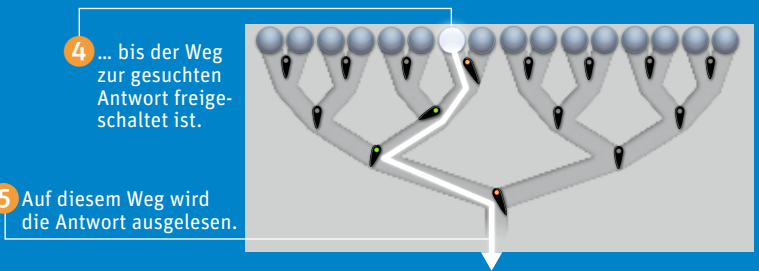
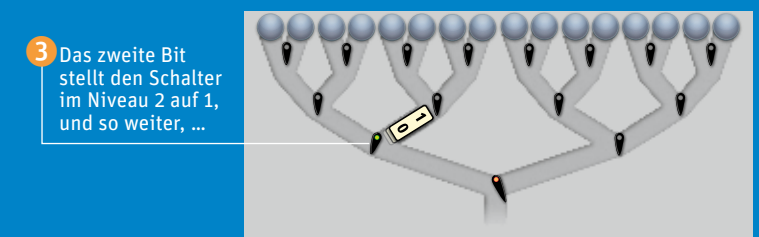
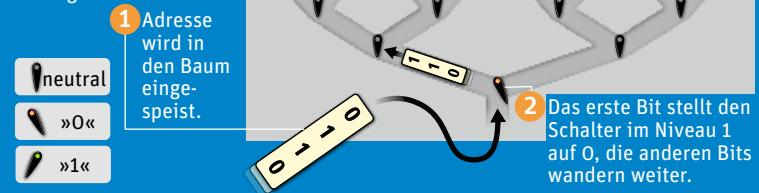
## EIN SPEICHER FÜR QUANTEN-SUCHMASCHINEN

**Absolute Vertraulichkeit** erfordert auf der Seite des Datenbankanbieters einen neuartigen Speicher namens Quanten-RAM. Der Nutzer sendet an diesen Speicher eine quantenmechanische Überlagerung mehrerer Fragen. Der Quanten-RAM addiert die Antworten zu diesem »Quantenpaket« hinzu und sendet die Summe an den Nutzer zurück. Der gleicht den Quantenzustand des empfangenen Pakets mit dem bei sich gespeicherten Referenzzustand ab und erkennt daran, ob die Frage kopiert, gespeichert oder auch nur gelesen wurde.

Allerdings erfordert ein Quanten-RAM eine neue Architektur, damit die Anzahl der zu betätigenden Schalter in akzeptablen Grenzen gehalten wird.

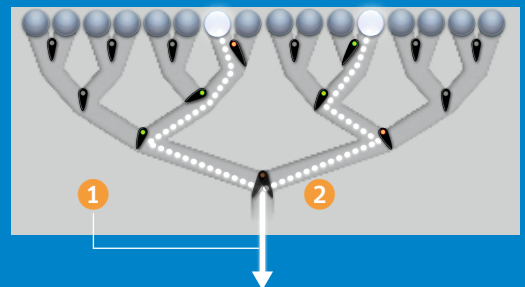
### DAS INNOVATIVE KONZEPT: DIE EIMERKETTE

In dieser Architektur werden nur die Schalter entlang dem Datenweg betätigt.



#### QUANTENVERSION

Ein Schalter kann auf 0 und 1 zugleich eingestellt sein. Damit werden zwei Wege eröffnet und entsprechend zwei Antworten ausgelesen, die zusammen mit den Fragen an den Nutzer zurückgesandt werden.





Die Daten eines Quanten-RAM könnten in konventionellem Material gespeichert sein, zum Beispiel in Milliarden winziger Spiegel, aus denen auch die Oberfläche einer CD besteht. »Echt quantenmechanisch« wären nur die Schalter. Quanten-Schalter, die ein Qubit auf beide Ausgänge zugleich leiten, existieren bereits und haben hinreichend niedrige Fehlerraten für einen Quanten-RAM mit einer Milliarde Adressen – oder mehr.

**Eine erste kleine Quanten-Datenbank**

Auch wenn damit die wesentlichen Zutaten für ein vertrauliches Quanten-Internet beisammen sind, wird es alles andere als einfach sein, sie zu einem funktionierenden System zusammensetzen. Aber die Schwierigkeiten scheinen nicht unüberwindlich. Zu allem Überfluss erkannten wir vor Kurzem, dass unser Verfahren, den Daten einen Weg durch den RAM zu bahnen, auch für Wege durch das große weite Internet taugt. Somit hätte der Nutzer die totale Anonymität im Netz: Es wäre den Blicken der Welt nicht nur verborgen, welche Fragen er stellt, sondern auch, welche Webseiten er aufsucht.

Einige Monate nachdem meine Kollegen und ich unsere Ideen im Detail ausgearbeitet hatten, begegnete ich Brin und Page abermals, diesmal auf einer Tagung in Napa (Kalifornien). Im Whirlpool unter Feigenbäumen, den gestirnten Himmel über mir und das Konzept von der vertraulichen Websuche in mir, versuchte ich meinen Gesprächspartnern dessen Vorteile schmackhaft zu machen.

Die entgegneten mir zunächst, das Geschäftsmodell von Google bestehe darin, die Information über alle Suchanfragen zu behalten und für die Schaltung von Anzeigen und zur Optimierung der Ergebnisreihenfolge zu nutzen. Die Vorstellung, diese Informationen einfach nicht zur Kenntnis zu nehmen, war ihnen nicht in den Sinn gekommen. Als ich ihnen die offenkundigen Vorteile des alternativen Geschäftsmodells vor Augen führte, bei dem der Kunde für die Suchergebnisse bezahlt, begannen sie nachzudenken. »Okay«, sagten sie schließlich, »schauen wir mal, ob ihr das bauen könnt.«

Genau das haben vor Kurzem Francesco De Martini und seine Gruppe an der Universität di Roma »La Sapienza« getan. Mit Lasern, Polarisationsfiltern und Photonendetektoren bauten sie einen einfachen Quanten-RAM und ließen unser Abfrageprotokoll auf einer kleinen Datenbank ablaufen. QPQ ist also im Prinzip machbar. Es ist eine spannende Frage, was geschehen wird, wenn große Quanten-RAMs und ein funktionierendes Quanten-Internet zur Verfügung stehen. <

Giovanetti, Maccone und ich erarbeiteten stattdessen ein Verfahren für den Speicherzugriff (für klassische wie für Quanten-RAMs), das mit weitaus weniger Schaltvorgängen auskommt (Kasten S. 83). Die Idee: Man schickt die Adressbits nicht über separate Leitungen, sondern auf denselben Weg, den hinterher auch die Daten wandern sollen. Das erste Adressbit kommt bis zur ersten Astgabel und betätigt den dort ansässigen Schalter, das nächste läuft auf dem so weit gebahnten Weg eine Astgabel höher, legt nur diesen einen Schalter um (und nicht auch alle anderen desselben Niveaus), und so weiter. Da die Adressbits eins nach dem anderen durchgereicht werden wie die Wassereimer bei der alten Dorffeuerwehr, nennen wir unsere Technik »Eimerkette« (*bucket brigade*).

Die Ersparnis an Schaltvorgängen ist dramatisch. Im genannten Beispiel sinkt der Aufwand von einer Milliarde auf bescheidene 30, und mit steigender Adresslänge wächst die Ersparnis nochmals exponentiell.

Einen Moment lang hielten wir unsere Eimerkette für die revolutionäre Innovation auch der klassischen RAM-Technik und träumten davon, damit reich zu werden. Es stellte sich allerdings bald heraus, dass andere Leute schon ähnliche Ideen gehabt hatten und obendrein unser Verfahren die Zugriffszeiten so verlängert, dass es für einen klassischen RAM uninteressant ist. Nur der geringere Energiebedarf könnte zum Beispiel für die Speicherkarte einer Digitalkamera ein Vorteil sein.

Für einen Quanten-RAM dagegen macht die Eimerkette den Unterschied zwischen hoffnungslos und realisierbar aus, denn sie toleriert eine Fehlerrate von 1 : 30. Das ist im Bereich des Möglichen, im Gegensatz zu der Rate 1 : 1 000 000 000 beim klassischen RAM.



**Seth Lloyd** ist Professor für Maschinenbau (»Quantenmechaniker«, wie er sich selbst gerne beschreibt) am Massachusetts Institute of Technology und Chef des dortigen W. M. Kreck Center for Extreme Quantum Information Theory. Er entwickelte erste theoretische Modelle für die Funktion eines Quantencomputers und arbeitet zusammen mit verschiedenen Gruppen an deren Realisierung.

**Giovanetti, V., Lloyd, S., Maccone, L.:** Quantum Random Access Memory. In: *Physical Review Letters* 100(16), S. 160501–160504, 25. April 2008.

**Giovanetti, V., Lloyd, S., Maccone, L.:** Quantum Private Queries. In: *Physical Review Letters* 100(23), S. 230502–230505, 13. Juni 2008.

**Stix, G.:** Datenschutz mit Quantenschlüsseln. In: *Spektrum der Wissenschaft* 5/2004, S. 68–73.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1026693](http://www.spektrum.de/artikel/1026693).



## 1960

### Hausfrauenliebling

»Die Hermann Zanker KG hat einen neuen Geschirrspülautomaten entwickelt. Als größten Fortschritt darf man die funktionsgesteuerte Voll-

### »Wasa« aus dem Wasser

»Das schwedische Kriegsschiff ›Wasa«, das im Jahre 1628 im Hafen (von Stockholm, *die Red.*) kenterte und sank, wurde von riesigen Pontons gehoben und – noch unter Wasser – knapp einen Kilometer weit, in seichtes Gewässer geschleppt. Bei dieser kniffligen und schweren Aufgabe, den Schiffsrumpf zu bewegen, der mit voller Ausrüstung und Ballast an Bord rund 700 t wog, mußten sechs Gräben unterhalb des Schiffs ausgehoben werden. Nach ihrer Bergung soll die ›Wasa« auf einem überdachten Trockendock zur öffentlichen Besichtigung ausgestellt werden.« *Populäre Mechanik, Bd. 10, Heft 5, Mai 1960, S. 19*

automatik ansehen. Diese lässt das gesamte Arbeitsprogramm ohne Zutun der Hausfrau ablaufen und zwar unabhängig davon, ob die Maschine an Kalt-, Warm- oder Heiß-Wasser angeschlossen ist. Die Spülmittel werden einmalig zugegeben, wobei ein flüssiges oder festes Spülmittel und Nachspülmittel in den Diffusions-Dosierer eingefüllt wird.« *Elektrotechnische Zeitschrift B, Bd. 12, Heft 10, 16. Mai 1960, S. 255*

### Sternbilder vom Himmel geholt

»Am 29. Januar wurde in New York das erste Exemplar eines neuen, von der Firma Carl Zeiss in Oberkochen (Württ.) gebauten Planetariumgerätes in Betrieb genommen. Besondere Projektions-einrichtungen beleben den Himmel durch Sternschnuppenschwärme und farbige Polarlichter. Ein Sonnensystemprojektor zeigt die heliozentrischen Bahnbewegungen der Planeten einschließlich der Erde. Eine in ständigem Ausbau befindliche Serie von zur Zeit fast 300 Diapositiven veranschaulicht unmittelbar an der Sphäre, wie die Völker aller Länder und Zeiten den Sternhimmel mit Gestalten der Sage und des täglichen Lebens erfüllt haben.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik, 60. Jg., Heft 9, 1. Mai 1960, S. 264 f.*



Der Koloss aus 29 000 Einzelteilen wurde innerhalb von vier Wochen vollständig montiert – eine Rekordleistung.



Nachts wurde das Wasser des deutschen Geysirs abgefangen und als Tafel- und Heilwasser verkauft.

### Ein Hauch von Yellowstone

»Etwa alle 4 Stunden sendet er (der heute Andernach genannte Kaltwassergeysir, *die Red.*) mit großer Regelmäßigkeit seinen mannsdicken Wasserstrahl hoch über die Gipfel der ihn rings umgebenden Bäume empor – ein Schauspiel, das an schönen Tagen regelmäßig Scharen von Besuchern herbeizieht. Im Gegensatz zu allen anderen bekannten Geisern tritt der Namedyer-Geiser nicht als heiße Quelle zutage, deren Hitze beispielsweise beim großen Islandgeiser bis zu 120° erreicht, sondern als kalte Quelle (18°). Es sei noch bemerkt, daß man gegenwärtig den Sprudel auf Namedy tagsüber steigen und das emporgeschleuderte Mineralwasser weglauen lässt; nachts jedoch wird dieses abgefangen.« *Kosmos, 7. Jg., Heft 5, Mai 1910, S. 183*

### Schießwütige Urlauber

»Wohl einem jeden, der unsre Bäder besucht, fällt es auf, wie wenig Vögel am Strande entlang fliegen oder von den Wellen sich schaukeln lassen. Das ›Schießvergnügen‹ der Badegäste ist es, das einen großen Teil der Schuld an der Verödung unserer Nordseeküste trägt. Aber erfreulich ist es doch, daß man diesem nun nicht mehr mit gleichgültigem

### Genaueste Waage der Welt

»Sir William Ramsay, der berühmte Chemiker, hat eine neue Waage konstruiert, die alle anderen Waagen, wie die Chemiker sie benutzen, an Empfindlichkeit weit übertrifft, denn mit ihrer Hilfe kann man Bruchteile von Grammen abwägen, die hinter dem Komma acht Nullen und erst in der neunten Dezimalen eine Ziffer haben.

## 1910

Auge zusieht. Das Schießen und der Eierraub ist zwar noch nicht verboten, aber die Vögel haben doch bereits Freistätten erhalten, wo sie ungestört brüten und ihre Jungen großziehen können.« *Die Umschau, 14. Jg., Nr. 20, 14. Mai 1910, S. 397*

Ramsay führte seinem Besucher die Abwägung einer geringen Menge Xenon vor, dem von ihm entdeckten Edelgase. Der Ausschlag war mit bloßem Auge nicht erkenntlich, aber ein Lichtstrahl und ein Spiegel zeigten ihn in vergrößertem Maßstabe auf einer Skala an der Wand.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik, 31. Jg., Nr. 9, 1. Mai 1910, S. 129*

## SPORTRASEN

# Plastik statt Gras

Profisport verlangt einen Profirasen. Und der ist mitunter nicht aus Gras.

Von Sandra Czaja

Ob im Fußballstadion, auf einem Hockeyspielfeld oder einem Golfplatz – der Rasen muss bei jedem Wetter und zu jeder Jahreszeit leisten, was von ihm erwartet wird. Wird er nass bespielt, reißt die Grasnarbe aber leichter auf. Deshalb leiten durchlässige Schichten Wasser in ein Kiesbett ab. Eine Heizung lässt das Grün zudem selbst im Winter wachsen. Für Halt sorgt 15 bis 25 Zentimeter starkes sandiges Erdreich (Tragschicht), das zudem heftige Stöße der Spieler dämpft und so die Gelenke schont.

Um einen Sportrasen vital zu halten, muss er nicht nur gemäht, gedüngt und bewässert, sondern auch vertikutiert, belüftet und besandet werden. Beim Vertikutieren zerschneiden rotierende Messer die Grasnarbe in Abständen von zwei bis drei Millimetern, durchtrennen damit auch den Rasenfilz – ineinander verwobene, nicht verrottete Pflanzenfasern – und entfernen das Moos. Das Belüften durch Löcher oder Schlitze sowie das Ausstreuen von Sand erhält die Durchlässigkeit für Gase und Wasser.

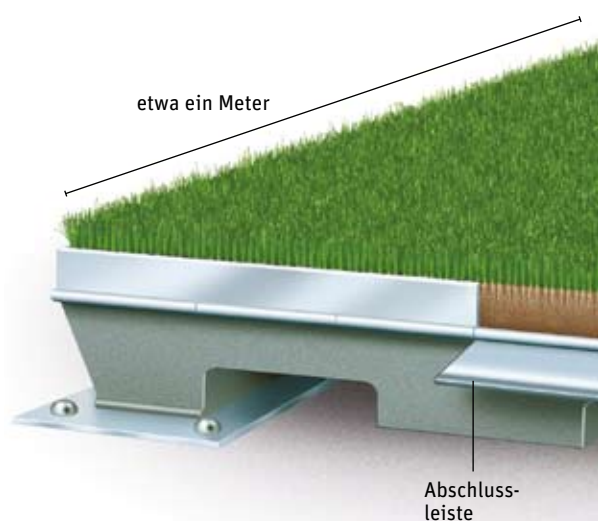
All das ist natürlich aufwändig. Deshalb entscheiden sich manche Vereine inzwischen für Grasimitate aus Polyamid, Polypropylen oder Polyethylen, die in ein Gewebe eingeschossen und auf der Rückseite mit Latex versiegelt werden. Je nach Sportart unterscheiden sich die Kunstrasen in Faserdichte, -länge und -struktur. So kommen bei Fußballplätzen fast ausschließlich gekräuselte Fasern zum Einsatz, da sie den Ball langsamer abbremsen, während sich für Hockeyfelder glatte Strukturen besser eignen, auf denen der Ball natürlicher rollt.

**Die Pflege beschränkt sich dann vor allem** auf das Abkehren oder Abblasen von Laub. Für ein Fußballfeld schlägt die Installation mit 290 000 bis 380 000 Euro zu Buche, etwa doppelt so viel, wie ein Naturrasenplatz kostet. Hinzu kommt nicht nur, dass manche Spieler klagen, ein solcher Platz fühle sich einfach falsch an. Sie fürchten auch ein erhöhtes Verletzungsrisiko. Nach Studien der UEFA sowie der schwedischen Sportkonföderation sei das aber für Kunstrasen der so genannten 3. und 4. Generation nicht mehr nachweisbar. Bei diesen liegt unter der Rasenfläche eine elastische Schicht aus vernetztem Polyethylen- oder Polyurethanschaum, die der Tragschicht von Naturplätzen vergleichbar sei. Zwar würden Gelenkverstauchungen häufiger beobachtet, Muskelverletzungen aber seltener. Kritiker weisen allerdings darauf hin, dass das Risiko verschleißbedingter Erkrankungen noch durch Langzeitstudien untersucht werden müsse.

Ein anderes Problem sind Verbrennungen: Kunststoff isoliert, Reibungswärme wird nur langsam abgeleitet und kann die Haut deshalb übermäßig erhitzen. In der 2. Generation der Kunstrasen füllten die Hersteller Sand zwischen die Fasern, der rutschende Sportler bremst. Doch die Quarzkörnchen schmirgeln die Fasern ab. Deshalb erfüllen auf den Plätzen der 3. Generation Gummigranulate diese Funktion. Die künstlichen Grashalme sollten 15 bis 20 Millimeter darüber hinausragen, insgesamt sind sie gut einen halben Zentimeter lang. Ein weiterer Vorteil der Verfüllung: Sie hält die Fasern aufrecht und stabilisiert dadurch den Rasen.

Weil solche Granulate aber den Ball langsam machen, verzichtet man beim Hockey darauf und bewässert den Platz stattdessen kurz vor der Partie. Inzwischen finden fast alle Hockeyprofispiele auf Kunstrasen statt, da der Ball darauf auch gleichmäßiger rollt. Selbst das sanfte Grün des Golfplatzes ist nicht überall naturfarben: Kunstrasen mit Quarzsandverfüllung kommen bei »Fairways« zum Einsatz – kurzhalme Bereiche zwischen Abschlag und Grün –, da sie die Aufprallenergie des Balls am besten verteilen. Rund um das Zielloch besteht das »Putting Green« oft aus festen Nylonfasern, die auch ohne Sand oder Gummigranulat aufrecht bleiben.

Gerade in Mehrzweckstadion lässt man Naturgras auf einzelnen, auswechselbaren Einsätzen wachsen. So ist es möglich, den Platz schnell umzubauen oder defekte Stellen zu ersetzen.



**Kunststoffrasen, zusammengesetzt aus einzelnen Bahnen oder Fliesen, liegt auf einer Basis aus Split. Gummigranulat oder ein Gemisch mit Sand zwischen den Halmen hält diese aufrecht, sorgt für Griffigkeit und verhindert hohe Reibungstemperaturen.**

SANDRA CZAJA studiert Wissenschaftsjournalismus an der Technischen Universität Dortmund.



## WUSSTEN SIE SCHON?

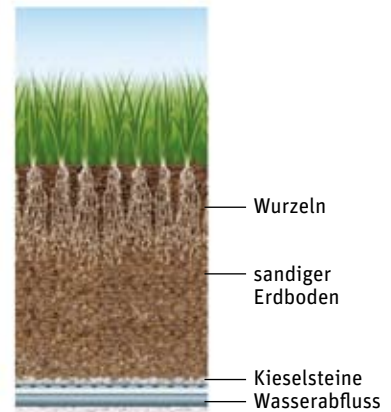
► **Als 1966 der Astrodome in Houston** als erste Profisportstätte seinen Naturrasen gegen einen aus Plastik austauschte, wurde damit der Markenname AstroTurf im Englischen zum Deonym für alle Kunstrasen.

► **8000 Quadratmeter Rasen** braucht man für ein ordentliches Fußballfeld. Für die WM 2006 in Deutschland bekamen alle Spielstätten einen neues Naturgrün. Die Experten setzten dabei auf eine Rasenmischung aus 25 Prozent Weidelgras und 75 Prozent Wiesenrispe.

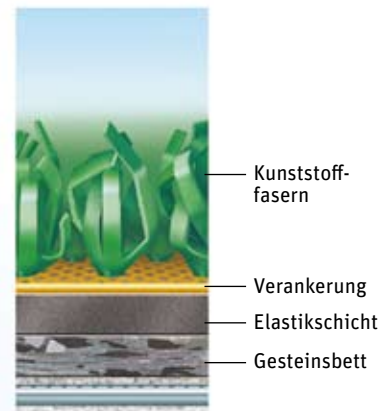
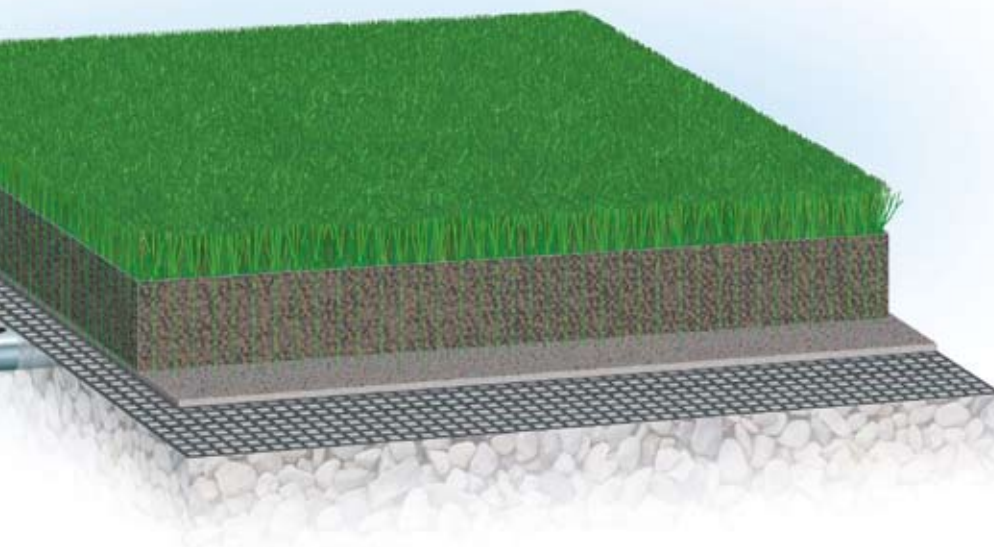
► **Mit der DIN-Norm V 18035-7: 2002-06** hat das Deutsche Institut für Normung festgelegt, wie Kunststoffrasenflächen für Sportanlagen geplant, angelegt und gepflegt werden müssen. Dabei werden Belagtypen dreier Generationen unterschieden.

► **Sollen auf Kunstrasen** nationale und internationale Fußballspiele ausgetragen werden, braucht der Platz die Recommended-2-Star-Zertifizierung der Fifa. In Einzelprüfungen werden dabei unter anderem das Ballrollverhalten, die Griffigkeit wie auch der Temperaturanstieg der Haut beim Darüberreiben getestet.

ILLUSTRATIONEN: KENT SMOODGRASS, PRECISION GRAPHICS



Bei Naturrasen steuert das Erdreich auch die nötige Elastizität bei. Sandiger Boden lässt Wasser besser durch.



Kunstrasen ohne Granulat in den Zwischenräumen ist besonders auf die stoßdämpfende Elastischicht unter den Kunststofffasern angewiesen. Diese besteht aus Gummi, Kunststoffschaum und Mineralien.



# Wann kommt der FUSIONSREAKTOR?

Seit Langem träumen Forscher davon, die Kernfusion – die Energiequelle der Sterne – in irdischen Kraftwerken zu zähmen. Im Prinzip könnte das bald gelingen, doch der Teufel steckt im Detail.

In der National Ignition Facility in Livermore (Kalifornien) zielen 192 gewaltige Strahlenkanonen auf das wasserstoffhaltige Target in der Mitte. Die durch den konzentrierten Laserblitz ausgelöste Fusionsreaktion soll schon bald mehr Energie erzeugen, als die Laser verbrauchen – die erste Voraussetzung für einen Kernfusionsreaktor.







Von Michael Moyer

## In Kürze

- ▶ Die **Fusion von Wasserstoffisotopen** soll demnächst mehr Energie liefern, als zur Verschmelzung der Teilchen erforderlich ist – ein Meilenstein im jahrzehntelangen Streben nach Fusionsenergie.
- ▶ Wenn dieser Energieüberschuss nutzbar gemacht werden könnte, wäre ein **neuartiger Kraftwerkstyp** möglich.
- ▶ Doch immer noch sind **erste technische Probleme** zu lösen. Sie dürften den Bau solcher Fusionskraftwerke auf Jahrzehnte hinaus verhindern.

Die Zündung steht nun kurz bevor. Vielleicht schon in einem Jahr wird das weltweit größte und leistungsstärkste Lasersystem an der National Ignition Facility in Livermore (Kalifornien) – ein 13 Jahre altes und vier Milliarden Dollar teures Unternehmen – seine gesamte Energie auf ein Materiekörnchen konzentrieren. Die geballte Strahlung wird das Target mit solcher Macht zermalmen, dass die Wasserstoffisotope im Inneren durch Kernfusion die Energie einer winzigen H-Bombe freisetzen.

Der Trick gelang zwar schon früher, aber bislang musste viel mehr Energie in die Laser gepumpt werden, als die Reaktion hergab. Dieses Mal wird die Bilanz positiv sein: Die Explosion des Pellets wird mehr Energie abgeben, als die Laser hineinstrahlen. Theoretisch kann man diesen Überschuss sammeln und damit ein Kraftwerk betreiben. Den Brennstoff liefern Substanzen in gewöhnlichem Meerwasser; der Betrieb ist emissionsfrei. Die Menschheit kann im Prinzip für immer ihren unersättlichen Energiehunger stillen, indem

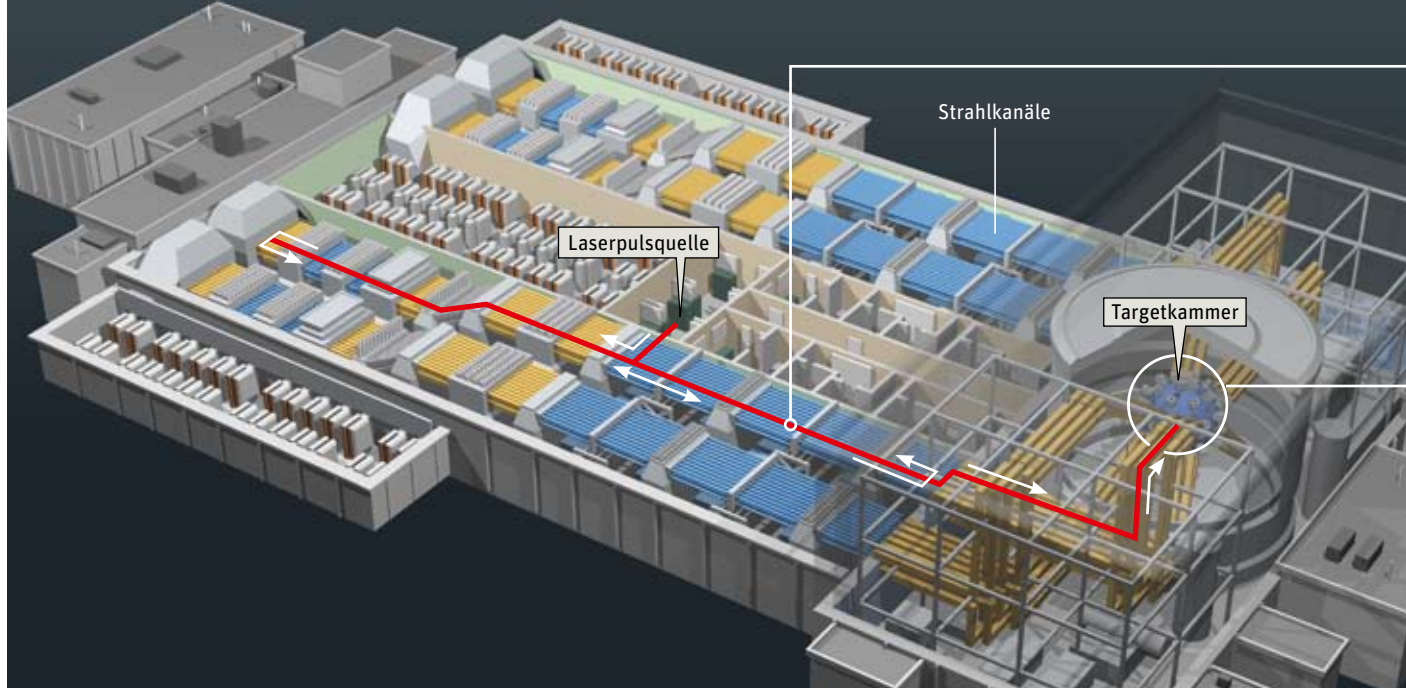
sie gleichsam einen Stern einfängt, um irdische Maschinen anzutreiben.

Eine weitere große Fusionsanlage namens ITER entsteht in Südfrankreich, nahe dem Dorf Cadarache. Das gut zehn Milliarden Euro teure Projekt verwendet nicht Laser, sondern supraleitende Magnete, um Wasserstoffisotope einzusperren und auf 150 Millionen Grad Celsius zu erhitzen – rund zehnmal mehr, als im Zentrum der Sonne herrschen. Auch ITER soll bald einen Nettoenergiegewinn liefern. Während ein Lasersystem nur separate Energiestöße erzeugt, können die Magnete fast kontinuierlich arbeiten und das Plasma zehn oder gar 100 Sekunden zusammenhalten.

Doch mit der erfolgreichen Zündung ist es längst nicht getan. Bau und Betrieb eines echten Fusionskraftwerks werfen so große Probleme auf, dass manche Kritiker die Idee von vornherein verwerfen. Das Baumaterial eines funktionierenden Reaktors müsste jahrelang Millionen Grad Hitze aushalten. Da es unentwegt mit hochenergetischen Kernteilchen bombardiert wird, droht es spröde und radioaktiv zu werden. In einem komplizierten Brutvorgang müsste die Anlage ihren eigenen

## FUSION MIT LASERN

Die **National Ignition Facility (NIF)** ist »nichts als ein enormer Laserverstärker«, sagt Betriebsleiter Bruno M. Van Wonterghem. Den größten Teil der Anlage machen 192 separate Strahlkanäle aus, die einen schwachen Laserpuls aufnehmen und viele Male verstärken. Dann werden die Strahlen in der Targetkammer auf einen Hohlraum gebündelt. Dieser Goldzylinder enthält das Deuterium-Tritium-Target.



Nuklearbrennstoff herstellen – und all das zuverlässig über Jahrzehnte hinweg, möglichst ohne Stilllegungen oder Unglücksfälle.

»Man hat gedacht, okay, das sind schwierige Probleme, aber lösbar, also konzentrieren wir uns auf die Fusion selbst«, meint Richard D. Hazeltine, Direktor des Institute for Fusion Studies an der University of Texas in Austin. »Das war vielleicht ein Fehler.«

### Warum die Sonne scheint

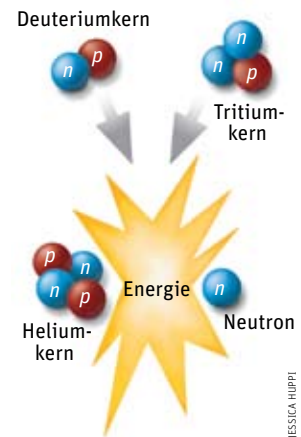
Indirekt beschäftigte das Rätsel der Kernfusion einige Naturforscher schon Mitte des 19. Jahrhunderts. Darwins neue Theorie der Evolution durch natürliche Selektion erforderte Milliarden Jahre, wenn sie die unglaubliche Vielfalt der Lebensformen durch kleine Veränderungen erklären sollte. Doch damals schätzte der große britische Physiker William Thompson – besser bekannt als Lord Kelvin – das Sonnenalter auf höchstens einige zehn Millionen Jahre, und Charles Darwin sah darin einen besonders schweren Schlag gegen die Evolutionstheorie. Er konnte die Wissenschaftler nur lahm ersuchen, ihr Urteil angesichts unserer lückenhaften Kenntnis der kosmischen Gesetze auf später zu vertagen.

Darwin hatte Recht. Es dauerte noch 70 Jahre, bis Forscher auch nur ahnen konnten, warum die Sonne scheint. Um 1930 wusste man, dass die Materie aus Atomen besteht und dass Atome einen Kern aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen besitzen; das einfachste Element, Wasserstoff, hat nur ein Proton als Kern. Seit Albert Einsteins berühmter Gleichung  $E=mc^2$  war bekannt, dass Masse sich in Energie verwandeln kann. Und spektrografischen Analysen zufolge besteht die Sonne nicht – wie Thompson angenommen hatte – aus geschmolzenem Gestein, sondern größtenteils aus Wasserstoff mit ein bisschen Helium.

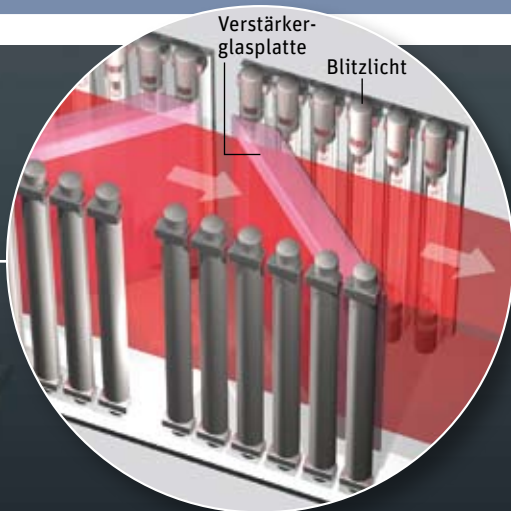
Wie der Physiker Hans Bethe 1938 erkannte, ist der Druck im Zentrum der Sonne so groß, dass einzelne Wasserstoffkerne trotz der zwischen gleichnamig geladenen Ionen wirkenden Abstoßung eng aneinandergedrückt werden. Bethe formulierte die vierstufige Fusionsreaktion für Wasserstoffionen. Die Endprodukte sind ein wenig leichter als die Anfangskerne, und dieser Massendefekt liefert gemäß  $E=mc^2$  die Energie der Sonne.

Die erforderlichen Drücke gibt es nur im Zentrum von Sternen. Ein vergleichsweise ein-

### DIE D-T-REAKTION

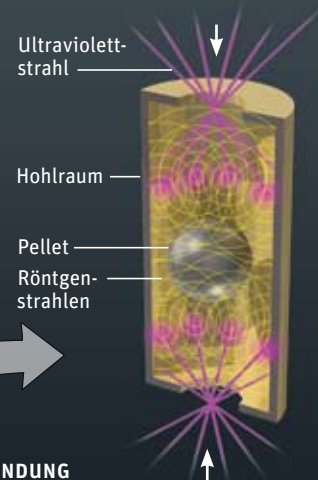


Wenn die Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium eng aneinandergedrückt werden, überwinden sie ihre elektromagnetische Abstoßung und fusionieren. Die Reaktion erzeugt Helium, ein Neutron und überschüssige Energie.



#### 1 LASERVERSTÄRKER

Nachdem ein schwacher Laserpuls aufgespaltert und durch Vorverstärker geschickt wurde, passiert er eine Reihe von Verstärker-glasplatten. Xenonblitzlampen regen das Neodym im Glas an; beim Durchgang der Laserstrahlung fügt ihr das Glas diese Energie hinzu. Der Prozess wird in 52 Durchgängen wiederholt; bei jedem Durchgang wird der Laserstrahl um 25 Prozent verstärkt.

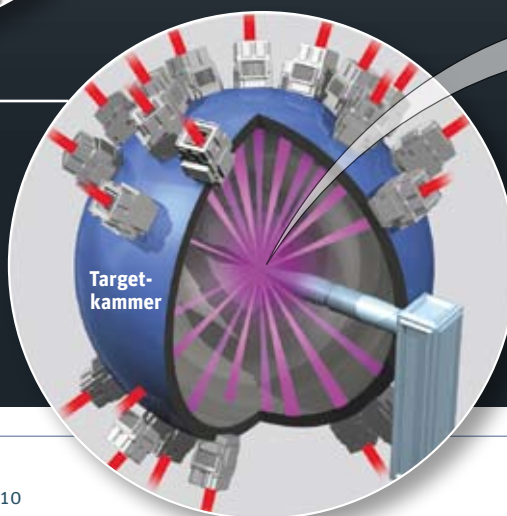


#### 3 ZÜNDUNG

Im Zentrum der Targetkammer konvergieren die Strahlen auf den Goldhohlraum, der daraufhin hochenergetische Röntgenstrahlen emittiert. Diese brennen die Außenschicht des Pellets ab, komprimieren es auf die 100-fache Dichte von Blei und erhitzen es auf 100 Millionen Grad. Der plötzliche Anstieg von Druck und Temperatur löst die Fusion aus.

#### 2 TARGETKAMMER

Wenn die Laserstrahlen in die zehn Meter große Targetkammer eindringen, halbieren Kristalle die Wellenlänge von Rot – das die Optik im Strahlengang weniger gefährdet – zu Ultraviolett, das die Fusion wirksamer auslöst.





## KURZE GESCHICHTE DER FUSION

**1950:** Der sowjetische Physiker Andrei Sacharow entwirft den Tokamak, eine magnetische Flasche, die ein Plasma einzuschließen vermag. Wegen seiner Arbeit an Nuklearwaffen kann Sacharow das Projekt nicht fortsetzen.

**1951:** Lyman Spitzer von der Princeton University ersinnt den Stellarator, einen anderen Fusionsreaktor auf Magnetbasis.

**1952:** Die USA zünden die erste Wasserstoffbombe.

**1969:** Westliche Wissenschaftler besuchen Moskau, um Sacharows Tokamak-Konzept zu studieren. Wie sie feststellen, erzeugt der Tokamak ein viel heißeres, dichteres Plasma als ihr Stellarator. Er beginnt die Magnetfusionsforschung zu dominieren.

**1977:** Forscher des Lawrence Livermore National Laboratory versuchen mit dem Shiva-Laser Fusion mittels Laserblitzen auszulösen.

**1984:** Der Joint European Torus geht im britischen Culham in Betrieb. Der Tokamak ist heute noch die weltweit größte Plasma-Fusionsanlage.

**2010:** Die National Ignition Facility soll Ende des Jahres mit der Deuterium-Tritium-Fusion experimentieren.

**2018:** Der Bau von ITER soll abgeschlossen sein. Erste Deuterium-Tritium-Fusionstests sind für 2026 geplant.

facher Weg zur Fusion beginnt mit den Wasserstoffisotopen Deuterium (ein Proton plus ein Neutron) und Tritium (ein Proton, zwei Neutronen). Sie fusionieren schon bei relativ geringer Temperatur und geringem Druck zu Helium (zwei Protonen, zwei Neutronen) plus einem Neutron und viel freier werdender Energie.

Fusionsbrennstoffe gibt es im Überfluss: Meerwasser enthält Deuterium, und Tritium kann in einem Reaktor erzeugt werden. Anders als übliche Kernspaltungsreaktoren hinterlässt die Fusion keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Theoretisch könnten ein paar Liter Wasser so viel Energie liefern wie ein Supertanker voll Erdöl, und dabei würde bloß ein wenig Helium ausgestoßen. »Sie gewinnen saubere Energie, unbegrenzten Brennstoff und geopolitische Entspannung«, sagt Edward I. Moses, Direktor der National Ignition Facility. »Es ist zu schön, um wahr zu sein.«

In der Tat. Die ersten Entwürfe für Fusionsreaktoren entstanden Anfang der 1950er Jahre. Damals schätzte Lyman Spitzer an der Princeton University, sein »Stellarator« würde 150 Megawatt leisten, genug für 150 000 Wohnungen. Spitzers Design beruhte auf der Tatsache, dass bei den für Fusionsprozesse nötigen hohen Temperaturen die Atome alle Elektronen verlieren und ein heißes Gas aus geladenen Teilchen bilden. Dieses Plasma kann mit Magnetfeldern gebändigt werden. Der Stellarator ist im Grunde eine magnetische Flasche, die ein Millionen Grad heißes Plasma festzuhalten vermag.

Doch Spitzer und seine Nachfolger mussten zu ihrem Leidwesen erfahren, dass sie viel zu wenig über das ungebärdige Verhalten von Plasmen wussten. Stellen wir uns einen großen weichen Ballon vor, den wir möglichst klein zusammendrücken möchten: Ein Stück Ballonhaut wird uns immer durch die Fingerschlüpfen und Ausstülpungen bilden. Genauso ging es den Forschern mit dem Plasma. Wenn sie versuchten, es möglichst fest zusammenzudrücken, fand es immer einen Weg, seitlich zu entweichen. Dieses Paradox plagt alle Typen von Fusionsreaktoren: Je mehr man das Plasma erhitzt und je enger man es zusammenquetscht, desto mehr sträubt es sich gegen den Einschluss.

In den sechs Jahrzehnten seither wurde versucht, Plasmen mit immer größeren Magnetflaschen zu zähmen. Jede verbesserte Maschine, welche die Probleme der Vorgängerin korrigieren sollte, stieß bei den höheren Energien auf neue Hindernisse. »Man kann machen, was man will«, meint Charles Baker, Exdirektor der Fusionsprogramme am Argonne und am Oak Ridge National Laboratory und derzeit Vorsitzender des amerikanischen ITER-

Beratungsgremiums, »Plasmen sind immer ein wenig instabil.«

Während der Energiekrise der 1970er Jahre entstand ein zweites Fusionsprogramm, das die Probleme des Magneteinschlusses zu vermeiden suchte. Eine Schar von Lasern sollte ein Pellet aus Deuterium und Tritium komprimieren und erhitzen. Die Forschung am Lawrence Livermore National Laboratory – bereits Heimstätte des militärischen Fusionswaffenprogramms der USA – begann mit zwei Laserstrahlen. Fortschritte in der Laserleistung führten 1977 zu Shiva, benannt nach dem erschaffenden und zerstörenden Hindu-Gott, und 1984 zu Nova. Mit jedem Programm überbot Livermore den eigenen Weltrekord für den stärksten Laserblitz, aber wie bei den Magnetprogrammen erreichte es nicht den Break-even-Point – den Punkt, an dem die Fusion so viel Energie hergibt, wie die Laser hineinstecken. Dafür brauchte Livermore einen noch 70-mal stärkeren Laser. Darum wurde 1997 mit dem Bau der National Ignition Facility (NIF) begonnen.

## Nebenprodukt der Waffentechnik

Von außen wirkt die Anlage unscheinbar. Sie ist fensterlos, so groß wie ein Flugzeughangar und in gedämpftem Beige gestrichen. Doch wie beim Large Hadron Collider bei Genf und anderen Großforschungsprojekten verbirgt sich das meiste tief unter der Erde. Im Inneren erstrecken sich Dutzende von meterdicken Rohren durch die Anlage. Sie führen zur Targetkammer, einer drei Stockwerke hohen Kugel, die mit Bullaugen für die Laser durchlöchert ist. Genau im Mittelpunkt der Kammer wird das Deuterium-Tritium-Target durch eine Art riesige Bleistiftspitze festgehalten. Die Laser werden hochpräzise auf den Mittelpunkt fokussiert und zertrümmern das Target mit einem Laserpuls, der für einen winzigen Sekundenbruchteil mehr Strom verbraucht als die gesamten USA.

Zwar wurde die NIF für den Break-even-Point konstruiert, doch ihr Hauptzweck ist militärisch. 1996 unterschrieb Präsident Bill Clinton den Vertrag über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen und untersagte alle US-Kernwaffentests. Um die Funktionsfähigkeit des Atomwaffenarsenals zu gewährleisten, richteten die Nuklearwaffenlaboratorien in Los Alamos und Livermore das Stockpile Stewardship Program ein; es soll durch Wartung und Tests die Zuverlässigkeit des US-Arsenals von derzeit rund 5200 atomaren Sprengköpfen garantieren.

In der Regel geht es dabei um Routineinspektionen und Ersatzteile. Zudem werden Kernexplosionen am Computer modelliert. Die Modelle sind extrem empfindlich für die

Anfangsbedingungen; das NIF soll solche Daten anhand winziger Deuterium-Tritium-Explosionen liefern. Daneben dient die Anlage auch der reinen Grundlagenforschung – etwa der Modellierung von Supernova-Stoßwellen.

Doch als der Bau im Mai 2009 endlich fertig wurde, machte der Aspekt der Energieerzeugung die meisten Schlagzeilen. In der »New York Times« schrieb Kolumnist Thomas Friedman: »Jedes zertrümmerte Pellet gibt einen Energieschub ab, der dann zum Erhitzen von flüssigem Salz und zur Erzeugung gewaltiger Dampfmen gen genutzt werden kann, um eine Turbine anzutreiben und Strom für Ihr Heim zu produzieren – wie das heute Kohle tut.«

Theoretisch, ja. Aber die NIF war nie als Maschine zur Erzeugung nutzbarer Energie gedacht. Laut Plan wird sie gegen Ende 2010 mit Fusionsexperimenten beginnen und, wenn alles gut geht, vielleicht 2011 den Break-even-Point erreichen. Wohl gemerkt, das ist, wie Moses betont, noch längst kein Kraftwerk-Break-even. Es bedeutet nur, dass aus dem Pellet mehr Energie herauskommt, als das Lasersystem hineinsteckt; der Energieaufwand für Bau und Betrieb des 4,2 Megajoule starken Lasersystems sowie die Verluste auf dem Weg zum Target tauchen in dieser Bilanz nicht auf. Dennoch soll NIF den Meilenstein mehr als 15 Jahre vor ITER erreichen.

### Die Tücke des Objekts

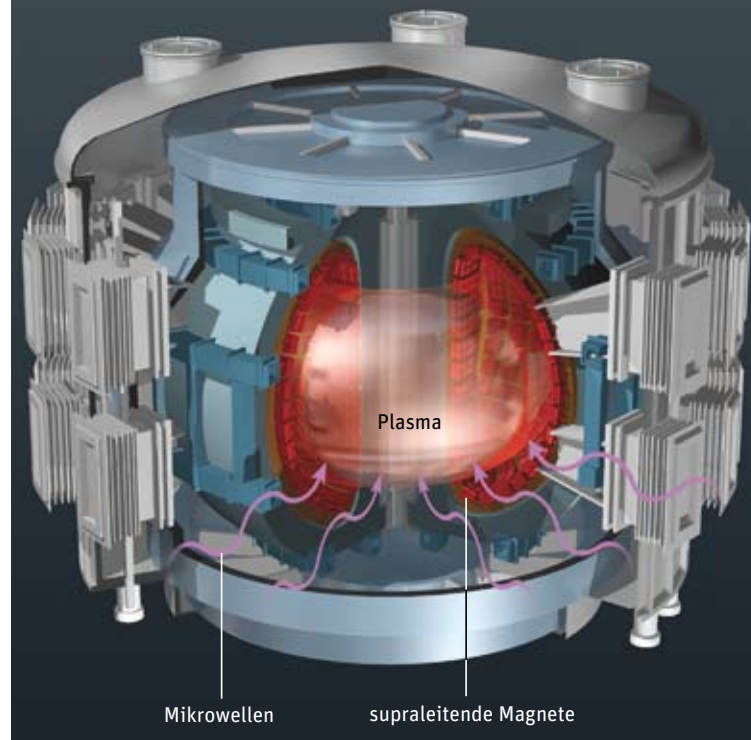
Ob man die Fusion nun mittels Megajoule-Lasern oder Magneteinschluss herbeiführt – der Energiegewinn wird in schnellen Neutronen ausbezahlt. Als neutrale Teilchen werden sie von elektrischen oder magnetischen Feldern nicht beeinflusst und durchdringen die meisten festen Materialien. Ein Neutron stoppt nur, wenn es direkt einen Atomkern trifft. Solche Kollisionen sind oft zerstörerisch. Die aus einer Deuterium-Tritium-Fusion stammenden Neutronen sind so energiereich, dass sie selbst in einem harten Metall wie Stahl einzelne Gitteratome herausschlagen. Mit der Zeit werden durch solche Treffer die tragenden Komponenten eines Reaktors brüchig.

Zudem machen die Neutronen inaktives Material radioaktiv. Wenn ein Neutron einen Atomkern trifft, kann der Kern es absorbieren und instabil werden. Durch einen stetigen Neutronenstrom – selbst wenn er von der »sauberen« Fusionsreaktion stammt – wird jeder normale Behälter gefährlich radioaktiv, betont Baker. »Wenn Ihnen jemand irgendein Nuklearsystem verkaufen will und behauptet, es gebe keine Radioaktivität, behalten Sie Ihr Geld in der Tasche.«

Ein Fusionskraftwerk muss die Neutronenenergie in Wärme umwandeln, die eine Turbi-

## FUSION MIT MAGNETEN

Das ITER-Projekt in Südfrankreich wird versuchen, die Fusion durch ein heißes Plasma aus Deuterium und Tritium auszulösen. Das Plasma wird durch mächtige supraleitende Magnete festgehalten, und Mikrowellen heizen es auf 150 Millionen Grad auf. Da der Prozess – im Unterschied zur Laserfusion bei NIF – kontinuierlich abläuft, könnte die Fusion mehrere zehn oder gar 100 Sekunden lang andauern.



ne antreibt. In künftigen Reaktoren soll die Umwandlung in einer Hülle um den Fusionskern stattfinden, dem so genannten Blanket (englisch für Decke). Obwohl die Chance gering ist, dass ein bestimmtes Neutron einen bestimmten Atomkern im Blanket trifft, fängt eine genügend dicke Hülle aus dem richtigen Material – zum Beispiel meterdicker Stahl – fast alle Neutronen ab. Die Kollisionen heizen das Blanket auf, und geschmolzenes Salz als Kühlflüssigkeit entzieht dem Reaktor diese Wärme. Das heiße Salz bringt dann Wasser zum Kochen, und der Dampf treibt wie üblich eine Turbine zur Stromerzeugung an.

Nur ist es nicht so einfach. Das Blanket hat eine weitere wichtige Aufgabe: Es soll auch noch Brennstoff herstellen, der in den Reaktor zurückgelangt.

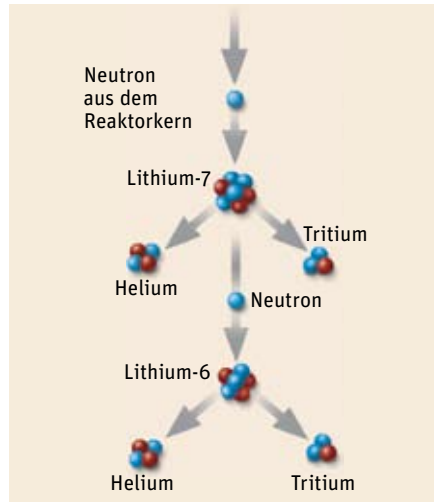
Deuterium ist zwar billig und reichlich vorhanden, aber dafür kommt das radioaktive Tritium extrem selten vor und muss eigens aus Kernreaktionen gewonnen werden. Ein gewöhnlicher Nuklearreaktor kann davon zwei bis drei Kilogramm pro Jahr liefern, zu einem

Der Aspekt der Energieerzeugung machte nach der Fertigstellung die meisten Schlagzeilen



### DER TRITIUM-TRICK

Fusionskraftwerke müssen ihren eigenen Tritiumbrennstoff über eine komplizierte Reaktionskette erzeugen. Zuerst trifft ein Neutron ein Lithium-7-Ion; daraus entstehen Helium, Tritium und ein Neutron. Dieses zweite Neutron trifft dann ein Lithium-6-Ion; das ergibt ein weiteres Helium- und ein Tritiumion. Die Lithiumionen sind in die Reaktorhülle, das so genannte Blanket, implantiert.



JESSICA HUPPI

Kilogrammpreis zwischen 60 und 90 Millionen Euro. Leider wird ein Magnetfusionskraftwerk rund ein Kilogramm Tritium pro Woche verbrauchen. »Der Fusionsbedarf überschreitet bei Weitem alles, was die Kernspaltung hergibt«, sagt Mohamed Abdou, Direktor des Fusion Science and Technology Center an der University of California in Los Angeles.

Damit eine Fusionsanlage ihr eigenes Tritium fabriziert, muss sie einen Teil der Neutronen von der Energiegewinnung abzweigen. Innerhalb des Blankets sollen Kanäle aus Lithium – einem weichen und hochreaktiven Metall – energiereiche Neutronen einfangen, um Helium und Tritium zu erzeugen. Das Tritium tritt durch die Kanäle aus, wird vom Reaktor eingefangen und wieder in das Plasma injiziert.

Genau besehen ist die Bilanz äußerst prekär. Jede Fusionsreaktion verbraucht exakt ein Tritiumion und erzeugt exakt ein Neutron. Somit muss jedes aus dem Reaktor kommende Neutron mindestens ein Tritiumion ergeben, sonst verbraucht der Reaktor mehr, als er erzeugt. Das Tritiumdefizit lässt sich nur vermeiden, wenn es den Forschern gelingt, eine komplizierte Reaktionskaskade in Gang zu setzen. Zuerst trifft ein Neutron ein Lithium-7-Isotop, das ein Tritiumion und ein Neutron produziert. Das zweite Neutron trifft dann ein Lithium-6-Isotop und erzeugt ein zweites Tritiumion.

Außerdem muss das Tritium zu fast 100 Prozent aus dem Blanket extrahiert und wieder dem Plasma zugeführt werden. »In dieser Kettenreaktion dürfen Sie kein einziges Neutron verlieren, sonst hört die Reaktion auf«, erklärt Michael Dittmar, Teilchenphysiker an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. »Zuerst einmal müsste gezeigt werden, dass die Tritiumproduktion funktioniert. Ganz offensichtlich ist das völlig ausgeschlossen.«

»Dieses Fusionsblanket ist ein ausgefallenes Wunderding«, meint Hazeltine. »Es verträgt eine Menge Hitze, ohne selbst zu überhitzen. Es nimmt Neutronen auf, besteht aber aus so raffiniertem Material, dass es trotzdem kaum Schaden nimmt. Und es verwendet die Neutronen, um Lithium in Tritium umzuwandeln.«

Leider wird ITER das Blanket-Design nicht testen. Darum finden viele Wissenschaftler – vor allem die amerikanischen, deren Land bei ITER keine große Rolle spielt –, dass eine eigene Anlage nötig ist, um ein Blanket zu konstruieren. »Man muss zeigen, dass das in der Praxis klappt«, sagt Abdou, »und wir haben überhaupt noch nie ein Blanket gebaut oder getestet.« Selbst wenn eine solche Testanlage morgen finanziert würde, schätzt Abdou, dass es 30 bis 75 Jahre dauern würde, bevor man mit der Konstruktion eines funktionsfähigen Kraftwerks beginnen könnte. »Ich halte es für machbar«, sagt er, »aber es ist viel Arbeit.«

### Weiter Weg zum Dauerbetrieb

Nehmen wir an, das geschieht. Wir schreiben das Jahr 2050. Sowohl NIF als auch ITER waren uneingeschränkt erfolgreich, sie haben ihre Ziele hinsichtlich des Energiegewinns pünktlich und im Budgetrahmen erreicht. Mutter Natur hielt keine Überraschungen bereit, als die Physiker in beiden Systemen die Energie hochfuhren; das renitente Plasma behalm sich wie erwartet. In einer separaten Anlage wurde ein Blanket entwickelt, das Tritium erzeugt, Neutronen in Strom verwandelt und den subatomaren Dauerbelastungen in einem Fusionskraftwerk standhält. Und nehmen wir an, ein funktionierendes Kraftwerk wird nicht mehr als acht Milliarden Euro kosten. Ist das eine brauchbare Option?

Selbst für diejenigen, die ihr Leben dem Traum von der Fusionsenergie gewidmet haben, ist die Frage schwer zu beantworten. Fusionskraftwerke sollen – wie gewöhnliche Kernspaltungsmeiler – Grundlast liefern. Das heißt, sie müssten permanent in Betrieb sein, um die hohen Anfangskosten einzubringen. »Jedes kapitalintensive System muss rund um die Uhr laufen, gerade weil man nichts für den Brennstoff zahlt«, meint Baker.

Leider ist es extrem schwierig, ein Fusionsplasma längere Zeit aufrechtzuerhalten. Bislang gelingt das nur für Sekundenbruchteile. ITER soll zehn Sekunden und mehr schaffen. Von da bis zum Dauerbetrieb ist es noch ein weiter Weg. »Die Fusion muss zu 90 Prozent betriebsbereit sein«, sagt Baker, und diese Zahl enthält die Abschaltzeiten für Routinewartung. »Das ist bei Weitem die größte Unwägbarkeit bei der wirtschaftlichen Zuverlässigkeit von Fusionssystemen.«

### HINDERNISSE

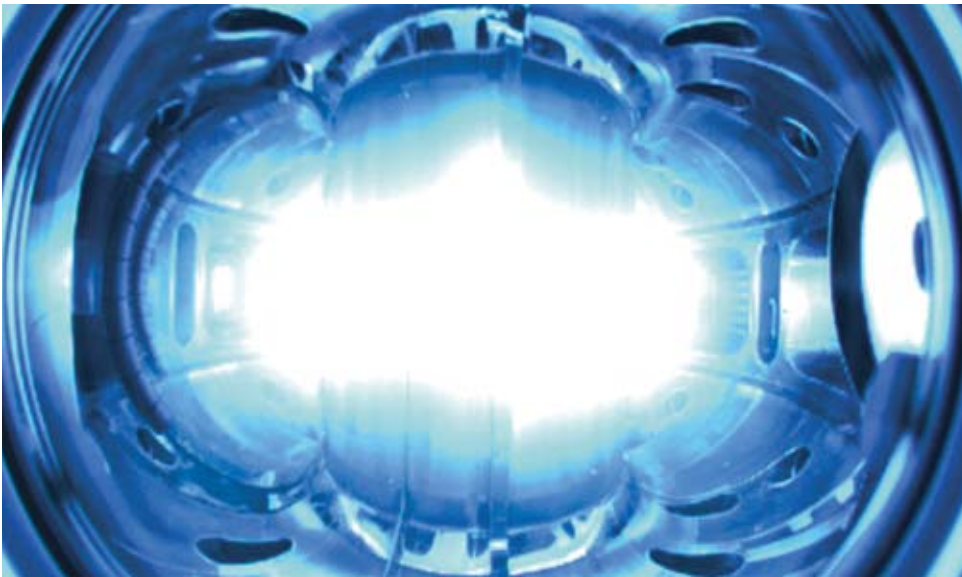
Bevor die Fusion zu einer brauchbaren Energiequelle werden kann, müssen noch mehrere Probleme gelöst werden.

**Hitze:** Das Reaktormaterial muss jahrelang extrem hohe Temperaturen aushalten.

**Struktur:** Die hochenergetischen Neutronen der Fusionsreaktionen machen gewöhnliche Materialien brüchig.

**Brennstoff:** Ein Fusionskraftwerk muss in einer komplexen Kettenreaktion sein eigenes Tritium erbrüten (siehe Kasten oben).

**Zuverlässigkeit:** Laserreaktoren lösen die Fusion nicht kontinuierlich aus. Magnetreaktoren müssen das Plasma wochenlang aufrechterhalten.



NATIONAL FUSION RESEARCH INSTITUTE (NRFI)

Das Projekt KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) in Daejeon (Südkorea) erzeugt seit 2008 mit supra-leitenden Magneten blendend weißes Plasma.

NIF-Direktor Moses meint die Lösung zu kennen. Er schlägt einen hybriden Fusions-Spaltungs-Reaktor vor, der Neutronen aus laserbetriebenen Fusionsreaktionen nutzt, um Spaltungsreaktionen in einem Blanket aus gewöhnlichem Nuklearabfall auszulösen. Er nennt sein System LIFE (*Laser Inertial Fusion Engine*, Laser-Trägheitsfusionsmaschine) und behauptet, es könne in 20 Jahren ans Netz gehen.

Das System beruht auf der Tatsache, dass nur fünf Prozent des in Kraftwerke gespeisten Urans genutzt werden, bevor es extrahiert wird und ins Endlager wandert. LIFE soll diesen verbrauchten Brennstoff mit Neutronen bombardieren, dadurch seinen Zerfall in leichtere, weniger radioaktive Elemente beschleunigen und unterdessen Wärme zur Stromerzeugung liefern. »Nach unseren Untersuchungen wären wir gegenüber allen heute erhältlichen Energiequellen wettbewerbsfähig«, sagt Moses, »oder sogar billiger.«

Natürlich hat LIFE seine Probleme. »Man darf die große Lüge in jedem Programm nicht übersehen«, warnt Edward C. Morse, Professor für Nukleartechnik an der University of California in Berkeley. »Die große Lüge bei der Laserfusion besagt, wir könnten die Targetkapseln für ein paar Cent pro Stück herstellen.« Die pfefferkorngroßen Kügelchen aus Deuterium-Tritium-Brennstoff müssen haargenau fabriziert und exakt rund sein, damit sie gleichmäßig von allen Seiten komprimiert werden können. Jede winzige Unebenheit auf dem Pellet verhindert, dass das Target im Laserfeuer explodiert; das macht die gegenwärtige Produktion der Pellets praktisch unbezahlbar. Zwar gibt Livermore, das seine Pellets selbst herstellen möchte, die mutmaßlichen Kosten nicht preis, doch das Laboratory for Laser Energetics an der University of Rochester produziert äh-

liche Deuterium-Tritium-Kugeln. »Das Jahresbudget für die Fabrikation der in Rochester benutzten Targets beträgt mehrere Millionen Dollar, und sie machen zirka sechs Kapseln pro Jahr«, sagt Morse. »Man könnte also sagen, der Stückpreis ist rund eine Million.«

Während am NIF die Pellets derzeit bestenfalls in mehreren Stunden Abstand explodieren, müssten die Targets in der Kammer mit dem Tempo einer Schnellfeuerkanone nachgeladen werden. »Diese Maschine macht 600 Umdrehungen pro Minute«, sagt Moses stolz. »Sie gleicht einem Automotor mit Millionen Pferdestärken, der aber ohne Kohlenstoff funktioniert.« Eine LIFE-Anlage wird im Dauerbetrieb fast 90 000 Targets pro Tag verbrauchen.

Natürlich lässt sich unmöglich vorhersagen, wie der globale Energiemarkt in 20 Jahren aussehen wird. Vielleicht entsteht eine riesige Nachfrage nach Fusionsenergie – oder die Fusion wird durch einen Durchbruch bei Solar- und Windkraft oder eine andere, ungeahnte Alternativenenergie vergleichsweise viel zu teuer und unhandlich. »Vielleicht werden die Leute sagen: Ja, es funktioniert, super, aber wir brauchen das nicht mehr, weil wir eine Menge Alternativen haben«, meint Hazeltine.

Bisher blieb die Fusion von solchen Überlegungen verschont. Sie unterschied sich grundlegend von schmutzigen fossilen Brennstoffen oder gefährlichem Uran. Sie war schön und rein – eine dauerhafte Lösung, das Ende unseres Energiehungers. Sie zauberte das Sternenlicht in ein irdisches Gefäß.

Inzwischen mutet diese Vision eher wie ein Schildbürgerstreich an. Die Fusion ist nur eine ferne Möglichkeit, deren Verwirklichung im günstigsten Fall noch Jahrzehnte dauern wird. Der Break-even-Point mag kurz bevorstehen, die Ära unbegrenzter Energie aber nicht. <



**Michael Moyer** ist Redakteur bei »Scientific American«.

**Hazeltine, R. (Hg.):** Research Needs for Magnetic Fusion Energy Science. Final Workshop Report, Bethesda 2009.

**Heller, A.:** Safe and Sustainable Energy with LIFE. In: Science and Technology Review. Publication of Lawrence Livermore National Laboratory, 2009.

**Kaufmann, M.:** Quantenphysik und Fusionsforschung. Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2003.

**Seife, C.:** Sun in a Bottle: The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking. Viking, New York 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1026694](http://www.spektrum.de/artikel/1026694).



MATHEMATIK

## Chaostheorie, einmal anders

Mario Markus legt die Summe seiner Computergrafiken zum Thema Ljapunow-Exponenten vor.

Vor 20 Jahren beherrschte das Thema »Chaos und Fraktale« die mathematisch-naturwissenschaftliche Welt – und nicht nur sie. Vor allem die faszinierenden Muster der Mandelbrot-Menge und der Julia-Mengen, verbreitet von »Scientific American« und »Spektrum der Wissenschaft«, trugen die Woge der Begeisterung weit über die wissenschaftlichen Kreise hinaus.

Die Bilder von Mario Markus, Professor für Physik an der Universität Dortmund und Forscher am Max-Planck-Institut für molekulare Physiologie, stachen aus der breiten Masse der irgendwie immer ähnlichen Mandelbrot-Mengen-Vergrößerungen heraus – im wahrsten Sinn des Worts. Seltsame Spitzen oder Antennen beherrschen seine Bilder. Und sie vermitteln einen Eindruck von räumlicher Tiefe, obwohl nichts in der Bilderzeugung etwas mit einer dritten Dimension zu tun hat. Das liegt an einer Erfindung von Mario Markus: der »demokratischen« Verteilung der Farben oder Graustufen. Dabei werden Zahlenwerte so in Farben umgesetzt, dass jede Farbe in annähernd gleich vielen Pixeln vorkommt. Das mindert zwar die analytische Aussagekraft

der Bilder, gibt ihnen aber genau die richtige Kontrastverteilung für ein spektakuläres Aussehen.

In der Aprilausgabe 1995 von »Spektrum der Wissenschaft« gab es die schönsten Farbbilder von Mario Markus zu bestaunen. Nun im Ruhestand, will er seine Bilder der Öffentlichkeit gesammelt vorstellen und die wissenschaftlichen Hintergründe darlegen. Dazu gibt es einen rückblickenden »Spaziergang durch die Chaosforschung«.

Ein Buch über Chaos und mathematische Computerbilder zu veröffentlichen ist heute nicht einfach. Die Euphorie über das Thema ist längst abgeklungen, und die Bücher von Heinz-Otto Peitgen und seiner Gruppe an der Universität Bremen haben die Messlatte sehr hoch gelegt. Wenn ich heute nach einem solchen Buch greife, erwarte ich drei Dinge: spektakuläre Bilder, computertechnische Anleitungen zu deren Erzeugung und Erläuterungen zum mathematischen Hintergrund. Das vorliegende Buch erfüllt diese Erwartungen in unterschiedlichem Maß.

Es ist zunächst einmal ein Bilderbuch. 159 Bilder erfreuen den Betrachter, davon 48 farbig. Der hohe Anteil an Schwarz-



Weiß-Bildern ist jedoch kein Nachteil, wirken diese doch oft dramatischer und ausdrucksstärker als die farbigen. Beim Durchblättern kommt das starke Verlangen auf, mit den Bildern herumzuspielen, verschiedene Varianten zu erproben. Wie schön, dass dem Buch eine CD mit einem Programm für genau diese Experimente beiliegt; das Java-Programm bedient erfreulicherweise nicht nur die Masse der Windows-Benutzer, sondern läuft auch auf Macintosh. Es ist allerdings nicht sehr schnell: Auf ein für heutige Verhältnisse kleines Bild von 200 mal 200 Pixeln muss man schon einmal eine Minute warten.

Im dritten Punkt, den mathematischen Erklärungen, sieht es nicht so gut aus. Natürlich erfährt man die Grundidee hinter den Bildern. Ein dynamisches System lässt sich durch eine einzige Zahl, den Ljapunow-Exponenten, in seinem Verhalten charakterisieren. Sehr oft hat man im System einen Parameter, mit dem man es an real vorliegende Daten anpassen kann. Nun zwingt Mario Markus dem System einen Takt auf, indem er den Parameter zwischen zwei Werten  $A$  und  $B$  hin- und herpendeln lässt – genau so, wie er schon 1988 in seiner Habilitationsschrift der Bierhefe einen neuen Rhythmus aufzwang, indem er sie im künstlichen Takt fütterte. Die beiden Werte  $A$  und  $B$  sind die Koordinaten für ein Pixel auf dem Computerbildschirm, der berechnete Ljapunow-Exponent bestimmt dessen Farbe, und schon haben wir die Zutaten für ein Bild.

Nach seinen eigenen Worten tritt Markus an, zwei Welten zu verbinden, Wissenschaft und Kunst. In diesem Buch gibt er jedoch eindeutig der Kunst den Vorzug. Um etwas auszudrücken, Assoziationen hervorzurufen oder den Betrachter durch Symmetrie zu erfreuen, dreht er bei Ausschnittsvergrößerungen schon einmal die Ausschnitte oder streckt die Achsen mit ungleichen Faktoren. Der mathematische Blick auf die zweidimensionale Parameterebene wird dem künstlerischen Zweck geopfert. Auch der mathematische Anhang von 33 Seiten kann nur einen Überblick geben. Viele Fragen, die bei näherer Analyse der Bilder aufkommen, bleiben ungeklärt.

Wenn Sie eine Darstellung der Chaostheorie samt ihrer Verbindung zu verschie-

**Diese Bilder gehen zurück auf die Iteration  $x_{n+1} = b \sin^2(x_n + r^m)$ , die noch durch ein paar Unstetigkeiten interessanter gemacht wird. Der Parameter  $r$  nimmt abwechselnd die Werte  $A$  und  $B$  an.**



densten Wissenschaften suchen und dazu spektakuläre Bilder sehen wollen, die noch nicht durch häufige Wiederholung verbraucht sind, so werden Sie dieses Buch mögen. Wenn Sie in die mathematischen Hintergründe eintauchen wollen, sind Sie bald genötigt, das Neuland auf eigene Faust zu erschließen.

Reimund Albers

Der Rezensent ist promovierter Mathematiker und Akademischer Rat an der Universität Bremen. Er

hat viele Jahre zusammen mit Heinz-Otto Peitgen an der didaktischen Aufarbeitung des Themas Chaos für die Einbindung in den Schulunterricht gearbeitet.

Mario Markus

#### Die Kunst der Mathematik

Wie aus Formeln Bilder werden

Zweitausendeins, Frankfurt am Main 2009.  
223 Seiten, € 24,90

## EPIGENETIK

# Die Macht über unsere Gene

Dank Epigenetik sind wir nicht die Sklaven unseres Erbguts, sondern seine Herren, wie Peter Spork zeigt.

Schwangere Frauen können sich kaum vor gut gemeinten Ratschlägen retten. Schließlich wirkt sich alles, was sie tun und lassen, auf das Kind aus – und wenn sich die Thesen der Epigenetik bewahrheiten, auch auf die Enkel und Urenkel.

Epigenetik ist die Wissenschaft von der Vererbung »neben« der DNA. Unsere Umwelt, Nahrung, Stress, Liebe, Erfahrungen – das alles hinterlässt Spuren in unseren Zellen, oder anschaulicher: Diese Ereignisse knipsen Schalter. Dadurch werden Gene an- oder ausgeschaltet und damit Hormonhaushalt, Stoffwechsel oder auch Krankheiten beeinflusst – vereinfacht gesagt.

Vereinfachen, das ist das große Talent des Neurobiologen und Wissenschaftsjournalisten Peter Spork. Der Autor erklärt auf diese Weise Epigenetik, die zu Grunde liegenden Mechanismen im Körper, unzählige Forschungsbeispiele und die Folgen für Wissenschaftler und unseren Lebensstil. »Die wichtigste Botschaft ... lautet: Fühlen Sie sich nicht als Marionetten Ihrer Gene.«

Neben der DNA gibt es einen zweiten genetischen Code, das Epigenom (Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 68, und 3/2004, S. 68). Spork veranschaulicht es: »Erbgut und Proteine funktionieren wie eine riesige Bibliothek: Die DNA enthält dabei die Texte, während die epigenetischen Strukturen die Bibliothekare, Ordner und Register sind, die die Information verwalten und sortieren.«

Das tun sie zum einen durch Methylierung. Dabei hängt sich eine Methyl(CH<sub>3</sub>)-Gruppe an eine Base im DNA-Code und verhindert, dass der zugehörige Text abgelesen und damit ein bestimmtes Protein produ-

ziert wird. Einen zweiten Mechanismus, die Histonmodifikation, vergleicht der Autor mit dem Aufwickeln auf eine Kabeltrommel. Die DNA wickelt sich um Pakete aus acht Eiweißen, den Histonen. Diese Pakete, die Nukleosomen, werden durch den Einfluss weiterer Proteine mehr oder weniger eng geschnürt, wodurch die Gene mehr oder weniger schwer abzulesen sind. Die dritte Eingriffsmöglichkeit der winzigen Bibliothekare ist die RNA-Interferenz. Die Boten-RNA, die eigentlich schon auf dem Weg ist, die Produktion eines Proteins auszulösen, wird nachträglich abgefangen und zerstört, und zwar durch die Wirkung von Mikro-RNA, Bruchstücken von DNA-Kopien, die man bis vor einigen Jahren für ein Abfallprodukt gehalten hat (Spektrum der Wissenschaft Dossier 1/2006 »Das neue Genom«, S. 42).

Methylierung, Histonmodifikation und RNA-Interferenz werden nicht nur durch einen autonom ablaufenden Prozess im Zellkern gesteuert, sondern durch unser Leben: durch Ernährung, Bewegung, Rauchen, Stress, Emotionen, wie Peter Spork mit vielen Forschungsergebnissen und Gesprächen mit hochkarätigen Wissenschaftlern – mal besser, mal schlechter – belegt. Wir selbst sind in der Lage, durch unser eigenes Verhalten die Schalter für ein langes Leben ohne physische oder psychische Krankheiten zu stellen. Aber nicht nur das: Auch unsere Eltern, Groß- oder sogar Urgroßeltern haben durch ihre Lebensweise manche für uns maßgeblichen Schalter betätigt.

Ratten, die von ihrer Mutter zu wenig umsorgt wurden, Kinder, die misshandelt wurden, oder auch Kriegsveteranen und Zeugen von Terroranschlägen entwickeln

oft epigenetische Störungen im Gehirn, in den Zentren für Gedächtnis, Angst und Stress, und tragen entsprechende Schäden davon. Der Stoffwechsel – und damit das Risiko für Diabetes oder Übergewicht – kann schon durch die Ernährung und das Rauchverhalten der Großmutter mütterlicherseits während ihrer Schwangerschaft oder des Vaters während seiner Pubertät festgelegt werden. Die Schalter werden auf die sich entwickelnden Keimzellen übertragen, die später bei der Zeugung verschmelzen.

Auch das Altern könnte man als epigenetische Krankheit auffassen, wie Studien an »Superalten« zeigen: Forscher fanden verschiedene Gene, Proteine und Enzyme, die Zellen und somit den Menschen jung halten. Die Produktion dieser Stoffe hängt wieder damit zusammen, ob die entsprechenden Gene mit den Bauplänen aktiviert sind oder nicht. Am meisten wird von der Ernährung erwartet: Grüner Tee, Kurkuma und Sojaprodukte aller Art sind laut manchen Forschungsergebnissen wahre Jungbrunnen.

Mit dem Ausruf »Revolution!« beginnt das Buch; und das könnte die Epigenetik tatsächlich auslösen, sofern sich denn die damit verknüpften Hoffnungen bewahrheiten, beispielsweise im Kampf gegen Krebs. »Die Zellen werden bösartig, weil biochemische Schalter dauerhaft »böse« Gene an- oder »gute« Gene ausschalten.« Dann müsste es doch möglich sein, genetische Mutationen durch Veränderungen des »zweiten Codes« rückgängig zu machen. Von Anwendungen auf einem breiten Markt wagen jedoch nicht einmal die optimistischsten Vertreter dieser jungen Wissenschaft zu sprechen.

Der Rat zu gesunder Ernährung, ausreichend Sport, wenig Stress, nicht Rauchen ist wahrlich nichts Neues. Aber wenn so anschaulich dargestellt wird, was einzelne, scheinbar bedeutungslose Entscheidungen in den Zellen auslösen können, welche Schalter umgelegt werden, und das nicht nur bei uns, sondern auch unseren Nachkommen – dann verleiht das bisherigen Erkenntnissen doch noch einmal ein anderes Gewicht.

Julia Eder

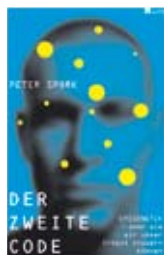
Die Rezensentin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Passau.

Peter Spork

#### Der zweite Code

Epigenetik – oder  
Wie wir unser Erbgut steuern können

Rowohlt, Reinbek 2009. 300 Seiten, € 19,90







PSYCHIATRIE

## Ein streitbarer Psychiater

Der prominente Depressionsforscher Florian Holsboer beschreibt sein wechselvolles Berufsleben.

Der Motor läuft nicht richtig? Dann fehlt ihm Schmieröl. Gib es ihm, es wird sich von selbst an die richtigen Stellen verteilen, und das Problem ist gelöst. Der Mensch ist zuckerkrank? Dann fehlt ihm Insulin. Gib es ihm, es wird sich von selbst an die richtigen Stellen verteilen, und das Problem ist – zumindest für den Moment – gelöst. Der Mensch ist depressiv? Dann fehlt ihm Serotonin – aber es ihm zu geben nützt nichts, denn es verteilt sich nicht von selbst an die richtigen Stellen, und selbst das würde das Problem nicht lösen. Das menschliche Gehirn ist eben deutlich komplizierter als der Verbrennungsmotor oder der Glukosestoffwechsel.

Der neuronale Botenstoff Serotonin wird aus einer Nervenzelle freigesetzt, wandert durch den nur 15 Nanometer breiten synaptischen Spalt zwischen ihr und der benachbarten Nervenzelle, lagert sich dort an einen Rezeptor an und vollendet damit die Informationsübertragung von der einen Zelle zur anderen – wenn es nicht von seiner Absenderzelle vorzeitig wieder eingesammelt wird. Allem Anschein nach dient dieser Hemmungsmechanismus (*reuptake*) dazu, die Stärke des so übertragenen Signals feinzusteuern. Das heute gebräuchliche Antidepressivum Imipramin mitsamt seinen zahlreichen Modifikationen entfaltet seine Wirkung, indem es den Hemmungsmechanismus hemmt und damit dem Serotonin, so es denn überhaupt freigesetzt wird, eine größere Wirksamkeit verschafft.

Mit der Geschichte dieses Medikaments, dessen Wirkung nur durch ein Zusammenwirken glücklicher Zufälle mit der Intuition der beteiligten Forscher entdeckt werden konnte, beginnt Florian Holsboer, Chef des Max-Planck-Instituts für Psychiatrie in München und »Deutschlands bekanntester Psychiater« (Klappentext), sein Buch. Es handelt sich um eine eigenwillige Mischung aus Sachbuch zum Thema Depression und Autobiografie. Wir erfahren von seinen Vorfahren – immerhin war es sein Urgroßvater Willem Jan Holsboer (1834–1898), der nicht nur Davos zum Kurort für Lungenkranke entwickelte, sondern für seine Kurgäste auch eine eigene Bahnlinie baute, die berühmt gewordene Rhätische Bahn –, seiner Kindheit in den Trümmern der unmittelbaren

Nachkriegszeit und in einer außergewöhnlichen Familienkonstellation sowie den wilden Zeiten von 1968, als er als Fachsachverständiger im AStA der Universität München sogar ein bisschen politisch tätig war.

Wie das bei Psychiatern so üblich ist, fragt Holsboer augenzwinkernd auch für seine eigene Person danach, wie Ererbtes und Erlebtes die gegenwärtige Persönlichkeitsstruktur bestimmen – und lässt es bei der Frage bewenden. Es kann schon sein, dass er die Tatkraft und den Gestaltungswillen von seinem Urgroßvater hat; und was sagt das über ihn selbst? Nicht viel Neues.

Weiter geht die Erzählung mit seiner alles andere als geradlinigen Karriere. Holsboer hat ein komplettes Chemiestudium hinter sich gebracht, bevor er sich der Medizin zuwandte. In deren Hierarchie musste er sich mangels Stallgeruch erst mühsam durchsetzen. Nach Umwegen über Mainz und Freiburg und einigen am Ende abgelehnten Angeboten aus den USA wurde er 1988 auf seine gegenwärtige Position berufen. Offensichtlich ist seine Durchsetzungskraft erheblich. Da er selbst freimütig beschreibt, an wie vielen Stellen er sich mit seinem erfolgreich realisierten Gestaltungswillen unbeliebt gemacht hat, wird schon etwas dran sein.

Im wissenschaftlichen Teil geht es um die weitere Aufklärung der Mechanismen der Depression. Man beobachtet bei Depressiven eine »andauernde Erhöhung der Stresshormone, insbesondere des Cortisols«. An Holsboers Institut wurde intensiv über den »kausalen Zusammenhang zwischen der andauernden Erhöhung des im Gehirn gebildeten Freisetzungshormons CRH (*cortisol releasing hormone*) und der Krankheitsentstehung« geforscht. Man beachte die vorsichtige Ausdrucksweise. Vereinfachungen wie »Stress verursacht Depression« sind bereits falsch.

Zum Schluss berichtet Holsboer, dass man in gewissen Fällen durch Analyse des Genoms darauf schließen könne, ob ein depressiver Patient auf ein bestimmtes Medikament ansprechen wird oder nicht – ein erster bescheidener Schritt zu einer »personalisierten Medizin«, die für jeden Patienten die speziell für ihn optimale Therapie findet. Natürlich schmeckt dieses Konzept der Pharmaindustrie nicht besonders. Viel einträglicher wäre für sie ein Einheitsmedikament

nach dem Prinzip des Schmieröls oder auch der Baseballkappe. »*One size fits all*«, und die einzige Variationsmöglichkeit, entsprechend dem Bändchen mit der Lochleiste an der Rückseite der Kappe, besteht in der Dosierung.

Dass Holsboer der Schmieröltheorie nicht anhängt, ist offensichtlich. Merkwürdigerweise scheint er selbst ihr jedoch ein bisschen nachzutruern. So beklagt er, dass es immer noch keine »objektive Labormethode« zur Diagnose der Depression gibt. Wenn es den einen Stoff, der dem Erkrankten helfen würde, schon nicht gibt, dann vielleicht wenigstens den einen Stoff, der die Erkrankung zuverlässig anzeigt?

In seinem Buch ergreift Holsboer dezidiert Partei in einem Richtungsstreit unter den Psychiatern, der nach seinen Worten bis heute andauert. Gegen seine Position, dass auch seelische Erkrankungen letztlich auf körperliche Fehlfunktionen zurückzuführen und vor allem durch die Analyse dieser physiologischen Prozesse zu erfassen seien, stehen nach seiner Auffassung die späten Anhänger des Dualismus, den man dem Philosophen René Descartes (1596–1650) zuschreibt: Die Seele sei ein vom Körper im Prinzip völlig unabhängiges Wesen, so dass es widersinnig sei, einer seelischen Erkrankung mit physiologischen Mitteln beikommen zu wollen.

Da der Dualismus heute allgemein als unhaltbar gilt, erscheinen Holsboers Gegner in seiner Darstellung als hoffnungslos gestrig, und er spart auch nicht mit Spott: Was für einen Sinn die herkömmliche Einteilung von Krankheitsursachen in »organisch« und »psychogen« (als Kürzel für »mit Labormethoden findet man nichts«) wohl habe? Ob das Gehirn etwa kein Organ sei? Polemik in allen Ehren – aber man braucht nicht einer verstaubten Philosophie anzuhängen, um seelische Probleme mit, sagen wir, seelischen Mitteln anzugehen. Während sich in dem Buch dazu kein gutes Wort findet, räumt Holsboer auf seiner Website <http://holsboer.de> bereitwillig ein, dass unter gewissen Umständen bei einer Depression Psychotherapie durchaus angesagt sei.

Da er sich zu seinen Zeiten als Chemiker intensiv mit der Quantentheorie beschäftigt hat, ist ihm auch ein probates Denkmuster

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

geläufig, um den scheinbaren Gegensatz der Philosophien aufzulösen: der Teilchen-Welle-Dualismus. Für den Gegenstand der Wissenschaft – hier ein Elementarteilchen, da das Gehirn – gibt es zwei konkurrierende und miteinander unvereinbare Beschreibungen: Entweder ist Licht eine Welle oder besteht aus Teilchen; entweder ist die Willensfreiheit – vom physiologischen Standpunkt – eine Illusion oder – vom psychologischen Standpunkt – eine offenkundige Realität. Zugleich sind beide Beschreibungen unentbehrlich, zumindest gegenwärtig. So gibt es für die Diagnose der Depression bislang nur die psychologische Beschreibung. Während aber in der Physik die friedliche Koexistenz beider Beschreibungsweisen durch einen komplizierten mathematischen Apparat hergestellt wird, ist an dergleichen für das Gehirn überhaupt

nicht zu denken. Was man durch die eine Brille gut sieht, ist durch die andere gesehen im Allgemeinen so hoffnungslos verschwommen, dass in der Praxis, anders als in der Philosophie, ein Widerspruch zwischen beiden nicht dingfest zu machen ist.

Für die Durchsetzung wissenschaftlicher Ziele mag die Polemik ja hilfreich gewesen sein; von außen ist ihre Notwendigkeit nicht recht einzusehen.

*Christoph Pöppe*

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Florian Holsboer

**Biologie für die Seele**

Mein Weg zur personalisierten Medizin

C.H.Beck, München 2009.  
304 Seiten, € 19,90



**MATHEMATIK**

# Mathematik in Geschichten

Ian Stewart bringt uns die Fülle des Fachs in vielen Erzählungen näher.

Wie kann es gelingen, die fassettenreiche Wissenschaft Mathematik, in der auch noch alles mit allem irgendwie zusammenhängt, in einem einzigen Buch zu erfassen? Ian Stewart, Emeritus der University of Warwick in Coventry (England), Direktor des dortigen Mathematics Awareness Centre und Verfasser fantasiereicher »Mathematischer Unterhaltungen« in dieser Zeitschrift, wählt eine einigermaßen konventionelle Einteilung in 20 Teilgebiete wie Zahlen, Dreiecke, Analysis, Topologie, Differenzialgleichungen, Numerik und nichtlineare Dynamik, aber für die einzelnen Kapitel eine ungewöhnliche Darstellungsweise.

Stewart schreibt kein Lehrbuch, sondern erzählt Geschichten – zum Beispiel in dem Kapitel zur vierten Dimension über den Roman »Die Zeitmaschine« von H. G. Wells. Dessen Protagonist bewegt sich in der vierten Raumdimension, die senkrecht zu allen drei uns geläufigen Richtungen steht, problemlos hin und her. Um seiner Science-fiction-Geschichte Glaubwürdigkeit zu verschaffen, verweist Wells im Roman auf einen mathematischen Vortrag von Simon Newcomb zum Thema »vierte Dimension«, der zu dieser Zeit tatsächlich stattgefunden hat. Und damit ist Stewart bei seinem eigentlichen Thema.



**Eine moderne Geschichte: Grigorij Perelman (links) bewies die Vermutung von Henri Poincaré (rechts) – und verschmähte den Ruhm.**

Jede Entdeckung und Errungenschaft, jede Anwendung bettet der Autor so in die persönliche Geschichte der handelnden Mathematiker ein, dass es ganz und gar nicht belehrend klingt – auch wenn er den Lesern die grundlegenden und entscheidenden Definitionen nicht verschweigt. In den geschichtlichen Kontext fügen sich an den passenden Stellen Kurzbiografien der Protagonisten. Ein wirklich wunderbarer Teil jedes Kapitels sind die Texte zu vergangenen und heutigen Anwendungen des jeweiligen Themas, wobei die Vergangenheit auch sehr lange her sein kann.

Offensichtlich rechnen wir im Dezimalsystem, weil wir zehn Finger haben. Im Prinzip könnten wir auch in jedem beliebigen Stellenwertsystem arbeiten. Auch an anderen Stellen verschafft uns Stewart die Erkenntnis, wie beliebig einige mathematische Anfangspunkte sind.

Die Kapitel sind in sich geschlossen, was es leichter macht, hin und wieder nur eins zu lesen. Gleichwohl gelingt es Stewart, zwischen den Teilthemen die Fäden zu ziehen, so dass schließlich alles zusammenpasst – wie das in der Mathematik eben so ist.

Die Folge der Kapitel hingegen ist für den, der mit Mathematik vertraut ist, eher ungewohnt. So wird die Logik erst gegen Ende im 17. Kapitel erwähnt. Aus der Gesamtanlage leuchtet das ein: Die Logik liegt zwar allen mathematischen Schlüssen zu Grunde, ist aber in ihrer heutigen Klarheit erst im 20. Jahrhundert beschrieben worden.

Die Literaturliste ist reichhaltig und vom Verlag noch durch deutschsprachige Werke ergänzt worden. Dennoch hätte ich mir an der einen oder anderen Stelle einen präziseren Quellenverweis gewünscht. Die angegebenen Internetseiten sind gut ausgewählt und weisen den Leser zu interessanten Orten. Die Übersetzung ist von hoher sprachlicher Qualität und wahrt den mitreißenden und erzählenden Stil des Originals.

Da Stewart die wichtigsten Grundlagen und Definitionen erläutert, ist das Buch ohne jedes Vorwissen lesbar. Es tauchen sogar fast ausschließlich aus der Schule bekannte Sätze auf. Da zum Ende hin etwas ausgefallene mathematische Themen auftauchen, ist das Buch ebenfalls für Mathematiker interessant, die nach einer breiteren historischen Einordnung suchen.

Auch schaut Stewart kontinuierlich über unseren kulturellen Tellerrand hinaus und beschäftigt sich vor allem bei den Zahlen und der grundlegenden Geometrie mit der Herangehensweise anderer Kulturen.

Vielleicht verdient nicht alles in diesem Buch das Etikett »Meilensteine«. Gleichwohl ist dieses reichlich illustrierte Werk in seiner geschichtlichen Bandbreite für jeden Leser eine Bereicherung.

*Lars Jeschio*

Der Rezensent studiert Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin.

Ian Stewart

**Meilensteine der Mathematik**

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer

Spektrum Akademischer Verlag,  
Heidelberg 2010. 288 Seiten, € 32,95



## Filmreife Forschung



Thomas Wiegand mit einem Emmy

MIT FRODL. GEN. VON THOMAS WIEGAND

Thomas Wiegand – Professor an der TU Berlin und Wissenschaftler am Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut – gilt als einer der Erfinder des Videostandards H.264. Der steckt heute in fast allen Geräten, die bewegte Bilder abspielen können.

Das »Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut« in Berlin gehört seit 2003 zur Fraunhofer-Gesellschaft. Gegründet wurde es 1928 als Heinrich-Hertz-Institut für Schwingungsforschung. Heute beschäftigen sich die rund 260 Mitarbeiter mit optischen Netzen, Breitband-Mobilfunknetzen, photonischen Komponenten, elektronischer 2-D- und 3-D-Bildverarbeitung und virtuellen Umgebungen. Der Etat beträgt rund 25 Millionen Euro.

Was ist der größte wirtschaftliche Erfolg der Fraunhofer-Gesellschaft? MP3, werden viele wie aus der Pistole geschossen antworten. In der Tat hat der Komprimierungsstandard für Musikdateien viele Millionen Euro in die Kassen von Europas größter Organisation für angewandte Forschung gespült. Andererseits gibt es ähnliche Erfindungen aus der Fraunhofer-Schmiede, die fast ebenso wichtig, aber nicht so bekannt sind.

Eine davon ist H.264, auch bekannt als MPEG4-AVC. Ein Standard, der mit Videodateien dasselbe tut wie MP3 mit Audiodateien: Er schrumpft die riesigen Informationsmengen so geschickt, dass sie sich in Echtzeit übermitteln oder auf kompakten Speichermedien archivieren lassen. So arbeiten alle Fernsehsender, die das hochauflösende Bildschirmformat HDTV ausstrahlen, mit H.264; auf Blu-ray-Discs sind Filme so gespeichert, ebenso auf iPods oder auf den Servern des Internetportals YouTube. »Mehr als eine Milliarde Geräte können mittlerweile H.264 abspielen, dabei war das vor sechs Jahren nicht mehr als ein Word-Dokument auf meinem Computer«, freut sich Thomas Wiegand, Leiter der Abteilung Bildverarbeitung am Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut in Berlin.

»Das ist einer unserer Emmys«, sagt der 39-Jährige und zeigt im Foyer des Instituts auf einen Glaskasten, in dem

eine goldene Statue glänzt. Den Technik-Oscar der amerikanischen Fernsehindustrie hat er schon zweimal stellvertretend für das H.264-Team entgegengenommen. Wiegand ist einer seiner Leiter. Die Grundlagen zu diesem Standard legte er schon während der Promotion vor zehn Jahren in Erlangen. Seit Wiegand am Heinrich-Hertz-Institut ist, hat er zusammen mit Heiko Schwarz, Detlev Marpe und den anderen Mitgliedern seines Teams an dem Thema weitergearbeitet und dafür neben den Emmys noch diverse weitere Preise eingeehmt.

Daraus wäre fast nichts geworden, denn der aus Wismar stammende Wiegand lernte erst Elektromonteur, weil er nicht die obligatorischen drei Jahre bei der Nationalen Volksarmee der DDR dienen wollte. Danach begann er mit dem Elektrotechnikstudium, das er an der Technischen Universität Hamburg-Harburg fortsetzte. Auslandsaufenthalte führten ihn nach Kobe in Japan, nach Santa Barbara und Stanford in den USA. Seit 2008 leitet Wiegand an der Technischen Universität Berlin das Fachgebiet Bildkommunikation. Laut dem Zitationsindex Google Scholar ist er der wohl meistzitierte deutsche Nachrichtentechniker.

HDTV und mobiles Fernsehen sind indes nur der Anfang für die Berliner Fraunhofer-Forscher. In einem abgedun-

keltten Raum im Institutshochhaus läuft auf einer riesigen, zu einem Halbkreis gebogenen Leinwand das Video einer Schlacht aus dem Jahr 1511, die alle drei Jahre beim Frundsbergfest in Mindelheim im Allgäu nachgestellt wird. Dank 6000 mal 2000 Bildpunkten aus sechs Beamern – etwa sechsfacher HDTV-Auflösung – sitzt der Betrachter mittendrin, 100 Lautsprecher vermitteln den Eindruck, als würden ihm die Kanonenkugeln um die Ohren pfeifen.

Demnächst wird die Projektion auf 3-D erweitert, mit Polarisationsbrillen auf der Nase ist der räumliche Eindruck dann perfekt. Dank H.264 und dessen Entwicklungen werden sich die enormen Datenmengen ausreichend kompakt speichern und übertragen lassen. Wenn HiRes-Cinema und 3-D-Visualisierung den Massenmarkt erobern, werden die Fraunhofer-Gesellschaft und weitere deutsche Firmen mit von der Partie sein. Wieder – denn im Gegensatz zur landläufigen Meinung war MP3 ein großer Erfolg für Deutschland, auch wenn heute alle MP3-Player in Asien gefertigt werden. »Viele sichtbare Dinge kommen zwar aus dem Ausland, aber dahinter stecken wichtige Technologien aus Deutschland.«

**Bernd Müller**

Der Autor arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Esslingen.



## Baden-Württemberg. Germany at its best.

**BW** Baden-Württemberg bietet durch seine exzellente Infrastruktur ausgezeichnete Voraussetzungen für Ihre Karriere in Forschung und Entwicklung. Hier treffen Sie nicht nur auf die größte Dichte an Forschungseinrichtungen und Hochschulen in Deutschland, diese werden auch höchsten Qualitätsansprüchen gerecht, wie das hervorragende Abschneiden in der Exzellenzinitiative belegt.

Baden-Württemberg investiert mehr als 4% seines BIP in Forschung und Entwicklung. Das Land nimmt dadurch eine echte Spitzenposition im nationalen und internationalen Vergleich ein und verfügt somit über optimale Rahmenbedingungen für Ihre Forschungsvorhaben.



Baden-Württemberg International

Gesellschaft für internationale wirtschaftliche und wissenschaftliche Zusammenarbeit mbH

Haus der Wirtschaft  
Willy-Blocher-Str. 19  
70074 Stuttgart

Tel: +49(0)711 22787-0  
Fax: +49(0)711 22787-22  
E-Mail: info@bw-career.de  
Internet: www.bw-career.de



Baden-Württemberg

Discovering  
Nature's Secrets  
and the Molecular  
Basis of Life



EXZELLENZCLUSTER

CellNetworks

Heidelbergs Forschungsnetzwerk, um zelluläre Netzwerke besser zu verstehen

**Unser Netzwerk** Wir nutzen unser Wissen aus den Lebenswissenschaften – Biologie, Medizin – sowie Chemie, Physik und Scientific Computing. Daran beteiligen sich Forscher/innen vom DKFZ, EMBL, MPI-MF und der Universität Heidelberg.

**Unser Cluster** Interdisziplinäre Zusammenarbeit ist erfolgreich, um komplexe Vorgänge zwischen und innerhalb von zellulären Netzwerken zu verstehen, dabei interessiert uns besonders die Dynamik und systemische Steuerung.



**Unsere Technik Sehen:** mit modernster Mikroskopie  
**Zählen:** Analytik und Mathematische Simulation  
**Verstehen:** Interdisziplinäre Auswertung.

**Interesse?**

Exzellenzcluster CellNetworks  
Im Neuenheimer Feld 267  
D-69120 Heidelberg  
[cellnetworks@bioquant.uni-heidelberg.de](mailto:cellnetworks@bioquant.uni-heidelberg.de)  
[www.cellnetworks.uni-hd.de](http://www.cellnetworks.uni-hd.de)

RUPRECHT-KARLS-  
UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG





## Hintergründiges Gehirn

»Dunkle Energie« nennen Forscher frech die Hintergrundaktivität im Gehirn, die ihnen bisher entgangen ist – auf die das Denkgorgan aber fast nie verzichtet

AARON GOODMAN

### WEITERE THEMEN IM JUNI

#### Gene der Neandertaler

Das Erbgut der Neandertaler erzählt von deren Geschichte – aber auch von einigen ihrer körperlichen Besonderheiten

#### Erdöl für alle

Ist die Zeit des billigen Erdöls bald vorbei? Optimisten sagen Nein und verweisen auf neue Techniken der Förderung und Exploration

**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)

BÖNTGEN: NASA/CXC/CACTEHS/WILLIAMS ET AL.;  
OPTISCH: NASA/STSC/UDU/CHIU & R. WILLIAMS ET AL.;  
INFRAROT: NASA/JPL-CALTECH/REHR ET AL.



#### Mission im Infraroten

Dichte Staubvorhänge verhüllen viele der interessantesten astronomischen Phänomene. Das Weltraumteleskop Spitzer sieht mit seinen Infrarotsensoren hinter die Kulissen von Sternentstehung und Galaxienentwicklung

MARTIN DILL

#### Ameisen als Wanderhirten

Sie ziehen als nomadische Viehzüchter durch den Dschungel, immer auf der Suche nach frischer Weide für ihre Läuseherden. Die Geschichte einer ungewöhnlichen Entdeckung

