

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SERIE ZEIT (TEIL II)  
Rolle der Zeit in  
Mesopotamien

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC  
AMERICAN

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

08/10

AUGUST 2010

ASTRONOMIE

Zwerggalaxien  
und Dunkle Materie

SPINNENTIERE

Evolution und Vielfalt  
der Weberknechte

HIRNFORSCHUNG

Warum entstehen im Gehirn  
neue Nervenzellen?



## Die Herkunft der Sprachen Europas

Neue Befunde zur Ausbreitung  
des Indogermanischen

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

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







Reinhard Breuer  
Chefredakteur

## Wenn Worte wandern

**Nach meinem Abitur** hatte ich, nicht untypisch, ein Entscheidungsproblem: Geistes- oder Naturwissenschaft? Ich entschied mich für einen Kompromiss. Nach einem Jahr Germanistik und Philologie wechselte ich in die Physik. Dabei bin ich dann zwar geblieben, aber auch die Germanistik, übrigens an der Universität Würzburg, hat bleibende Spuren hinterlassen. Neben akademischen Lehrern, die mich damals besonders beeindruckten – etwa der Mediävist Kurt Ruh oder der neuere Literaturwissenschaftler Beda Allemann –, faszinierte mich die Etymologie, ein Teilgebiet der historischen Linguistik. Worte, so lernte ich am Beispiel des Mittelhochdeutschen, können sich verändern und wandern, haben ihre eigene Geschichte – ein Thema, das ich auch bei »Spektrum« aufgreifen konnte.

Es ist allerdings schon eine Weile her, dass wir über solche Sprachforschung berichtet haben (»Die Evolution der Sprachen«, Dossier 2/2000; »Die Ursprache der Europäer«, SdW 5/2002). Damals riefen diese Artikel beträchtliche Leserresonanz hervor. Aber seitdem hat sich die Forschung natürlich weiterbewegt und neue Verfahren entwickelt, vor allem Paläogenetik und Computerlinguistik. Als uns Ruth Berger einen Beitrag über indogermanische Sprachen anbot, der die Ergebnisse dieser jüngsten Fortschritte resümiert, konnten wir daher nicht widerstehen.

Die in Frankfurt lebende Autorin ist eine interessante Grenzgängerin: Zuerst studierte sie Turksprachen, Hebräisch, Biologie und allgemeine Sprachwissenschaft, promovierte danach in Judaistik. Seitdem publizierte sie nicht nur Sciencefiction sowie historische Romane über die Goethezeit, sondern 2008 auch das Sachbuch »Warum der Mensch

spricht«. Offenbar fesselt die »Naturgeschichte der Sprache« (so der Untertitel) Ruth Berger auch weiterhin, wie ihr spannender Artikel belegt (S. 50).

**Die Kosmologie steckt noch immer voller Rätsel.** Die zentralen Zutaten des »kosmologischen Standardmodells«, nämlich Dunkle Energie und Dunkle Materie, entziehen sich weiterhin dem konkreten Zugriff der Forscher. Nur eines glauben sie sicher zu wissen: Ohne diese Zutaten lässt sich derzeit kein konsistentes Modell unseres Universums bauen, das zugleich alle Beobachtungen erklären kann. So weit, so schlecht.

Doch manchmal kommt etwas Bewegung in die Szene. Wie ab S. 22 der australische Astronom Pavel Kroupa und sein Mitarbeiter Marcel Pawlowski von der Universität Bonn berichten, können womöglich Zwerggalaxien dazu benutzt werden, zumindest das Dogma der Dunklen Materie kritisch unter die Lupe zu nehmen.

Die Eigenschaften von etlichen dieser Objekte, darauf verweisen die Forscher auch in einer kürzlich erschienenen Fachpublikation, lassen sich eigentlich viel besser erklären, wenn man auf die Annahme der Dunklen Materie verzichtet – selbst wenn man damit in einen Widerspruch zum kosmologischen Standardmodell gerät. Aus diesem Dilemma herauszukommen ist sicher die Aufgabe weiterer Forschung. Wie immer gilt: Widersprüche zwischen Beobachtungen und Modellen versprechen der Forschung »interessante Zeiten«.

Herzlich Ihr

*Reinhard Breuer*



Die Sprachwissenschaftlerin und Romanautorin Ruth Berger

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### Neue Zellen im Gehirn



34

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### Zwerggalaxien testen das kosmologische Standardmodell

22

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### Evolution der Weberknechte



40

## AKTUELL

### 8 Spektrogramm

Tang vergiftet Korallen · Verstellen der inneren Uhr · Klebreis zementiert Chinesische Mauer · *Helicobacter* – harmlos ohne Dreh u. a.

### 11 Bild des Monats

Neu entdeckte Frösche

### 12 Supernova in 3-D

Simulationen zeigen gewaltige Umwälzströmungen gleich zu Beginn der Sternexplosion

### 14 Erstes künstliches Lebewesen?

Craig Venters Versuch, Gott zu spielen

### 16 Sonne schiebt ruhige Kugel

Was steckt hinter der ungewöhnlichen Länge des jüngsten solaren Minimums?

### 17 Das Geheimnis ewigen Lebens

Schlüssel zum Jungbrunnen der Plattwürmer entdeckt

### 20 Springers Einwürfe

Das Klima ist vergiftet

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### 22 ► Das kosmologische Standardmodell auf dem Prüfstand

Dunkle Materie soll eine zentrale Rolle bei der Entwicklung des Universums spielen. Doch Beobachtungen von Satellitengalaxien der Milchstraße nähren Zweifel an ihrer Existenz

SCHLICHTING!

### 32 Sonnenaufgang in einem Opal

Von Himmelsblau und Alpenglühem – Opale haben mehr mit kilometerdicken Luftschichten gemeinsam, als unsereins denken würde

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### 34 ► Sein oder nicht sein im Gehirn

Tag für Tag entstehen neue Nervenzellen in unserem Denkorgan, doch die meisten sterben bald wieder ab. Offenbar überleben nur solche Neurone, die bei anspruchsvollen Lernaufgaben gefordert werden

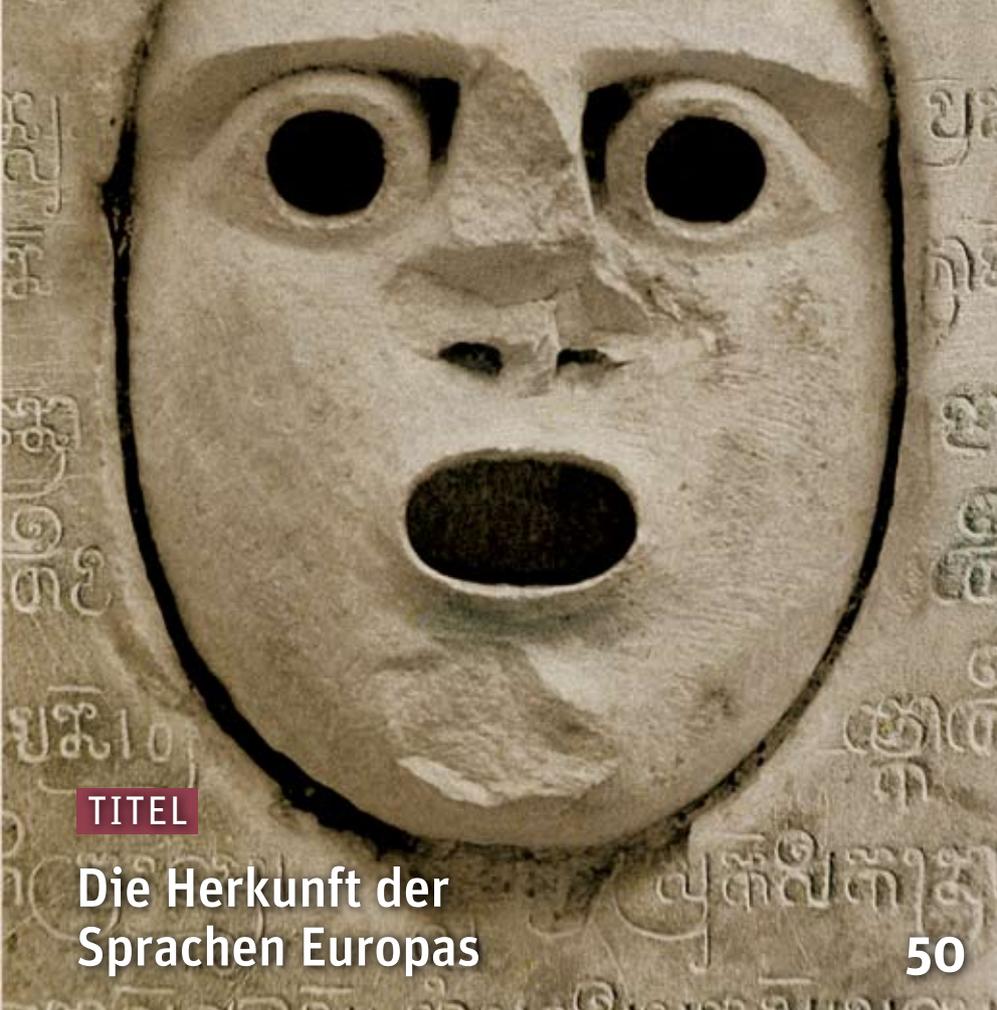
### 40 ► Weberknechte – Künstler der Evolution

Sie erscheinen in tausenden Arten und verblüffen mit vielen raffinierten Anpassungen. Längst nicht alle haben die uns so vertrauten extrem langen Beine

Titelmotiv: Alessandra Kocman (Maske); AKG Berlin (Sanskrit); Spektrum der Wissenschaft (Composing)

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)



**TITEL**  
**Die Herkunft der Sprachen Europas**

**50**



**80**

**ERDE & UMWELT**  
**Stammbaum der Mineralien**



**88**

**TECHNIK & COMPUTER**  
**Fotorealismus per Computer**

**MENSCH & GEIST**

**TITEL**   
**50 ▶ Wie die indogermanischen Sprachen nach Europa kamen**  
 Paläogenetik und Computerlinguistik liefern neue Indizien zur Ausbreitung des Indogermanischen vor fünf- bis zehntausend Jahren

**60 Drei kleine Achtecke**  
 Überraschung aus der klassischen Geometrie der Ebene: Das Symmetrische ist nicht immer das Optimale

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

**68 Das Damenproblem**  
 Eine Verallgemeinerung und die Mittel der Gruppentheorie bringen neues Licht in eine alte Knobelaufgabe

SERIE ZEIT (II)

**72 ▶ Mesopotamien**  
 Nach dem Zeitverständnis des Alten Orients lag Utopia keineswegs in einer besseren Zukunft, sondern in einer fernen Vergangenheit

**ERDE & UMWELT**

**80 Die Evolution der Minerale**   
 Fast alle heutigen Minerale sind erst im Lauf der Erdgeschichte entstanden – bei verschiedenen Etappen in der Entwicklung unseres Planeten. Mehr als die Hälfte verdankt ihre Existenz dem Leben

**TECHNIK & COMPUTER**

**88 Echter als die Wirklichkeit?**  
 Was Filmstudios vormachen, soll auch in Computerspielen möglich sein: natürlich, nicht künstlich wirkende Szenen. Doch die Interaktivität der Spiele stellt hohe Anforderungen

FRAG DEN EXPERTEN

**97 Können sich Fingerabdrücke verändern?**  
 Die Wissenschaftsjournalistin Katherine Harmon hinterfragt ein Dogma

**WEITERE RUBRIKEN**

- 3 Editorial: Wenn Worte wandern
- 6 Leserbrief/Impressum
- 58 Im Rückblick
- 104 Onlineangebote
- 106 Vorschau

- 98 Rezensionen:  
 Norbert Elsner et al. (Hg.) *Evolution*  
 Alexander Unzicker *Vom Urknall zum Durchknall*  
 Alfred Schreiber *Die Leier des Pythagoras*  
 Bruno P. Kremer *Der Rhein*

## Wie schnell sind Neutrinos?

Neutrinos als Boten ferner Welten  
Juli 2010

Schon lange plagt mich folgende Frage: Wenn Neutrinos nicht masselos sind, können sie ja auch nicht lichtschnell sein. Wie schnell sind sie aber wirklich? Kann die Differenz zwischen ihrer Geschwindigkeit und der des Lichts nicht dazu führen, dass das Licht einer Supernova, obwohl erst später ausgesandt, auf dem Weg zur Erde die Neutrinos ein- oder sogar überholt? Und wie wahrscheinlich ist so etwas? Weiß man da etwas darüber?

Liane Mayer, Wien

### Antwort der Redaktion:

Bei einer Supernova-Explosion werden zugleich Strahlung und Neutrinos frei. Als man noch nicht sicher wusste, ob Neutrinos Masse haben, lieferte die Supernova 1987A ein Indiz: Erst 15 Se-

kunden nach dem elektromagnetischen Strahlungsblitz kamen die ersten Neutrinos auf der Erde an. Die Supernova ist 150 000 Lichtjahre entfernt, daher ist diese Verzögerung freilich winzig – und somit auch die Neutrinomasse.

## Vorgänge und Schlussfolgerungen falsch

Gemeinsam schwächer  
Spektrogramm, Juni 2010

Der Grund für den Blackout in ganz Italien (außer Sardinien) am 28.9.2003 (nicht am 23.) war keineswegs »die Abschaltung nur eines einzigen Elektrizitätswerks«, sondern der Ausfall der 380-kV-»Lukmanier«-Leitung von der Schweiz nach Italien, die wegen eines Erdschlusses automatisch abgeschaltet wurde. Eine Wiedereinschaltung scheiterte an den hohen, nicht fahrplanmäßigen Stromimporten Italiens, die zu diesem Zeitpunkt 6951 MW betragen, was 25 Prozent des gesamten italienischen Verbrauchs entsprach.

Die resultierende Überlastung anderer Leitungen von Frankreich, der Schweiz, Österreich, Slowenien und Griechenland (Seekabel) konnte nach 25 Minuten nicht mehr toleriert werden. Was dann folgte, war der bekannte Dominoeffekt: automatisierte, kaskadierte Abschaltungen innerhalb von wenigen Minuten. Italien war damit elektrisch vom Rest Europas getrennt. Wie sich jetzt zeigte,

war das italienische Netz nicht inselfähig. Instabilitäten mit massiven Frequenzeinbrüchen und der zwangsläufige Ausfall aller Kraftwerke waren nicht mehr zu verhindern. Um 3.28 Uhr lag das ganze Land im Dunkeln.

All dies hatte nichts mit dem Internet zu tun. Schaltungen zum Netzschutz werden lokal in Netzknoten ausgelöst und vollzogen. Hierzu werden auch keine zentralen Rechnerkapazitäten oder Internetverbindungen eingesetzt, sondern Frequenzrelais in den Netzknoten, die einen Lastabwurf einleiten und die zu diesem Zeitpunkt auch nicht beeinflussbar sind.

Die Risiken im europäischen Verbundnetz liegen im Stromhandel sowie in der zunehmenden hoch volatilen Einspeisung aus erneuerbaren Quellen – vor

### 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)

Die vollständigen Leserbriefe finden Sie unter:

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



## Spektrum

DER WISSENSCHAFT

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

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: [spektrum@zenit-presse.de](mailto:spektrum@zenit-presse.de), Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,40/Sfr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SWW zum Vorzugspreis.

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenvertretung:** Hamburg: Matthias Meißner, Brandswiete 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Ursula Haslauer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, [branchenbetreuung@iqm.de](mailto:branchenbetreuung@iqm.de)

**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 31 vom 01. 01. 2010.

**Gesamtherstellung:** L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2010 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



# Pragmatismus versus Moral

Schuld und freier Wille, Juni 2010

## Strafrecht nicht ändern

Herr Dahl verlangt, wie schon viele vor ihm, der Schuldbegriff und in dessen Folge auch unser Strafrecht müssten geändert werden, da niemand anders hätte handeln können, als er tatsächlich gehandelt hat (weil – meine Ergänzung – alle Handlungen durch Naturgesetze bestimmt sind). Diese Forderung ist so nicht begründbar.

Laut Brockhaus ist Schuld die individuelle Vorwerfbarkeit eines rechtswidrigen Verhaltens. Wer behauptet, nicht er sei der Urheber seiner Handlung, sondern seine Neurone, und die in seinem Körper ablaufenden physischen Prozesse hätten die Tat herbeigeführt, verkennt, dass beides ein Teil von ihm ist. An der individuellen Vorwerfbarkeit und damit an der persönlichen Schuld führt also kein Weg vorbei. Deswegen muss auch unser Strafrecht nicht geändert werden.

Dr. Eugen Muchowski, Unterhaching

## Determiniert durch Strafe

Edgar Dahl schreibt, dass sich die Frage, ob wir unsere Mitmenschen für ihr Tun und Lassen zur Verantwortung ziehen dürfen, a priori verneinen lässt. Die Frage ist so gestellt, dass sie sich kaum beantworten lässt – denn wer mag schon entscheiden, ob man etwas »darf«? Aus »moralischer« Sicht »darf« man niemanden für etwas verurteilen, das er oder sie nicht zu »verantworten« hat, aber Edgar Dahl greift ja gerade die »Moral« als Maßstab an. Wenn es eher um Zweckmäßigkeit geht, »darf« man Menschen unter Umständen schon zur Verantwortung ziehen, auch wenn ihr Verhalten determiniert ist, einfach weil es möglicherweise für die Allgemeinheit von Vorteil (wenn auch nicht unbedingt »gerecht«) ist, so zu verfahren – denn eine Strafe als »sozialer Akt« ist ja gerade Teil dessen, was einen Menschen determiniert.

Andreas Berg, per E-Mail

## Wo sind die Argumente?

In der ersten Hälfte, also zum Begriff der Schuld (beziehungsweise zur Moral), wird rein pragmatisch beziehungsweise juristisch diskutiert. Das heißt, es wird überhaupt nicht auf die wichtige Frage eingegangen, ob es evolutionäre Vorgänger moralisch differenzierten Verhaltens

bei anderen Tieren gibt. Sollte das so sein, kann es sich nämlich nicht nur um den Ausdruck menschlicher Konventionen handeln – darf also nicht rein pragmatisch diskutiert werden. Hinweise auf eine bestimmte Art von »Gewissensarbeit« gibt es übrigens wohl wenigstens bei Primaten (langjährige Beobachtungen bei großen Schimpansengruppen).

Norbert Hinterberger, Hamburg

## Definition der Freiheit

Ich stimme mit Herrn Dahl überein, dass in einer deterministischen Welt die Begriffe Schuld (damit allerdings auch der Begriff Unschuld) sowie Verantwortung sinnlos und deshalb moralische Urteile in einer solchen Welt verfehlt sind. Stattdessen schlägt er ästhetische Urteile vor, die aber – da stimme ich wiederum Herrn Pauen zu – absurde Konsequenzen haben. Noch absurder scheint mir allerdings eine deterministische Welt, in der wir noch nicht einmal sinnvoll über den Sinn von irgendetwas diskutieren können, und schon gar nicht über den eines Rechtssystems.

Ganz anders unsere nichtdeterministische Welt: Schuld und Verantwortung sind hier keine leeren Begriffe, und das heute in der Rechtsprechung vorherrschend angewandte Schuldprinzip ist vernünftig. Nach diesem Prinzip kann jemand für eine begangene Tat nur dann zur Verantwortung gezogen werden, wenn es im Moment der Tat Alternativen gab, zwischen denen er, dank seiner angenommenen Freiheit, hätte entscheiden können. Hatte er keine Alternativen, dann hat er zwangsläufig und deshalb nicht schuldhaft gehandelt.

Gunter Berauer, München

## Willensfreiheit nicht gleich Handlungsfreiheit

Edgar Dahl bestreitet die Existenz einer menschlichen Willensfreiheit und zitiert dazu unter anderem folgendes Argument: »Wir tun, was wir tun, weil wir sind, wie wir sind.« Auch wenn man diese Aussage akzeptiert, besagt sie zunächst nur, dass unsere Handlungsfreiheit zum Beispiel durch biologische und physikalische Grenzen eingeschränkt ist. Wir sind nun einmal keine Fische, die im Wasser schwimmen, und keine Vögel, die in der Luft fliegen. Biologische und physikalische Grenzen sind für sich genommen aber nichts Besonderes und schließen Willensfreiheit nicht aus, denn Willens- und Handlungsfreiheit sind unterschiedliche Dinge.

Jörg Michael, Hannover

allem der Windkraft. Seit der Liberalisierung des Strommarkts werden erhebliche Mengen über die nationalen Grenzen hinweg transportiert. Dabei bestimmen der Einspeisepunkt, beispielsweise ein Kraftwerk irgendwo in Frankreich, und der Ausspeisepunkt, vielleicht ein Pumpspeicherwerk in Italien, Wege und Netzlasten im Stromaustausch. Ein Transitland wie die Schweiz hat kaum Möglichkeiten zur Steuerung, ausgenommen die geplante oder überlastbedingte Abschaltung.

Wirtschaftliche Überlegungen wie »Kaufen ist aktuell billiger als selbst erzeugen« gefährden zunehmend das Europäische Verbundnetz. Auch noch 2009 lag der Verbrauch in Italien um mehr als 14 Prozent über der eigenen Erzeugung.

Gerhard Juli, Kempten/Allgäu

## Aspekte zu Verlauf und Vollendung

Neheh und Djet – die zwei Gesichter der Zeit, Juli 2010

Bei den indogermanischen Sprachen bietet nicht nur das Englische für den Aspekt »Verlauf« eine besondere grammatikalische Form an.

Im Russischen, das ja zweifellos zu den indogermanischen Sprachen zählt, spielt bei den Verben der Aspekt eine zentrale Rolle. Die meisten Verben drücken ein Geschehen entweder als ein nicht abgeschlossenes, zeitlich unbegrenztes (unvollendeter Aspekt) oder als ein zeitlich begrenztes, unteilbares, abgeschlossenes Ganzes aus (vollendeter Aspekt).

Es gibt demnach im Russischen für eine Handlung immer ein Paar Verben, die sich oft durch eine Vorsilbe unterscheiden oder zwei verschiedene Verben vom gleichen Wortstamm sind. Die unvollendeten Verben haben ein Präsens, ein Futur und ein Präteritum. Die vollendeten Verben nur ein Futur und ein Präteritum. Jeder Russisch Lernende muss also immer für jede Handlung zwei Verben lernen.

Klaus Noack, Binningen (Schweiz)

## Korrigendum

Grundchemikalien aus Biomasse Spektrogramm, Juli 2010

In dem Beitrag muss es Milchsäuremethylester statt Methylmilchsäure heißen.



MPI FÜR BIOPHYSIKALISCHE CHEMIE / MERVE EVREN

## CHRONOBIOLOGIE

### Wirkstoff dreht an der inneren Uhr

■ Wenn wir im Flugzeug mehrere Zeitzonen durchreisen, verliert unser Organismus für eine Weile den gewohnten Rhythmus. Viele Körperfunktionen wie Herzschlag, Hormonhaushalt oder das Schlafbedürfnis werden von einer inneren Uhr gesteuert. In den Organen existiert ein ganzes Räderwerk dieser internen Taktgeber, mit dem Hypothalamus als Koordinator. Beim Jetlag verlieren sie nicht nur vorübergehend die Synchronisation mit dem realen Tag-Nacht-Rhythmus, sondern geraten auch durcheinander: Die Uhren einzelner Organe stellen sich unterschiedlich schnell um.

Das entdeckte nun Gregor Eichele, Leiter der Abteilung Gene und Verhalten am

MPI für biophysikalische Chemie (Göttingen) bei der Untersuchung von Mäusen mit defekter Nebennieren-Uhr. Diese hatten weniger Probleme, sich einem veränderten Tag-Nacht-Rhythmus anzupassen. Daraufhin manipulierte der Forscher bei gesunden Nagern mit dem Wirkstoff Metyrapon, einem Kortikoidhemmer, die tageszeitabhängige Ausschüttung des Hormons Kortikosteron, das dem menschlichen Cortisol entspricht. Dadurch konnte er die Mäuse-Uhr sowohl vor- als auch zurückdrehen.

Eichele hält die besonders beharrliche Nebennieren-Uhr für den eigentlichen Verursacher von Jetlag. Seiner Ansicht nach drosselt sie die Anpassungsgeschwindigkeit des Hypothalamus, um sporadische Schwankungen abzupuffern. Sonst könnte etwa schon die Abdunklung im Kino das Körperuhrwerk verstellen.

*The Journal of Clinical Investigation, Bd. 120, S. 2600*

**Bei weiten Flugreisen kommt es zum Jetlag, weil die innere Uhr nicht mehr mit dem äußeren Tag-Nacht-Rhythmus übereinstimmt.**

## MATERIALFORSCHUNG

### Chinesische Mauer – stabil dank Klebreis

■ Die Beständigkeit der chinesischen Mauer beruht wesentlich auf den besonderen Eigenschaften eines Getreides: Vor 1500 Jahren vermengten Bauarbeiter jenen Klebreis, der bis heute das Hauptnahrungsmittel in Asien ist, als angedickte Suppe mit ihrem Kalkzement. Diese Mischung hält immer noch viele imposante Pagoden, Paläste und eben auch das berühmteste Bauwerk im Reich der Mitte zusammen: die Große Mauer.

Was verleiht diesem Mörtel seine besondere Festigkeit und Robustheit, so dass die damit errichteten Bauwerke über Jahrtausende Wind und Wetter und sogar starken Erdbeben widerstanden? Bingjian Zhang und sein Team von der Zhejiang University in Hangzhou sind dieser Frage nun mit analytischen Methoden auf den Grund gegangen.

Ihre Antwort: Bei dem alten Baustoff handelt es sich um ein frühes Verbundmaterial, das aus einer organischen und einer anorganischen Komponente zusammenge-

setzt ist: Kalziumkarbonat und Amylopektin. Und genau dieses Amylopektin, ein Polysaccharid, das in Reis und vielen anderen stärkehaltigen Produkten vorkommt, beschreibt Zhang als entscheidende Komponente. Es habe das Wachstum der Kalziumkarbonat-Kristalle kontrolliert,

so dass sich eine kompakte Mikrostruktur bildete. Einem ähnlichen Verbund, in dem allerdings Proteine die Rolle des Amylopektins übernehmen, ist es auch zu verdanken, dass Knochen viel bruchfester sind als Keramik.

*Accounts of Chemical Research, Bd. 43, S. 936*



FOTOLIA / JONAS GINTER

**Liegt es am Klebreis im Mörtel, dass die chinesische Mauer heute noch steht?**

## Tang vergiftet Korallen

■ Weltweit gehen Anzahl und Größe der Korallenriffe dramatisch zurück. Die Gründe dafür sind vielfältig. Als Hauptursache gilt die globale Erwärmung. Daneben vermuten Meeresbiologen schon seit Längerem, dass Seetang, der sich zunehmend in Riffgebieten ausbreitet, die Korallen verdrängt. Mark E. Hay und Douglas B. Rasher vom Georgia Institute of Technology in Atlanta entdeckten nun, dass manche Meerespflanzen die festsitzenden Riffbewohner sogar gezielt mit Kontaktgiften attackieren.

Die Forscher untersuchten, wie sich zwei Korallenarten aus dem Karibischen Meer und dem Pazifik entwickeln, wenn daneben verschiedene Tange aus ihrer Heimat wachsen. Die Effekte waren teils dramatisch. Einige Meeresalgen benötigten nur zwei Tage, um die Bereiche der Korallen absterben zu lassen, zu denen sie direkten Kontakt hatten. Bei anderen dauerte es drei Wochen, bis die ersten Schäden auftraten. Insgesamt ließen fünf von sieben Tangarten die karibische Koralle (*Porites cylindrica*) und drei von acht das Gegenstück aus dem Pazifik (*Porites porites*) ausbleichen. Dieses Ergebnis konnten die Forscher reproduzieren, indem sie nur den fettlöslichen Extrakt der Algen auf die Blumentiere auftrugen.

Tange sind zwar sicher nicht der einzige Grund für das weltweite Korallensterben. Vermehren sie sich jedoch zu stark, könnten sie insbesondere die Regeneration der Riffe behindern. Hay und Rasher betonten, welche ungute Rolle die Überfischung in diesem Zusammenhang spielt: Fehlen die Weidetiere, können sich die Meerespflanzen unkontrolliert vermehren und die Korallen gefährden.

PNAS, Bd. 107, S. 9683



GEORGIA TECH PHOTO

Forscher ließen Korallen auf Betonbrocken in unmittelbarer Nachbarschaft von Tangarten aus dem heimatischen Lebensraum der Blumentiere wachsen.

## ELEKTRONIK

### Nanostickkunst mit heißer Nadel

■ Graphen zählt zu den großen Hoffnungsträgern im Nanobereich. Als Maschendraht aus wabenartig verknüpften Kohlenstoffatomen ist es der dünnste bekannte elektrische Leiter überhaupt. Aus ihm sollten sich deshalb auch die kleinsten denkbaren elektronischen Schaltkreise fertigen lassen. Bis jetzt fehlt jedoch eine geeignete Methode, entsprechende Graphen-Nanostrukturen im großen Stil zu erzeugen.

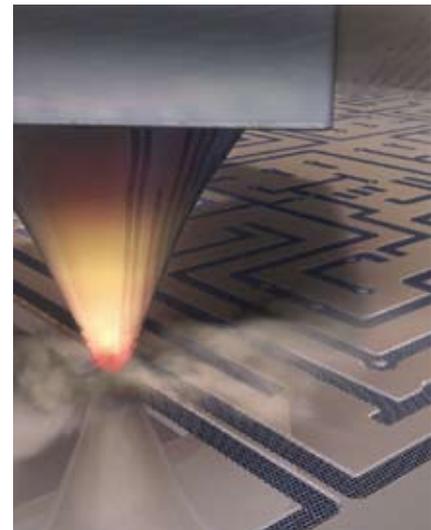
Dem sind Elisa Riedo vom Georgia Institute of Technology in Atlanta (Georgia) und ihre Kollegen nun ein gutes Stück nähergekommen – auf einem Umweg. Als Ausgangsmaterial wählten sie statt des Graphens nämlich dessen Oxid. Es ist zwar ein Nichtleiter, lässt sich aber wesentlich einfacher in großen Mengen gewinnen. Um Schaltkreise darauf anzubringen, führte das Team um Riedo die extrem feine Spitze eines

Rasterkraftmikroskops, die zuvor erhitzt worden war, über die Oberfläche der Folie. Wo sie das Material berührte, gab es den Sauerstoff ab und verwandelte sich in leitfähiges Graphen. So konnten die Forscher nach Belieben zwölf Nanometer schmale Leiterbahnen auf die Unterlage zeichnen.

Riedos Kollege Paul Sheehan vom U.S. Naval Research Laboratory in Washington glaubt bereits an einen Durchbruch bei der kommerziellen Erzeugung von Nanoschaltkreisen. Die Methode erfülle alle nötigen Voraussetzungen. Sie sei sehr schnell, erfordere nur einen Arbeitsschritt und verursache keinen Materialverschleiß. Sheehans Kollege Walt de Heer sieht noch eine andere Einsatzmöglichkeit: die Untersuchung elektrischer Signale in lebenden Zellen mittels biokompatibler Graphenleitungen.

Science, Bd. 328, S. 1373

Die erhitzte Sonde eines Rasterkraftmikroskops reduziert Graphenoxid und erzeugt so in einem Arbeitsgang schnell und zuverlässig nur zwölf Nanometer breite Leiterbahnen.



UNIVERSITY OF ILLINOIS AT URBANA-CHAMPAIGN

## RADIOKARBONDATIERUNG

## Genauere ägyptische Chronologie

■ Trotz vieler Schriftquellen ist die altägyptische Chronologie keineswegs in Stein gemeißelt. Während die relative zeitliche Einordnung der Ereignisse beispielsweise anhand der Königslisten ziemlich präzise gelingt, sind absolute Zeitangaben noch immer schwierig. Ein Team um Christopher Bronk Ramsey von der University of Oxford (England) hat nun mit Radiokarbondatierungen für ein Stück mehr Klarheit gesorgt. Die Forscher analysierten Überreste von 211 kurzlebigen Pflanzen, die sich – etwa als Grabbeigaben – direkt der Regierungszeit eines bestimmten Pharaos zuordnen ließen. Die Proben in Form von Samen, Bastkörben, Kleiderstücken oder Früchten stammten aus Museumssammlungen.

Die Ergebnisse bestätigen in vielen Fällen die gängige Chronologie oder stützen einen von mehreren bereits diskutierten Alternativvorschlägen. Teils ergeben



EZRA MARCUS, RECANATI INSTITUTE OF MARITIME STUDIES, UNIVERSITY OF HAIFA

**Schriftquellen wie die Lahunpapyri aus der Zeit um 1800 v. Chr. – hier ein Fragment – liefern Fixpunkte für die altägyptische Chronologie, aber keine absoluten Daten.**

sich aber auch kleinere Abweichungen: So wurde der Beginn der Regentschaft des altägyptischen Pharaos Djoser, der die nach ihm benannte Stufenpyramide bauen ließ, bislang auf den Zeitraum zwischen 2667 und 2592 v. Chr. datiert; die neuen Untersuchungen liefern dagegen die Spanne von 2691 bis 2625 v. Chr. Auch den Beginn – und damit alle weiteren Daten – des Neuen Reichs verlegen sie um einige Jahrzehnte zurück: Frühestens 1570 und spätestens 1544 v. Chr. soll es begonnen haben und nicht, wie bislang vermutet, im Jahr 1550 oder gar erst 1539 v. Chr.

*Science, Bd. 328, S. 1489 und 1554*

## KREBSFORSCHUNG

## Helicobacter – harmlos ohne Dreh

■ Magengeschwüre sind nicht nur unangenehm, sondern können sich auch zu bösartigen Tumoren entwickeln. Lange führten Mediziner das Leiden vornehmlich auf Stress oder scharfes Essen zurück. Doch dann erwies sich das Bakterium *Helicobacter pylori* als wahrer Verursacher.

Schon länger bestand die Vermutung, dass sich der Keim nur auf Grund seiner markanten korkenzieherartigen Form in der Magenschleimhaut einnisten und so im sehr sauren Milieu des Verdauungsorgans

überleben kann. Die Mikrobiologin Nina Salama hat diese These nun gemeinsam mit Kollegen vom Fred Hutchinson Cancer Research Center in Seattle (US-Bundesstaat Washington) erstmals experimentell untermauert. Das Team erzeugte Mutanten von *Helicobacter*, denen bestimmte Zellwandproteine fehlten, die für die gekrümmte Form des Bakteriums verantwortlich sind. »Alle unsere Mutanten hatten es bei der Besiedelung des Magens schwer und wurden von normalen, korkenzieherförmigen Vertretern verdrängt«, erklärt Salama.

Statistisch hat jeder zweite Mensch eine *Helicobacter*-Infektion. Meist bleibt sie symptomlos. Bei fast jedem zehnten Betroffenen nimmt sie jedoch einen aggressiven Verlauf und verursacht Entzündungen und Geschwüre bis hin zu Karzinomen. Die übliche Behandlung gestaltet sich auf Grund zunehmender Antibiotikaresistenzen immer schwieriger. »Wenn wir verstehen, wie *Helicobacter* den Magen besiedelt, können wir über Therapien nachdenken, die eine Infektion von vornherein verhindern«, meint Salama.

*Cell, Bd. 141, S. 822*

## LANDWIRTSCHAFT

## Bt-Toxin begünstigt neue Schädlinge

■ Die Endotoxine des Bakteriums *Bacillus thuringiensis* (Bt) töten die Larven diverser Insektenarten und sind daher weit verbreitete Pflanzenschutzmittel. Bei bestimmten Kulturpflanzen wie Mais oder Baumwolle wurde das Bt-Gen ins Erbgut eingefügt. Der eingebaute Fraßschutz macht chemische Schädlingsbekämpfungsmittel überflüssig.

Doch was das eine Insekt tötet, verschafft dem anderen einen Vorteil. Forscher um Kongming Wu von der chinesischen Akademie der Agrarwissenschaften in Peking fanden nun heraus, dass auf Feldern mit Bt-Baumwolle in China Weichwanzen, die das Gift tolerieren, den Platz der Larven der Baumwollleule einnehmen.



KONGMING WU, CHINESISCHE AKADEMIE DER AGRARWISSENSCHAFTEN PEKING

**Solche Weichwanzen vermehren sich auf Feldern mit Bt-Baumwolle in China an Stelle der Baumwollleule und könnten sich zu einer neuen Plage entwickeln.**

Die Wissenschaftler untersuchten zehn Jahre lang Baumwollfelder in sechs Regionen auf ihren Schädlingsbefall. Dabei entdeckten sie, dass sich auf Feldern mit Bt-Baumwolle zunehmend Weichwanzen ausbreiteten. Davon waren aber auch die umliegenden landwirtschaftlichen Flächen betroffen. Da die Weichwanzen ein breites Pflanzenspektrum befallen, wandern sie von den Baumwollfeldern auf Plantagen mit anderen Nutzpflanzen ab und verursachen dort ebenfalls Ernteverluste. Bisher galten sie in China als unbedeutende Schädlinge. Werden künftig jedoch mehr Bt-Pflanzen angebaut, könnten sie sich – ebenso wie andere, zuvor wenig beachtete Insekten – zu einer Plage entwickeln.

*Science, Bd. 328, S. 5982*



**Mutanten von *Helicobacter pylori* ohne die Korkenzieherform können sich nicht mehr in der Magenschleimhaut ansiedeln.**

NINA R. SALAMA UND LAURA K. SCURIO, FRED HUTCHINSON CANCER RESEARCH CENTER



## Unerschöpfliche Giftquelle im Regenwald

Auch abseits der riesigen Amazonasregion ist Brasilien ein Eldorado für Biologen. Wie viele Tierarten hier noch der Entdeckung harren, illustriert das Programm BIOTA/FAPESP des Staates São Paulo, das die Charakterisierung, Bewahrung und nachhaltige Nutzung der einheimischen Fauna und Flora zum Ziel hat. In den zehn Jahren seit seinem Start wurden in dem Staat im Südosten Brasiliens mehr als 1200 neue Tierarten entdeckt. Zu den jüngsten Beispielen zählen sechs Frösche – darunter diese beiden aus dem Regenwald der Serra do Mar.

*Brachycephalus pitanga* (unten) ist nur daumennagelgroß, tagaktiv und extrem giftig. Er haust im feuchten, vermodernden Laub am Boden. Sein Artname leitet sich von dem Wort für »rötlich« aus der einheimischen Tupí-Guaraní-Sprache ab. Das zweite Foto (oben) zeigt einen neuen, noch nicht beschriebenen Vertreter aus der Gattung der Makifrösche (*Phyllomedusa*). Das nachtaktive Tier lebt auf Bäumen und ist ebenfalls äußerst giftig.



ASTROPHYSIK

## Supernova in 3-D

Erstmals ist es gelungen, das Sterben eines massereichen Sterns dreidimensional zu simulieren. Die Rechnungen zeigen, dass gewaltige Umwälzströmungen am Anfang der Explosion die bei Supernova-Überresten beobachteten Asymmetrien und Dichteunterschiede hervorbringen.



BÖNTGEN: NASA/CXC/SAO; OPTISCH: NASA/STSCI; INFRAROT: NASA/JPL/CALTECH/STEWART OBSERVATORY, O. KRAUSE ET AL.

Von Hans-Thomas Janka

Massereiche Sterne enden in einer fulminanten Explosion als Supernovae. Während ihres kurzen Daseins, in dem sie sich strahlend verausgaben, läuft in ihrem Innern eine Serie nuklearer Brennphasen ab, bei denen leichtere Kerne zu immer schwereren Elementen verschmelzen. Das Ergebnis ist eine Art Zwiebelstruktur: In kugelsymmetrischen Schalen ordnet sich von außen nach innen jeweils die »Asche« der vorangegan-

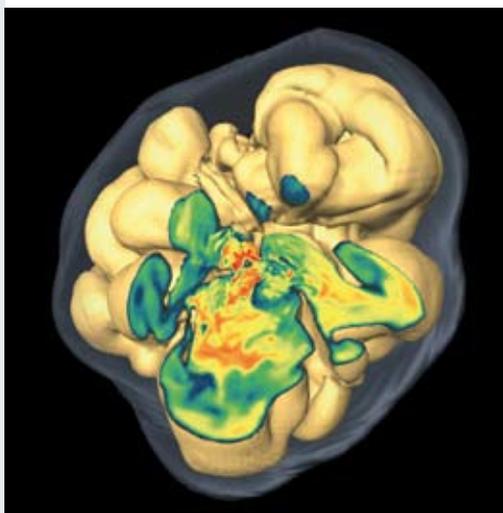
genen Brennphasen an, mit Eisen als schwerstem Element im Zentrum.

Wenn der nukleare Treibstoff schließlich verbraucht ist und der Gasdruck im Innern nicht mehr gegen die Schwerkraft ankommt, wird der Stern instabil. Sein Kern kollabiert dann unter seinem eigenen Gewicht innerhalb von Sekundenbruchteilen zu einem äußerst kompakten Gebilde, das im Endzustand fast nur noch aus Neutronen besteht. Ein kleiner Teil der dabei freigesetzten gravitativen Bindungsenergie sprengt die äußeren

Schichten ab, so dass sie mit extrem hoher Geschwindigkeit expandieren.

Die Folge ist eine gewaltige Supernova-Explosion, welche die verbliebene Sternmaterie im umgebenden Raum verteilt. Die auseinanderstiebenden heißen, gasförmigen Überreste erinnern allerdings nur in seltenen Fällen an die Kugelform des Ausgangsobjekts. Meist haben sie eine asymmetrische Gestalt und sind zerfranst in größere und kleinere faserige Strukturen mit klumpenartigen Verdichtungen sowie Bereichen geringerer Materiekonzentration. Die Astronomen erklärten das lange Zeit mit der Annahme, die ausgeschleuderten Stern gases würden auf einen vor der Explosion abgeblasenen stellaren Wind ungleichmäßiger Dichte stoßen. Eine andere Hypothese war, dass die Vorderfront der Explosionswolke durch eine gasdynamische Instabilität aufbricht und im Lauf von Jahrhunderten stark zerfleddert.

Die Supernova (SN) 1987A, die in der Nacht zum 24. Februar 1987 in der Großen Magellanschen Wolke erstrahlte und als erste seit 400 Jahren mit bloßem Auge sichtbar war, erzwang aber eine unerwartete Korrektur der gängigen Vorstellungen. Weil das Ereignis »nur« 170 000 Lichtjahre entfernt stattfand



LEONHARD SCHECK, MPI FÜR ASTROPHYSIK

Dieser Schnappschuss einer dreidimensionalen Computersimulation zeigt die Situation im kollabierenden stellaren Kern wenige zehntel Sekunden nach Beginn der Supernova-Explosion. Im Zentrum hat sich ein Neutronenstern gebildet (kleines, graues, dreieckiges Kugelsegment), der riesige Mengen Neutrinos abstrahlt. Diese heizen das umgebende stellare Plasma auf, so dass es heftig brodelnd (die Temperatur nimmt von blau über grün und gelb nach rot zu). Der transparente, graublau markiert die Stoßfront der Explosion und hat einen mittleren Radius von rund 2000 Kilometern. Die beigefarbene Oberfläche ist eine Isotherme, an der überall die gleiche, relativ niedrige Temperatur herrscht.

Der Kassiopeia-A-Nebel ist der gasförmige Überrest einer Supernova-Explosion, deren Licht die Erde etwa um das Jahr 1680 erreichte. Die Asymmetrien und faserigen Strukturen in diesem aus Aufnahmen im Röntgen-, sichtbaren und Infrarotbereich zusammengesetzten Falschfarbenbild sind bei Klumpungs- und Mischvorgängen entstanden, die das Team des Autors am Max-Planck-Institut für Astrophysik nun erstmals in allen drei Raumdimensionen simuliert hat.

und moderne astronomische Instrumente eine Beobachtung in vielen Wellenlängenbereichen des elektromagnetischen Strahlungsspektrums ermöglichen, ließen sich alle Entwicklungsstadien der Explosion des Vorläufersterns, der rund die 20-fache Sonnenmasse hatte, genau verfolgen.

Überraschenderweise registrierten Detektoren auf Satelliten schon nach wenigen Wochen hochenergetische Röntgen- und Gammastrahlung. Sie entsteht beim Zerfall radioaktiver Atomkerne, hauptsächlich Nickel-56, das sich über Kobalt-56 in Eisen-56 umwandelt. Die dabei freigesetzte Energie heizt das expandierende Supernova-Gas über Jahre auf und lässt es hell leuchten.

### Geisterteilchen heizen Sternplasma auf

Nickel-56 und andere radioaktive Nuklide entstehen allerdings ganz zu Beginn der Explosion in unmittelbarer Nähe des frisch gebildeten Neutronensterns. Gemäß den kugelsymmetrischen Modellen von Supernova-Explosionen sollte die radioaktive Strahlung daher erst nach vielen Monaten entweichen, wenn sich das expandierende Gas so weit ausgedünnt hat, dass es den Blick auf die innersten Schichten freigibt.

Bei SN 1987A war das offensichtlich nicht der Fall. Deshalb müssen Mischvorgänge stattgefunden haben, welche die Zwiebschalenstruktur des sterbenden Sterns schon während der Explosion zerstörten. Auch andere Beobachtungen wiesen in diese Richtung. Die Form der Lichtkurve von SN 1987A, das heißt der zeitliche Verlauf ihrer Helligkeit, ließ sich nur erklären, wenn Nickel in die bereits vor der Explosion abgestoßene Wasserstoffhülle und Wasserstoff von dort zurück ins Innere des explodierenden Sterns gelangt

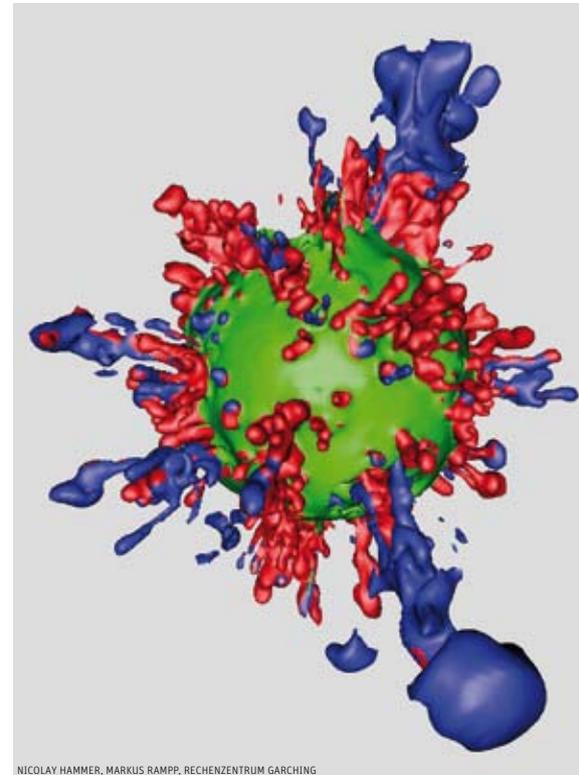
war. Außerdem deuteten rotverschobene Spektrallinien auf Nickelklumpen, die mit mehr als 4000 Kilometern pro Sekunde durch die viel langsamere Wasserstoffwolke pflühten.

Nach alledem müssen mehrdimensionale hydrodynamische Effekte, also Umwälzströmungen, schon in der frühesten Phase der Explosion aufgetreten sein und die Ursprungsregion der radioaktiven Nuklide erfasst haben. Für die Theoretiker hieß das, dass sie die Supernova nicht mehr wie bisher in nur einer Raumdimension simulieren konnten.

Mehrdimensionale Simulationen eines derart komplexen Ereignisses sind aber bis heute eine gewaltige Herausforderung und gehen an die Grenze der Leistungsfähigkeit selbst modernster Supercomputer. Die Modelle müssen komplizierte Mikrophysik berücksichtigen. Insbesondere Neutrinos – geisterhafte Elementarteilchen, die nur auf die schwache Kernkraft ansprechen – spielen zu Beginn der Explosion eine große Rolle. Im anfangs extrem heißen Neutronenstern werden sie in riesiger Zahl erzeugt und tragen über 99 Prozent seiner gravitativen Bindungsenergie fort. Ihre Wechselwirkung mit dem dichten Sternplasma gilt es in den Modellen zu beschreiben.

Neutrinos übertragen Energie vom Neutronenstern auf die umgebenden Schichten, wodurch sie vermutlich deren Kollaps stoppen und die Explosion einleiten. Ganz sicher ist das allerdings noch nicht. Immerhin sprechen auch neueste zweidimensionale Computermodelle dafür. Im Einklang mit den Erkenntnissen über SN1987A zeigen sie, dass der Energieübertrag durch Neutrinos zwangsläufig Umwälzströmungen auslöst, die den Heizeffekt der Geisterteilchen sogar noch verstärken. Wie Suppe in einem Topf auf der Herdplatte kommt dabei das von Neutrinos erhitze Sternplasma in heftige Wallung. Während kühlere Materie zum Neutronenstern absinkt, steigt brodelndes, heißes Gas in expandierenden Blasen auf. Diese beschleunigen die Stoßwelle der Explosion und treiben sie in Richtung Sternoberfläche.

Die ungestümen Materiebewegungen erklären, warum die Explosionswolke schon ganz am Anfang von der Kugelform abweicht. Aber können sie auch die Ursache der späteren Anisotropien und Inhomogenitäten sein, die bei SN 1987A



NICOLAY HAMMER, MARKUS RAMPP, RECHENZENTRUM GARCHING

Rund 2,5 Stunden nach Beginn der Supernova-Explosion hat die Stoßfront in der dreidimensionalen Computersimulation die Sternoberfläche (nicht gezeigt) gerade durchdrungen. Farbiger dargestellt sind die am weitesten außen liegenden Orte, an denen Kohlenstoff (grün), Sauerstoff (rot) und Nickel (blau) in einer bestimmten Häufigkeit vorliegen. Das Metall wurde, wie man sieht, in großen, klumpen- und fingerartigen Strukturen mit hoher Geschwindigkeit aus dem Supernova-Kern bis in die Wasserstoffhülle des sterbenden Sterns verfrachtet.

und anderen seither gesichteten Supernovae beobachtet wurden? Nur mit dreidimensionalen Computermodellen lässt sich diese Frage beantworten.

Am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching ist es dem Doktoranden Nicolay J. Hammer, meinem Kollegen Ewald Müller und mir erstmals gelungen, solche dreidimensionalen Berechnungen durchzuführen. Dabei konnten wir die Explosion von den ersten tausendstel Sekunden bis zum Moment des Ausbruchs der Stoßfront aus der Sternoberfläche Stunden später lückenlos verfolgen.

Unsere Simulationen starteten mit dem Energieübertrag durch Neutrinos, wobei wir annahmen, dass er stark genug ist, um die Explosion des Sterns zu bewir-

ken. Dreidimensionale Modelle der ersten Sekunde nach dem Beginn des Kollapses, die alle physikalisch relevanten Details berücksichtigen, sind wegen des enormen Rechenzeitbedarfs noch nicht möglich.

Die schnellsten aufsteigenden Blasen dehnen sich bei unseren Simulationen anfangs mit Spitzenwerten von über 10000 Kilometern pro Sekunde aus. So erreicht die nickelhaltige Materie der heißen Gasblasen schließlich in Form dichter Klumpen und lang gestreckter Finger die dünne Wasserstoffhülle des sterbenden Sterns. Dort bewegen sich die schnellsten »Nickelgeschosse« trotz der Abbremsung unterwegs immer noch mit mehr als 4000 Kilometern pro Sekunde, was den bei SN 1987A beobachteten Geschwindigkeiten entspricht.

Frühere zweidimensionale Rechnungen, bei denen alle Strukturen wegen der angenommenen Achsensymmetrie ring-

förmige Gestalt hatten, ergaben wesentlich geringere Werte. In der dreidimensionalen realen Welt sind die Objekte jedoch eher pilz- und kugelartig. Dadurch haben sie ein günstigeres Volumen-zu-Querschnitt-Verhältnis, weshalb das Umgebungsmedium ihre Bewegung weit weniger stark hemmt.

### Tiefer Blick in sterbende Sterne

Unsere Berechnungen belegen damit erstmals sowohl grundsätzlich als auch quantitativ, dass bei Supernovae zu Beginn der Explosion von Neutrinos ausgelöste Umwälzströmungen die beobachteten Asymmetrien und die Durchmischung von Materie aus Sternhülle und -kern erklären können. Noch sind die Computermodelle aber nicht für spezielle Fälle wie SN 1987A oder den Kassiopeia-A-Überrest optimiert worden. Indem wir eine größere Zahl von dreidimensionalen

Simulationen unter abgewandelten Bedingungen durchführen, hoffen wir, durch Vergleich der Ergebnisse mit den Messdaten mehr über die noch immer rätselhaften Vorgänge zu Beginn der Explosion zu lernen.

Das ist weiterhin nötig. Zwar versprechen moderne Detektoren für Neutrinos und Gravitationswellen einen direkten Blick ins tiefe Innere sterbender Sterne. Doch sind die von ihnen registrierten Signale so schwach, dass ihr Nachweis auf absehbare Zeit nur bei einer Supernova in der Milchstraße möglich sein wird; die aber könnte noch Jahrzehnte, vielleicht gar Jahrhunderte auf sich warten lassen.

**Hans-Thomas Janka** ist Wissenschaftler am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching und Privatdozent an der Technischen Universität München.

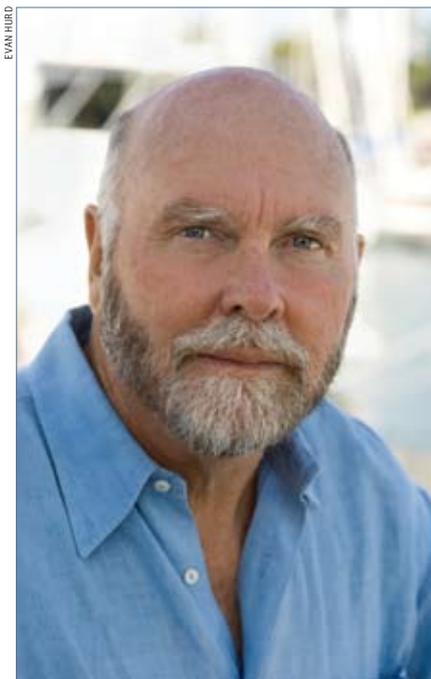
**SYNTHETISCHE BIOLOGIE** 🎧 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Erstes künstliches Lebewesen?

Der jüngste Coup des Genpioniers Craig Venter machte wieder einmal Schlagzeilen.

»Erste synthetische Zelle erzeugt« oder »Wissenschaftler spielen Gott« titelten die Medien.

Was steckte wirklich dahinter?



Möchte Leben aus der Retorte erschaffen: J. Craig Venter.

Von Michael Groß

Die Pionierleistungen von J. Craig Venter auf dem Gebiet der Genforschung sind unumstritten. So hat die Mitte der 1990er Jahre von ihm eingeführte Schrotschuss-Methode die Sequenzierung der ersten Genome von zellulären Lebewesen erheblich beschleunigt (Spektrum der Wissenschaft 11/1996, S. 32). Dadurch übernahm er ebenso einflussreiche wie umtriebige Wissenschaftler, der nach Jahren an den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) 1992 sein eigenes, privat finanziertes Institute for Genomic Research gründete, auf diesem Sektor die Führung.

Wenig später wendete er sich der Sequenzierung des menschlichen Erbguts zu, wofür er 1998 die Firma Celeron Genomics ins Leben rief. So kam es zu dem berühmten Wettrennen zwischen seiner kommerziell betriebenen Forschung und dem öffentlich finanzierten

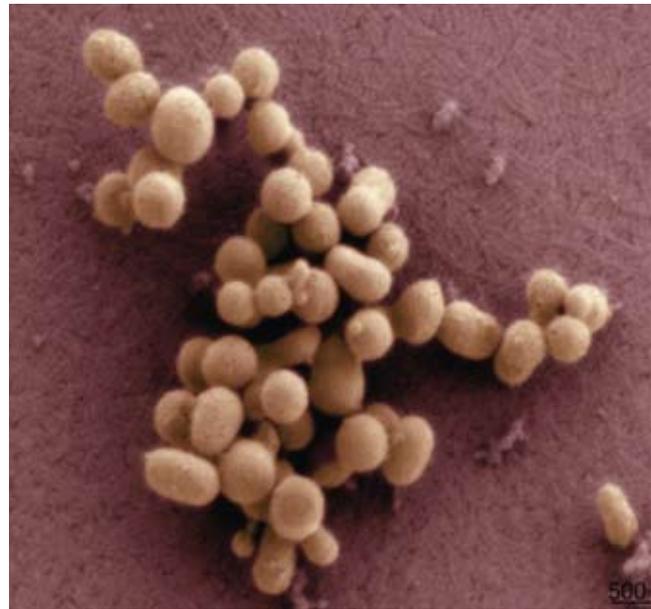
internationalen Humangenomprojekt, das letztlich in einem Unentschieden endete – ein eindrucksvoller Erfolg für den Außenseiter, der viel später gestartet war und die titanische Aufgabe im Alleingang bewältigte.

Genome schneller entziffern zu können als die Konkurrenz reichte Venter jedoch nicht. Schon vor der Jahrtausendwende propagierte er die Erzeugung von künstlichem Erbmateriale als sein eigentliches Ziel. Er wolle DNA nicht nur lesen, sondern auch schreiben, um neuartige, patentierbare Mikroben zu erzeugen. Die ließen sich dann gezielt auf die Lösung von drängenden Problemen wie etwa der Erzeugung von Treibstoffen aus dem als Klimagas berüchtigten Verbrennungsprodukt Kohlendioxid abrichten.

Dieses Ziel passte in einen breiteren Trend, der inzwischen unter dem Schlagwort »synthetische Biologie« bekannt geworden ist. Allerdings kam Venter dabei nicht ganz so schnell voran wie bei der Sequenzierung zahlreicher Genome von



TOM DIERINCK UND MARK ELLISMAN, NATIONAL CENTER FOR MICROSCOPY AND IMAGING RESEARCH, IUCS



Mikroben und Menschen, die er nebenher betrieb. An die Synthese einer wirklich neuen Art war ohnehin nicht zu denken. Schließlich verstehen die Biologen bisher nur einen winzigen Bruchteil der komplizierten regulatorischen Netzwerke, welche die Gene einer Spezies miteinander verknüpfen. Für Venter und seine Gesinnungsgenossen blieb als ehrgeizigstes kurzfristig erreichbares Ziel also nur, das Genom einer existierenden Art in geringfügig abgewandelter Form zusammenzubauen und es dann in eine lebende Zelle einzuschleusen.

Als Modell diente zunächst das Erbgut des Bakteriums *Mycoplasma genitalium*. Es ist nicht nur das kleinste bisher bekannte Genom eines frei lebenden Organismus, sondern zählte auch zu den ersten beiden, die Venter vollständig entschlüsselt hatte. Im Jahr 2008 gelang es dem Pionier und seinen Mitarbeitern an einem weiteren von ihm gegründeten privaten Forschungsinstitut namens JCVI (J. Craig Venter Institute) in Rockville (Maryland), eine im Labor synthetisierte Variante dieses Erbguts sozusagen als Gast in einer Hefezelle unterzubringen, wo es mitsamt dem doppelt so großen Hefegenom kopiert und weitervererbt wurde. Allerdings blieb es stumm und wirkte sich in keiner Weise auf die Eigenschaften seines Wirts aus.

Das eigentliche Ziel, ein Bakterium mit einem synthetischen Erbgut auszustatten, erreichte Venter mit *M. genitalium* nicht. Mit der Begründung, dieser Organismus wachse zu langsam – ein Nachteil, der freilich von Anfang an be-

kannt war –, wechselten er und seine Mitarbeiter deshalb nach dem Teilerfolg 2008 zu einer verwandten Mikrobe, die Milchdrüsenentzündung bei Ziegen auslöst, für den Rest der Tierwelt aber harmlos ist: *Mycoplasma mycoides*. Eine synthetische Kopie von deren fast doppelt so großem Erbgut zu erzeugen, stellte aber eine noch größere Herausforderung dar.

### Fataler Fehler beim Abschreiben

Das betraf vor allem die Genauigkeit beim Entziffern und Reproduzieren der Erbinformation. Wie ein Schüler, der seine Klassenarbeit beim Nachbarn abschreibt, ohne sie wirklich zu verstehen, mussten Venters Mitarbeiter mit extremer Sorgfalt vorgehen, um sicherzustellen, dass nicht der ganze Text durch einen unbemerkten Fehler sinnlos wird. Tatsächlich verloren die Forscher nach eigenem Eingeständnis mehrere Wochen, weil eine einzelne falsch gelesene Base ein wichtiges Gen ruinierte.

Als Venter seine ersten Bakterien sequenzierte, galt eine Fehlerquote von 0,1 Promille als gutes Ergebnis, doch bei dieser Genauigkeit wäre immer noch mit 110 Lesefehlern in dem 1,1 Millionen Buchstaben umfassenden *Mycoplasma*-Genom zu rechnen gewesen. Die Forscher mussten also die Lesegenauigkeit um mehr als den Faktor 100 verbessern, bevor sie ans Abschreiben gehen konnten. Tatsächlich gelang es ihnen, die Abfolge der genetischen Buchstaben im Erbgut von *M. mycoides* mit der nötigen, zuvor unerreichten Präzision zu ermitteln.

**Die neu erzeugten synthetischen Bakterien können sich ganz normal teilen (links) und bilden Kolonien wie ihre natürlichen Vorbilder (rechts). Die beiden elektronenmikroskopischen Aufnahmen wurden künstlich eingefärbt.**

Die gesamte Sequenz unterteilten die Forscher dann im Computer systematisch in Tausenderblöcke, die sie bei einer Firma auf chemischem Weg synthetisieren ließen. Diese Blöcke, die am Ende kurze, überlappende Stücke trugen, führten sie in Hefezellen ein, um sie zusammenschweißen zu lassen. Die Anweisung dazu übermittelten zusätzlich angebrachte genetische Signale. Sie aktivierten das DNA-Reparatursystem der Hefezellen, das normalerweise Brüche im Erbgut wieder schließt. Die Blöcke enthielten außerdem einige frei erfundene Sequenzen als Wasserzeichen, mit dem sich das synthetisierte Genom jederzeit leicht vom natürlichen Vorbild unterscheiden ließ.

Mit einer numerischen Präzision, die das Synthetische ihres Vorgehens betont, hangelten sich die Forscher in Zehnerpotenzen von den Tausenderblöcken zu dem Millionen-Basen-Genom hoch, wofür sie außer Hefen auch Bakterien als Helfer einsetzten: Jeweils zehn der synthetischen Stränge verknüpften sie zu einem 10 000-Basen-Strang, zehn davon zu einem Stück mit 100 000 Basen und elf davon schließlich zum kompletten Genom. Dieses pflanzten sie am Ende in ein Bakterium der Art *Mycoplasma capri-*

colum ein, das mit dem Ursprungsorganismus verwandt ist.

Zunächst scheiterte die Übertragung allerdings. Wie sich zeigte, baute das Zielbakterium die Fremd-DNA kurzerhand ab. Weitere Untersuchungen deckten den Grund dafür auf. Beide *Mycoplasma*-Arten schützen ihre DNA mit Methylgruppen in bestimmten Positionen. Dem synthetischen, in Hefen kultivierten Erbgut fehlte dieser Schutz, so dass es von den Restriktionsenzymen des Wirtsbakteriums verdaut wurde. Nachdem Venter und seine Mitarbeiter diese störenden Enzyme ausgeschaltet hatten, konnten sie schließlich *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn1.0 – so der offizielle Name des neuen Wesens mit dem synthetischen Genom – wie ein normales Bakterium im Labor züchten und untersuchen (*Scienceexpress* 20.5.2010, doi 10.1126/science.1190719).

Aber handelt es sich wirklich um künstliches Leben? Wohl kaum. Was Venters Team mit enormem Aufwand herstellte, ist lediglich eine Variante eines bekannten Bakteriums. Mit etablierten Methoden der Gentechnik hätten die Forscher die wenigen Veränderungen viel leichter einführen können. Und drastischere Neuerungen lassen sich derzeit noch nicht verwirklichen, weil dazu schlicht das tiefer gehende Verständnis selbst einfacher Genome fehlt.

Wollte Venter wirklich »Gott spielen«? Die Antwort ist klipp und klar in seinem Artikel in »Science« nachzulesen. Gleich das erste Wort des Titels gibt Auskunft. Es lautet: »Creation« – was man nicht nur als »Erzeugung« lesen darf, sondern auch als »Schöpfung« im biblischen Sinne.

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

## SOLARPHYSIK

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

# Sonne schiebt ruhige Kugel

Ein ungewöhnlich langes und tiefes solares Minimum befremdet die Astronomen. Was könnte dahinterstecken?

Von John Matson

Grob gesprochen, schwillt die Aktivität der Sonne in einem elfjährigen Zyklus an und ab. Auf dem Höhepunkt dieses Zyklus, also im solaren Maximum, treten besonders viele energiereiche Phänomene auf – etwa Strahlungsausbrüche

(Flares), Protuberanzen oder koronare Massenauswürfe. Im solaren Minimum kehrt dagegen relative Ruhe ein. Einen visuellen Indikator für das momentane Stadium des Zyklus liefern die Sonnenflecken, in denen sich die magnetische Aktivität an der Sonnenoberfläche widerspiegelt. Im solaren Maximum erscheinen sie scharenweise, während sie im Minimum fast oder sogar völlig verschwinden.

Tatsächlich verhält sich unser Mutterstern aber keineswegs so vorhersagbar, wie diese Beschreibung suggeriert. Den Beweis lieferte zum Beispiel das jüngste solare Minimum, das 2008 begann und Anfang dieses Jahres endete. Es dauerte nicht nur ungewöhnlich lange, sondern war auch ausnehmend tief.

**Strahlungsausbrüche (Flares) wie dieser – hier eine Aufnahme im ultravioletten Spektralbereich – waren seit Beginn des jüngsten solaren Minimums Ende 2008 nicht mehr auf der Sonne zu beobachten.**

Sonnenphysiker rätseln immer noch darüber, wie das Auf und Ab der Sonnenaktivität zu Stande kommt. Einsichten in die Ursache der Schwankung würden nicht nur das grundlegende Verständnis der Vorgänge in und auf unserem Zentralgestirn vertiefen, sondern auch bessere Vorhersagen von Sonnenstürmen erlauben, die Stromnetze überlasten oder Satelliten beschädigen können und Astronauten erhöhter Strahlung aussetzen. So ließen sich rechtzeitig Vorkehrungen treffen.

## Ein ungewöhnliches Minimum

Auf der jüngsten Tagung der Amerikanischen Astronomischen Gesellschaft im Mai stellten die Teilnehmer verschiedene Ansätze vor, wie sich die Aktivität der Sonne besser verfolgen und prognostizieren ließe. Aber die endgültige Erklärung für die jüngste ungewöhnlich lange und tiefe Flaute blieben sie schuldig. Einig war man sich nur in der Feststellung, dass es sich um ein ungewöhnliches Minimum gehandelt habe.

Tatsächlich fällt es in vieler Hinsicht aus dem Rahmen, auch wenn die Vergleichsdaten aus der Vergangenheit teils nur wenige Zyklen umfassen oder unvollständig sind. David Hathaway vom Marshall Flight Center der NASA in Huntsville (Alabama) betrachtete die meridionalen Ströme, die sich vom Sonnenäquator zu den Polen bewegen. Sie erreichten, wie er feststellte, während des jüngsten Minimums Rekordgeschwindigkeiten. Hathaway warnt jedoch vor voreiligen Schlüssen, weil analoge Daten bisher nur von wenigen Zyklen vorliegen.

Der relativ langsame solare Strahlstrom, der in mittleren Breiten entspringt und sowohl zum Äquator als auch zu den Polen hin zieht, bietet ein weiteres Fenster in das brodelnde Innere der Sonne. Frank Hill vom National Solar Observatory in Tucson (Arizona) untersuchte die periodischen Änderungen dieses Stroms, die mit dem Beginn und Ende eines Sonnenfleckenzyklus zusammenzufallen scheinen.

Helioseismische Messungen liefern Daten über akustische Schwingungen innerhalb der Sonne. Damit lässt sich die Entwicklung des Strahlstroms schon Tausende von Kilometern unterhalb der Oberfläche verfolgen. Das bietet möglicherweise die Chance, den Zeitverlauf eines Sonnenfleckenzyklus besser vorherzusagen. Noch könne man sich aller-



NASA, GSFC, SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY

dings nicht sicher sein, ob das wirklich gelingt, meint Hill.

Andere Wissenschaftler analysierten per Helioseismologie Minima in den akustischen Schwingungen, die oft mit solaren Minima zusammenfallen. Wieder andere erstellten magnetische Karten der Sonnenoberfläche, um Verschie-

bungen im magnetischen Fluss aufzuspüren.

Als Resümee all dieser Untersuchungen und Ansätze konstatiert Hill vor allem eine Fülle offener Fragen. Nach seinem Gesamteindruck befragt, meint er: »Es freut mich, dass wir alle der Ansicht sind, dass dies ein interes-

santes Minimum ist«, und fährt halb im Scherz fort: »Weniger erfreulich finde ich, dass wir bei keinem der Effekte die geringste Ahnung haben, was letztlich dahintersteckt.«

**John Matson** ist Onlineredakteur bei »Scientific American«.

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

## Das Geheimnis ewigen Lebens

Wissenschaftler haben den Schlüssel zum Jungbrunnen von Strudelwürmern gefunden – und damit ein wichtiges Werkzeug für die Stammzellforschung, die auch dem Menschen ungeahnte Möglichkeiten zur Erneuerung verheißt.

Von Stefanie Reinberger

Planarien, zu Deutsch Strudelwürmer, sind schon merkwürdige Wesen. Wenige Millimeter bis Zentimeter groß, bevölkern sie Süßwasserbiotope aller Art, können sich geschlechtlich und ungeschlechtlich vermehren und sehen irgendwie ein bisschen ulkig aus: ein platter Körper, der an Nacktschnecken erinnert, der Kopf oft rautenförmig verbreitert, und die Pigmente der Sehorgane so angeordnet, dass es aussieht, als ob die Tierchen ein wenig schielen.

Aber ausgerechnet diese seltsamen Zeitgenossen bringen etwas fertig, wovon Menschen nur träumen können. Planarien verfügen über eine schier unbegrenzte Regenerationsfähigkeit. Egal, ob man sie köpft oder zerstückelt, spätestens zwei Wochen nach der rabiaten Behandlung ist aus jedem Teil ein neues Tier entstanden. Das macht die platten Wunderwürmer fast unsterblich. Einzige Bedingung für das Nachwachsen eines neuen Organismus: Das verbliebene Schnipselchen muss wenigstens 10 000 Zellen sowie ein intaktes Stück Haut enthalten.

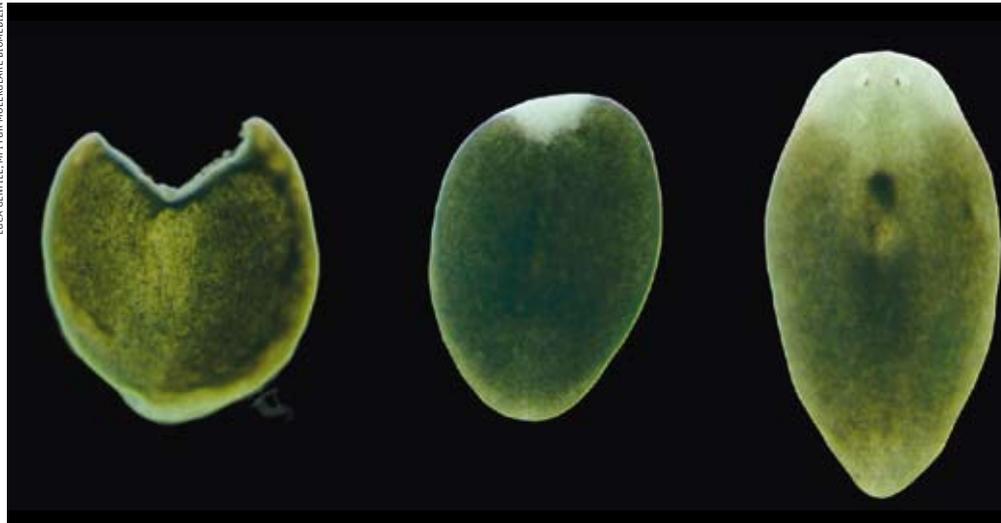
Eine ungewöhnliche Regenerationsfähigkeit zeigen zwar auch andere Tiere. So lassen Hummer verloren gegangene Scheren nachwachsen, und der mittelamerikanische Schwanzlurch Axolotl kann nicht nur Gliedmaßen und Organe, sondern sogar Teile seines Gehirns ersetzen. Was die Planarien vor diesen Meistern der Regenerationskunst auszeichnet, ist jedoch, dass das Ersatzgewebe nicht etwa aus bereits spezialisierten Zellen ent-

spricht. Als Quell neuer Gewebe fungieren bei ihnen vielmehr, wie alle bisherigen Forschungsergebnisse zeigen, so genannte pluripotente Stammzellen. Das sind Zellen, die sich unbegrenzt vermehren und zu sämtlichen Gewebetypen entwickeln können. Diese Tausendsassas finden sich über den ganzen Körper der Planarien verteilt und machen rund 20 bis 30 Prozent ihres Gewebes aus.

Dadurch sollten Strudelwürmer interessante Modellorganismen für die Stammzellforschung abgeben. Davon überzeugte der Biologe Luca Gentile vor einigen Jahren seinen Chef, den bekannten deutschen Stammzellforscher Hans Schöler (Porträt in Spektrum der Wissenschaft 7/2010, S. 34). Und der ermöglichte ihm, am Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin in Münster eine Planarien-Gruppe aufzubauen.

Weil die Stammzellen der Wunderwürmer neue Gewebe entstehen lassen, haben frühe Planarienforscher sie Neoblasten getauft. Über die molekularbiologischen Mechanismen dieses kontrollierten Wucherns war bislang aber so gut wie nichts bekannt. Mit derlei Unwissenheit ist jetzt Schluss; denn das Münsteraner Team um Gentile hat in Zusammenarbeit mit Kollegen der Universität de Barcelona (Spanien) beim Strudelwurm *Schmidtea mediterranea* einen entscheidenden Schalter für die Regeneration entdeckt (*Development*, Bd. 137, S. 1055).

**Weiterleben nach Enthauptung: Den Kopf zu verlieren, macht einem Strudelwurm nichts aus. Er bleibt putzmunter und lässt das gute Stück einfach nachwachsen.**



LUCA GENTILE, MPI FÜR MOLEKULARE BIOMEDIZIN

# WÄHLEN SIE AUS UNSEREN VORTEILSABOS:



## EIN ABO – VIELE VORTEILE

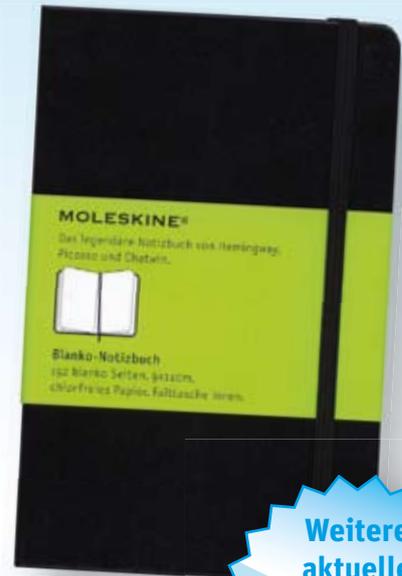
- 1 Nutzen Sie Ihren Sparvorteil gegenüber dem Einzelkauf.
- 2 Sie verpassen keine Ausgabe und bekommen das Heft sicher verpackt und pünktlich nach Hause geschickt.
- 3 Profitieren Sie vom kostenlosen Onlinezugang auf alle Spektrum-Ausgaben seit 1993.
- 4 Jeden Monat finden Sie im Internet einen nicht im Heft publizierten Zusatzartikel.
- 5 Sie können ausgewählte Sonderhefte gratis downloaden.
- 6 Mit Ihrem persönlichen Mitgliedsausweis (zum Download) kommen Sie in den Genuss zahlreicher Vergünstigungen.
- 7 Als Abonnent können Sie unser Produkt des Monats günstiger bestellen.
- 8 Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4-mal Gutscheine über € 25,- für den Science-Shop.de

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

## JAHRESABO:

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

Pocket-Notizbuch »Moleskine«: Hemingway hatte es, Picasso auch: das Notizbuch (9 x 14 cm) hat einen festen Einband und wird mit einem Gummiband verschlossen. Alle Seiten sind mit Zwirn geheftet.



Weitere  
aktuelle  
Präsente unter  
[spektrum.de/  
august](http://spektrum.de/august)



Diese CD bietet Ihnen alle Spektrum-Monatshefte inkl. Bildern des vergangenen Jahrgangs im PDF-Format. Zusätzlich enthält sie noch eine Registerdatenbank mit Suchfunktion bis zur Erstausgabe 1978 sowie das spektrumdirekt-Archiv mit über 10.000 Artikeln (Register und spektrumdirekt nur für Windowssysteme, ausgenommen Windows 7).

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

# MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

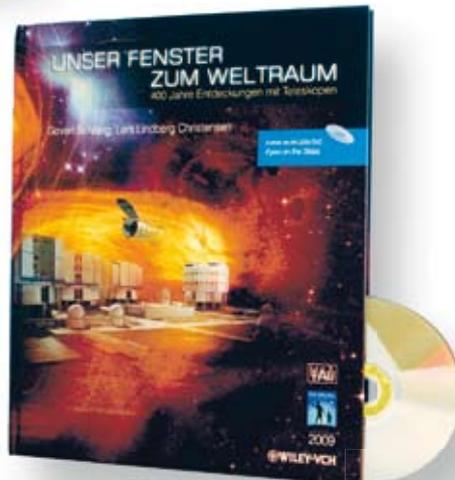
## LESER WERBEN LESER:

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermitteln können?  
Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!



Der DriversChoice-Tankgutschein über € 30,- lässt Sie der nächsten Benzinpreiserhöhung deutlich gelassener entgegensehen.

Das Buch »Unser Fenster zum Weltraum« präsentiert astronomische Entdeckungen aus 400 Jahren. Die beiliegende DVD bietet zudem reiches Zusatzmaterial wie Animationen, Computersimulationen und Experteninterviews.



## SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751



E-MAIL: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

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

**20%  
PREIS-  
VORTEIL**



## SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR  
LESEVERGNÜGEN

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

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

## MINIABO

SIE MÖCHTEN SPEKTRUM  
DER WISSENSCHAFT GERNE  
NOCH TESTEN?

Mit einem Spektrum-Miniabo (3 Ausgaben) zahlen Sie pro Heft nur € 4,83 und erhalten außerdem noch ein Präsent zur Wahl!

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

## PRODUKT DES MONATS

Mit Sonnenlicht aufgeladen, schäumt und quirlt der »SoLait 100« Liquidese aller Art in sekundenschnelle auf. So verwandelt er in weniger als 15 Sekunden z. B. 0,2 l warme Milch ohne Spritzer in weichen, cremigen Schaum! Vollgeladen reicht die Leistung des »SoLait 100« für ca. 100 solcher Anwendungen; danach muss das Solarmodul wieder aufgeladen werden.

Preis für Abonnenten: € 24,- inkl. Versand Inland (statt € 29,90)

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

## Springers Einwürfe

### Das Klima ist vergiftet

Im Internet bleiben die feindlichen Lager unversöhnlich.

**Im März habe ich an dieser Stelle meinen Freund**, den Klimaskeptiker, kurz vorgestellt und angekündigt, ich würde das Gespräch mit ihm suchen. Hier das Ergebnis.

Einleitend fragte ich ihn, ob er bestreite, dass seit Beginn der Industrialisierung der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre gestiegen ist und dass im selben Zeitraum auch die mittlere globale Temperatur zugenommen hat. Er fragte gekränkt zurück, ob ich ihn für einen Spinner halte; das seien Tatsachen, die jeder Kenner der Materie selbstverständlich anerkenne.

Ich war erleichtert. Damit sind wir uns im wesentlichen Punkt einig, dachte ich: Du erkennst an, dass die globale Erwärmung existiert und von Menschen verursacht wird. Ich nickte zufrieden, er zuckte die Achseln, und die Unterhaltung wandte sich anderen Themen zu.

Dass ich mich zu früh gefreut hatte, begriff ich erst, als ich einige Tage später im Internet den Blog meines Freundes besuchte. Dort hat er für alle, die vor den Folgen des anthropogenen Klimawandels warnen, nichts als Hohn und Spott übrig. Unermüdet trägt er aus der Blogosphäre Zitate zusammen, die sich zum Bild einer internationalen Verschwörung der etablierten Klimaforscher zusammensetzen. Scheinbar vertuscht diese Ingroup mit allen Mitteln der Datenmanipulation die für meinen Freund offensichtliche Tatsache, dass es im Mittelalter sogar wärmer war als heute und dass nicht das Kohlendioxid, sondern Schwankungen der Sonnenaktivität, der kosmischen Strahlung oder der Meeresströmungen am Klimawandel schuld sind.

**Die verschworene Forschergemeinde wolle**, so scheint es demnach, um jeden Preis den Teufel eines künftig katastrophalen Klimawandels durch anthropogen freigesetztes Kohlendioxid an die Wand malen, wobei ihre Motive – intellektuelle Wichtigkeit, weltverbesserisches Sendungsbewusstsein, Sicherung akademischer Pfründe? – im Dunkel bleiben. Doch zum Glück renne im Internet ein Heer von Dissidenten gegen die Bastionen der Klima-Orthodoxie an.

Also begab ich mich neugierig ins Netz und verlor mich bald in einem Labyrinth aus Blogs, Links und oft vielfach gestaffelten Kommentaren zu Kommentaren. Ein Menschenleben reicht nicht aus, allen Verästelungen der Argumente nachzugehen und die Spreu vom Weizen zu trennen. Einige Blogs werden von politisch obskuren Gestalten betrieben, die hinter der Klimaforschung die Absicht wittern, unter dem Mantel der UNO eine kommunistische Weltregierung zu etablieren. Andere, wie der Blog ClimateAudit des Statistikers Steve McIntyre, versuchen nur hartnäckig nachzuweisen, dass gewisse Rohdaten, aus denen man auf historische Temperaturverläufe zu schließen vermag, so selektiert wurden, dass der anthropogene Klimawandel besonders prägnant hervorsticht.

Mein Gesamteindruck nach ein paar Nächten Internetsurfen: unendlich viel Rauch, dahinter vielleicht hier und da ein Feuer. Mag sein, dass der eine oder andere aus der Zunft die Kurven seiner Diagramme ein wenig hingebogen hat – was schlimm genug ist. Aber die große Verschwörung existiert nur als Schimäre, aufrechterhalten durch ein immer dichteres Link-Geflecht.

Das Internet ist ein großer Gleichmacher; jeder Blogger tritt mit der gleichen Autorität auf. So entsteht der Eindruck, eine gewaltige Menge selbstloser Dissidenten stehe einer kleinen abgeschotteten Gemeinschaft von Inzucht treibenden Universitätswissenschaftlern gegenüber. Mein Freund fühlt sich in der kritischen Masse wohl und weidet sich dort am Zusammenhalt durch Zitieren. Im persönlichen Gespräch aber ist er ganz zivil.



Michael Springer

Bei ihren Experimenten bestrahlten die Wissenschaftler die Tiere, um die Neoblasten auszuschalten. Weil diese Stammzellen sich schnell teilen, erleiden sie besonders leicht Strahlenschäden – ihre Reparatursysteme haben schlicht keine Zeit, Defekte im Erbgut zu beheben. Nach dem Absterben synthetisieren die Neoblasten natürlich keine Eiweißmoleküle mehr. Ein Vergleich des Proteinmusters bestrahlter Tiere mit dem von unbehandelten Artgenossen erlaubt deshalb Rückschlüsse darauf, welche Eiweißstoffe typisch für Stammzellen sind und nur in diesen gebildet werden.

### Ein Protein als Achillesferse

Dazu gehört, wie die Münsteraner Forscher nun herausfanden, ein Protein namens SmB. Um seine Bedeutung für die Regeneration zu prüfen, schalteten Gentile und seine Mitarbeiter das zugehörige Gen in unbestrahlten Tieren mit Hilfe der so genannten RNA-Interferenz aus. Dadurch verhinderten sie, dass SmB entstand. Tatsächlich erholten sich die so behandelten Würmer nicht mehr, wenn sie zerschnitten wurden. Sogar intakte Planarien gingen ohne das SmB-Protein nach zwei bis vier Wochen zu Grunde. Genau wie die Haut-, Darm oder Leberzellen des Menschen sind die Zellen der Strudelwürmer nämlich einem ständigen Verschleiß unterworfen, den sie nicht mehr ausgleichen können, wenn der Nachschub plötzlich versiegt.

Damit zeigte sich gleich in doppelter Weise, dass SmB eine Schlüsselfunktion bei der Regeneration spielen muss. Zudem greift es, wie sich erwies, ganz am Anfang in den Prozess ein. Alle anderen Eiweißstoffe, die bislang in diesem Zusammenhang untersucht wurden, scheinen dagegen erst im späteren Verlauf zu wirken. Schaltet man sie aus, bildet sich zumindest noch das so genannte Blastem: ein ungeordneter Zellhaufen, der immer zu Beginn entsteht, wenn neues Wurmgewebe nachwachsen soll.

»SmB sorgt offensichtlich dafür, dass die Neoblasten sich teilen und vermehren können«, erläutert Gentile. Seiner Ansicht nach ist das Protein an der Bildung von Cyclin B beteiligt. Dieser Eiweißstoff lässt den Zellteilungszyklus von der vorbereitenden G2- in die M-Phase vorrücken, in der die eigentliche Aufspaltung der Zelle stattfindet.

Wie das Protein das genau bewerkstelligt, wissen die Münsteraner Forscher zwar nicht. Bekannt ist aber – und in dieser Funktion kennt man SmB auch bei anderen Organismen –, dass es eine Rolle bei der so genannten Prozessierung der RNA spielt, bei der die rohe Abschrift eines Gens gleichsam nachbearbeitet und in eine korrekte Bauanleitung für das entsprechende Protein umgewandelt wird. »In unseren Experimenten haben wir gesehen, dass ohne SmB in den Neoblasten nur wirkungsloses, unprozessiertes Cyclin B entsteht«, sagt Gentile. Das reicht ihm als Hinweis; denn die Münsteraner Forscher wollen den Wirkmechanismus von SmB gar nicht im Detail aufklären.

»Uns ist vielmehr wichtig, ein Werkzeug gefunden zu haben, mit dem wir künftig die Vorgänge bei der Regeneration genauer untersuchen können, um generelle molekularbiologische Prinzipien von Stammzellen aufzudecken«, erklärt Gentiles Mitarbeiter Sören Moritz. Pluripotente Stammzellen, die Vergleichbares wie die Neoblasten leisten, treten bei Säugetieren nämlich nur wäh-

rend eines äußerst begrenzten Zeitraums in der sehr frühen Embryonalentwicklung auf.

Ganz anders bei den Strudelwürmern: Hier sind die Allround-Talente auch beim erwachsenen Tier aktiv und lassen sich daher unter natürlichen Bedingungen beobachten – ohne das eingeschränkte Zeitfenster und ohne das Problem, Zellen aus ihrer normalen Umgebung herausreißen und in der Kulturflasche hätscheln zu müssen. Das macht *Schmidtea* als Modellorganismus einzigartig.

### Schlüssel zum Jungbrunnen?

»Mit SmB haben wir einen Schalter gefunden, mit dem wir diese Zellen ausschalten können – ganz ohne die Tiere bestrahlen zu müssen, was auch die Funktion der anderen Körpergewebe beeinträchtigen würde«, unterstreicht Moritz die Bedeutung dieser Arbeit. Und genau das, so glaubt das Münsteraner Forscherteam, wird auch die Stammzellforschung und die Regenerationsmedizin beim Menschen entscheidend voranbringen. »*Schmidtea* ist der einzige Modellorganismus mit dieser besonderen

Regenerationsfähigkeit, der außerdem genau wie wir Menschen in seiner Embryonalentwicklung ein Stadium mit drei Keimblättern durchläuft und einen bilateralen, also zweiseitig symmetrischen Aufbau hat«, so Moritz. Überdies weiß man, dass rund drei Viertel der Gene des Wurms denen ähneln, die in den Zellen von *Homo sapiens* aktiv sind.

Auch SmB kommt beim Menschen vor. Allerdings wirkt es hier nicht stammzellenspezifisch, sondern ist in allen Körperzellen zu finden. Als Schlüssel zum Jungbrunnen taugt es bei Vertretern unserer Art also sehr wahrscheinlich nicht. »Die große Hoffnung ist jedoch, durch die Arbeit mit dem Strudelwurm auf Mechanismen von Stammzellen zu stoßen, die sich in der Evolution erhalten haben und auch beim Menschen eine Rolle spielen«, erklärt Gentile. Und deren Entdeckung könnte dann als Initialzündung für einen Durchbruch in der Regenerationsmedizin wirken, der vielleicht auch uns Menschen dem ewigen Leben näher bringt.

**Stefanie Reinberger** ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

## 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**

Stand: Januar 2010 T/12/09/1

## 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)

# Das kosmologische Standardmodell

**AUF DEM PRÜFSTAND**

Die noch rätselhafte Dunkle Materie soll eine zentrale Rolle bei der Entwicklung von Galaxien spielen. Besonders in den Satellitengalaxien der Milchstraße würden sich ihre Einflüsse bemerkbar machen. Doch Beobachtungen in unserer kosmischen Nachbarschaft nähren Zweifel an der Existenz dieser Materieform.

## In Kürze

- ▶ Ein zentraler Baustein des kosmologischen Standardmodells ist die Dunkle Materie. Die Existenz dieser rätselhaften Materieform ist bislang allerdings **noch nicht nachgewiesen** worden.
- ▶ Auch die **Eigenschaften von Satellitengalaxien** nahe gelegener Sternsysteme hängen dem Standardmodell zufolge eng mit der Dunklen Materie zusammen.
- ▶ Detaillierte Studien von Satellitengalaxien weisen aber auf **zahlreiche Widersprüche zwischen Modell und Beobachtung** hin. Müssen wir über eine Alternative zur Dunklen Materie nachdenken?

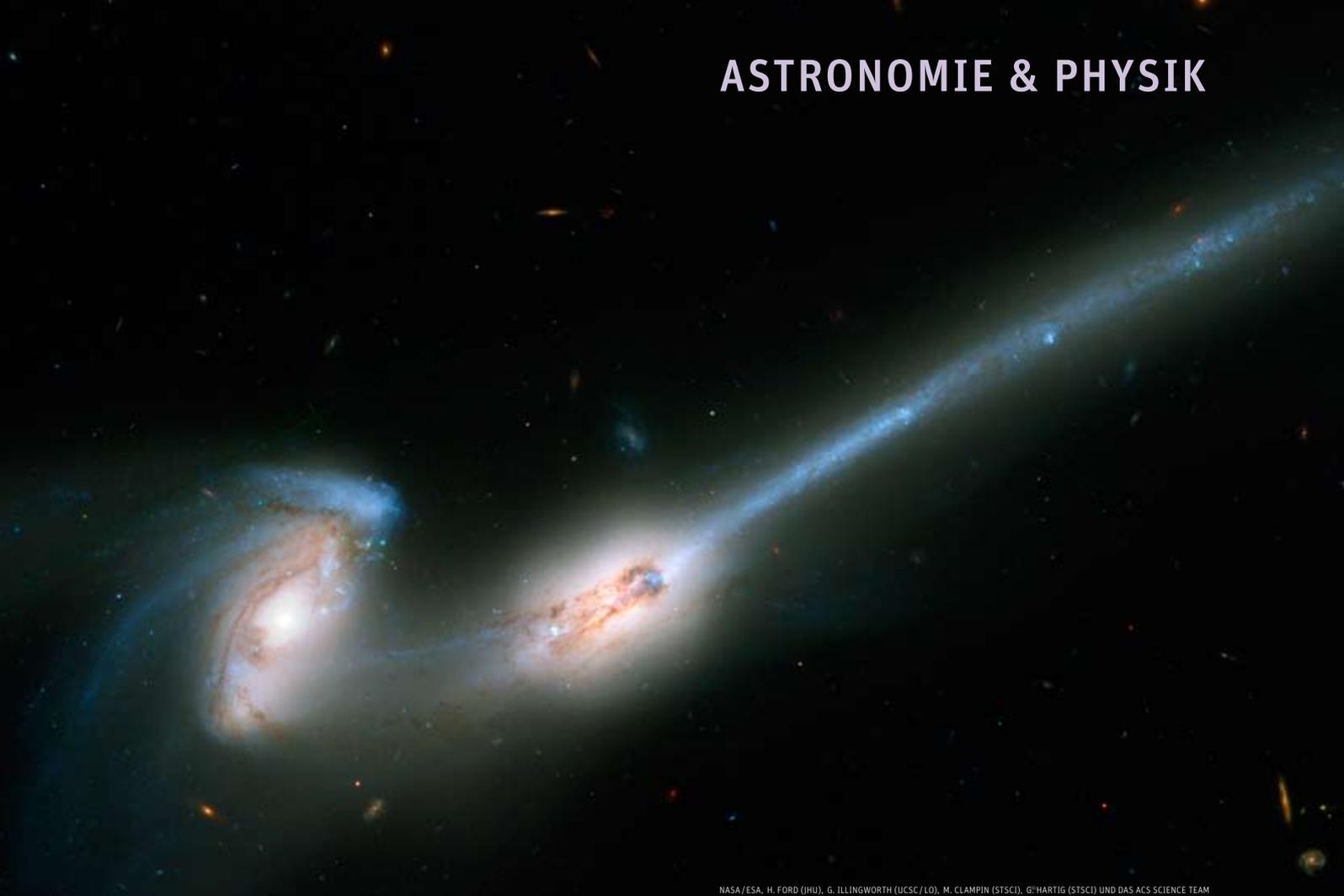
Von Pavel Kroupa und Marcel Pawlowski

Seit 13,7 Milliarden Jahren existiert das Universum. Doch wie gelangte es zu seiner großräumigen Struktur? Und welche Materiearten und Kräfte spielten dabei die wesentlichen Rollen? Es gibt vieles, was wir schon wissen. Die Häufigkeit der Elemente, der kosmische Mikrowellenhintergrund, die Expansion des Universums: All diese Phänomene sind gut untersucht und lassen uns aus vielen Gründen vermuten, dass der Kosmos einst in einem Urknall entstand. Seither ist es vor allem die Schwerkraft, die unserem Universum seine von Galaxien und ganzen Haufen von Galaxien strukturierte Form gab.

Doch das so genannte kosmologische Standardmodell, mit dessen Hilfe Forscher gegenwärtig die Entwicklung des Universums beschreiben, macht noch weitere Vorhersagen. Eine davon lautet: Galaxien setzen sich nicht nur aus sichtbarer Materie zusammen. Vielmehr verfügen sie neben der »normalen« baryonischen Materie, aus der Sterne ebenso wie Menschen bestehen, über eine weitere Zutat: die Dunkle Materie. Diese ist nicht nur das Salz in der Suppe, sondern soll gleich 85 Pro-

zent aller Materie im Universum ausmachen. Nachgewiesen wurde sie bislang nicht, aber vor allem in unterirdischen Labors fahnden Forscher bereits nach ihr, und auch auf der Internationalen Raumstation wird bald ein 1,5 Milliarden Euro teures Instrument installiert, das Alpha-Magnet-Spektrometer (AMS, siehe die kommende Ausgabe von SdW), um die Suche aufzunehmen.

Doch gibt es diese Dunkle Materie wirklich? Für ihre Existenz führen die Astronomen gute Gründe an. Beobachtungen von Scheibengalaxien belegen, dass die Sterne in deren Außenbereichen schneller um das Zentrum der Galaxien rotieren, als es das newtonsche Gravitationsgesetz vorhersagt. In die Berechnungen fließt die Masse aller beobachtbaren Materie einer Galaxie ein: die Masse der Sterne ebenso wie die des interstellaren Gases und des kosmischen Staubs. Das Ergebnis sind so genannte Rotationskurven, die den Zusammenhang zwischen Rotationsgeschwindigkeit der Sterne und ihrem Abstand vom Zentrum der jeweiligen Galaxie beschreiben (siehe Grafik S. 25). Ihnen zufolge sollte die Geschwindigkeit, mit der Sterne etwa um das Milchstraßenzentrum kreisen, zum Rand der Galaxis hin stark ab-



NASA/ESA, H. FORD (JHU), G. ILLINGWORTH (UCSC/LO), M. CLAMPIN (STSCI), G. HARTIG (STSCI) UND DAS ACS SCIENCE TEAM

fallen; so, wie auch die äußeren Planeten im Sonnensystem langsamer um die Sonne rotieren, als dies etwa Venus oder Erde gemäß den keplerschen Gesetzen tun. Tatsächlich beobachten die Forscher aber, dass außen liegende Sterne das galaktische Zentrum viel schneller umkreisen als erwartet. Infolge der dabei entstehenden Fliehkräfte müsste unser Sternensystem sogar in kürzester Zeit auseinanderfliegen. Rätselhafterweise geschieht genau dies jedoch nicht.

## Einen Kandidaten nach dem anderen ausgeschlossen

Die einfachste Möglichkeit, diesen Widerspruch aufzulösen, lautet: Wir unterschätzen die Masse der Galaxien. Anfangs gab es für die »fehlende« Masse zahlreiche Kandidaten wie Schwarze Löcher und Neutronensterne, aber auch braune Zwerge und kaltes Gas. Doch nach und nach schlossen die Forscher einen nach dem anderen aus. Übrig blieb nur die Vermutung, dass es dann eben eine neue Art von Materie geben müsste: Dunkle Materie. Diese hypothetische Form von Teilchen zeichnet sich gegenüber gewöhnlicher, sichtbarer Materie dadurch aus, dass sie keine elektromagnetische Wechselwirkung ausübt. Sie sendet

also kein Licht aus und kann kaum mit baryonischer Materie wechselwirken. Deshalb ist sie nicht nur im Universum unsichtbar, sondern lässt sich auch von unseren Messgeräten und Detektoren kaum registrieren. Wenn überhaupt, treten Dunkle-Materie-Teilchen nur äußerst schwach mit normaler Materie und mit sich selbst in eine nachweisbare Beziehung. Diese Teilchen, falls es sie gibt, krümmen durch ihre Schwerkraft lediglich die Raumzeit. Im Standardmodell der Teilchenphysik, das ansonsten sämtliche heute bekannten Elementarteilchen beschreibt, sind die Dunkle-Materie-Teilchen auffälligerweise nicht enthalten – ein Hinweis, dass sie vielleicht überhaupt nicht existieren? Künftig könnte das gegenwärtige Standardmodell allerdings von der Stringtheorie (siehe »Ist die Stringtheorie noch eine Wissenschaft?«, SdW 5/2009, S. 34) abgelöst werden. Diese neue Theorie, so hoffen die Physiker, würde auch Dunkle-Materie-Teilchen umfassen. Deren Existenz müsste dann nicht mehr postuliert werden; stattdessen würden die Partikel auf ganz natürliche Weise als Bestandteil unserer Welt auftreten.

Was ursprünglich als einfache Problemlösung erschien, mittels deren sich die beobachteten Rotationskurven erklären ließen, wuchs

**In dem langen Gezeitenarm (rechts oben im Bild) der miteinander verschmelzenden Mäusegalaxien bilden sich kleine so genannte Gezeitenzwergegalaxien. Der Mechanismus ihrer Entstehung könnte auch vollständig beschreiben, wie sich die Satellitengalaxien um unsere Milchstraße bildeten. Dunkle Materie, einer der Stützpfeiler des kosmologischen Standardmodells, wäre für die Erklärung ihrer Existenz dann überflüssig.**

JÜRIG DIEMAND, MICHAEL KUHLEN, PIERO MADAU, MARCEL ZEMP, BEN MOORE, DOUG POTTER UND JOACHIM STADEL, MIT FRODL GEN. VON JÜRIG DIEMAND, UNI ZÜRICH



**Dunkle Materie, sichtbar gemacht:** Diese Simulation zeigt den Dunkle-Materie-Halo, der laut kosmologischem Standardmodell die Milchstraße (Mitte) umgibt, als Negativbild. Grundlage der Darstellung sind Berechnungen an einem Supercomputer, die der theoretische Physiker Jürg Diemand von der Universität Zürich im Jahr 2008 durchführte. Die auffallend große Zahl von Subhalos (helle Punkte im Bild), in denen sich sichtbare Satellitengalaxien bilden können, steht im Widerspruch zu astronomischen Beobachtungen, bei denen bislang nur wenige Milchstraßenbegleiter aufgespürt wurden.

mit der Zeit zu dem unter Wissenschaftlern heute sehr populären kosmologischen Standardmodell heran. Auf diesem theoretischen Fundament beruht das bis heute umfangreichste Modell von den Ursprüngen, der Entwicklung und der Zusammensetzung des Kosmos. Ihm zufolge ist der größte Teil der Materie im Kosmos dunkel: Galaxien bestehen vor allem aus riesigen Ansammlungen Dunkler Materie, so genannten Dunkle-Materie-Halos. In deren Zentren wiederum und nur dort sitzen die für uns sichtbaren Galaxien. Doch stimmt dies wirklich?

Viele kosmologische Simulationen beruhen allein auf dem Verhalten der Dunklen Materie; der Einfluss der uns vertrauten baryonischen Materie gilt als vernachlässigbar gering. Ursprünglich sollen die Dunkle-Materie-Partikel gleichförmig im Kosmos verteilt gewesen sein. Schon sehr früh begannen die Teilchen aber, sich zusammenzuballen. Auf diese Weise entstanden zunächst viele kleine Dunkle-Materie-Halos, von denen etliche miteinander kollidierten und zu größeren Halos verschmolzen. Meistens waren es größere Halos, die sich in einer Art Dunkle-Halo-Kannibalismus Zwerggalaxien einverleibten und so zu stattlicher Größe heranwuchsen. Unserer Abschätzung nach benötigte die Milchstraße etwa  $10^{10}$  dunkle Halos mit Massen oberhalb einer Sonnenmasse, um ihre heutige Größe zu erreichen.

In den Simulationen wuchsen die Strukturen aus Dunkler Materie aber zu schnell he-

ran: Sie benötigten weniger Zeit, um groß zu werden, als es die astronomischen Beobachtungen nahelegen. Daher brachte das Standardmodell der Kosmologie noch die so genannte Dunkle Energie (SdW 8/2009, S. 26) ins Spiel. Diese verlangsamt das Heranwachsen der Dunkle-Materie-Strukturen, so dass die errechnete Materieverteilung schließlich mit den Beobachtungen in Einklang stand.

Die Dunkle Energie ist jedoch ebenfalls nur ein postuliertes Phänomen. Als Forscher kurz vor der Jahrhundertwende herausfanden, dass das Universum nicht nur expandiert, sondern sich die Ausdehnung offensichtlich sogar beschleunigt, erklärten sie dies mit einer neuen Energieform, die den Raum gewissermaßen auseinanderreißt – eben der Dunklen Energie. Diese bringt allerdings eine große Schwierigkeit mit sich. Expandiert das Universum beschleunigt, wächst dadurch auch seine Vakuumenergie letztendlich über alle Grenzen an. Die Energieerhaltung in einem abgeschlossenen System ist jedoch ein grundlegendes Prinzip der Physik. Wenn wir die Existenz der Dunklen Energie annehmen wollen, müssen wir, ohne dies derzeit belegen zu können, das Universum als ein offenes System betrachten.

Doch zurück zur Dunklen Materie. Wie füllen sich die dunklen Halos überhaupt mit dem leuchtenden, baryonischen Gas, aus dem sich Sterne und schließlich sichtbare Galaxien bilden? Dies ist eine entscheidende Frage. Alle Berechnungen auf Basis des Standardmodells, denen realistische physikalische Prozesse der Sternentstehung zu Grunde liegen, zeigen, dass sich zunächst die kleinen Halos und erst später die größeren Exemplare mit Gas und Sternen füllen. Beginnt die Sternentstehung zuerst in Zwerggalaxien, sollten diese im Durchschnitt also eher älter sein als massereiche, größere Galaxien. Tatsächlich beobachten Astronomen aber genau das Gegenteil: Massereiche Galaxien sind deutlich älter als ihre zwerghaften Verwandten.

### Das Problem der fehlenden Satelliten

Auch andere Widersprüche haben sich aufgetan. In diesem Jahr wiesen die Astrophysiker Jim Peebles von der University of Princeton in New Jersey und Adi Nusser vom Technologieinstitut Technion im israelischen Haifa nach, dass die Verteilung der sichtbaren Materie im so genannten Lokalen Volumen nicht mit den Vorhersagen des Standardmodells übereinstimmt. (Zu dieser Region, die einen Radius von 24 Millionen Lichtjahren besitzt, gehört auch die Milchstraßengalaxie.)

Wir selbst haben das Standardmodell auf noch kleineren Skalen getestet. Denn ihm zu-

folge müssten sich sämtliche Galaxien, also auch unsere Milchstraße, aus unzähligen kleineren Galaxienbausteinen zusammengesetzt haben. Tatsächlich sagen Simulationen voraus, dass sich im Dunklen Halo der Milchstraße, der rund eine Million Lichtjahre misst – zehnmal mehr als die sichtbare Milchstraßenscheibe –, noch viele hundert bis tausend Halos identifizieren lassen müssten. Erkennen könnten wir sie an den leuchtenden Galaxien in ihrem Inneren. (Hinzu kommt eine noch viel größere Zahl völlig dunkler Halos.)

Das geeignete Testgelände, um diese Halos aufzuspüren, ist die so genannte Lokale Gruppe. Mit einem Durchmesser von gerade einmal drei Millionen Lichtjahren stellt sie unsere unmittelbare kosmische Nachbarschaft dar. Sie beherbergt zwei große Spiralgalaxien: unsere Milchstraße selbst sowie die Andromedagalaxie. Beide werden von je einer kleinen Schar von Satellitengalaxien in maximal 800 000 Lichtjahren Entfernung von ihrer jeweiligen Muttergalaxie umkreist.

Die Lokale Gruppe erlaubt den präzisesten Test eines kosmologischen Modells, der uns möglich ist, weil wir sie im Vergleich zu entfernteren Regionen am detailliertesten beobachten können. Die vielfältigen Aussagen, welche die Standardkosmologie zu den erwarteten Eigenschaften und Verteilungen der Satellitengalaxien trifft, lassen sich hier also besonders gut überprüfen. Doch gerade auf der Ebene von Galaxien und ihren Satelliten treffen wir auf eine Reihe von schwer wiegenden Widersprüchen zwischen Theorie und Beobachtung.

Dem Standardmodell zufolge können sich Verschmelzungen von Halos über Milliarden von Jahren hinziehen, so dass sich innerhalb größerer Dunkle-Materie-Halos auch heute Subhalos befinden können, die sich noch nicht ganz aufgelöst haben. Diese Subhalos wiederum besitzen ihrerseits Subhalos und so weiter. Alle diese Ansammlungen Dunkler Materie (siehe Bild oben links) laufen räumlich ungeordnet auf sich ständig verändernden Bahnen um ein gemeinsames Zentrum.

Insbesondere sagen die Simulationen voraus, dass um eine Galaxie von der Größe der Milchstraße hunderte bis tausende Dunkle-Materie-Halos kreisen sollten. Bislang sind aber nur etwa 24 Satellitengalaxien der Milchstraße bekannt, eine bedeutende Steigerung ihrer Zahl durch künftige Entdeckungen ist wohl nicht zu erwarten. Diese Diskrepanz zwischen Vorhersage und Beobachtung ist unter dem Begriff des »Missing Satellite Problem« bekannt. Zunächst versuchte man daher, die physikalischen Prozesse in den Simulationen realistischer und in höherer Auflösung darzustellen, in der Hoffnung, die Anzahl der vor-

hergesagten Subhalos würde sich auf das beobachtete Maß reduzieren. Aber diese Versuche scheiterten. Damit schien die Standardkosmologie und insbesondere die Dunkle-Materie-Hypothese bereits widerlegt.

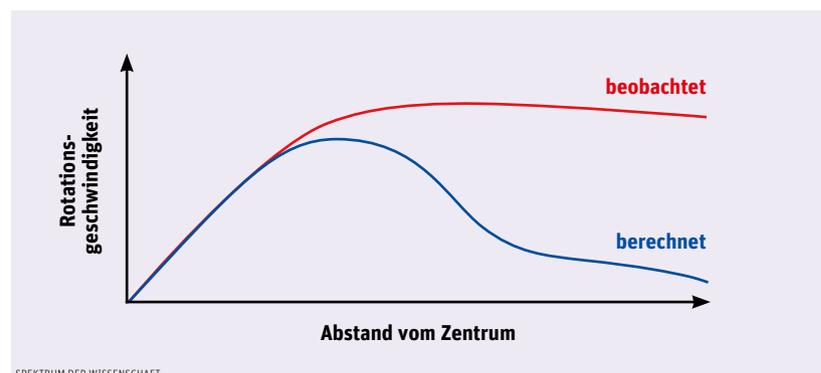
Dann allerdings entwickelten die Theoretiker andere mögliche Erklärungen, um die Theorie doch noch zu retten. Vielleicht, so eine der Annahmen, sind die sichtbaren Galaxien nur die »Spitze des Eisbergs«. Das würde bedeuten, dass zwar eine große Zahl dunkler Halos existiert, dass sich aber nur in wenigen von ihnen Sterne oder zumindest Gasansammlungen bilden. Welche Ursachen könnte dies haben?

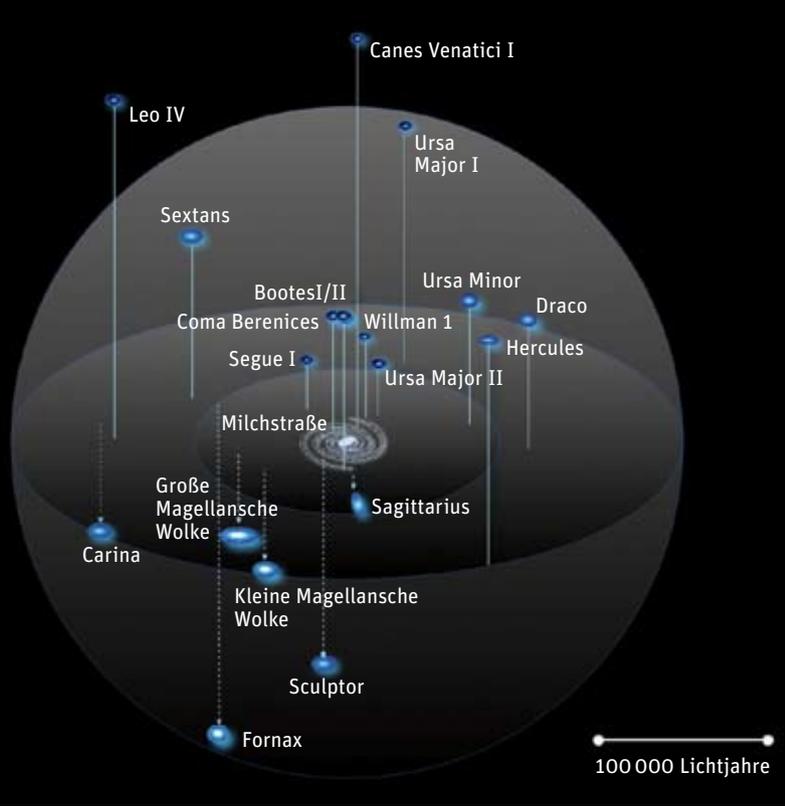
### Beobachten wir nur die Spitze des Eisbergs?

Je weniger Masse ein dunkler Halo besitzt, desto geringer ist seine Schwerkraft und damit seine Fähigkeit, sichtbare Materie zu binden. Zudem existieren interne wie externe Energiequellen, die der Schwerkraft weitere Kräfte entgegenwirken lassen. Befindet sich im dunklen Halo bereits eine Zwerggalaxie, heizen die darin entstehenden Sterne das abgekühlte Gas wieder auf, so dass es gegen die Schwerkraft expandiert und aus der Galaxie hinausströmt. Denselben Effekt könnte ionisierende Strahlung von außen bewirken. Dunkle Halos geringer Masse wären dann also nicht in der Lage, ausreichend Gas an sich zu binden, so dass in ihnen nicht einmal Sterne entstehen würden. Vielleicht beschränken aber auch Gezeitenwechselwirkungen das Wachstum der Satellitenhalos.

Wenn es zutrifft, dass wir lediglich die Spitze des Eisbergs der Satellitengalaxieverteilung beobachten, dann wären diese Zwerggalaxien in Dunkle Subhalos extrem großer Masse eingebettet, denn nur diese üben ausreichend Schwerkraft aus, um genug sichtbare Materie zu binden. Daraus können wir schließen: Weil ein Halo umso mehr baryonische Materie bindet, je massereicher er ist, muss der Halo einer Zwerggalaxie im statistischen Mittel umso massereicher sein, je leuchtkräf-

Die Geschwindigkeit, mit der Sterne um das Zentrum einer Galaxie rotieren, hängt davon ab, wie weit sie von ihm entfernt sind. Die Grafik, eine so genannte Rotationskurve, zeigt diesen Zusammenhang. Ab einer bestimmten Entfernung, so ergeben Berechnungen mit Hilfe der newtonschen Gesetze, müsste die Rotationsgeschwindigkeit der Sterne abnehmen. Tatsächlich aber beobachtet man, dass außen liegende Himmelskörper die Galaxie viel schneller umkreisen als erwartet.





Mittlerweile sind 24 Satellitengalaxien der Milchstraße (die hier nicht maßstabsgerecht abgebildet ist) sicher identifiziert. Rund zehn von ihnen wurden erst im vergangenen Jahrzehnt entdeckt. Doch noch immer sind es viel zu wenige, gemessen an den Hunderten von Objekten, die das kosmologische Standardmodell vorausagt. Nicht abgebildet, weil erst kürzlich entdeckt oder zu weit entfernt, sind Leo I, Leo II und Leo V sowie Canes Venatici I, Pisces I und Pisces II. Segue II (ebenfalls nicht im Bild) sowie Segue I sind noch »nicht eindeutig identifiziert«. In den Grafiken S. 27 unten werden sie durch Quadrate dargestellt. Dreht man das obige Bild um 180 Grad um die senkrechte Achse, entspricht die Perspektive etwa derjenigen auf Grafik b.

tiger die Galaxie ist. Die Standardkosmologie sagt folglich voraus, dass ein Zusammenhang zwischen der Masse der dunklen Halos und der Leuchtkraft der enthaltenen Zwerggalaxien existiert. Dies bestätigen auch zahlreiche Modellrechnungen, welche die unterschiedlichen internen und externen Energiequellen berücksichtigen.

Was aber ergeben unsere Beobachtungen? Studien zeigen, dass alle Satellitengalaxien der Milchstraße – in der Nordhemisphäre kennen wir mit 16 Exemplaren bereits die meisten, im Süden läuft eine groß angelegte Suche (siehe Kasten rechts) – vergleichbare Mengen an Dunkler Materie aufweisen, nämlich jeweils rund eine Milliarde Sonnenmassen. Ihre Leuchtkräfte (korrekter müsste man sagen: Leuchtleistungen) erstrecken sich allerdings über einen weiten Bereich: Sie betragen zwischen dem Tausendfachen und dem Zehnmillionenfachen der Leuchtkraft der Sonne und stehen entgegen den Voraussagen der Standardkosmologie daher keineswegs in einem Zusammenhang mit der Masse der Halos. Behauptet man, um das Problem der fehlenden Satelliten zu lösen, wir sähen nur die Spitze des Eisbergs – nur jene Satelliten, in denen sich tatsächlich leuchtende baryonische Materie ansammelte –, verstrickt man sich also an anderer Stelle in einen Widerspruch.

Auch in weiteren Fällen hält die Standardkosmologie dem Vergleich mit Beobachtungen nicht stand. Scheibengalaxien bestehen aus einer Scheibe aus Sternen, deren Mitte häufig eine Art Verdickung aufweist. Dieser Bereich größerer Sterndichte, der wie eine elliptische Galaxie erscheint und in dem die Sterne auf ungeordneten Bahnen um das Zen-

trum der Galaxie laufen, wird Bulge genannt. Offenbar besitzt er einen Einfluss auf die Zahl der Satelliten um eine Galaxie. Das lässt sich prüfen, indem man einfach die Satelliten der uns nächstgelegenen Scheibengalaxien zählt. Das Risiko, einige davon zu übersehen, reduzieren die Astronomen, indem sie von vornherein nur jene in die Rechnung aufnehmen, die mehr als das 200 000-Fache der Sonnenleuchtkraft aufweisen. Die Andromedagalaxie mit ihrem massereichen Bulge ist von 16 solcher Satelliten umgeben. Der Bulge der Milchstraße verfügt nur über halb so viel Masse, um sie zählen wir neun Exemplare. Und schließlich hat die Lokale Gruppe auch noch die recht kleine Scheibengalaxie M33 zu bieten. Sie besitzt überhaupt keinen Bulge, und bislang haben die Astronomen auch vergeblich nach ihren Satelliten gesucht. Unser Test zeigt also eine bemerkenswerte Relation: Je massereicher der Bulge einer Galaxie, von desto mehr Satellitengalaxien wird sie umgeben. (Bisher können wir diesen Test nur anhand der drei Galaxien in der Lokalen Gruppe durchführen, denn nur hier können wir weitgehend sicher sein, die existierenden Satelliten tatsächlich zu entdecken.)

Aus Sicht der Standardkosmologie ist die beobachtete Relation indessen unwahrscheinlich. Ihr zufolge sollten Galaxien mit massereicheren dunklen Halos, entstanden aus vorangegangenen Verschmelzungen, mehr Subhalos, also mehr beobachtbare Satellitengalaxien aufweisen. Doch die Astronomen haben Scheibengalaxien sowohl mit als auch ohne Bulge entdeckt, die vergleichbare Rotationskurven aufweisen. Daher sollten sie auch dunkle Halos ähnlicher Masse besitzen und folglich eine etwa gleiche Zahl von Subhalos. Laut Standardkosmologie steht die Zahl der Satellitengalaxien daher *nicht* in einem Zusammenhang mit der Masse des Bulges – doch genau diesen Zusammenhang beobachten wir in der Lokalen Gruppe.

### Gleichmäßig verteilt? Im Gegenteil

Werfen wir nun einen Blick auf die Anordnung der Satelliten um ihre Muttergalaxien. Ihre dreidimensionale räumliche Verteilung und ihre Bahnen enthalten wichtige Informationen über ihren Ursprung. Folgt man der Standardkosmologie, so fallen Zwerggalaxien im Lauf der Verschmelzungsvorgänge sozusagen aus allen Richtungen in einen größeren dunklen Halo hinein. Doch selbst die kleinsten kosmischen Strukturen, Filamente und Ansammlungen von Zwerggalaxien, die Astronomen beobachtet haben, erstrecken sich über mehr als 600 000 Lichtjahre, also über ein Mehrfaches des Milchstraßendurchmes-

## AUF DER SUCHE NACH DEN FEHLENDEN SATELLITEN

**Gibt es die Dunkle Materie wirklich** oder müssen wir über Alternativen nachdenken? Die Antwort auf diese Fragen hängt entscheidend von der Zahl der Satellitengalaxien der Milchstraße ab. Bisher wurde nur die Nordhemisphäre mit hoher Präzision nach ihnen abgesucht. Zu den Zielen des »Stromlo Milky Way Satellites (SMS) Survey« gehört es darum, die Südhemisphäre nach noch unentdeckten Satelliten zu durchmustern. Leiter des internationalen Projekts ist der schweizerische Astrophysiker Helmut Jerjen vom Mount-Stromlo-Observatorium der Australian National University in Canberra.

**Erweisen sich die Satelliten am Südhimmel ebenfalls** als in einer Scheibe angeordnet – so wie die bislang bekannten 16 nördlichen und acht südlichen Satelliten –, würde dies den Vorhersagen der Standardkosmologie klar widersprechen. Aus Symmetriegründen ist zu erwarten, dass die SMS-Durchmusterung rund acht weitere Satellitengalaxien entdecken wird. Eine

Nord-Süd-Asymmetrie in der Verteilung der Satelliten ist unwahrscheinlich, sie würde sich über kosmologisch relativ kurze Zeiträume hinweg ausgleichen.

**Werkzeug für den SMS-Survey** ist das zehn Millionen Dollar teure, robotische 1,35-Meter-Teleskop SkyMapper am Siding-Spring-Observatorium der Australian National University. Eine 268-Megapixel-CCD-Kamera mit einem großen Gesichtsfeld von 5,7 Quadratgrad sorgt dank ihrer hohen Lichtempfindlichkeit für die bislang präzisesten Durchmusterungsdaten des Südhimmels. Auch Deutschland ist an dem Instrument beteiligt: Ein spezieller Verschluss, entwickelt am Observatorium Hoher List der Universität Bonn, gewährleistet über das ganze Gesichtsfeld hinweg eine gleichmäßige Belichtung. Unsere Bonner Arbeitsgruppe wird die Daten gemeinsam mit anderen Forscherteams interpretieren und sich voraussichtlich auch an den Beobachtungen beteiligen.

pk/mp

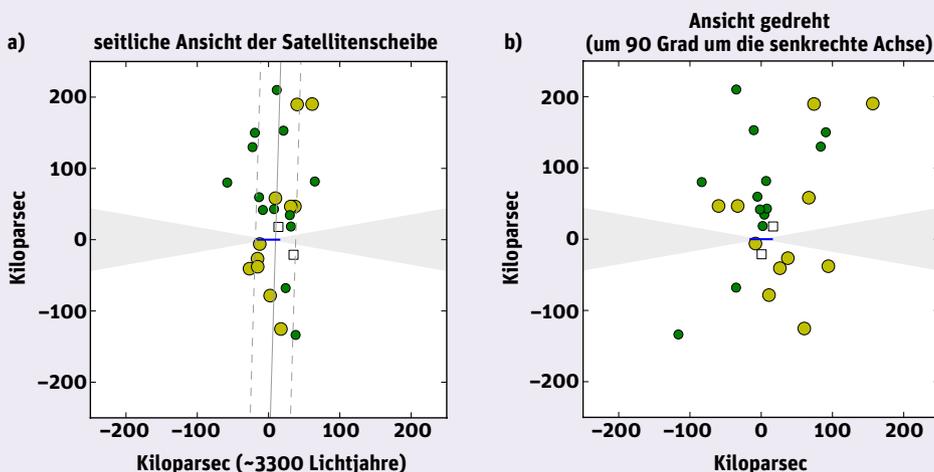
sers. Man sollte also davon ausgehen können, dass die Satellitengalaxien mehr oder weniger gleichmäßig im gesamten Milchstraßenhalo verteilt sind.

Tatsächlich aber weist die räumliche Verteilung der bekannten Satellitengalaxien eine sehr klare Struktur auf: Sie sind in einer Scheibe angeordnet, die senkrecht zur Milchstraßenebene steht (siehe Grafiken unten). Diese nur etwa 150 000 Lichtjahre dicke Satellitenscheibe besitzt einen Durchmesser von ungefähr 1,5 Millionen Lichtjahren. Erwartet hatten die Astronomen jedoch eine andere Verteilung der Satelliten. Auf diesen Widerspruch hat erst 2005 einer von uns (Kroupa) gemeinsam mit Christian Theis, der damals an der Universität Kiel forschte, und Christian Boily vom Observatoire astronomique de Strasbourg hingewiesen. Weil auch die in den Folgejahren gefundenen, sehr leuchtschwachen Satellitengalaxien dieser Scheibenanordnung folgen, kann von Zufall keine Rede mehr sein.

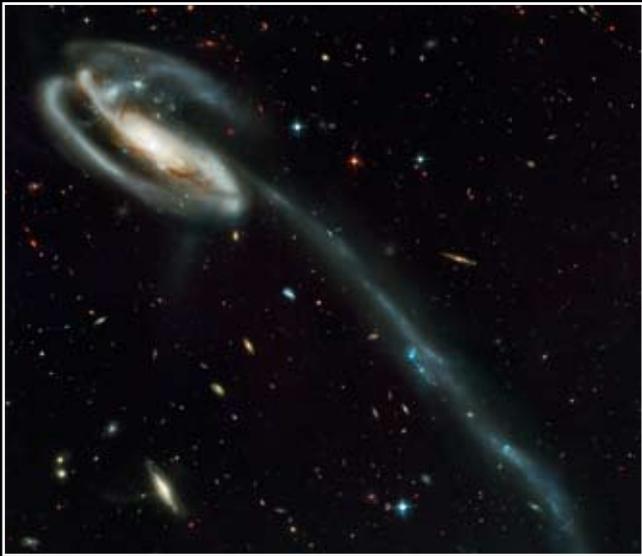
Damit nicht genug. Aus den Spektren der Satellitengalaxien lassen sich ihre Radialgeschwindigkeiten ermitteln. Fertigt man darüber hinaus über mehrere Jahre hinweg Aufnahmen der Satellitengalaxien an, so lassen sich zwei weitere Bewegungskomponenten und auch ihre Geschwindigkeit messen – vorausgesetzt, sie sind schnell und nah genug, damit ihre Winkelgeschwindigkeit ausreichend groß ist. Von einigen der nahe gelegenen Satelliten weiß man daher auch, in welcher Richtung sie um die Milchstraße kreisen. Sieben der acht auf diese Weise vermessenen Satelliten bewegen sich erstaunlicherweise innerhalb der Satellitenscheibe, ähnlich den Planeten des Sonnensystems, die in derselben Ebene um ihr Zentralgestirn rotieren. Sechs davon kreisen sogar in derselben Richtung; nur eine, nämlich Sculptor, ist ein »Geisterfahrer«, der sich in entgegengesetzter Richtung bewegt.

Diese Ergebnis kommt für die Standardkosmologie völlig überraschend, denn sie ver-

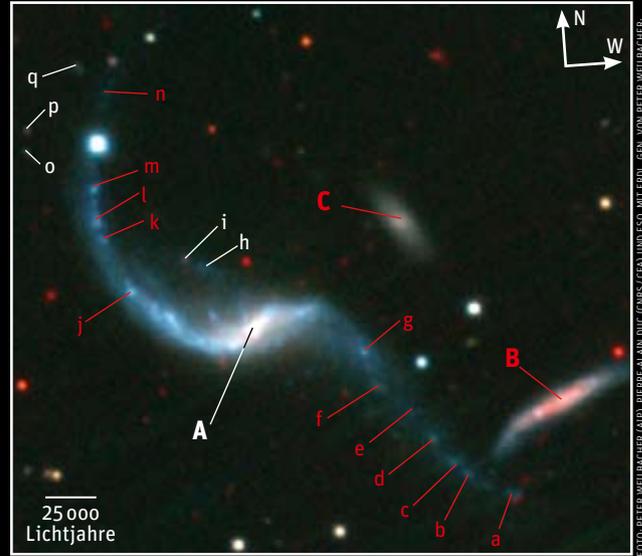
**Die Satellitengalaxien der Milchstraße sind in einer Scheibe angeordnet. Das Diagramm a zeigt den Blick auf deren Kante. Diagramm b ist um 90 Grad um die senkrechte Achse gedreht (von oben gesehen im Uhrzeigersinn), erlaubt also den Blick auf die Scheibenebene. Diese ist in a mit einer dünnen Linie markiert, die gestrichelten Linien deuten ihre Dicke an. Der kurze Strich im Zentrum entspricht der horizontal liegenden Scheibe der Milchstraße (ihr Durchmesser ist kleiner als die Dicke der Satellitenscheibe). Die elf gelben Punkte stellen die schon länger bekannten leuchtkräftigen Satellitengalaxien dar. Die 13 in jüngerer Zeit gefundenen leuchtschwächeren Exemplare sind grün markiert. Zwei Quadrate stehen für noch nicht eindeutig identifizierte Objekte. Die grauen Kegel deuten schließlich die Raumregion an, in der die Milchstraße unseren Blick auf mögliche Satelliten versperrt.**



MARCEL PAWLOWSKI



Die 420 Millionen Lichtjahre entfernte Kaulquappengalaxie UGC 10214 ist eine stark verformte Balken-Spiralgalaxie. Ihr 280 000 Lichtjahre langer Gezeitenarm verdankt sich dem einstigen Durchflug eines kleineren Sternsystems. Er beherbergt eine Reihe von Sternhaufen mit jeweils einigen hunderttausend neugeborenen, zum Teil sehr massereichen Sternen. Weil diese viel heißer sind als die Sonne, senden sie bläuliches Licht aus. Computersimulationen, die von der Arbeitsgruppe der Autoren dieses Artikels durchgeführt wurden, zeigen, dass die Gruppen von Sternhaufen mit der Zeit zu Gezeitenzwerggalaxien verschmelzen.



Diese Konstellation aus drei miteinander wechselwirkenden Sternsystemen wird im Englischen »Dentist's Chair« (Zahnarztstuhl) genannt und offiziell als AM 1353-272 bezeichnet. Die auffälligste Galaxie (A) zeichnet sich durch zwei rund 100 000 Lichtjahre lange Gezeitenarme aus, in denen Astronomen zahlreiche Kandidaten (mit roten Kleinbuchstaben gekennzeichnet) für entstehende Gezeitenzwerggalaxien entdeckten. Einige Objekte sind bislang unidentifiziert (weiße Kleinbuchstaben). Außerdem besteht die Konstellation aus einer Scheibengalaxie (B) sowie einem elliptischen Sternsystem (C).

mag weder für die Anordnung der Satelliten in einer Scheibe noch für ihre gemeinsame Bewegungsrichtung eine Erklärung zu liefern. Auch hier kann der Zufall keine Rolle spielen: Das ist so unwahrscheinlich, dass wir es ausschließen können, zumal die Andromedagalaxie eine vergleichbare Anordnung von Satellitengalaxien aufzuweisen scheint.

Wollen wir die Satellitengalaxien der Milchstraße als baryonische Materie inmitten von Subhalos aus Dunkler Materie auffassen, stoßen wir also auf eine Reihe von Schwierigkeiten. Gibt es denn Alternativen zu dieser Auffassung? Bereits im Jahr 1976, als die Dunkle-Materie-Hypothese noch keine allgemeine Anerkennung gefunden hatte, schlug der renommierte Astrophysiker Donald Lynden-Bell von der University of Cambridge vor, dass es sich bei ihnen um Gezeitenzwerggalaxien handeln könnte. Objekte dieser Art entstehen, wenn zwei gasreiche Galaxien auf ihrem Weg eng aneinander vorbeifliegen – streifende Zusammenstöße sind weit häufiger als frontale Kollisionen – und sich durch ihre gegenseitige Schwerkraft abbremsen und herumreißen.

Dabei wirken dort, wo die Galaxien einander zugewandt sind, stärkere Anziehungskräfte als auf der entgegengesetzten Seite. Zudem entstehen Fliehkräfte, während die Galaxien beim Vorbeiflug aneinander zerren. Diese Kräfte reißen die Galaxien förmlich auseinander und lassen aus jeder von ihnen zwei gebogene so genannte Gezeitenarme herauswachsen. Die beiden inneren Arme laufen dabei aufeinander zu, während die äußeren vom Ort der Kollision wegweisen.

**Neues aus dem »Schrott« der Kollision**

Diese Arme können sich über Hunderttausende von Lichtjahren und damit weit über die Durchmesser der Galaxien hinaus erstrecken. Sie bestehen aus Sternen, aber auch aus Gas und Staub. Dieses Material wiederum kann verklumpen, so dass es schließlich zum gravitativen Kollaps der Gas- und Staubwolken kommt und damit zur Geburt neuer Sterne. So bilden sich aus dem weggeschleuderten »Schrott« der Kollision allmählich größere Ansammlungen von Sternen, und schließlich werden in den Gezeitenarmen ganze Galaxien geboren: Gezeitenzwerggalaxien.

## KREISEN MEHRERE STRÖME VON SATELLITENGALAXIEN UM DIE MILCHSTRASSE?

**Neue Daten über die Satellitengalaxien der Milchstraße** erhoffen wir uns von Gaia. Von 2012 bis 2017 wird die rund 500 Millionen Euro teure ESA-Mission rund ein Prozent aller Sterne der Milchstraße und sogar Exemplare in der Andromedagalaxie vermessen. Der Zensus umfasst verschiedene Typen und Altersklassen von Sternen. Ihre Positionen, vor allem auch die Geschwindigkeit, mit der sie sich durch die Galaxis bewegen, wird der Satellit mit höchster Präzision ermitteln und zudem die Leuchtkraft der Sterne in unterschiedlichen Spektralbereichen untersuchen.

**Die Gaia-Mission soll aber auch** die Geschwindigkeiten, mit der sich Satellitengalaxien um unsere Milchstraße bewegen, mit einer Genauigkeit von einigen Dutzend Kilometern pro Sekunde in drei Dimensionen erfassen. Möglicherweise wird sogar die Feinstruktur ihrer Bewegung in der Satellitenscheibe, innerhalb derer sie um die Milchstraße kreisen, erkennbar sein: Entstanden die Sate-

litengalaxien aus nicht nur einem, sondern aus zwei Gezeitenarmen, könnten wir auf gleich zwei Ströme von Satellitengalaxien stoßen, die in der Scheibe leicht gegeneinander versetzt sind.

**Geht man statt vom kosmologischen Standardmodell** von alternativen Ansätzen wie dem in diesem Artikel vorgeschlagenen MONDschen Universum aus, gelangt man zu weiteren Voraussagen. Neueste Computersimulationen zeigen, dass die junge Milchstraße einst möglicherweise gleich mehrfach mit derselben Galaxie in Wechselwirkung trat, bevor beide schließlich verschmolzen. War dies der Fall, könnte Gaia sogar mehrere Generationen von Satellitengalaxien entdecken und damit auch mehrere, aber ähnlich ausgerichtete Scheibenebenen. In unserem Bonner Team erarbeiten wir mit Hilfe von Computermodellen der frühen Milchstraße derzeit entsprechende Voraussagen, um sie später mit Gaias Beobachtungsdaten abzugleichen. *pk/mp*

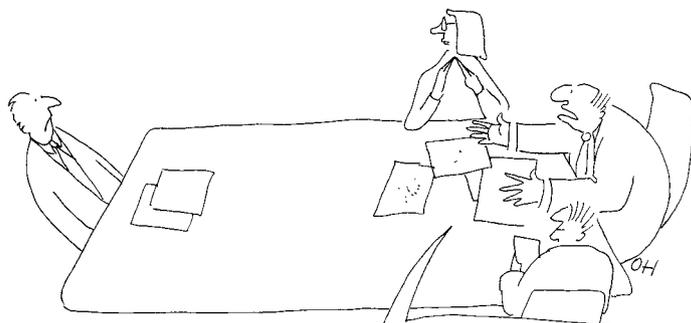
Die so entstandenen Gezeitenzwergegalaxien reihen sich entlang des Gezeitenarms auf und besitzen ähnliche Bewegungsrichtungen. Zudem befinden sie sich unweigerlich in der Ebene der Wechselwirkung zwischen den großen Galaxien, wo die stärksten Kräfte wirken, und unsere jüngsten Computerberechnungen zeigen, dass sich in diesem Fall auch leicht »Geisterfahrer« bilden können.

Betrachtet man die Satellitengalaxien der Milchstraße als Gezeitenzwergegalaxien, lässt sich ihre bislang rätselhafte Verteilung ebenso wie die Richtung ihrer Bewegungen auf überzeugende Weise erklären. Die Kollision, bei der sie ursprünglich entstanden, dürfte sich unseren Berechnungen zufolge vor rund elf Milliarden Jahren ereignet haben. In jener kosmischen Epoche war das Universum noch viel kleiner und dichter, die Galaxien kollidierten darum häufiger. Dank ihres damals hohen Gasanteils stand zudem sehr viel Material für die Ausbildung von Gezeitenarmen und Gezeitenarmgalaxien zur Verfügung. Wahrscheinlich hat diese Kollision auch zur Entstehung des Bulges der Milchstraße geführt.

Das Szenario der Gezeitengalaxien erklärt zudem weitere Beobachtungen. Ihm zufolge sind umso mehr Gezeitengalaxien zu erwarten, je massereicher die kollidierenden Sternsysteme sind. Bulges lassen sich ebenfalls als Produkt der Kollision zweier Galaxien und des in ihnen enthaltenen Gases erklären. Sie fallen dann umso massereicher aus, je massereicher oder gasreicher die Kollisionspartner waren. So ergibt sich auf plausible Weise der in der Lokalen Gruppe beobachtete Zusammenhang zwischen der Masse des Bulges einer Scheibengalaxie und der Anzahl ihrer aus Gezeitenwechselwirkungen hervorgegangenen Satelliten, denn beide Phänomene hängen auf ähnliche

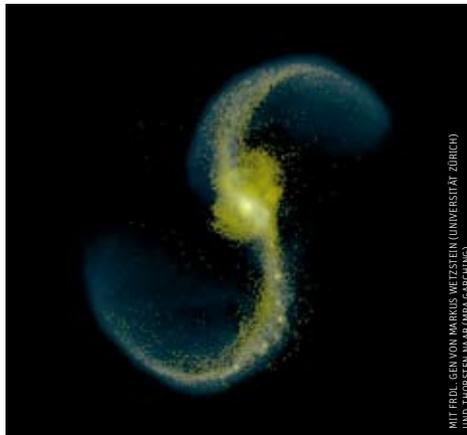
Weise von der vorangegangenen Galaxienwechselwirkung ab. Entstand eine Scheibengalaxie hingegen, ohne dass eine größere Kollision dabei eine Rolle spielte, verfügt sie weder über einen Bulge noch über Satellitengalaxien, so wie es bei der Galaxie M33 der Fall ist.

Natürlich beschreibt auch die Standardkosmologie Wechselwirkungen zwischen Galaxien, sie sind schließlich das treibende Element des Wachstums von Sternsystemen. Allerdings haben Tadashi Okazaki und Yoshiaki Taniguchi von der japanischen Tohoku University schon im Jahr 2000 festgestellt, dass die Zahl der durch die Wechselwirkungen entstehenden Gezeitengalaxien vollkommen ausreicht, um die Zahl sowohl der beobachteten Satellitengalaxien als auch die der elliptischen Zwergegalaxien in Galaxienhaufen zu erklären. In diesem Bild bleibt also gar kein Platz für weitere, von Dunkler Materie dominierte Zwergegalaxien, so dass sich selbst innerhalb der Standardkosmologie ein logischer Widerspruch zu offenbaren scheint.



TUT MIR LEID, ABER WENN SIE JETZT NUR MEHR ZWERGGALAXIEN UNTERSUCHEN, MÜSSEN WIR NATÜRLICH IHRE FORSCHUNGSMITTEL KÜRZEN!

Ließen sich einige der Satellitengalaxien der Milchstraße als Gezeitenzwerggalaxien identifizieren, würde das Problem der »fehlenden Satelliten« noch drängender: Denn dann wären kaum noch Satelliten vorhanden, für deren Erklärung die Dunkle Materie benötigt wird. Tatsächlich entstehen Gezeitenzwerggalaxien aber auch schon im Standardmodell. Dieses Bild aus einer Simulation, in der die Dunkle Materie berücksichtigt wird, zeigt zwei Scheibengalaxien in einer späten Kollisionsphase; auch der zentrale Bulge der künftigen Galaxie (heller Punkt in der Bildmitte) ist bereits erkennbar. Vor allem aber sind, wie Perlen an einer Schnur aufgereiht, im unteren Gezeitenarm die Vorläufer von Gezeitenzwerggalaxien zu sehen.



In den nächsten Jahren müssen wir daher unter anderem mit Hilfe des SMS-Survey (siehe Kasten S. 27) und des Gaia-Satelliten (siehe Kasten S. 29) überprüfen, ob sich tatsächlich die meisten Satellitenzwerggalaxien unserer Milchstraße in einer Scheibe bewegen. Wäre dies der Fall, sind sie mit hoher Sicherheit Gezeitenzwerge und es blieben, entgegen den Voraussagen der Standardkosmologie, keine Dunkle-Materie-Satellitengalaxien mehr übrig, die im dunklen Halo der Milchstraße gefangen sein könnten.

Noch ist aber ein weiterer wichtiger Punkt zu klären. Auch die Sterne in Satellitengalaxien kreisen viel schneller um deren Zentren, als es die Schwerkraft der sichtbaren Masse vermuten lässt. Die Satelliten der Milchstraße müssten sogar einen extrem hohen Anteil an Dunkler Materie aufweisen, um stabil zu sein und nicht auseinanderzufliegen. Brauchen wir die Dunkle Materie also doch?

Hier hilft ein Blick auf die noch jungen Zwerggalaxien, die zur etwa 200 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie NGC 5291 gehören. Auch bei ihnen dürfte es sich um Gezeitenarmgalaxien handeln, denn der Gezeitenarm, in dem sie entstanden, ist noch zu erkennen. Dennoch scheinen sie die zusätzliche Gravitation der Dunklen Materie zum Zusammenhalt zu benötigen, wie erstmals Frédéric Bournaud von der Université Paris Diderot im Jahr 2007 anhand ihrer Rotationskurven zeigte.

Doch Gezeitenarme verfügen nur über vergleichsweise wenig Dunkle Materie, wie die amerikanischen Astrophysiker Joshua Barnes und Lars Hernquist bereits 1992 im Wissenschaftsjournal »Nature« dargelegt haben. Denn diese verhält sich anders als ihr sichtbares Pendant. Statt sich in einer dünnen, rotierenden Scheibe anzuordnen, verteilt sie sich gleichmäßiger und sehr weiträumig um die interagierenden Galaxien. Sie ist also nicht einfach dort zu suchen, wo wir die Gezeitenarme sehen. Anders als die Gas- und Staubwolken in diesen Armen klumpt sie auch nicht. (Wird bary-

onisches Gas komprimiert, können die Atome ihre Energie abstrahlen, wodurch sie abkühlen und dann verklumpen. Komprimierte Dunkle Materie hingegen kann, weil sie nicht elektromagnetisch wechselwirkt, ihre Energie nicht auf diese Weise loswerden. Steigt der Druck, so treibt es die Partikel wieder nach außen weg.) Obwohl Gezeitenzwerggalaxien also mit Sicherheit keine signifikanten Mengen Dunkler Materie enthalten, wirken in ihnen größere Gravitationskräfte, als die bloße sichtbare Materie vermuten lässt. Welche Kraft hält aber dann die Galaxien zusammen?

Die Standardkosmologie und mit ihr die Dunkle-Materie-Hypothese fußt auf der Annahme, dass Einsteins allgemeine Relativitätstheorie (ART) nicht nur dort gültig ist, wo wir sie experimentell mit höchster Präzision überprüft haben, sondern auch auf kosmischen Skalen. Doch die Folgerungen aus der Dunkle-Materie-Hypothese widersprechen den Beobachtungen – die ART lässt sich in ihrer heutigen Form also nicht halten.

Dieses Paradoxon hat Folgen für unser Verständnis von Gravitation, von der wir bis heute nicht wirklich wissen, was sie eigentlich ist. Im einsteinschen Sinn müsste die Gravitation nicht als Kraft interpretiert werden, die Schwerkraftanziehung zwischen Massen wäre stattdessen auf die Krümmung der Raumzeit zurückzuführen. Anders als bei den drei übrigen Fundamentalkräften, die durch so genannte Austauschteilchen vermittelt werden, würde dann kein Austauschteilchen der Gravitation existieren.

## Auf eine Wissenslücke gestoßen

Aber auch die moderne theoretische Physik kennt den genauen Zusammenhang zwischen Masse und Raumzeit bislang nicht. Noch ungeklärt ist etwa die wichtige Frage, ob die Raumzeit aus der Existenz von Materie hervorgeht oder ob sie überhaupt unabhängig von Masse existieren kann. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Astronomie genau im Bereich der Gravitation eine Wissenslücke aufdeckt.

Die beschriebenen Widersprüche zwischen kosmologischem Standardmodell und astronomischen Beobachtungen legen nun die Annahme nahe, dass wir ein anderes Verständnis der Gravitation in Galaxien benötigen und die Gravitationsgesetze neu formulieren müssen – so, dass die Schwerkräfte unter bestimmten Umständen um ein wenig stärker sind als gedacht. Diese Alternative zur Standardkosmologie ist konzeptionell sogar einfacher als die Dunkle-Materie-Hypothese, was aus wissenschaftstheoretischen Gründen für sie spricht. Und auch das Standardmodell der

## EINSPRUCH?

Viele Forscher behaupten, dass sich das Standardmodell auf kleinen Skalen nicht testen lässt. Die physikalischen Prozesse der baryonischen Materie wie etwa die Sternentstehung seien zu komplex, als dass man sie in Simulationen großräumiger kosmischer Entwicklungen präzise genug berücksichtigen könne. Folglich besäßen die Simulationen auch nur auf größeren Skalen Aussagekraft. Doch dieser Einwand erfolgt zu Unrecht, denn alle im nebenstehenden Artikel genannten Folgerungen aus dem Standardmodell beziehen sich auf fundamentale Erhaltungssätze der Energie und des Drehimpulses und keineswegs auf Details der baryonischen Physik. *pk/mp*

Teilchenphysik müsste nicht um die Partikel der Dunklen Materie ergänzt werden und besäße weiterhin Gültigkeit. In Galaxien würde keine Masse mehr »fehlen«, stattdessen würde die sichtbare, baryonische Materie leicht stärkere Kräfte verursachen.

Eine Vielzahl von Untersuchungen hat in den vergangenen Jahren immer wieder gezeigt, dass die Eigenschaften von Galaxien wie etwa die Unregelmäßigkeiten ihrer Rotationskurven anscheinend nur von der Verteilung der sichtbaren Materie abhängen – dass also die Dunkle Materie, wenn es sie denn gäbe, auf beinahe magische Weise mit normaler Materie gekoppelt sein müsste. Eine Beschreibung, die von Newtons Gravitationsgesetz abweicht, würde diese scheinbare Kopplung hingegen auf völlig natürliche Weise erklären.

Den hervorragenden Bestätigungen der einsteinschen ART widerspricht all dies nicht, denn die entsprechenden Experimente fanden stets auf sehr viel kleineren Skalen statt – die Gravitationsgesetze gelten daher nicht notwendigerweise auch auf der Ebene von Galaxien. Selbst die Erkenntnis, dass die großräumige Verteilung der Materie im Kosmos mit den Vorhersagen der ART übereinstimmt, ist kein Beweis dafür, dass die Theorie vollständig korrekt ist. Denn naturwissenschaftliche Theorien lassen sich aus prinzipiellen Grün-

den niemals beweisen. Man kann sie lediglich in konkreten Experimenten überprüfen, um festzustellen, ob sie dort Gültigkeit besitzen. Eine einzige Widerlegung reicht jedoch aus, um ihre Allgemeingültigkeit zu widerlegen.

Eine allgemein akzeptierte, konkrete Formulierung einer modifizierten Gravitation gibt es heute noch nicht. Momentan befinden sich aber einige Alternativen im Wettstreit. Am bekanntesten ist wohl die Modifizierte newtonsche Dynamik (MOND), auf die immer mehr Forscher ihre Hoffnungen richten. Erstmals formuliert wurde diese Theorie 1983 vom israelischen Physiker Mordehai Milgrom (»Gibt es Dunkle Materie?« von Mordehai Milgrom, SdW 10/2002, S. 34). Sie basiert auf einer Modifikation des 2. newtonschen Gesetzes, dem zufolge die auf einen Körper wirkende Kraft proportional zu dessen Beschleunigung ist. Dieses Gesetz ist in weiten Bereichen hervorragend bestätigt. Bei Beschleunigungen unterhalb einer bestimmten Schwelle treten Milgrom zufolge jedoch Abweichungen davon auf.

Aus Rotationskurven von Galaxien wurde für diese Schwelle eine Größenordnung von  $10^{-10} \text{ m/s}^2$  abgeleitet. (Zum Vergleich: Auf der Erdoberfläche erfahren wir durch die Erdmasse eine Beschleunigung, die 100 Milliarden Mal stärker ist.) Der Ursprung dieser winzigen Abweichung könnte nach unserer Sicht möglicherweise in quantenmechanischen Prozessen liegen, die sich in der Raumzeit abspielen, oder in der Existenz zusätzlicher, noch unbekannter Felder. Diese könnten die von Massen verursachten Störungen der Raumzeit weitertragen, als dies die herkömmliche Theorie voraussagt. Ein anderer Vorschlag stammt vom Physiker John Moffat vom kanadischen Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Ontario). Dessen Modified Gravity (MOG) basiert darauf, im Fall schwacher Felder eine weitere Kraft zur Gravitation zu addieren. Diese ähnelt der so genannten Yukawa-Kraft, die in Atomkernen eine wichtige Rolle spielt.

Vielleicht muss die ART aber gar nicht modifiziert werden. Auch bisher unberücksichtigte Raumzeiteffekte, die nur im Fall sehr schwacher Gravitation, also sehr geringer Krümmungen des Raums auftreten, könnten Abweichungen verursachen.

Theorien zur Erklärung der Gravitationsanomalien in Galaxien werden unter Wissenschaftlern derzeit immer intensiver debattiert und stellen ein rasant wachsendes Forschungsfeld dar. Das kommende Jahrzehnt dürfte also sehr spannend werden. Noch ist nichts entschieden, eins aber ist schon jetzt sicher: Die wahre Geschichte des Universums muss erst noch geschrieben werden. ◀



**Pavel Kroupa** (links) hat an der englischen University of Cambridge promoviert. Derzeit leitet der australische Staatsbürger die Arbeitsgruppe Sternpopulationen und Sterndynamik am Argelander-Institut für Astronomie der Universität Bonn. Sein Forschungsinteresse gilt der Dynamik von Sternen und Galaxien. In Zukunft will er sich den Varianten der modifizierten newtonschen Dynamik widmen. **Marcel Pawlowski** promoviert an der Universität Bonn im Fachbereich Astrophysik.



Um die Kollision zweier milchstraßenähnlicher Scheibengalaxien zu simulieren, muss nicht unbedingt die Existenz Dunkler Materie angenommen werden. Im Jahr 2008 war es Olivier Tiret (jetzt an der International School for Advanced Studies in Trieste) und Françoise Combes vom Observatoire de Paris erstmals gelungen, bei Berechnungen auf Basis nichtnewtonscher Dynamik auch die Ausbreitung von Gezeitenarmen und die Bildung von Zwerggalaxien zu reproduzieren (Bild). Simulationen dieser Art sind sehr viel aufwändiger als newtonsche Rechnungen und bislang nur in niedriger Auflösung möglich.

**Bournaud, F. et al.:** Missing Mass in Collisional Debris from Galaxies. In: *Science* 316(5828), S. 1166 – 1169, 25. Mai 2007.

**Gentile, G. et al.:** Tidal Dwarf Galaxies as a Test of Fundamental Physics. In: *Astronomy and Astrophysics* 472(2), S. L25 – L28, 2007.

**Kroupa, P. et al.:** Local-Group Tests of Dark-Matter Concordance Cosmology: Towards a New Paradigm for Structure Formation. In: *Astronomy and Astrophysics*, im Druck. <http://xxx.uni-augsburg.de/abs/1006.1647>.

**Peebles, P. J. E., Nusser, A.:** Nearby Galaxies and Problems of Structure Formation; a Review. In: *Nature* 465(7298), S. 565 – 569, 3. Juni 2010. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010arXiv1001.1484P>.

**Tiret, O., Combes, F.:** Evolution of Spiral Galaxies in Modified Gravity. In: *Astronomy and Astrophysics* 464(2), S. 517 – 528, 2007.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037414](http://www.spektrum.de/artikel/1037414).

## Sonnenaufgang in einem Opal

*... nicht aus einem Zimmer voll Luft,  
sondern erst aus der ganzen Höhe der Luftsäule  
kann das Ätherblau eines Himmels geschaffen werden*

Jean Paul (1763–1825)

### Von H. Joachim Schlichting

Das Alpenglühen ist an sich der Bergwelt vorbehalten. Während die Täler bei Sonnenaufgang noch im Dunkeln liegen, reflektieren Felswände und Schneeflächen das rötliche Sonnenlicht – am intensivsten dann, wenn es kurz zuvor auf sie geregnet hat – und schaffen eine einzigartige Stimmung. Dasselbe Naturphänomen tritt natürlich auch bei Sonnenuntergang auf, aber man muss nicht einmal in den Bergen sein, um es zu erleben. Moderne Städte mit ihren Hochhäusern tun es auch, wie das Foto unten belegt.

Indessen fällt auf diesem Bild, entstanden beim Landeanflug auf das südafrikanische Johannesburg, nicht nur die rötliche Färbung der in der aufgehenden Sonne stehenden Wolkenkratzer auf, sondern auch der auf den meisten Gebäuden liegende Blauschimmer. Der wiederum besitzt eine so unmittelbar einleuchtende Erklärung – er verdankt sich dem Himmelsblau –, dass die Fragen, die sich daran anschließen müssten, gerne gar nicht erst gestellt werden. Ist zum Beispiel klar, warum erst das Blau des Himmels den Sonnenuntergang in Gelb und Rot erscheinen lässt?

**Kombiniert mit einer Blaufärbung der Gebäude ist das Phänomen des »Alpenglühens« auch beim Sonnenaufgang über Johannesburg zu bewundern.**



Verlassen wir also den Ort, an dem uns manches allzu selbstverständlich ist, und blicken einmal vom Mond aus in das Weltall. Hier wäre alles anders: Der »Himmel« erschiene schwarz wie die Nacht, und stünde man im Schatten eines Mondkraters, wäre es dort ebenfalls pechfinster. Allenfalls das Streulicht der hell beleuchteten Mondoberfläche würde die Umgebung schwach aufhellen.

Der schon sprichwörtlichen Frage »Warum ist der Himmel blau?« wäre demzufolge eine viel wichtigere voranzustellen: Warum ist der Himmel hell? Denn anders als auf dem Mond darf auf der Erde die Sonne schon einmal verdeckt sein, und trotzdem sorgt der Tageshimmel allenthalben für gute Sicht.

Das verdanken wir der Atmosphäre, jener vor allem aus Stickstoff und Sauerstoff bestehenden Gasschicht, die das Licht der Sonne streut und zu der indirekten Beleuchtung führt, die wir als Himmel wahrnehmen. Auch manche Wohnzimmerlampen beleuchten die Gegenstände im Zimmer nur indirekt: Sie senden ihr Licht zur Decke, von der es zurückgestreut wird. Die Wellenlänge – also Farbe – des Lichts verändert sich dabei kaum. Luft hingegen streut verschiedene Farben unterschiedlich stark: Violett und Blau am kurzwelligen Ende des Spektrums werden am stärksten gestreut, das langwellige Rot am schwächsten. Quantifiziert hat diesen Zusammenhang schon 1873 der Brite Lord Rayleigh (der für seine Forschung an Gasen 1904 den Nobelpreis erhielt): Die Intensität der Streustrahlung nimmt mit der 4. Potenz der Wellenlänge ab. Da die Wellenlänge von rotem Licht, zur Veranschaulichung grob vereinfacht, zweimal so groß ist wie die des blauen Lichts, ist die Intensität des blauen Lichts also  $2^4 = 16$  Mal so groß wie die des roten. Im Streulicht ist der Blauanteil darum entsprechend größer als im direkten, weißen Sonnenlicht.

Doch violettes Licht ist noch kurzwelliger als blaues. Da liegt die Frage nahe, warum der Himmel nicht eher violett erscheint? Dafür gibt es mehrere Gründe. Zum einen nimmt der Wellenlängenbereich, den unser Gehirn zu einer violetten Farbwahrnehmung verarbeitet, nur einen relativ kleinen Anteil im Spektrum des Sonnenlichts ein. Auch ist unser Auge für die entsprechenden Wellenlängen weniger empfindlich als für jene, die der Farbe Blau entsprechen. Zum anderen werden ja auch alle anderen Farben über Grün und Gelb bis zum Rot an den Luftmolekülen gestreut (wenn

auch mit rapide abnehmender Intensität). Was wir als charakteristisches Himmelsblau wahrnehmen, ist also eine Mischfarbe, die sich von Weiß vor allem dadurch unterscheidet, dass die kurzen Wellenlängen wesentlich stärker als die langen vertreten sind.

Ganz im Sinn des Zitats von Jean Paul kann man sich übrigens auch klarmachen, wie schwach die Blautönung eigentlich ist. Wäre sie dies nicht, müsste jeder Gegenstand, der nicht im direkten Sonnenlicht betrachtet wird, blau schimmern, weil wir ihn stets durch die Luft hindurch sehen. Erst der Blick durch eine kilometerdicke Luftschicht etwa auf ferne Berge führt dazu, dass wir die blaue Farbe allmählich erkennen. Dann allerdings wirkt sie merkwürdig, obgleich uns der Himmel dieses Phänomen alltäglich vor Augen führt.

**»Beim Siroc der Sonnenwagen purpurrot sich niedersenkt«**

Die Rayleighstreuung in der Atmosphäre hat auch eine Konsequenz für die Farbe des direkten Sonnenlichts. Denn diesem gehen beim Durchgang durch die Atmosphäre vor allem kurzwellige Anteile verloren. Das legt die Frage nahe, ob uns das direkte Sonnenlicht im kurzwelligen Bereich nicht stärker »ausgedünnt« und wegen der resultierenden Dominanz langwelliger Anteile nicht noch etwas gelblicher erscheinen müsste.

Dies ist in der Tat der Fall. Bei hoch stehender Sonne merken wir davon zwar wenig, weil der Weg des Sonnenlichts durch die Atmosphäre kurz und daher die Streuverluste gering sind. Nähert sich die Sonne aber dem Horizont und legt die Strahlung einen sehr langen Weg durch dichte Atmosphärenschichten zurück, bevor sie das Auge des Betrachters erreicht, hat das weiße Licht so viel an kurzwelligen Anteilen verloren – violett, blau und grün –, dass die Gelb- und Rottöne dominieren. Diese also gewinnen vor allem dadurch an Einfluss, dass das Blau ja »benötigt« wird, um den Himmel einzufärben.

Einer kilometerdicken Luftschicht bedarf es indessen gar nicht, um all diese Lichteffekte vorzuführen. Schon ein Opal erinnert uns unweigerlich an Himmelsblau und Alpenglühen. Im weißen Sonnenlicht schimmert der Schmuckstein bläulich, streut also verstärkt blaues Licht nach allen Seiten. Hält man ihn hingegen vor eine weiße Lichtquelle und schaut durch ihn hindurch, erscheint er je nach Dicke gelb, orange oder rot. Das hindurchgegangene Licht kann man aber auch auffangen (siehe Foto oben rechts): Dann herrscht das »kalte Feuer« einer Rotfärbung vor, die jedem farbenprächtigen Sonnenuntergang zur Ehre gereicht.



BEIDE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Ist die Ähnlichkeit der Effekte eine zufällige? Keineswegs. Auch die Farben, die uns der Opal sehen lässt, verdanken sich der Rayleighstreuung des Lichts. In diesem Fall wird es an winzigen Kügelchen aus Cristobalit gestreut. (Dieses Molekül, das dieselbe Summenformel wie Siliziumdioxid, SiO<sub>2</sub>, besitzt, ist in die amorphe Kieselsäurematrix des Opals eingelagert.)

Im Licht der Physik können sich Ähnlichkeiten zwischen völlig verschiedenen Gegenständen also als Manifestationen desselben physikalischen Gesetzes erweisen. Den Zusammenhang zwischen Himmelsbläue und Farbenlehre hat auch Johann Wolfgang von Goethe – der Dichterstürst, der sich eher als Naturforscher betrachtete – schon gesehen:

*Wenn der Blick an heitern Tagen  
Sich zur Himmelsbläue lenkt,  
Beim Siroc der Sonnenwagen  
Purpurrot sich niedersenkt,  
Da gebt der Natur die Ehre,  
Froh, an Aug' und Herz gesund,  
Und erkennt der Farbenlehre  
Allgemeinen ewigen Grund.*

Tatsächlich: Auch der vom Schirocco (Siroc) aus den nordafrikanischen Wüsten nach Europa gewehrte und oft sehr feine Sandstaub kann die Lichtstreuung verstärken und für purpurrote Sonnenuntergänge sorgen, wie sie bei klarer Luft ausbleiben. Rayleigh hat quantifiziert, was Goethe wohl schon erahnte. <

**Dem Augenschein nach hat dieser Opal wenig mit einer kilometerdicken Luftschicht zu tun. Doch bei beiden offenbart sich dieselbe physikalische Gesetzmäßigkeit: die Rayleighstreuung.**



**H. Joachim Schlichting** ist 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.

Weblinks finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037432](http://www.spektrum.de/artikel/1037432).

# SEIN ODER NICHT SEIN IM GEHIRN

Täglich entstehen in unserem Denkorgan neue Nervenzellen. Doch die meisten davon sterben schon bald wieder ab. Warum? Forscher glauben: Diese Neurone sind für bestimmte Lernvorgänge wichtig – und überleben nur, wenn sie dabei so richtig gefordert werden.

Von Tracey J. Shors

## In Kürze

- ▶ Im Gehirn eines Erwachsenen entstehen täglich **Tausende neuer Nervenzellen**: Neben dem Riechkolben betrifft das vor allem den Hippocampus, der für Lernen und Gedächtnis zuständig ist.
- ▶ Die meisten der im Hippocampus neu gebildeten Neurone **sterben jedoch innerhalb weniger Wochen wieder ab** – außer es gilt in dieser Zeit etwas Schwieriges zu lernen. Die damit verbundene geistige Anstrengung scheint die Zellen am Leben zu halten.
- ▶ Möglicherweise werden diese Neurone dazu gebraucht, um anhand früherer Erfahrungen **zukünftige Ereignisse vorherzusagen**. Viele andere Lernvorgänge dürften hingegen ohne sie auskommen. Förderung der Neurogenese könnte das Gehirn alter Menschen fit halten und den geistigen Verfall bei Demenzerkrankungen verzögern.

**A**nfang der 1990er Jahre warteten Neurobiologen mit einer Sensation auf: Das bis dahin geltende Dogma, die Gehirne ausgewachsener Säugetiere könnten grundsätzlich keine neuen Nervenzellen mehr bilden, sei nicht mehr haltbar. Was war geschehen? Die amerikanische Neurowissenschaftlerin Elizabeth Gould an der New Yorker Rockefeller University hatte beobachtet, dass im erwachsenen Rattenhirn frische Neurone entstehen – und zwar im so genannten Hippocampus, der für Lernen und Gedächtnis zuständig ist. Bald darauf folgten entsprechende Berichte über andere Tiere, von Mäusen bis zu Krallenaffen. 1998 wiesen dann Neurobiologen in den USA und Schweden auch bei Menschen eine solche »adulte Neurogenese« im Gehirn nach (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 32).

Um die Nervenzellneubildung bei Nagetieren zu untersuchen, injizieren Forscher ihnen eine Substanz namens Bromdesoxyuridin (BrdU). Das Molekül markiert die Erbsubstanz sich teilender Zellen, wodurch sich die betreffenden Zellkerne im Mikroskop sichtbar machen lassen. Solche Untersuchungen brachten an den Tag, dass im Hippocampus einer Ratte täglich zwischen 5000 und 10000 neue Nervenzellen entstehen. Wie viele Neurone sich pro Tag im menschlichen Gehirn neu bilden, ist noch unbekannt, denn BrdU kann Mutationen verursachen und eignet sich daher nicht für Experimente mit gesunden Menschen.

Dieser Nachschub erfolgt nicht automatisch und gleichmäßig, sondern hängt von verschiedenen Umweltfaktoren ab. Alkoholkon-

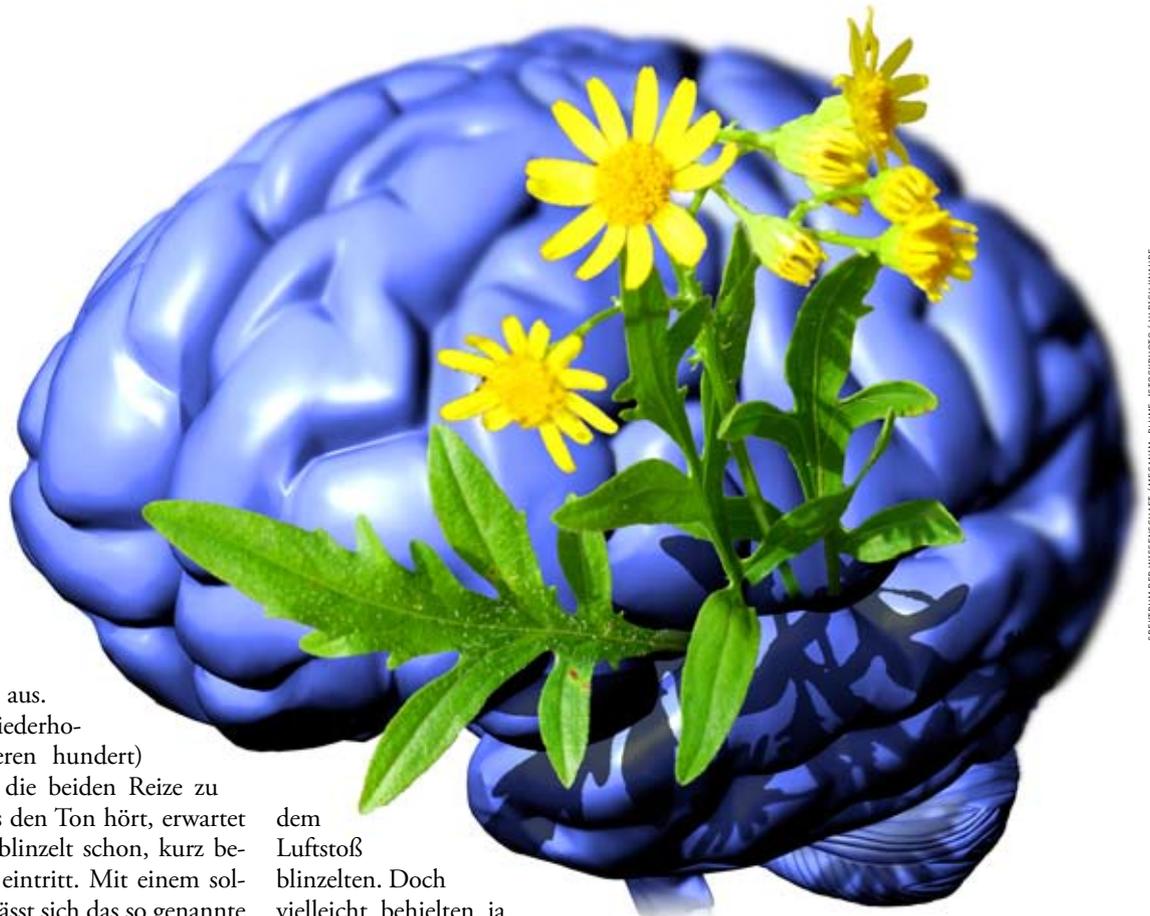
sum brems beispielsweise die Produktion an Neuronen; Sport und andere körperliche Aktivitäten hingegen steigern sie. Ratten und Mäuse, die regelmäßig in einem Laufrad rennen, bilden bis zu doppelt so viele neue Zellen wie ihre Artgenossen, die ein beschaulicheres Leben führen. Sogar der Verzehr von Heidelbeeren scheint einigen Studien zufolge die Erneuerung im Rattenhippocampus zu fördern.

Allerdings: Ein Großteil des Nachwuchses stirbt binnen weniger Wochen ab. Weshalb treibt das Gehirn dann überhaupt den beträchtlichen Aufwand, neue Zellen herzustellen, wenn diese doch so rasch wieder verloren gehen?

Unseren Experimenten mit Ratten nach zu schließen entstehen die Zellen einfach für den Fall, dass sie gebraucht werden. Werden die Tiere geistig gefordert, überleben die Neurone – ansonsten verschwinden sie wieder. Diese Entdeckung machten Elizabeth Gould, die heute an der Princeton University im US-Bundesstaat New Jersey forscht, und ich 1999, als wir untersuchten, welchen Effekt Lernen auf neue Nervenzellen im Rattenhippocampus besitzt.

Für diese Versuche nutzten wir die so genannte Trace-Konditionierung des Lidschlagreflexes (siehe Kasten S. 37). Sie ähnelt den klassischen Experimenten des russischen Physiologen Iwan Pawlow (1849–1936). In ihnen produzierte ein Hund Speichel, nachdem er einen Ton hörte, den er mit Futter in Verbindung brachte.

Während der Lidschlagkonditionierung lässt man ein Tier einen Ton hören und löst eine halbe Sekunde darauf mit einem Luftstoß oder einem anderen leichten Stimulus ei-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANIM, BLUME: ISTOCKPHOTO / ULRICH KNAUPE

nen Lidschlussreflex aus. Nach zahlreichen Wiederholungen (meist mehreren hundert) hat das Tier gelernt, die beiden Reize zu verknüpfen: Sobald es den Ton hört, erwartet es den Luftstoß und blinzelt schon, kurz bevor dieser tatsächlich eintritt. Mit einem solchen Versuchsaufbau lässt sich das so genannte antizipatorische Lernen untersuchen: die Fähigkeit, zukünftige Ereignisse mit Hilfe von Erfahrungen aus der Vergangenheit vorherzusagen.

### Wer blinzelt im richtigen Moment?

Um den Zusammenhang von Lernen und Neurogenese zu untersuchen, injizierten wir allen Ratten zu Beginn des Experiments BrdU, um neu entstehende Nervenzellen zu markieren. Eine Woche später begann für die Hälfte der Nager das Blinzeltraining, die anderen blieben in ihren Käfigen. Nach vier oder fünf Übungstagen zählten wir bei jenen Ratten, die nun schon vor dem Luftstoß die Lider schlossen, mehr BrdU-haltige Neurone im Hippocampus als bei ihren Artgenossen aus der Vergleichsgruppe. Letztere wiesen am Ende des Experiments nur noch sehr wenige neu gebildete Zellen auf, die zu Beginn BrdU eingebaut hatten. Dies deutete darauf hin, dass die Blinzelübung Hirnzellen am Leben erhalten hat, die andernfalls abgestorben wären. Das gleiche Resultat fanden wir bei Tieren, die gelernt haben, sich in einem Labyrinth zurechtzufinden.

Als wir Ende der 1990er Jahre mit diesen Studien begannen, konzentrierten wir uns zunächst vor allem auf solche Ratten, die gute Lernerfolge erzielten – in diesem Fall jene, die in mehr als 60 Prozent der Versuche kurz vor

dem Luftstoß blinzelten. Doch vielleicht behielten ja auch Nager, die nur schlecht oder gar nicht lernten, nach dem Training mehr neue Hirnzellen als die Tiere der Vergleichsgruppe? Unsere 2007 veröffentlichten Ergebnisse zeigten, dass dies nicht der Fall war: Ratten, die selbst nach 800 Übungszyklen den Lidreiz nicht vorausahnten, wiesen ebenso wenig Zellnachwuchs auf wie jene, die ihre Käfige nie verlassen hatten.

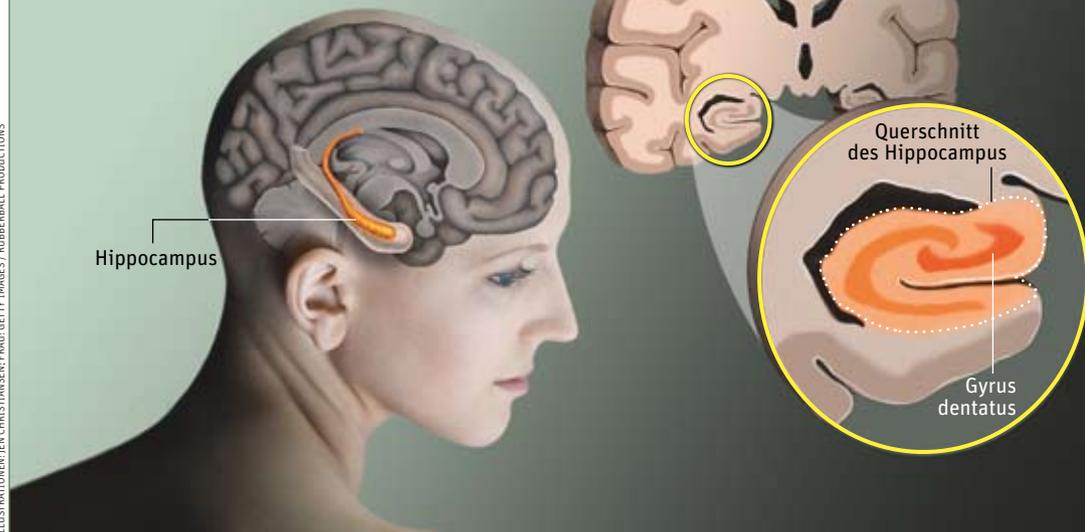
Wir führten auch Experimente durch, bei denen den Ratten nur ein Tag mit etwa 200 Versuchen zur Verfügung stand. Einige Tiere lernten sogar unter solchen verschärften Bedingungen, den Reiz vorauszuahnen. Obwohl alle das gleiche Training durchlaufen hatten, wiesen diese gelehrigen Nager wieder mehr neue Neurone auf als die anderen. Es ist also offenbar der Lernvorgang an sich, der das Absterben der Neuankömmlinge verhindert – und nicht etwa das wiederholte Üben, die veränderte Umgebung oder der modifizierte Tagesablauf.

Jedoch: Nicht alle Arten von Lernen wirken gleich gut. So überleben zum Beispiel nicht mehr Hirnzellen, wenn man eine Ratte darauf trainiert, im Wasser zu einer für sie sichtbaren Plattform zu schwimmen. Auch wenn ein Tier beigebracht bekommt, dass zwei Reize – etwa Ton und Luftstoß – fast gleichzeitig eintreten, hat dies keinen Effekt. Warum?

**Lange glaubten Forscher, mit der Geburt sei die Bildung von Neuronen im Gehirn abgeschlossen. Doch in jüngerer Zeit zeigte sich: Zumindest in einigen Regionen wachsen auch bei Erwachsenen Nervenzellen nach. Diese Entdeckung eröffnet neue Möglichkeiten, um dem geistigen Abbau im Alter oder bei neurologischen Erkrankungen Einhalt zu gebieten.**

**Im ausgewachsenen Gehirn** entstehen Neurone unter anderem im Hippocampus – genauer gesagt im Gyrus dentatus (rechter Teil der Grafik). Erstmals entdeckten Forscher diese »adulte Neurogenese« bei Nagetieren, später konnten sie sie auch bei erwachsenen Menschen nachweisen.

ILLUSTRATIONEN: JEN CHRISTIANSEN; FRAU: GETTY IMAGES; HIRNBEREICH: PRODUCTIONS



### SEINER ZEIT VORAUSS: JOSEPH ALTMAN, DER ENTDECKER DER ADULTEN NEUROGENESE

Bereits in den 1960er Jahren fand der amerikanische Neuroanatom Joseph Altman am Massachusetts Institute of Technology (MIT) erstmals Hinweise darauf, dass auch im Gehirn von erwachsenen Säugetieren neue Nervenzellen entstehen. Seine Entdeckung wurde jedoch lange Zeit ignoriert, da sie der vorherrschenden Lehrmeinung widersprach, der zufolge im ausgewachsenen Säugerhirn keine Neurogenese stattfindet. Erst die erneute Entdeckung der adulten Neurogenese in den 1990er Jahren durch andere Forscher wie Elizabeth Gould führte zum Umsturz dieses Dogmas und zur nachträglichen Würdigung von Altman's Forschungsarbeiten.

Altman, J.: Are New Neurons Formed in the Brains of Adult Mammals? In: *Science* 135, S. 1127–1128, 1962.

Altman, J., Das, G. D.: Autoradiographic and Histological Evidence of Postnatal Hippocampal Neurogenesis in Rats. In: *Journal of Comparative Neurology* 124, S. 319–335, 1965.

Vermutlich sind solche Aufgaben schlicht nicht schwer genug. Ratten schwimmen quasi automatisch zu einer sichtbaren Plattform, schließlich wollen sie nicht ertrinken. Und wenn der Lidreiz immer mit dem Ton zusammenfällt, müssen die Versuchstiere Letzteren nicht im Gedächtnis speichern, um vorherzusagen, wann der Luftstoß erfolgen wird – sie reagieren einfach, sobald sie den Ton hören.

Wir gehen davon aus, dass die kognitiv anspruchsvollsten Aufgaben auch die meisten Nervenzellen am Leben erhalten. Um die Hypothese zu überprüfen, führten wir zuerst wieder das einfache Blinzelexperiment durch, in dem der Lidreiz noch während des Tons erfolgt. Dann gestalteten wir die Aufgabe komplexer: Wir verlängerten die Dauer des Tons stark, wobei der Reiz gegen Ende eintraf.

In dieser Form war die Lernaufgabe deutlich schwieriger, da die Tiere jetzt nicht den Beginn des Tons als Startschuss interpretieren und gleich danach blinzeln durften. Sie fiel den Nagern sogar noch schwerer als der oben beschriebene Standard-Trace-Versuch, bei dem der Lidreiz eine halbe Sekunde nach Tonde erfolgte. Im Unterschied zu diesem fehlte nun nämlich das Ende des Tons als Signal, dass gleich der Lidschlussreflex ausgelöst wird. Stattdessen mussten die Ratten den Tonverlauf von Beginn an aufmerksam verfolgen und abschätzen, wann der Lidreiz kommen wird – eine echte Herausforderung. Es zeigte sich, dass das Erlernen dieser Fähigkeit mindestens ebenso viele Neurone am Leben erhält wie das Standardexperiment, manchmal sogar mehr.

### MENSCHLICHES GEHIRN

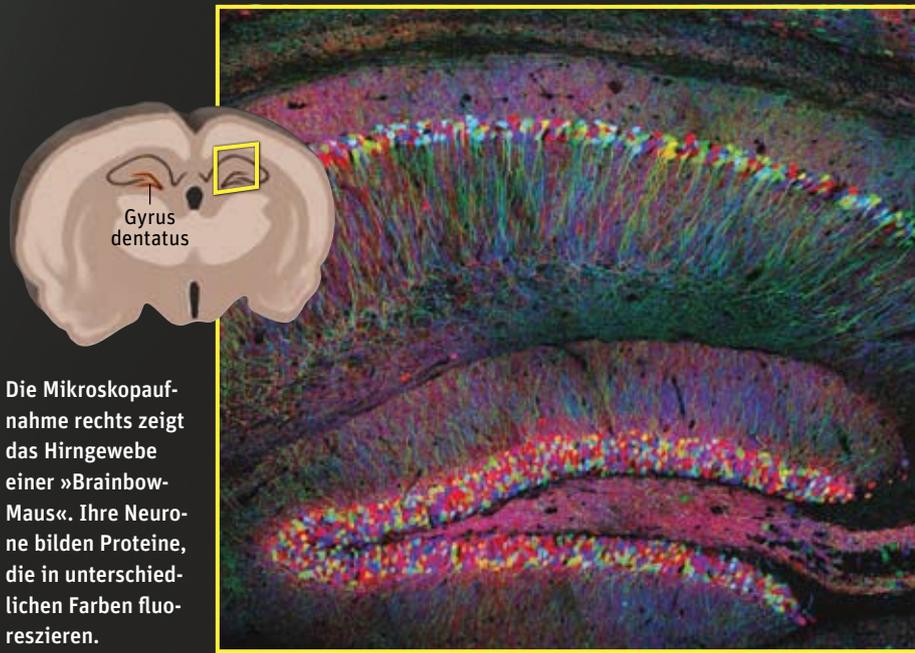
Zudem verloren jene Versuchstiere, die das korrekte Blinzeln langsamer lernten, also mehr Wiederholungen benötigten, weniger Neurone als Ratten mit schnellerer Auffassungsgabe. Neue Hirnzellen im Hippocampus scheinen demnach am ehesten durch besonders mühsame Lernaufgaben am Leben zu bleiben.

### Zeit der Reifung

Weshalb gerade mentale Anstrengung hier so wichtig ist, wissen wir noch nicht genau. Vermutlich aktivieren anspruchsvolle Aufgaben – oder solche, die längeres Üben erfordern – die Netzwerke der Nervenzellen im Hippocampus stärker, an denen auch die neu gebildeten Neurone beteiligt sind. Denn inzwischen wiesen mehrere Forschergruppen nach, dass Lernaufgaben wie die klassische Lidschlagkonditionierung allgemein die Erregbarkeit der Neurone im Hippocampus steigern und so ihre Aktivität stark erhöhen. Und beides geht Hand in Hand: Tiere mit der höchsten Aktivität in dieser Hirnregion lernen auch am besten.

Außerdem scheint es ein kritisches Zeitfenster zu geben, in dem Lernen eine neue Nervenzelle vor dem Untergang bewahren kann. Bei Nagern liegt es laut verschiedenen Studien etwa zwischen ein und drei Wochen nach der Entstehung. Beginnt das Training erst danach, ist es bereits zu spät – das Neuron stirbt. Ebenso bleibt »Üben davor« ohne Wirkung. Das hat einen biologischen Hintergrund: In diesem Zeitraum differenzieren sich die zunächst noch unspezialisierten Zellen zu reifen Neuronen aus: Sie bilden bäumchenförmige Dendriten, die Signale aus anderen

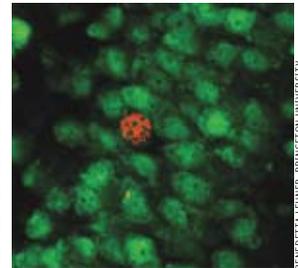
NAGERHIRN



Die Mikroskopaufnahme rechts zeigt das Hirngewebe einer »Brainbow-Maus«. Ihre Neurone bilden Proteine, die in unterschiedlichen Farben fluoreszieren.

JEAN-LUC ET, FAMILY WEISSMAN, JOSHUA SALES UND JEFF LICHTMAN, HARVARD UNIVERSITY

NACHWUCHS SICHTBAR GEMACHT



BENEDICTA LEDNER, PRINCETON UNIVERSITY

Bromdesoxyuridin (BrdU) weist Zellen nach, die entstanden sind, nachdem das Versuchstier dieser Substanz ausgesetzt wurde. Hier markiert BrdU den Kern eines neu gebildeten Neurons (rot).

Hirnteilen empfangen, sowie Axone, die Informationen in eine benachbarte Region im Hippocampus weiterleiten. Jetzt reagieren die Zellen auch erstmals auf Neurotransmitter – jene Moleküle, die der Signalübertragung zwischen Neuronen dienen.

Vermutlich antworten also Nervenzellen erst dann auf Lernreize, wenn sie schon teilweise ausgereift und in neuronale Netzwerke integriert sind. Bei anspruchsvollen Aufgaben sind alle Neurone des Hippocampus einschließlich der Neuankömmlinge voll beschäftigt. Die Folge: Letztere überleben. Andernfalls fehlt ihnen die nötige Stimulation, und sie sterben ab.

Doch worin besteht die eigentliche Aufgabe der Frischlinge? Sie werden kaum in der Lage sein, schon während ihrer Entstehung beim Lernen zu helfen – läuft es doch oft in Sekundenschnelle ab. Bei einer neuen Aufgabe kann das Gehirn ja schlecht ein paar Tage warten, bis die Zellen endlich einsatzbereit sind. Wir vermuten, dass sie auf Vorrat produziert werden, um an zukünftigen Lernprozessen mitwirken zu können. Diese Hypothese testeten wir, indem wir die neu entstandenen Nervenzellen so vollständig wie möglich ausschalteten. Dazu verabreichten wir Ratten zunächst über mehrere Wochen hinweg eine Substanz namens MAM (Methyl-



LIDSCHLAGKONDITIONIERUNG – DREI VARIANTEN EINES EXPERIMENTS

Bei der klassischen Form des Experiments (oben) hört das Versuchstier einen Ton, dem eine halbe Sekunde später ein Reiz folgt, der den Lidschlussreflex auslöst. Nach mehreren hundert Wiederholungen haben die meisten Versuchstiere gelernt, schon kurz vor dem Reiz zu blinzeln. Da der Ton und der auslösende Reiz zeitlich versetzt erscheinen, ist es für das Tier schwierig, herauszufinden, wann es blinzeln sollte. Diese anspruchsvolle Lernaufgabe hilft mit, viele neu entstandene Neurone am Leben zu halten.

Ratten meistern problemlos eine einfachere Variante dieser Aufgabe, bei der Ton und Lidreiz zeitlich überlappen (Mitte); diese simple Aufgabe erhöht die Überlebensrate neuer Hirnzellen nicht. Steigert man den Schwierigkeitsgrad durch starkes Verlängern des Tons (unten), überleben jedoch sogar mehr Neurone als bei der klassischen Versuchsanordnung.

KLASSISCHE TRACE-KONDITIONIERUNG



ÜBERLAPPENDE REIZE, KURZER TON



ÜBERLAPPENDE REIZE, LANGER TON



SCHWIERIGKEIT ÜBERLEBENDE NEURONE

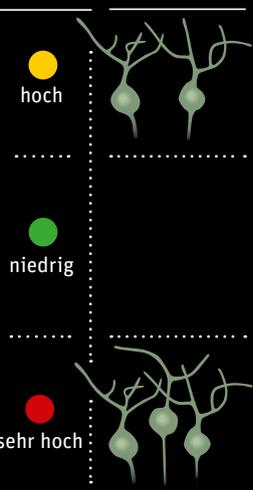


ILLUSTRATION: IEN CHRISTIANSEN; RATTE: PHOTO RESEARCHERS / NIGEL CATTLIN

azoxymethanolazetat). Sie blockiert die Zellteilung der Neuronenvorläufer und verhindert damit, dass neue Gehirnzellen entstehen. Sollten diese tatsächlich für das Lernen wichtig sein, müssten sich die Tiere als schlechtere Schüler erweisen.

Tatsächlich versagten die mit MAM behandelten Ratten im anfangs beschriebenen Blinzeltest mit einer halben Sekunde Verzögerung zwischen den Reizen. Andere Lernaufgaben, an denen ebenfalls der Hippocampus beteiligt ist, bewältigten sie hingegen gut, etwa das Schwimmen im Morris-Wasserlabyrinth. Bei diesem Experiment setzt man die Nager in eine undurchsichtige Flüssigkeit. Darin müssen sie schwimmen, bis sie eine unter der Wasseroberfläche liegende, für die Tiere nicht sichtbare Plattform erreichen. An den Wänden des Beckens befinden sich Markierungen, an denen sie sich orientieren können. Ratten ohne Neuronennachwuchs erreichten die Plattform überraschenderweise genauso schnell wie ihre unbehandelten Artgenossen.

Mit MAM behandelte Tiere konnten sich auch noch gut an Orte erinnern, an denen sie eine emotionale Erfahrung gemacht hatten.

So setzten wir Ratten in einen Käfig und verabreichten ihnen unangenehme Reize an den Füßen. Nahmen wir sie heraus und setzten sie dann wieder in denselben Käfig, verfielen sie augenblicklich in eine Schreckstarre. Auch bei solchen emotionalen Lernvorgängen, die als kontextuelle Angstkonditionierung bezeichnet werden, ist der Hippocampus aktiv. Dennoch verhielten sich unsere behandelten Versuchstiere in diesem Experiment völlig normal.

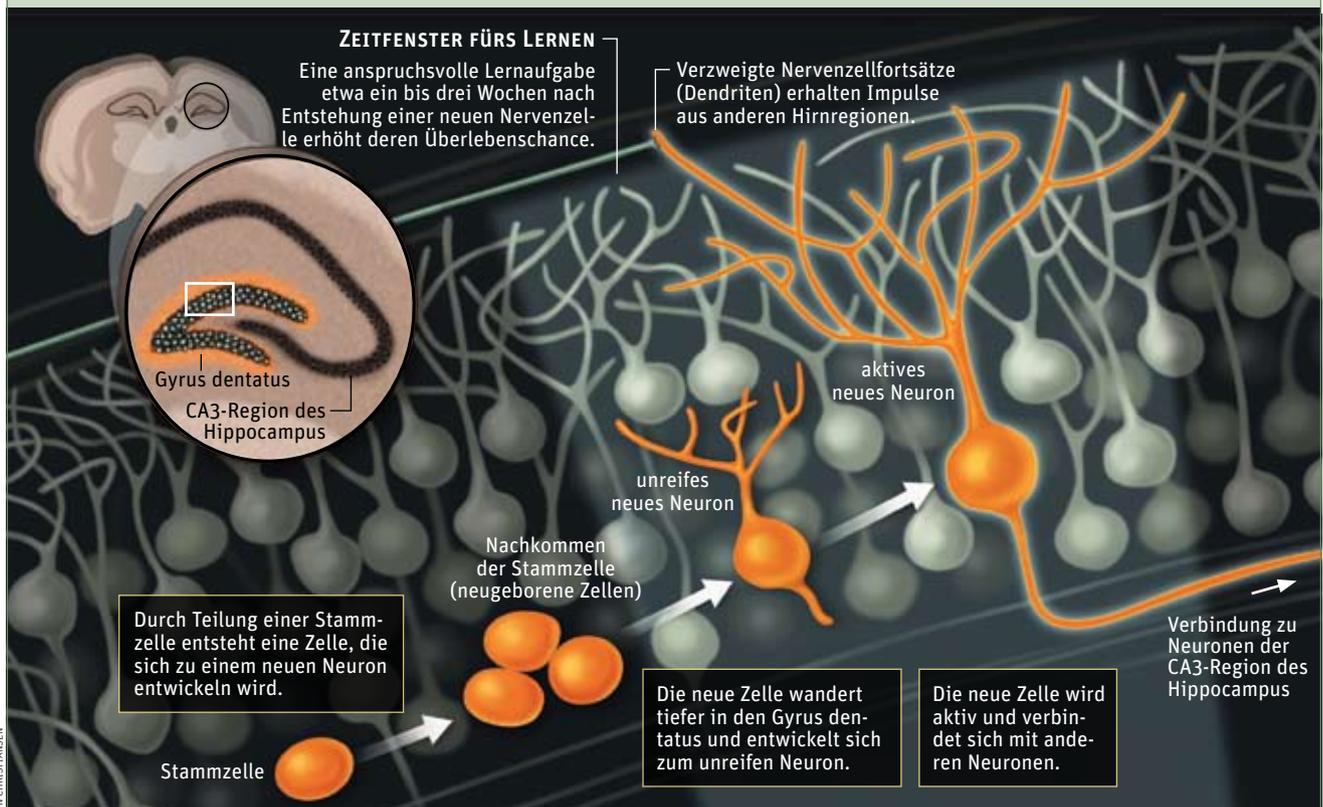
Alles in allem blieb die Lernfähigkeit von Ratten mit nur wenigen frisch entstandenen Hirnzellen – abgesehen von den erwähnten anspruchsvolleren Assoziationsaufgaben – offenbar weitgehend erhalten. Daher dürften die neuen Neurone auch nur in solchen Lernsituationen eine Rolle spielen, die beträchtliche kognitive Anstrengung verlangen.

Das erscheint auch sinnvoll: Bei lebensbedrohlichen Situationen kann ein Tier nicht erst abwarten, bis sich neue Zellverbände gebildet haben. Wahrscheinlich dienen also die zusätzlichen Zellen eher zur Feinabstimmung oder Verstärkung bereits vorhandener Problemlösefähigkeiten. Psychologen sprechen hier von der Fähigkeit, »lernen zu lernen«.

## DAS SCHICKSAL NEUER NERVENZELLEN

**Neu gebildete Neurone im Hippocampus** wandern in ihrer ersten Lebenswoche aus den Randgebieten des Gyrus dentatus in eine tiefer gelegene Region, in der sie reifen und sich in einem Netzwerk anderer Neurone integrieren. Lernvorgänge, die etwa ein bis drei Wochen nach Entstehung der Zellen ablaufen, erhöhen deren Überlebenschance.

hen deren Überlebenschancen. Dies geschieht möglicherweise dadurch, dass sie andere Neurone anregen, Signale zu senden, welche den Reifungsprozess der jungen Neurone fördern. Ohne Lernprozesse während der Reifungsperiode sterben die meisten neuen Zellen wieder ab.



Alle bisher erwähnten Studien wurden an Labortieren durchgeführt – Mäusen oder Ratten. Was aber geschieht bei Menschen, deren Hippocampus keine neuen Nervenzellen nachbildet? Patienten, die sich einer Chemotherapie gegen Krebs unterziehen müssen, sind genau in dieser Situation. Wie MAM verhindern die Krebsmedikamente die notwendigen Zellteilungen. Und tatsächlich klagen diese Patienten häufig über Lernprobleme und Gedächtnisschwierigkeiten, ein Phänomen, das gelegentlich als »Chemobrain« bezeichnet wird.

So wie MAM bei Nagetieren die kognitive Leistungsfähigkeit nur leicht und sehr spezifisch beeinträchtigt, kommen auch Patienten nach einer Chemotherapie in den meisten Situationen ziemlich gut zurecht: Sie gehen zur Arbeit, bereiten Mahlzeiten zu, treffen sich mit Freunden und führen auch sonst ein weitgehend normales Leben. Die Tierexperimente würden auch keine umfassenden oder tief greifenden Defizite grundlegender Denkleistungen erwarten lassen, sondern eher einzelne Schwächen bei schwierigeren Lernprozessen – zum Beispiel wenn es darum geht, gleichzeitig mehrere Projekte zu koordinieren und dabei ständig neue Informationen zu verarbeiten.

### Was Hänschen nicht lernt, ...

Um zu klären, ob neue Nervenzellen auch für das menschliche Lernen wichtig sind, müssten Forscher sie im lebenden Gehirn sichtbar machen sowie ihre Reifung während des Lernvorgangs vorübergehend hemmen können. Methoden für die erste Aufgabe werden bereits entwickelt, das zweite Problem dürfte sich erst in fernerer Zukunft lösen lassen. Doch angenommen, ein steter Nachschub von Neuronen hielte unser Gehirn tatsächlich fit: Ließe sich dann die Neurogenese womöglich nutzen, um den kognitiven Abbau bei bestimmten Krankheiten zu verhindern oder zumindest zu bremsen?

Bei der Alzheimerdemenz etwa sterben massenweise Neurone im Hippocampus ab, was zu einem fortschreitenden Verlust der Gedächtnis- und Lernfähigkeit führt. Alzheimerpatienten produzieren zwar weiterhin neue Hirnzellen, offenbar überleben aber die wenigsten lange genug, um funktionsfähige Neurone zu bilden. Möglicherweise ist hier die Neurogenese beziehungsweise die neuronale Reifung gestört. Oder aber die Krankheit reduziert die Lernfähigkeit, wodurch die Nervenzellen nicht genügend stimuliert werden – und daher zu Grunde gehen.

Einige Forschungsergebnisse lassen jedoch hoffen, zumindest für Patienten in frühen Stadien der Demenz. So können schon einfache

## NÄCHSTE SCHRITTE

**Derzeit versuchen wir herauszufinden**, dank welcher molekularer Mechanismen geistige Aktivität neue Nervenzellen am Leben erhält. Welche Neurotransmitter sind daran beteiligt und welche Rezeptorproteine? Hilft Lernen, neu entstandene Zellen in bereits existierende neuronale Netzwerke zu integrieren, oder fördert es das Überleben bereits vernetzter Neurone? Wie genau tragen die neuen Zellen zur Lernfähigkeit bei?

Neben solchen Untersuchungen an Tieren möchten wir auch die Neurogenese beim Menschen genauer unter die Lupe nehmen – sowohl bei gesunden Individuen als auch bei Menschen, die an der Alzheimerdemenz oder ähnlichen Erkrankungen leiden. Hierzu benötigen wir allerdings neue Methoden, mit denen sich das Entstehen und Vergehen der Neurone von außen bei lebenden Menschen beobachten lässt. So könnten wir etwa herausfinden, wie viele neue Zellen bei Gesunden wie auch bei Alzheimerpatienten entstehen, ob sich diese Zahl mittels Gentherapie oder anderer Vorgehensweisen erhöhen ließe und ob ein gezieltes Hirntraining sie besser am Leben erhalten würde.

Aktivitäten wie Aerobicübungen die Neubildung von Neuronen bei gesunden Menschen und Tieren anregen. Und eine Untersuchung von Alzheimerpatienten aus dem Jahr 2007 ergab, dass eine Langzeittherapie mit Antidepressiva die Alltagsfertigkeiten und allgemeinen Hirnfunktionen verbessert. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass solche Substanzen Neurone entstehen und überleben lassen.

Zudem legen einzelne Berichte nahe, dass auch intensives Lernen den Patienten helfen könnte. Als ich die Ergebnisse unserer Experimente auf einem Kongress über die Alzheimerkrankheit und andere Formen von Demenz vorstellte, berichteten einige Klinikärzte im Publikum, sie hätten selbst schon beobachtet, dass ihre Patienten von mentalen Anstrengungen profitieren. Betroffene, die sich ganz einer geistig herausfordernden Arbeit widmen, könnten vielleicht sogar das Fortschreiten der zerstörerischen Krankheit verzögern.

Allerdings wird verstärkte geistige Aktivität kaum ausreichen, um Hirnschäden bei Demenzerkrankungen wie Morbus Alzheimer zu beheben, selbst wenn man gleichzeitig Antidepressiva einnehmen oder sich körperlich betätigen sollte. Denn bei diesen Erkrankungen sind nicht nur neu gebildete Neurone betroffen, sondern die Hirnzellen sterben in sehr großer Zahl ab. Möglicherweise können aber solche Maßnahmen den geistigen Abbau im Alter etwas verlangsamen – bei Demenzkranken wie auch bei Gesunden.

»Was Hänschen nicht lernt, lernt Hans nimmermehr«, heißt es. Tatsächlich fällt es älteren Menschen oft schwer, sich mit Neuem vertraut zu machen. Doch wer sein Gehirn in Schuss halten will, macht sicher keinen Fehler, wenn er beispielsweise eine Fremdsprache lernt oder mit Steptanz anfängt. ◀



**Tracey J. Shors** ist Professorin an der Abteilung für Psychologie sowie am Zentrum für kooperative Neurowissenschaften der Rutgers University, New Jersey, und interessiert sich schon seit vielen Jahren für die neurobiologische Erforschung von Lernen und Gedächtnis. Zusammen mit Elizabeth Gould von der Princeton University gelang ihr der Nachweis, dass Lernen die Überlebensrate neu gebildeter Nervenzellen im Hippocampus erhöht und dass diese jungen Neurone offenbar an bestimmten Formen des Lernens beteiligt sind.

**Berninger, B., Götz, M.:** Nachwuchsförderung im Gehirn. In: Gehirn&Geist 7-8/2009, S. 58 – 63.

**Gould, E. et al.:** Neurogenesis in the Hippocampal Formation. In: Nature Neuroscience 2(3), S. 260 – 265, 1999.

**Shors, T. J. et al.:** Neurogenesis in the Adult is Involved in the Formation of Trace Memories. In: Nature 410, S. 372–376, 2001.

**Waddell, J., Shors, T. J.:** Neurogenesis, Learning and Associative Strength. In: European Journal of Neuroscience 27 (11), S. 3020 – 3028, 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037415](http://www.spektrum.de/artikel/1037415).



Hurtig läuft *Caddo agilis* auf der Jagd quasi auf den Zehenspitzen. Diese Art besteht fast nur aus Weibchen. Für Weberknechte untypisch sind die Riesenaugen.

JOE WARFEL

## Künstler der Evolution: **WEBERKNECHTE**

Längst nicht alle dieser besonderen Spinnentiere krabbeln auf extrem langen Beinen umher. Ihre bisher tausende Arten verblüffen mit vielen raffinierten Anpassungen. Das meiste davon harrt wohl noch der Entdeckung – wie auch ihre wirkliche Vielfalt.

Von William A. Shear

**W**enn ich in den USA einen Vortrag über Spinnentiere halte, kommt vom Auditorium mit Sicherheit die Frage: »Enthält der Biss eines Weberknechts wirklich das stärkste Tiergift überhaupt?« – Dazu mehr am Ende.

Wohl jeder, der sich gern im Wald oder in einem alten Garten aufhält, hat die Tiere mit den acht ellenlangen dünnen Beinen und dem winzigen Körper schon gesehen, wie sie geschwind davonstaksen oder sich weiterhangeln. Der Volksmund erfand für sie Namen wie Kanker, Schneider, Schuster, Zimmermann. In Großbritannien und Nordamerika heißen die merkwürdigen Gesellen unter anderem *harvestman* (Ernteknecht), in Frankreich *faucheux* (Schnitter) – wohl weil sie gerade um die Erntezeit auf den Feldern auftauchen. Auch mögen sie mit ihrem eigenartigen Gang an einen langgliedrigen Sensenmann erinnern.

Jedes Land, jedes Gebiet kennt seine eigenen Bezeichnungen, und nicht selten treten dabei Verwechslungen auf. Klarheit schaffen dann die lateinischen Namen. Da heißen die Weberknechte Opiliones, nach griechisch und lateinisch für Schäfer. Hirten benutzten vormals Stelzen, um ihre verstreuten Herden besser zu überblicken.

In großen Teilen der Welt herrschen tatsächlich die extrem langbeinigen Weberknechte vor. Doch wer sie als Biologe er-

forscht, lernt bald, dass keineswegs alle ihre Arten (Spezies) so aussehen. Denn zur systematischen Ordnung der Opiliones zählen auch kurzbeinige Winzlinge mit gedrungenem Körper. Sie leben in Blattstreu und Humus. Des Weiteren gibt es große, oft bunt gezeichnete Arten, von denen viele Dornen oder bizarre Auswüchse tragen. Wieder andere Spezies wohnen tief in Höhlen und verzichten auf Augen und Farbe. Manche Weberknechte tarnen sich als Erdklumpen. Sie tragen spezielle Strukturen, an denen Erdkrümel oder Sandkörner haften bleiben.

Als Gliederfüßer – Arthropoden – schützt ihren Körper sowie die Beine und Fühler eine feste Außenhülle, die so genannte Kutikula. Sie wirkt als Panzer, hält Feuchtigkeit zurück und dient zugleich als Außenskelett, an dem innen die Muskeln ansetzen. Die Beine bestehen aus mehreren – bei den langbeinigen Formen oft zahlreichen – röhrenförmigen Gliedern mit Gelenken dazwischen. Systematiker stellen die Weberknechte zu den Spinnentieren oder Arachniden. Denn wie Letztere besitzen sie keine so genannten Antennen (wie etwa Insekten oder Krebstiere), also Fühler am Kopf mit Sinnesorganen zum Tasten und »Riechen«. An Stelle dessen verwenden Weberknechte so genannte Cheliceren: zangenbewehrte Kieferfühler (Kieferklauen); sowie Kiefertaster oder Pedipalpen genannte längere Anhänge. Auf diese folgen die vier Laufbeinpaare, deren zweites, meist längstes, oft auch als Ersatzantenne dient. Indem die Tiere diese Beine hin und her bewegen, ertasten sie die

## In Kürze

- ▶ Die **Weberknechte**, wissenschaftlich Opiliones, stellen **eine uralte Gruppe der Spinnentiere** dar. Typische anatomische Strukturen haben sich seit 400 Millionen Jahren kaum verändert. Doch in vielen Linien entstanden die unterschiedlichsten Spezialanpassungen in Aussehen und Verhalten, bis hin zu skurrilen Erscheinungen.
- ▶ Bisher kennen die Systematiker von ihnen schon **über 6000 Arten**. Da diese kleinen Räuber oft versteckt leben und sich zudem vielfach gut tarnen, erwarten die Experten mindestens die doppelte Anzahl an Spezies.
- ▶ Einige ihrer Gruppen erweisen sich als gute Modelle, um **Evolutionsmechanismen** zu untersuchen.

JOE WARFEL



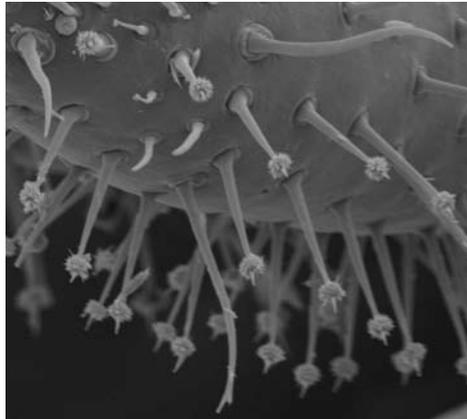
Zu den zahlreichen großen, bunten Arten im Küstenregenwald Brasiliens gehört *Acutisoma proximum*. Ihre Wehrdrüsen erscheinen als hellorange Flecken direkt über dem zweiten Beinpaar. Viele Angehörige dieser nur in Südamerika lebenden, umfangreichen Weberknechtfamilie, der Gonyleptiden, kommen in wundervollen Farbmustern daher – und sind dornenbewaffnet.



JOE WARFEL

**Dornenbewehrter Räuber:** Mit den riesigen Kiefertastern (Pedipalpen) packt *Erebomaster flavescens* seine Opfer. Diese Art aus den Appalachen im Osten der USA bewohnt Höhlen und Waldstreu. Hier ein Jugendstadium. Erwachsene sind gelb oder orange gefärbt.

Die Gattung *Ortholasma* fängt Beute mittels eines klebrigen Sekrets, das Drüsenhaare auf den Kiefertastern absondern.



WILLIAM A. SHEAR

Umgebung und erspüren wahrscheinlich auch Stoffe in der Luft.

Hinter- und Vorderkörper (mitsamt Kopf) bilden ein kompaktes Stück, während sich bei den Echten Spinnen dazwischen eine Taille befindet. Auch haben die Weberknechte keine Spinndrüsen zum Seidespinnen. Ihr einziges Augenpaar sitzt bei vielen Arten vorn am Kopf auf einer Erhebung, dem Augenhügel. Allerdings sind die Augen fast immer winzig. Zum Aufspüren von Beute oder Erkennen von Feinden dürften sie nicht viel nützen. Vielmehr leben die Opiliones wie ihre Spinnenverwandten vorrangig in einer Tast- und Geruchs- oder Geschmackswelt.

Wozu dienen die endlos langen Beine? Bei manchen Arten sind sie 20-mal so lang wie der Körper. Forscher haben sich dazu verschiedene Erklärungen überlegt. Einem physikalischen Modell zufolge übersetzt sich das

Auf- und Abfedern des Körpers – quasi wie bei einem Pendel – in potenzielle Energie, welche die elastische Kutikula aufnimmt und in den Vorwärtsschwung abgibt. Dank dessen würden Weberknechte rasch und Energie sparend vorankommen. Nach einer anderen Idee bewahrt ein hoch über dem Boden getragener Körper bei einer möglichst kleinen Aufsatzfläche der Beine vor Angreifern wie Ameisen.

Aber im tropischen Südamerika beobachteten Biologen auch langbeinige Arten, die mit weit ausgespreizten Beinen kopfüber in Pflanzen hingen. Es sah fast so aus wie Speichen der Radnetze von Spinnen. Hilft ihnen solches Verhalten, Fluginsekten abzufangen? Des Weiteren können Weberknechte mit den vielgliedrigen Enden ihrer langen Beine Zweige oder Halme umgreifen, sie sogar regelrecht darumwickeln. Vielleicht entstanden ihre Extremitäten schlicht als Anpassung an das Klettern in wirrer Vegetation.

### Aas, Läuse, Faulobst

Über 6000 Arten der Opiliones haben Zoologen bisher benannt. Doch entdecken sie besonders in den Tropen Amerikas und Südostasiens immerfort so viele neue, dass wir sicherlich nicht einmal die Hälfte, vielleicht sogar nur einen Bruchteil ihrer Spezies schon kennen – zudem viele nur in einer knappen Beschreibung. Zwar trifft man die merkwürdigen Gesellen in den verschiedensten Lebensräumen an, im Regenwald, in Wüsten, selbst noch in der Tundra. Doch am häufigsten und mannigfaltigsten treten sie in Waldgebieten



JOE WARFEL

auf. Wer sie genauer studiert, erlebt immer wieder Überraschendes. Offenbar wissen wir sehr vieles von ihnen noch gar nicht. Das wenige ist aber faszinierend genug.

Wie die meisten Spinnentiere leben Weberknechte wohl vorwiegend räuberisch. Forscher wurden Zeuge, wie sie weiche Insekten und Spinnen verzehrten. Sie machen sich über Blatt- und Schmierläuse her und mögen alle Sorten von Aas, ob kleine Wirbeltiere oder Regenwürmer. Auch lecken sie manchmal Pflanzensäfte oder knabbern an faulem Obst. Eine Besonderheit: Als einzige Spinnentiere schlucken sie feste Futterbrocken. Denn die Vertreter von anderen Ordnungen, so die Spinnen und Skorpione, verflüssigen die Nahrung erst mit ausgewürgten Enzymen und schlürfen sie dann als Suppe.

Doch manche Weberknechte geben sich als Spezialisten. So sind in Europa die Schneckenkanker und die Brettkanker offenbar reine Schneckenjäger. Die beiden Gruppen verwenden dazu allerdings völlig verschiedene Techniken. Schneckenkanker tragen ein mehr als körperlanges, kräftiges Paar so genannter Cheliceren, scherenbewaffnete Kieferfühler. Damit brechen sie Stücke aus einem Schneckenhaus und machen sich den weichen Schneckenkörper zugänglich. Die kleinen, flach gebauten, recht kurzbeinigen Brettkanker stellen es noch pfiffiger an: Sie arbeiten sich selbst unter die Schneckenschale vor. Ihre Weibchen legen die Eier in leeren Schneckenhäusern ab. Eine Reihe tropischer Arten bildet riesige muskulöse Cheliceren aus, die an Stelle der üblichen ke-

gelförmigen Zähne dicke Buckel und Knoten aufweisen. Damit dürften sie ähnlich wie scherenbewaffnete Krebse Tiergehäuse und -panzer zerbrechen können.

Bei der artenreichen Gruppe der Dyspnoi wiederum fallen die dicht mit klebrigen Drüsenhaaren besetzten Kiefertaster oder Pedipalpen auf. Sie könnten wie Fliegenfänger funktionieren, die der Besitzer dann mit Spezialstrukturen an seinen Cheliceren auf kleine Beutetiere abkämmt. Auch Weberknechte, die Beute aktiv erjagen, benutzen dazu meist ihre Pedipalpen. Bei ihnen sind diese Raubwerk-

**Vielseitig wandelbare Kiefertaster:** Diese südamerikanische Art der Stygniden bedient sich zum Beutefang besonders langer »Arme« mit gefährlichen Greifzangen.

**Dreck zur Tarnung:** Ein Tuch aus Erdkrümchen legt sich *Ortholasma rugosum* über. Zu diesem Zweck bildet die kalifornische Art auf der Körperoberfläche eine siebähnliche Struktur aus.



MARSHALL HEDIN, SAN DIEGO STATE UNIVERSITY

Mit einem stark ätzenden, hochgiftigen Sekret, das aus zwei Poren am Beinansatz austritt (hellblau), wehrt sich *Cynorta astora* gegen den Pinzettengriff. Die Substanz besteht aus zwei Phenolen.



TAPPEY H. JONES, VIRGINIA MILITARY INSTITUTE



JOE WARFEL

Die sicherlich strategisch nützlichen Scheinaugen der noch namenlosen Art aus Peru bestehen aus Wachs und lassen sich abreiben. Neben den Rückenstacheln verfügen die Tiere über effiziente Abwehrstoffe. Sie gehören zu den artenreichen Cosmetiden, die vom Süden Perus bis zum Ohio River im Osten der USA verbreitet sind.

zeuge oft riesig und tragen nicht selten ineinandergreifende Dornenreihen, die sich in das Opfer einbohren. Die südamerikanischen Stygniden erwischen ihre Opfer mit ihren überlangen Kiefertastern mit einer Dornenhand am Ende auch auf Distanz (Bild S. 43 oben).

Die Weberknechte ihrerseits haben eine Menge Fressfeinde. Sie stehen zum Beispiel auf dem Speisezettel so mancher Amphibien, Reptilien und Vögel. Allzu einfach machen sie es Räubern aber in der Regel nicht. So besitzen tropische Arten oft nicht nur eine ziemlich harte Hülle (Kutikula), sondern tragen an Körper und Beinen zusätzlich nadelspitze Stacheln. Zumindest ein Vertreter der tropischen Gonyleptiden ist mit einem riesig langen vierten Beinpaar mit derart kräftigen Dornen ausgestattet, dass sich selbst ein Mensch empfindlich daran stechen kann.

Die langbeinigen Vertreter in unseren Breiten vermögen bei Gefahr ein oder sogar zwei

Beine abzuwerfen, die dann bis zu eine halbe Stunde weiterzucken – offenbar eine Anpassung zur Ablenkung des Feindes. Eigene Atemporen in den Beinen, die auch ein eigenes Nervenzentrum enthalten, versorgen die Muskulatur dabei mit Sauerstoff. Allerdings scheinen verlorene Extremitäten nicht wieder nachzuwachsen. Ich habe aber Tiere gesehen, die mit nur drei Beinen offenbar gut zurechtkamen, sofern der schlechteren Seite mindestens noch eines blieb.

Am besten lässt man sich natürlich erst gar nicht aufstöbern. Manche Weberknechte, die in der Waldstreu leben, nutzen Körperstrukturen, in denen sich Humusteilchen und dergleichen sammeln. Mal handelt es sich um kurze gebogene Borstenkämme, mal um Drüsenhöcker, die ein klebriges Sekret absondern. Eine kalifornische Gattung entwickelt ein regelrechtes Gittersieb, das über dem Körper befestigt ist (Bild S. 43 unten). Solche Arten stellen sich bei Gefahr gern tot. Nicht nur Vögel oder Kröten übersehen die so getarnten Wesen leicht, sondern auch die Forscher. Das mag erklären, warum wir immer noch so viele bisher unbekannte Spezies finden.

Am interessantesten sind allerdings die chemischen Abwehrstrategien der Opiliones. Viele von ihnen erzeugen in speziellen Drüsen ein ganzes Arsenal an widerlichen und schädlichen Stinkstoffen, die sie über zwei Wehrporen vorn am Körper absondern. Anscheinend benutzen die einzelnen systematischen Gruppen jeweils ihre eigenen Mixturen. Die Gattung *Leiobunum* und deren Verwandtschaft etwa – eine sehr artenreiche, in vielen Teilen der Welt verbreitete Gruppe langbeiniger Weberknechte – bevorzugt Cocktails aus langkettigen Alkoholen und Aldehyden. Es riecht wie wochenlang in Turnschuhen getragene Sportsocken. Die vor allem tropischen Gonyleptiden und verwandte Familien nehmen lieber ätzende Benzochinone. Dagegen gebrau-

chen die winzigen, milbenähnlichen Cyphophthalmiden ein Gemisch aus Chinonen und Alkoholen. Merkwürdiger noch erscheinen die Travunioiden, eine kleine Gruppe gepanzerter Bodenbewohner, die wir aus Nordamerika, Japan und Europa kennen. Soweit bisher überhaupt daraufhin untersucht, erzeugen deren Arten Substanzen mit Effekten ähnlich wie durch Pseudoephedrin, das gefäßverengend wirkt und darum in manchen abschwellenden Nasensprays enthalten ist, aber auch zum Doping dient. Außerdem verwenden diese Arten allerlei giftige Alkaloide, darunter Nikotin.

### Stinkporen für Sozialkontakte?

So verschiedenartig wie diese Stoffe ist ihr Einsatz. Manche Arten hüllen sich in eine abschreckende Geruchswolke, da sich ihr Drüsensekret schnell über den Körper verteilt und verdunstet. Andere können es sogar als dünnen Strahl oder feinen Nebel sprühen. Die Cyphophthalmiden nehmen die Absonderung auf die Fußspitzen und betupfen Angreifer damit. Ein Rätsel stellen derweil noch die auch schon genannten Dyspnoi mit ihren behaarten, klebrigen Kiefertastern dar. Zwar besitzen sie passende Drüsen und entsprechende Stinkporen, doch weder der Chemiker Tappey Jones vom Virginia Military Institute in Lexington noch ich konnten bei ihnen irgendwelche flüchtigen Abwehrstoffe aufspüren. Womöglich dient die Vorrichtung bei ihnen inzwischen zu etwas anderem, etwa zur Verständigung mit Artgenossen.

Sogar das Sexualleben der Weberknechte dürfte noch manche Überraschung bereithalten, denn erst wenige ihrer Arten haben die

Forscher diesbezüglich gründlicher angeschaut. Manchmal sind die Männchen größer und schwerer bewaffnet als die Weibchen. Das könnte bedeuten, dass sie untereinander um Partnerinnen streiten – ob nun in ritualisierten Scheingefechten oder im echten Kampf –, und anscheinend bei einigen wenigen Arten sogar um andere Ressourcen. *Zygopachylus*-Männchen, eine südamerikanische Gattung der Gonyleptiden, kämpfen oft um Nester, genauer gesagt kleine Schlammburgen, die sie bauen. Nach Möglichkeit bringen sie mehrere Weibchen dazu, in ihr Nest Eier zu legen.

Die Balz dauert wohl meist nicht lang. Gewöhnlich wird der Partner dabei unter ande-

### OFT MIT ZITTERSPINNEN VERWECHSELT

Weberknechte sind zwar Spinnentiere, aber keine so genannten Echten Spinnen (Webspinnen). Sie besitzen keine Spinndrüsen und erzeugen keine Spinnenseide. Bei den langbeinigen Wesen in Zimmerecken handelt es sich nicht um Weberknechte, sondern um Zitterspinnen.



HAGEN 1945, WESTFÄLISCHE WILHELM-UNIVERSITÄT MÜNSTER

Anatomisch sehen Weberknechte heute noch fast genauso aus wie vor Urzeiten. *Eophalangium sheari* lebte im Devon vor über 400 Millionen Jahren. Bei diesem Fossil ist in der Mitte der lange, spitze Penis deutlich erkennbar.



JOE WARFEL

Ein *Santinezia-serratotibialis*-Weibchen aus Trinidad beim Eierhüten. Später wird es auch die Jungen bewachen. Seine Beine versteht es völlig zusammenzufalten.

## ÜBERLANGE BEINE

Ihr Körper misst oft nur ein paar Millimeter – bei teils 20-mal oder sogar noch längeren Beinen. Es gibt Winzlinge von kaum einem Millimeter Größe, aber auch Tiere mit einem über zwei Zentimeter langen Körper. Die Spanne der Extremitäten mancher der zartesten Arten beträgt 18 Zentimeter.

rem ausgiebig mit den Beinen beklopft. Dyspnoi-Männchen können dem Weibchen auch ein Brautgeschenk darbieten: ein leckeres Drüsensekret von ihren Kieferfühlern. Generell besitzen die Männchen einen auffallend langen, dehnbaren Penis. Die Partner stehen meist voreinander Kopf an Kopf, wenn sie ihn in die vorn liegende weibliche Geschlechtsöffnung einführen. Die Weibchen bewahren die nicht mobilen Spermien bis zur Eiablage auf. Mittels einer langen Legeröhre platzieren sie die Eier in Felsritzen oder zwischen Erdkrümel. Vielfach liegt das kostbare Gut dort so geschützt, dass es an sich keiner weiteren Brutfürsorge bedarf. Trotzdem bewachen die Weibchen mancher Arten ihr Gelege und später sogar die frisch geschlüpfte Brut. Und die erwähnten *Zygopachylus*-Männchen mit den Schlammnestern übernehmen es selbst, auf die Eier aufzupassen – bei Weberknechten eher eine Ausnahme.

### Ohne Männer geht es auch

Eine Hand voll Arten verzichtet, wie es scheint, völlig auf Männchen. Bei ihnen schlüpfen die Jungen aus unbefruchteten Eiern, was Biologen Jungfernzeugung oder Parthenogenese nennen. (Das kommt auch sonst im Tierreich gar nicht so selten vor.)

Ansonsten benehmen sich manche Weberknechte recht gesellig. Einige Vertreter der Gattung *Leiobunum* bilden sogar regelrechte Massenansammlungen (Bild unten). Hierzu gibt es etliche Beobachtungen in Nordamerika und mittlerweile in Europa. In Mitteleuropa, auch Deutschland, fielen gerade in den letzten Jahren an dunklen und schattigen Orten Schlafgemeinschaften aus Dutzenden bis etlichen Hunderten dicht zusammengedrängter Tiere auf. Sie gehören zu einer Art

bislang rätselhafter Herkunft, die vermutlich eingeschleppt wurde. Ihr Körper misst zwar nur einen halben Zentimeter, doch die Spannweite der extrem dünnen Beine kann 18 Zentimeter betragen.

Am häufigsten tritt dergleichen bei kalter Witterung auf, weil die Spinnentiere dann gern geschützte Orte aufsuchen, wo sie den Winter verbringen. Vielleicht ist die Massierung am selben Fleck darum nur reiner Zufall. Womöglich handelt es sich aber sogar um eine besondere gemeinsame Verteidigungsstrategie. Denn bestimmt wirkt die komprimierte Stink- oder Giftwolke von hunderten Tieren viel heftiger als die Ausdünstungen einer Hand voll Weberknechte.

Noch etwas anderes durfte ich verschiedentlich beobachten: Stört man einen solchen Haufen, dann gerät er koordiniert in Bewegung, was ziemlich gruselig anmuten kann. Alle Tiere schwingen nun auf und ab, wie ein unheimlicher pulsierender Körper. Einen Fressfeind muss dies gehörig verwirren. Ein Opfer wird er in dem Haufen nun wohl nicht mehr gezielt ausmachen können.

Die Weberknechte stellen eine uralte Tiergruppe dar, die schon im Unteren Devon vor rund 400 Millionen Jahren existierte, in der Frühzeit von Landpflanzen und -tieren. Das belegen inzwischen Fossilien von der bedeutenden Lagerstätte Rhynie Chert in Schottland (Bild S. 45 oben), die Jason Dunlop vom Museum für Naturkunde an der Humboldt-Universität zu Berlin und seine Kollegen gründlich beschrieben haben. Bei den Fossilien sind selbst Strukturen der äußeren Fortpflanzungsorgane bei beiden Geschlechtern deutlich zu erkennen. Jene frühe Art, *Eo-phalangium sheari* genannt, ähnelt heutigen Weberknechtarten derselben Gegend in erstaunlichem Maß. Auch aus dem Karbon, das vor rund 360 Millionen Jahren begann, sind verschiedentlich Weberknechte bekannt. Und nicht zuletzt identifizieren Forscher die Tiere in bis zu 35 Millionen Jahre altem Bernstein. Nach all diesen Studien haben die Weberknechte in den letzten 400 Millionen Jahren in ihrem grundsätzlichen anatomischen Bau nicht allzu viel Neues hervorgebracht.

Zunehmend benutzen Forscher die Optionen für übergreifende Studien, bei denen Befunde zur Genetik, Evolution und Biogeografie zusammenfließen. Nobuo Tsurusaki von der Tottori-Universität in Japan entdeckte, dass die Chromosomenzahl zwischen verschiedenen Populationen bei einigen Arten der Gattung *Leiobunum* so stark differiert wie sonst kaum bei anderen Tieren innerhalb derselben Art. In manchen Populationen besitzen die Mitglieder sogar vier Chromosomensätze –

Weberknechte der Gattung *Leiobunum* unter einem Gartentisch. Manchmal bilden hunderte Tiere solche Massenansammlungen. Unheimlich wirkt es, wenn der Haufen bei Gefahr »pulsiert«.



statt der üblichen zwei. (Bei Tieren ist dieses Phänomen, Tetraploidie genannt, selten. Häufiger kommt es bei Pflanzen vor.) In anderen Populationen sind überzählige Chromosomen unbekannter Funktion vorhanden.

Solche neu ausgerichteten Studien haben auch frühere Befunde von mir schon mehrmals umgeworfen. Im Jahr 1977 entdeckte ich in den Appalachen eine neue Art, leuchtend gelbe Winzlinge, die ich *Fumontana deprehendor* nannte. Doch vor Kurzem zeigten Steven Thomas und Marshal Hedin von der San Diego State University in Kalifornien, dass es sich dabei um mehrere, vielleicht sogar fünf verschiedene Spezies handeln könnte. Flüsse und Täler trennen diese Tiere in Populationen, die keinen Kontakt zueinander haben und sich genetisch klar unterscheiden. Anatomische Unterschiede konnten wir allerdings bisher keine finden.

Oder ein noch komplizierterer Fall: Als ich über die Gattung *Caddo* forschte, fand ich in Neuengland eine neue Art, von mir *Caddo pepperella* genannt. Mir fiel auf, dass diese Tiere quasi Seite an Seite mit der Spezies *Caddo agilis* (Bild S. 40) lebten – und haargenau so aussahen wie noch nicht geschlechtsreife Vertreter von *C. agilis*. Dennoch waren sie eindeutig fortpflanzungsfähig. Meine These damals: *C. pepperella* stammt von *C. agilis* ab. Ich glaubte an eine so genannte Neotenie, bei der die Geschlechtsreife vorzeitig einsetzt und die weitere körperliche Reifung ausfällt. In diesem Fall wäre die neue Art schlagartig aufgetreten – beide Spezies verzichten auf Männchen.

### Verwandtschaften zwischen Japan und Nordamerika

Als Forscherkollegen beide Arten dann auch in Japan entdeckten, mutmaßte ich, *C. agilis* sei früher auf der Nordhalbkugel rundum verbreitet gewesen. Denn in 35 Millionen Jahre altem Bernstein finden sich Spinnentiere, die genau wie *C. agilis* aussehen. Aus der Ursprungsart sei später zweimal unabhängig voneinander eine Art mit jugendlichem Habitus hervorgegangen, einmal in Japan, einmal in Nordamerika. Da seien die *C.-agilis*-Populationen andernorts schon ausgestorben gewesen.

Meine These ließ sich damals noch nicht molekulargenetisch testen. Jeff Shultz und Jerome Regier von der University of Maryland in College Park haben das kürzlich nachgeholt. Demnach ist die *C.-pepperella*-Population Japans näher mit den nordamerikanischen Populationen verwandt als mit den japanischen *C.-agilis*-Vertretern. Somit dürfte *Caddo pepperella* schon entstanden sein, bevor sich die *C.-agilis*-Populationen Nordamerikas und Japans trennten.



Die Verwandtschaftsbeziehungen bei den Cyphophthalmiden, die entfernt an Milben erinnern, passen gut zur mutmaßlichen Entwicklung der Kontinente. Darum eignet sich die Gruppe bestens zum Studium von Evolutionsmechanismen.

Nicht zuletzt spiegeln manche Weberknechte die Entstehung der Kontinente aus einem Ursuperkontinent Pangäa. Die erwähnten milbenähnlichen Cyphophthalmiden, deren Arten kleine Verbreitungsgebiete aufweisen, eignen sich hervorragend, um genauer zu ergründen, wie sich die Kontinentaldrift auf die biologische Evolution ausgewirkt hat. Durch geologisch erzwungene räumliche Trennung entstehen oft neue Arten, die anderswo vorhandenen entsprechen können. Nach Gonzalo Giribet von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und Sarah Boyer vom Macalester College in St. Paul (Minnesota) passt der Stammbaum dieser kleinen Vertreter sehr gut zur mutmaßlichen Entstehungsgeschichte der Kontinente, wie Forscher sie rekonstruiert haben: Gerade die ältesten Äste dieser Weberknechte korrespondieren hervorragend damit, wie der Superkontinent einst auseinanderbrach.

Nun noch zur Eingangsfrage nach der angeblichen besonderen Giftigkeit dieser Kreaturen. Weberknechte sind überhaupt nicht in der Lage, giftige Bisse oder Stiche zu verabreichen. Ihnen fehlen entsprechende Giftdrüsen. Die in Amerika verbreitete Furcht vor einem gefährlichen Biss beruht auf einem sprachlichen Missverständnis, das anscheinend durch verschieden verwendete Trivialnamen zu Stande kam. In Amerika sagt man zu ihnen nicht nur *harvestman*, sondern gern auch *daddy-long-legs* (Väterchen Langbein).

Ebenso heißt aber in Australien eine tatsächlich wohl recht giftige Echte Spinne. Über ebendiese Spinne erschien einmal ein kurzer Bericht, auf den amerikanische Boulevardblätter zugriffen, ohne die wissenschaftlichen Namen zu beachten. So schnell können die falschen Tiere in Verruf geraten. ◀



**William A. Shear** hat die Trinkle-Professur für Biologie am Hampden-Sydney College in Virginia inne.

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

**Boyer, S. L. et al.:** Biogeography of the World: A Case Study from Cyphophthalmid Opiliones, a Globally Distributed Group of Arachnids. In: *Journal of Biogeography* 34, S. 2070 – 2085, 2007.

**Dunlop, J. A. et al.:** Preserved Organs of Devonian Harvestmen. In: *Nature* 425, S. 916, 30. Okt. 2003.

**Pinto-da-Rocha, R. et al.:** Harvestmen: The Biology of Opiliones. Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts) 2007.

**Shultz, J. W., Regier, J. C.:** *Caddo agilis* Banks and *C. pepperella* Shear (Opiliones, Caddidae) Diverged Phylogenetically before Acquiring their Disjunct, Sympatric Distributions in Japan and North America. In: *Journal of Arachnology* 37, S. 238 – 240, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037416](http://www.spektrum.de/artikel/1037416).

# Wie kamen die indogermanischen Sprachen nach Europa?

Paläogenetik und computergestützte Linguistik liefern neue Indizien zum Verlauf der Sprachausbreitung. Doch das Rätsel ist noch keineswegs gelöst.

Von Ruth Berger

## In Kürze

- ▶ Archäologen streiten darüber, ob **die heute in Europa dominanten Sprachen** mit Steppenvölkern der Kupferzeit aus Südrussland kamen – oder ob die ersten Bauern aus Anatolien sie Jahrtausende früher mitgebracht hatten.
- ▶ Statistische Sprachanalysen datieren die indogermanische Ursprache **weiter zurück** als traditionell vermutet. Das passt zur Anatolienthese.
- ▶ **Eine genetische Untersuchung** an prähistorischen Bauern Nordmitteleuropas zeigt: Die frühesten waren eingewandert und unterschieden sich deutlich von den modernen Europäern.
- ▶ Wahrscheinlich sind beide Thesen über die Ausbreitung des Indogermanischen **zu einfach**. Jede enthält nur einen Teil der Wahrheit.

Es ist – beinahe – sicher: Bevor die indogermanischen Sprachen Europa eroberten, wurde hier unter anderem etwas gesprochen, was mit dem heutigen Baskisch verwandt ist. Es gibt in West- und Mitteleuropa viele Flussnamen, die sich von baskischen Begriffen ableiten lassen (siehe »Die Ursprache der Alteuropäer« von Elisabeth Hamel und Theo Vennemann, Spektrum der Wissenschaft 5/2002, S. 32). Aber wann und wie lösten indogermanische Sprachen die alteuropäischen Vorläufer ab?

Lange galt die Hypothese der litauisch-amerikanischen Archäologin Marija Gimbutas (1921–1994): Nomadische Reitervölker aus den Steppenregionen um das Schwarze und das Kaspische Meer hätten vor frühestens 6000 Jahren begonnen, sich in Wellen nach Europa und Asien auszubreiten. Dafür gibt es archäologisch einige Indizien, die aber keine Klarheit schufen. Jedenfalls schienen diese Steppenvölker und ihre kriegerische, patriarchalische Kultur gut auf so manches zu passen, was man seit dem 19. Jahrhundert über die alten Indogermanen und ihre »Urheimat« zu wissen glaubte.

Eine konkurrierende Hypothese entwarf der britische Archäologe Colin Renfrew (»Der Ursprung der indoeuropäischen Sprachfamilie«, SdW 12/1989, S. 114; »Die Sprachenvielfalt der Welt«, SdW 7/1995, S. 72). Ihm zufolge stammen die Indogermanen ursprünglich aus Anatolien. Sie kamen viel früher, nämlich vor über 8000 Jahren, und brachten als Siedler die Landwirtschaft ins wilde, dünn besiedelte Europa.

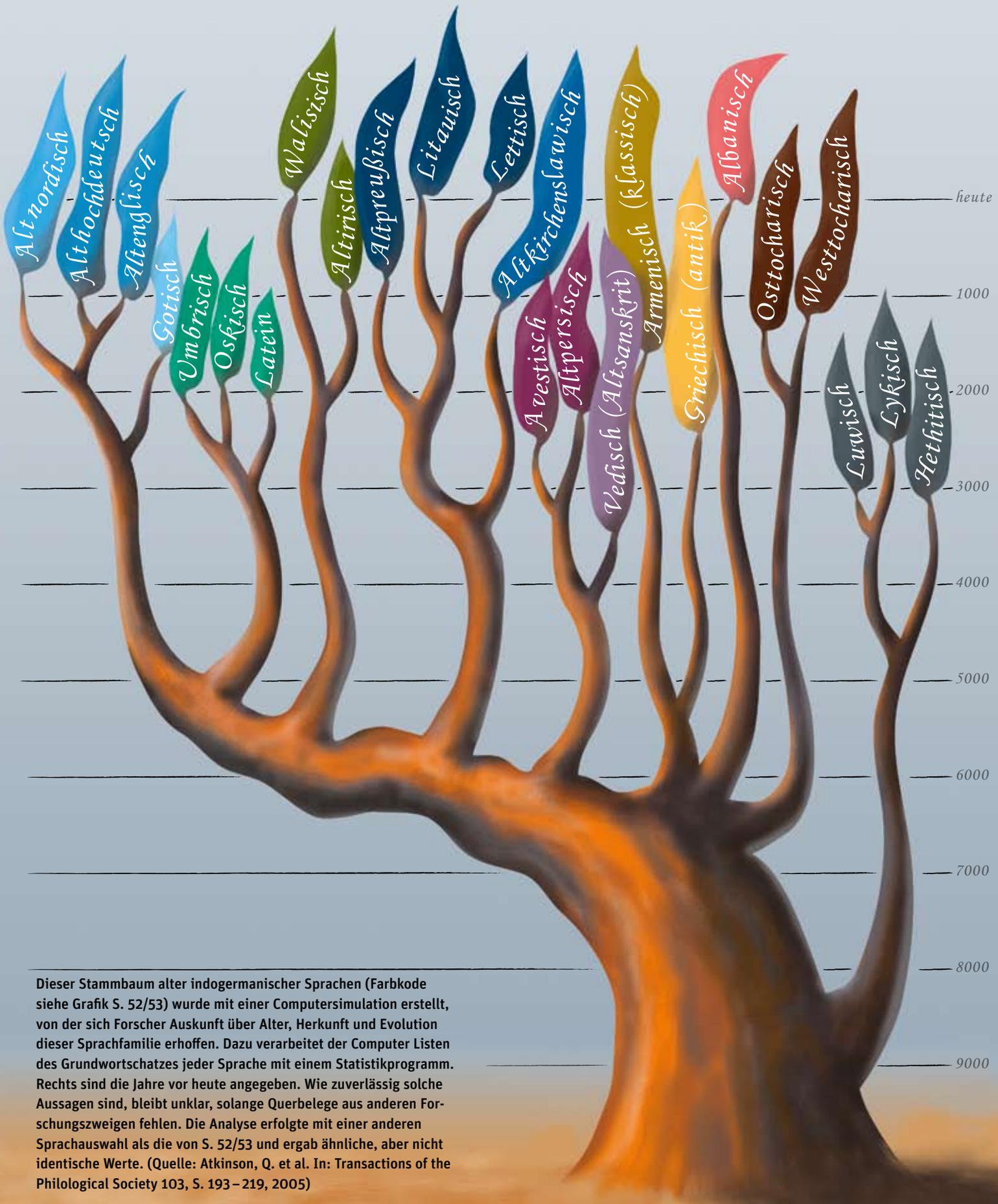
Renfrews These ist schön, weil sie einfach ist: Europa hat mit dem Eindringen der Land-

wirtschaft seine stärkste prähistorische Umwälzung erfahren – da liegt es nahe, die Ausbreitung der indogermanischen Sprachen auf dasselbe Ereignis zurückzuführen. Allerdings setzt dies voraus, dass die Landwirtschaft tatsächlich durch Einwanderung in Europa eingeführt wurde. Genau daran zweifeln viele Archäologen. Nach einer gängigen Lehrmeinung ging die europäische Urbevölkerung selbst zur landwirtschaftlichen Lebensweise über, quasi angesteckt durch Kontakt mit Anatolien, aber ohne erheblichen Bevölkerungsaustausch.

## Was das Erbgut über Wanderungen verrät

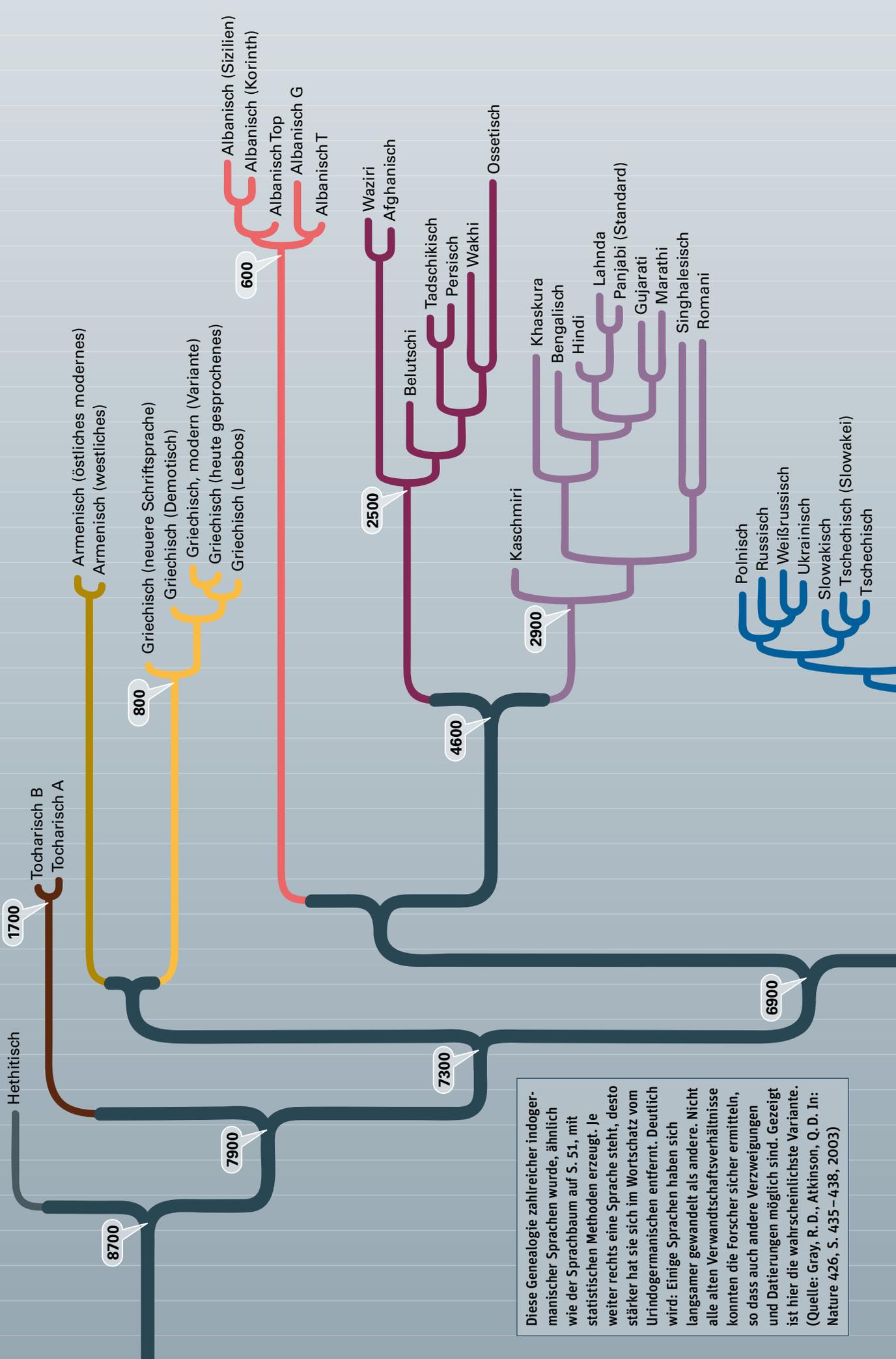
Kann die Genetik hier weiterhelfen? Seit den 1980er Jahren versuchen Forscher, aus den Genen heutiger Menschen auf Wanderbewegungen in der Vergangenheit zu schließen (Luigi Luca Cavalli-Sforza »Stammbäume von Völkern und Sprachen«, SdW 1/1992, S. 90; siehe auch SdW-Dossier 1/2000 »Die Evolution der Sprachen«). In Europa fand man bei der Häufigkeit bestimmter Genvarianten eine graduelle Abnahme von Südosten nach Nordwesten. Man nahm an, dies bilde tatsächlich eine Einwanderungswelle ab. Nur wann sie sich ereignet haben sollte, ließ sich nicht mit Sicherheit sagen.

Solche Rückschlüsse aus heutigen Genverteilungen sind grundsätzlich unsicher. Angenommen, Sie sollen aus der momentanen Parteienlandschaft Deutschlands auf die politischen Fraktionen im Parlament von 1848 zurückschließen. Exakt wird das kaum gelingen. Mit genetischen Genealogien ist es ähnlich: Es gibt immer mehrere historische Szenarien, die zu den heutigen Verteilungen passen, und viele Details der Vergangenheit sind schlicht nicht mehr rekonstruierbar. Deshalb

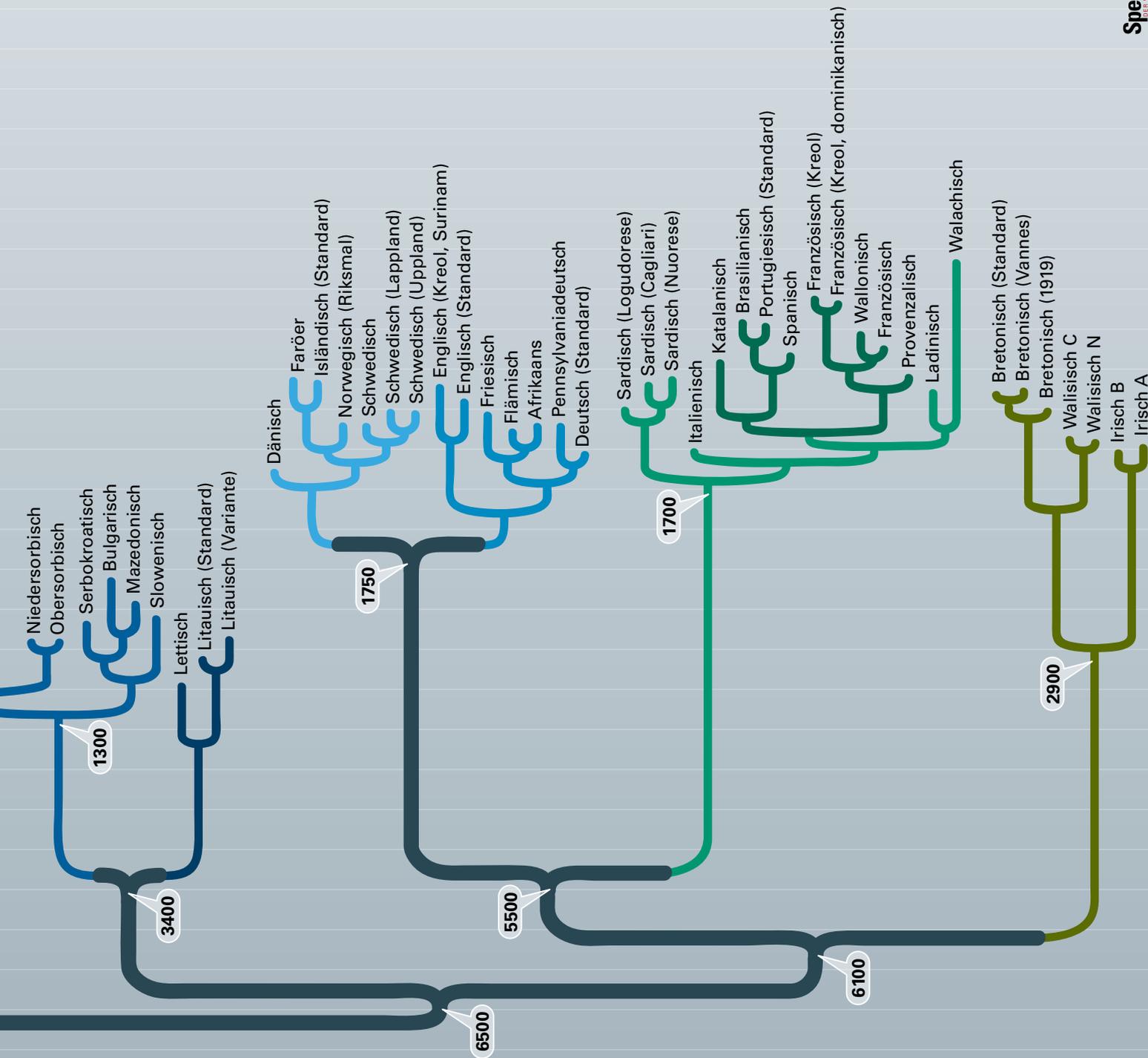


Dieser Stammbaum alter indogermanischer Sprachen (Farbcode siehe Grafik S. 52/53) wurde mit einer Computersimulation erstellt, von der sich Forscher Auskunft über Alter, Herkunft und Evolution dieser Sprachfamilie erhoffen. Dazu verarbeitet der Computer Listen des Grundwortschatzes jeder Sprache mit einem Statistikprogramm. Rechts sind die Jahre vor heute angegeben. Wie zuverlässig solche Aussagen sind, bleibt unklar, solange Querbelege aus anderen Forschungszweigen fehlen. Die Analyse erfolgte mit einer anderen Sprachauswahl als die von S. 52/53 und ergab ähnliche, aber nicht identische Werte. (Quelle: Atkinson, Q. et al. In: Transactions of the Philological Society 103, S. 193–219, 2005)

# STAMMBAUM DER INDOGERMANISCHEN SPRACHEN



Diese Genealogie zahlreicher indogermanischer Sprachen wurde, ähnlich wie der Sprachbaum auf S. 51, mit statistischen Methoden erzeugt. Je weiter rechts eine Sprache steht, desto stärker hat sie sich im Wortschatz vom Urindogermanischen entfernt. Deutlich wird: Einige Sprachen haben sich langsamer gewandelt als andere. Nicht alle alten Verwandtschaftsverhältnisse konnten die Forscher sicher ermitteln, so dass auch andere Verzweigungen und Datierungen möglich sind. Gezeigt ist hier die wahrscheinlichste Variante. (Quelle: Gray, R. D., Atkinson, Q. D. In: Nature 426, S. 435–438, 2003)



- Anatolisch
- Tocharisch
- Armenisch
- Griechisch
- Albanisch
- Iranisch ) **Indoiranisch**
- Indisch )
- Slawisch ) **Baltoslawisch**
- Baltisch )
- Norddeutsch ) **Germanisch**
- Westdeutsch )
- Französisch/Iberisch ) **Italisch**
- Italic )
- Keltisch

5500 errechnete mittlere Daten der jeweiligen Abspaltung in Jahren vor heute

## INDOGERMANISCH ODER INDOEUROPÄISCH?

**Beides ist richtig und politisch korrekt.** Indogermanisch spielt auf die südöstlichsten und nordwestlichsten Ausläufer der Sprachfamilie an – Sri Lanka beziehungsweise Island –, die das Verbreitungsgebiet umklammern. Im deutschen Sprachraum setzte sich dieser Begriff durch, anderswo in Europa machte Indoeuropäisch das Rennen. In manchen Kreisen fiel der Begriff Indogermanisch nach 1945 und erneut nach 1968 in Ungnade: Er klang zu »germanisch«, Indoeuropäisch wirkte internationaler. Doch die deutsche Indogermanistik bevorzugt den traditionellen Ausdruck. Dem folgt auch dieser Artikel.

ist es ein Segen, dass es in den letzten Jahren riesige Fortschritte beim Lesen alter DNA gegeben hat.

Die konkurrierenden Annahmen über die »neolithische Revolution« in Europa – Einwanderung oder nicht – können nun direkt an fossilen Funden getestet werden. Forscher um Barbara Bramanti von der Universität Mainz isolierten aus 26 Skeletten der frühesten Ackerbauern Ostmitteleuropas so genannte mitochondriale DNA (siehe Kasten rechts unten). Die Bauern gehörten der bandkeramischen Kultur an, die vor etwa 7500 Jahren die landwirtschaftliche Epoche in unseren Regionen einläutete. Zusätzlich entnahmen die Forscher Proben von gleichzeitig lebenden Jägern und Sammlern.

Das Ergebnis: Die Jäger und die Landwirte waren sich in dem untersuchten DNA-Abschnitt extrem unähnlich. Sie schienen genetisch sogar weiter voneinander entfernt zu sein als australische Ureinwohner und Europäer. Die ersten Ackerbauern Mitteleuropas, die Bandkeramiker, waren demnach Einwanderer. Das passt bestens zu Colin Renfrews These, das Indogermanische sei mit anatolischen Bauern nach Europa gekommen.

Doch wie so oft steckt der Teufel im Detail. Die urtümlich lebenden Jäger und Sammler aus Bramantis Untersuchung kontrastierten zwar stark mit den bandkeramischen Bauern; ihr verarmter Genpool ist typisch für kleine, isolierte Gruppen. Doch die bei den steinzeitlichen Jägern gefundenen Varianten der mitochondrialen DNA – U4 und U5 – gibt es noch heute in Europa, U5 immerhin mit der Häufigkeit von elf Prozent. U4, das in Deutschland selten ist, tritt derzeit am häufigsten in Osteuropa sowie in Tadschikistan und benachbarten Regionen auf; es galt bislang als typisch indogermanisch.

Bramantis Untersuchung lieferte noch eine weitere Überraschung: Die bandkeramischen Ackerbauern zeigten ihrerseits eine andere Genverteilung als heutige Europäer: Die meisten besaßen entweder die Variante N1a oder H der mitochondrialen DNA. Die letztere,

H, ist bis jetzt bei Europäern sehr verbreitet, ja sogar dominant. Doch N1a gibt es heute in Europa praktisch nicht.

Das unerwartete Ergebnis könnte auf mindestens zwei große Migrationsereignisse im neolithischen Mitteleuropa hindeuten. Erst kamen die Bandkeramiker und verdrängten Jäger und Sammler mit den Versionen U4 und U5. Dann drängte eine spätere Welle die Bandkeramiker ihrerseits so stark zurück, dass deren typischer Mitochondrientyp N1a fast von der Bildfläche verschwand. Das passt nun eher zu Gimbutas' Hypothese mit der frühbronzezeitlichen Einwanderung von Steppenvölkern als zur These Renfrews. Die Bandkeramiker könnten die Urbasken gewesen sein, und erst die spätere Migration brachte die Indogermanen nach Europa. Oder umgekehrt oder weder noch – das Bild ist nämlich in Wahrheit noch komplizierter.

Erstens könnte einiges an der sich ändernden DNA-Typenverteilung auf Selektion statt auf Migration zurückzuführen sein. Dann wären hier Mitochondrientypen gewandert oder verdrängt worden, aber nicht Menschen.

Zweitens war die bandkeramische Kultur nicht die einzige frühe Landwirtschaft in Europa. Im Süden, entlang des Mittelmeers, gab es noch eine zweite, weniger entwickelte, deren Angehörige teils in Höhlen lebten. Die charakteristische Keramik mit Muschelabdrücken, die zu dieser so genannten Cardialkultur gehört, ist am frühesten in Thessalien im heutigen Griechenland nachgewiesen, zieht sich aber an der nördlichen und südlichen Küste des Mittelmeers bis zum Atlantik. Ein möglicher Vorläufer ließ sich im Libanon ausmachen, während die Ursprünge der Bandkeramik im westlichen Donauraum liegen. Demnach steht die mittelmeerische Cardialkultur im Gegensatz zur Bandkeramik in direkter Verbindung mit dem Orient.

Liegen die Ursprünge mancher Komponenten des europäischen Genpools bei den Vertretern der Cardialkultur? Sind womöglich sie und nicht die Bandkeramiker die gesuchten Indogermanen? 2005 führte Helen Chandler von der University of Oxford mit Kollegen eine paläogenetische Untersuchung für Portugal durch. Auch hier wurden lokale Jäger und Sammler mit neolithischen Bauern verglichen, und die Forscher arbeiteten mit mitochondrialen DNA-Markern, weil andere Teile des Genoms aus alten Knochen schwerer zu gewinnen sind.

Ebenso ergaben sich in Portugal Unterschiede zwischen den Jägern und den Bauern, doch sie fielen längst nicht so extrem aus wie bei Bramantis mitteleuropäischen »Testpersonen«. Vor allem weichen beide Gruppen auf

### ARCHÄOLOGIE DER SPRACHE

Wörter für Joch, Rad oder Achse sind in den indogermanischen Sprachen sehr ähnlich. Daraus schloss man, dass diese Dinge vor der Aufspaltung des Indogermanischen in Tochtersprachen bereits existiert haben müssten. Damit könnte die Sprachfamilie nicht älter sein als etwa 6000 Jahre, denn zuvor gab es das Rad noch nicht. Vertreter der These von einer früheren Aufspaltung des Indogermanischen versuchen dagegen, die Ähnlichkeiten mit Entlehnungen und zufälligen Parallelbildungen zu erklären.

ähnliche Weise von der heutigen europäischen Durchschnittsverteilung der mitochondrialen Typen ab: Die als nahöstlich geltende Variante J fehlt ganz; dafür ist bei beiden Gruppen die Variante H sehr stark sowie Typ U stark vertreten. Die Vielfalt ist insgesamt reduziert – wie bei Steinzeitbevölkerungen am kontinentalen Rand zu erwarten. Chandlers Team verglich die Altportugiesen mit heutigen Bevölkerungen und kam zu dem Schluss, dass Jäger wie Bauern in der mitochondrialen DNA am meisten heutigen Basken, Galiziern und Katalanen ähneln. Zumindest in Portugal scheint somit die erste neolithische Kultur von einer indigenen Bevölkerung am westlichen Mittelmeer vertreten worden zu sein. Hier suchen wir die Indogermanen wohl vergebens.

Fassen wir zusammen: Bislang liefert die Paläogenetik keinen Beleg für Renfrews These, die frühen Bauern seien aus Anatolien eingewandert. Im Fall der Bandkeramik gab es zwar eine Migration, doch die lässt sich nur bis zum Donauraum zurückverfolgen. Da außerdem die direkte genetische Kontinuität zwischen Bandkeramikern und heutigen Mitteleuropäern fehlt, haben wohl später noch weitere Migrationen in die Region stattgefunden.

### Beschleunigter Wortaustausch

Wenn die Genetik die Frage nach dem Ursprung der Indogermanen vorläufig nicht zu klären vermag, hilft uns vielleicht die Sprachwissenschaft weiter. Im Jahr 2003 erschien in »Nature« eine seitdem viel diskutierte Untersuchung, die mit dem Anspruch antrat, zwischen den Thesen von Gimbutas und Renfrew entscheiden zu können. Quentin Atkinson und Russel Gray, zwei sprachinteressierte Psychologen, ermittelten mit einem Computerprogramm, das sonst Genetikern zur Berechnung menschlicher Stammbäume dient, das Alter der indogermanischen Sprachfamilie. Sie fütterten den Computer mit einem Grundwortschatz von 200 Wörtern und deren Äquivalenten in den verschiedenen indogermanischen Sprachen sowie mit Tipps, wie lange es dauert, bis in einer Sprache ein Wort durch eines mit anderer Herkunft ersetzt wird. Das Programm berechnete daraufhin einen Sprachstammbaum und ermittelte das Alter der Wurzel sowie sämtlicher Abspaltungen.

Die Methode ist allerdings nicht so exakt, wie sie scheint, denn in Wirklichkeit schwanken die Veränderungsrate des Vokabulars: Kontakt mit Nachbarvölkern oder Übernahme eine Sprache durch eine zuvor anderssprachige Gruppe können den Wortaustausch beschleunigen. Die Autoren bemühten sich, sol-



Wie sich genetische Varianten in Europa verteilen, zeigt der Farbverlauf, basierend auf mehreren Gentyphen. Die im Orient häufigste Variante nimmt nach Nordwesten ab. Dies kann für einmalige oder mehrfache Besiedelung aus dem Südosten sprechen.

### WIE VERLÄSSLICH IST DIE MITOCHONDRIALE DNA?



UNIVERSITÄT ROSTOCK, INSTITUT FÜR ANATOMIE

#### Mitochondrien sind Zellorganellen mit eigener Erbsubstanz.

Die mitochondriale DNA wird nur über die Mutter vererbt, mutiert oft und lässt sich aus alten Knochen besser gewinnen als die DNA des Zellkerns. Deshalb benutzt man mitochondriale DNA, um prähistorischen Völkerwanderungen auf die Spur zu kommen. Doch ein absolut verlässlicher Indikator für Verwandtschaft – oder ihr Gegenteil – ist sie nicht. Erstens können Teile des Kern-Genoms eine andere Herkunft haben als die Mitochondrien. Zweitens, und dies ist eine neue Erkenntnis: Die verschiedenen Varianten der Mitochondrien-DNA sind nicht bloß funktionslose Verwandtschaftsmarker. Vielmehr gibt es Hinweise, dass manche von ihnen mit Besonderheiten des Stoffwechsels, mit Krankheitsanfälligkeiten oder der Muskelleistung verbunden sind. In der heutigen Mitochondrienverteilung spielt deshalb wohl die Selektion ebenso eine Rolle wie Verwandtschaft in der weiblichen Linie und Wanderungen. Zum Beispiel könnte die Mitochondrienvariante N1 der bandkeramischen Bauern durch Selektion verloren gegangen sein, obwohl ihre Träger unsere Vorfahren wären.

Die verschiedenen Varianten der Mitochondrien-DNA sind nicht bloß funktionslose Verwandtschaftsmarker. Vielmehr gibt es Hinweise, dass manche von ihnen mit Besonderheiten des Stoffwechsels, mit Krankheitsanfälligkeiten oder der Muskelleistung verbunden sind. In der heutigen Mitochondrienverteilung spielt deshalb wohl die Selektion ebenso eine Rolle wie Verwandtschaft in der weiblichen Linie und Wanderungen. Zum Beispiel könnte die Mitochondrienvariante N1 der bandkeramischen Bauern durch Selektion verloren gegangen sein, obwohl ihre Träger unsere Vorfahren wären.

## SPRACHVERTEILUNG IM 1. JAHRTAUSEND V. CHR.



So verteilten sich vermutlich die indogermanischen Sprachen (farbig) im ersten Jahrtausend vor unserer Zeit (schematisch, Überschneidungen nicht dargestellt). Die Sprachfamilie hatte sich damals schon weit verbreitet. Die frühesten Nachweise des Indogermanischen stammen aus dem 2. Jahrtausend v. Chr.

che Unwägbarkeiten zu berücksichtigen, doch ob ihnen das ausreichend gelang, weiß niemand. Wie Atkinson und Gray meinen, gleichen sich die Schwächen der Methode bei Verwendung einer großen Zahl von Sprachen und Wörtern weit gehend aus.

Vertrauen weckt, dass der per Computer erstellte Stammbaum (siehe Abbildung S. 52/53) kaum überrascht und Hypothesen stützt, die mit traditionellen Methoden der Sprachwissenschaft erstellt wurden. So bestätigt sich beispielsweise der isolierte Status des Albanischen. Auch werden die heutigen Großgruppen – Germanisch, Romanisch, Slawisch und so weiter – korrekt abgebildet.

Aber ist die Datierung verlässlich? Von den plausiblen Werten für die historische Zeit, beispielsweise für die Aufspaltung der germanischen und romanischen Sprachen in ihre heutigen Zweige vor gut 1700 Jahren, darf man sich nicht täuschen lassen – denn mit solchen aus historischem Wissen hergeleiteten Daten wurde die Methode ja gerade geeicht. Nehmen wir einmal an, dass sie für die älteren Daten zumindest eine Näherung liefert. Immerhin kamen nachfolgende Analysen zu ähnlichen Ergebnissen (siehe Grafik S. 51).

Nach der Simulation ereignete sich die erste Aufspaltung der protoindogermanischen Ursprache schon vor rund 8700 Jahren. Demnach wäre die Hypothese von Marija Gimbutas widerlegt.

Die Reitervölker der südrussischen Steppen, in denen Gimbutas die Träger des Protoindogermanischen sah, lebten über 2000 Jahre zu spät, um als Urindogermanen durchzugehen. Auf Renfrews These hingegen passt eine Spaltung des Urindogermanischen vor rund 9000 Jahren bestens. In Ostgriechenland sind die ersten Spuren der Landwirtschaft nicht viel später nachweisbar; sie kommen aus dem benachbarten Anatolien – und genau dort lokalisiert der Stammbaum mit Hethitisch den ältesten Zweig der indogermanischen Sprachen.

Doch halt! Hethitisch ist erst für das 2. Jahrtausend v. Chr. belegt – Jahrtausende nach der Verbreitung der Landwirtschaft. Ob das vor 8700 Jahren gesprochene Prähethitisch ebenfalls in Anatolien anzusiedeln ist, verrät uns der Stammbaum nicht, da er keine Ortsangaben enthält. Heutige oder historische Verortungen können allenfalls schwache Anhaltspunkte liefern. Sprachen sind nicht ortsfest. Keltisch, heute auf die Bretagne und die Britischen Inseln beschränkt, wurde einmal von Spanien bis zum Bosphorus gesprochen. Türkisch, heute die wichtigste Sprache in Anatolien, kam erst im Hochmittelalter dorthin.

Sprachen wandern oder sterben aus. Die Geschichte Europas, Westasiens und des Indogermanischen erstreckt sich über einen Zeitraum von 9000 Jahren. Denn in dieser



Zeit wanderten, wechselten oder verschwanden Sprachen, ohne Spuren zu hinterlassen. Deshalb wissen wir nicht, was vor 8000 Jahren in Anatolien gesprochen wurde. Nach Renfrews These war es Protoindogermanisch. Das sei dann mit der Landwirtschaft aus Anatolien auf den Balkan gekommen und zur Vorgängersprache von Griechisch und Albanisch geworden. Prähethitisch sei in Anatolien isoliert worden, während sich die übrigen indogermanischen Sprachen in Europa weiter aufspalteten. Demnach hätte es auf dem Balkan und in Anatolien eine über 8000 Jahre währende indogermanische Kontinuität gegeben.

Ebenso möglich ist aber, dass es anders lief. Die älteste halbwegs entzifferte Schrift Europas, Linear A auf Kreta, dokumentiert eine Sprache, die man bislang nicht der indogermanischen Sprachfamilie zuordnen konnte. Ein nichtindogermanischer Ursprung wird auch für die Sprache der Pelasger diskutiert, einer Ackerbau treibenden prähistorischen Bevölkerung Griechenlands, sowie für die der frühantiken Bewohner der Inseln Limnos und Zypern. Und Anatolien? Als die Hethiter dort zu schreiben begannen und die Region aus dem Dunkel der Vorgeschichte hoben, verewigten sie neben ihrer eigenen indogermanischen Sprache auch die ihres Vorgängerstaats Hatti, dessen Hochkultur und Hauptstadt sie übernahmen. Diese Sprache war definitiv

nicht indogermanisch. Somit steht keineswegs fest, dass die ersten Bauern in Anatolien oder in Griechenland Indogermanen waren.

Fazit: Der datierte Stammbaum von Gray und Atkinson lässt sich zwar mit der These vereinbaren, dass Indogermanisch mit der Landwirtschaft nach Europa kam – aber beweisen kann er sie nicht.

Dafür enthält der Stammbaum noch ein weiteres Datum, das die Forscher fasziniert. Neben den ausgestorbenen oder isolierten Sprachen wie Hethitisch oder Griechisch bestimmt er nämlich auch den Ursprung der großen indogermanischen Sprachfamilien: Indoiranisch, Baltisch, Slawisch, Keltisch, Romanisch-Italisch, Germanisch. All diese Familien haben einen gemeinsamen Ursprung, der fast 2000 Jahre nach der Trennung vom Hethitischen liegt. Die Aufspaltung in die heutigen Großfamilien geschah dann in einem Zeitfenster von nur 1400 Jahren. Das deutet auf Migrationen und Landnahmen hin – und zwar nach der frühesten Verbreitung der Landwirtschaft. Als erste der heutigen großen Familien spaltete sich vor 6900 Jahren Indoiranisch ab. Dann folgten die nordosteuropäischen Sprachfamilien Baltisch und Slawisch. Vor 6100 Jahren trennte sich Keltisch vom Stamm. Vor 5500 Jahren schließlich spaltete sich der verbliebene Rest in Germanisch und Romanisch (Italisch) auf.

Renfrew vermutet den Ursprung dieser enormen Wanderwelle, die den weiträumigen Erfolg der indogermanischen Sprachen begründet, auf dem heutigen Balkan. Natürlich ist dies eine Option, doch ein Blick auf die Landkarte eröffnet eine andere Möglichkeit: Vielleicht ging die Spaltungs- und Wanderwelle von den Steppen nördlich des Schwarzen Meers aus, also von dort, wo die von Marija Gimbutas favorisierten Steppenvölker zu Hause waren. Von dort gelangt man leicht sowohl in den Iran – und zur Abspaltung des Indoiranischen – als auch nach Osteuropa mit der Abspaltung der Baltischen und der slawischen Sprachen. Es gibt sogar einen Beleg für die frühe Anwesenheit von Indogermanen in der Schwarzmeerregion: die dortigen Flussnamen. Don, Donez, Dnjepr, Dnjestr, Donau enthalten allesamt einen indogermanischen Wortstamm, das altpersische und altkeltische Wort für Fluss (*danu*).

Die Steppenvölker sind also weiter im Rennen. Es kann gut sein, dass sie zur heutigen Verbreitung der indogermanischen Sprachen beigetragen haben. Vielleicht liegt die Wahrheit irgendwo zwischen Renfrew und Gimbutas. Sicher aber lässt sich nur eines sagen: Bei diesem Thema sind die einfachen Hypothesen nicht unbedingt die besten. ◀



**Ruth Berger** studierte neben Turksprachen, Judaistik und Amerikanistik allgemeine Sprachwissenschaften und Biologie, promovierte in Judaistik und schreibt heute hauptberuflich Romane, zuletzt »Der Seelenarzt« (Kindler, 2010). Ihr Sachbuch über die Evolution der Sprache erschien 2008 bei Eichborn unter dem Titel »Warum der Mensch spricht«.

**Bramanti, B. et al.:** Genetic Discontinuity Between Local Hunter-gatherers and Central Europe's First Farmers. In: *Science* 326, S. 137–140, 2009.

**Chandler, H. et al.:** Using Ancient DNA to Examine Genetic Continuity at the Mesolithic-Neolithic Transition in Portugal. In: Arias, P. et al. (Hg.): *Actas del III Congreso del Neolítico en la Península Ibérica*, Santander, S. 781–786, 2005.

**Gray, R. D., Atkinson, Q. D.:** Language-Tree Divergence Times Support the Anatolian Theory of Indo-European Origin. In: *Nature* 426, S. 435–438, 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037418](http://www.spektrum.de/artikel/1037418).

## 1960

### Warnung vor Hula-Hupp-Abusus

»An fünf Kindern im Alter von 7 bis 11 Jahren wurde in der Kinderklinik der Universität Ottawa, Canada, ein

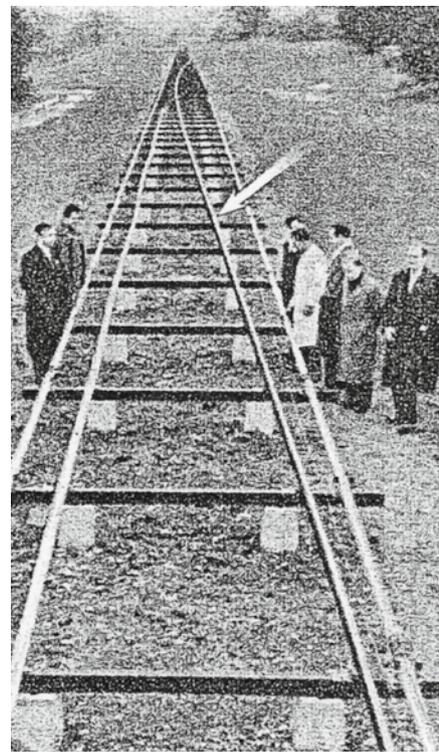
»Hula-Hupp-Syndrom« beobachtet. Im Vordergrund stehen heftige Schmerzen im Bereich des Abdomens, der Lenden, der Brustmuskulatur, der Oberschenkel und der Arme. Über Nackenschmerzen – Hula-Hupp um den Hals! – wurde seltener geklagt, dagegen war ein bis zwei Tage anhaltendes Schwindelgefühl häufig.« *Deutsche medizinische Wochenschrift*, 85. Jg., Nr. 34, 19. August 1960, S. 1514

### Fertigverband für kleine Wunden

»Bisher war es unangenehm, wenn das Pflaster, das zum Schutze einer kleinen Wunde verwendet wurde, an den Rändern ausfranst, steif wurde oder sich zusammenrollt. Diese Nachteile fallen bei dem neuen Wundverband »Hansaplast« Strip, der aus Plastic-Folie hergestellt ist, weg. Es handelt sich um eine dünne, dehnbare und anschmiegsame Folie aus Kunststoff, die wasserfest, ölfest und schmutzabweisend ist. Ein weiterer Vorteil ist die neuartige Applikation der Mullkompressen, die das Ausfransen an den Rändern verhindert.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik*, 60. Jg., Heft 15, 1. August 1960, S. 477

### 400 Kanäle gleichzeitig

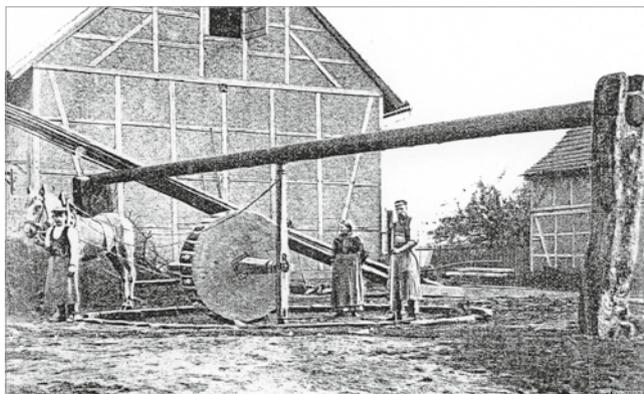
»Techniker des britischen Fernsehens besichtigen ein versuchsweise angelegtes Fernseh-Übertragungssystem in Herfordshire. Bei dieser Anlage wird das Bild rund 1100 m weit durch ein hohles Dreizollrohr geschickt. Die Anlage arbeitet mit dem neuen Impulscodierungs-Modulations-Sendeverfahren. Es kann gleichzeitig mit 400 Fernsehkanälen oder einigen hunderttausend Telefongesprächen belegt werden. Die Versuchsanlage ist zwar noch über der Erde installiert, aber kommerzielle Anlagen würden mit in die Erde gegrabenen Röhren arbeiten, und das – wie man hofft – billiger als die üblichen Koaxialkabel oder Relais-türme.« *Populäre Mechanik*, Bd. 10, Heft 7, August 1960, S. 51



Fernseh Wunder dank Röhrenübertragung

### Ende der blauen Phase

»Mit dem Anbau des Färberwaid, der einst zum Blaufärben diente, befaßten sich die Bewohner zahlreicher Ortschaften. Mit der Entdeckung des Seeweges nach Ostindien wurde aber dem Indigo der Weg nach Europa geöffnet und im Laufe der Zeit bürgerte dieser billige und ergiebigere Farbstoff sich derart ein, daß der Waidbau immer mehr eingeschränkt wurde. Die letzte Waidmühle steht in dem Gothaischen Dorfe Pferdingsleben. Der Besitzer hat beschlossen, den Waidbau aufzugeben, so daß sie in Kürze ebenfalls vom Erdboden verschwinden dürfte, eine letzte Zeugin eines eigenartigen Betriebes, der einst den europäischen Handel beherrschte.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 32, 6. August 1910, S. 637–638



Die letzte Waidmühle in Pferdingsleben schloss 1910.

### Kurzes Königsleben

»Der schwedische Statistiker Gustav Sundbörg hat Geburtsziffern und Sterblichkeit der gekrönten Häupter zum Gegenstand der Forschung gemacht. Der Vergleich der Sterblichkeitsziffern zwischen der königlichen Bevölkerung und der Gesamtbevölkerung Europas zeigte die Tatsache, daß die Sterblichkeit in den Fürstentümern größer ist als im Volke, wiewohl man das Gegenteil annehmen sollte, da die Mitglieder der königlichen Familien in höherem Maße in der Lage sind, allen Komfort

## 1910

und alle Segnungen der Heilkunst sich verschaffen zu können. Zwar im Kindesalter ist die Sterblichkeit innerhalb der Fürstentümer gering, aber sie wächst bei den erwachsenen Personen. Im Alter von 15–20 übersteigt die Mortalität der Prinzen die ihrer Untertanen um nicht weniger als 72 %. Erst mit dem 45. Lebensjahre werden die Sterblichkeitsziffern günstiger.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 34, 20. August 1910, S. 677

### Patentgesetz in Holland

»Im holländischen Unterhaus wurde kürzlich ein Gesetz angenommen, welches auch für Holland den Schutz des gewerblichen geistigen Eigentums gewährleisten soll. ... wird damit auch das letzte Industrieland Europas, das bisher eines Patentgesetzes entbehrte, mit einer Einrichtung versehen sein, deren Mangel insbesondere auch von der deutschen Industrie immer peinlicher empfunden wurde.« *Zeitschrift für Schwachstromtechnik*, 4. Jg., Heft 15, August 1910, S. 396

## Durchbruch in die Mikrowelt

Der niederländischen Tuchmacher Antoni van Leeuwenhoek baute erstmals Mikroskope mit weit mehr als 100-facher Vergrößerung. Wie es ihm gelang, Linsen derart präzise zu schleifen, bleibt ein Rätsel.

Europa, Ende des 17. Jahrhunderts. Gelehrte und Fürsten reisen ins niederländische Delft, um einen Blick durch ein unscheinbares optisches Gerät zu werfen: ein kaum handtellergroßes Mikroskop aus der Werkstatt Antoni van Leeuwenhoeks (1632–1723). Der gelernte Tuchmacher setzte Maßstäbe. Die besten Mikroskope seiner Zeit lieferten gerade einmal eine 100-fache Vergrößerung, ihm hingegen gelangen Vergrößerungen bis zum 270-Fachen.



Ein Leeuwenhoek-Mikroskop bestand meist aus fünf Teilen: einer Bodenplatte (1), einem Probenhalter (2), einer Höhenverstellung (3), einem Gewinde für das Scharfstellen (4) sowie einer Bohrung für die Linse (5). Für jedes Objekt entwarf der Niederländer ein eigenes Mikroskop. Zur Betrachtung hielt man es gegen eine Lichtquelle und blickte durch die Linse.

Damit eröffnete sich eine völlig neue Welt. So betrachtete der russische Zar Peter der Große 1698 in Delft den Blutkreislauf im Schwanz eines Aals. Leeuwenhoeks Freund Gerard van Loon berichtete 1723 in einer Biografie: »Das erfreute den Prinzen so sehr, dass er darüber und mit anderen Betrachtungen nicht weniger als zwei Stunden verbrachte.«

Die Qualität eines Stoffs beurteilte ein Tuchmacher damals auch mittels einer Lupe (vergrößernde Linsen waren seit dem 16. Jahrhundert in Gebrauch). Leeuwenhoek schiff die Gläser dafür selbst. Zu seinen Mikroskopen inspirierte ihn vielleicht die Lektüre von »Micrographia«, einem damals maßgeblichen Werk von Robert Hooke (1635–1703).

Der Physiker beschrieb darin ein aus zwei Linsen zusammengesetztes Mikroskop: Das Zwischenbild der ersten wurde von der zweiten vergrößert. Weil sich aber bei diesem – spätestens seit 1608 bekannten – Prinzip die Abbildungsfehler der Einzellinsen summieren, erreichte Hooke keine sonderlich hohe Vergrößerung, seinen Zeichnungen nach zu urteilen etwa mit dem Faktor 50.

Leeuwenhoek beschränkte sich auf Mikroskope mit nur einer Linse. Weil die sehr klein (1,5 bis 2 Millimeter im Durchmesser) und fast kugelförmig waren, also mit stark gewölbter Oberfläche, vergrößerten sie ungleich stärker. Wie es ihm allerdings gelang, mit den damaligen Techniken eine so hohe Präzision, insbesondere derart glatte Oberflächen zu erzielen, hat er keinem Menschen jemals verraten.

Als Erster sah der Delfter die Kapillargefäße, die Arterien und Venen miteinander verbinden; beobachtete, dass sich Spermien mittels einer Geißel vorwärtsbewegen; erkannte, dass der Floh wie der Mensch über eine quergestreifte Muskulatur verfügt.

Seine in Niederländisch abgefassten Berichte samt Zeichnungen schickte er der britischen Royal Society, die sie ins Lateinische und Englische übersetzte,



Als er Abstriche seines Zahnbelags durch eines seiner Mikroskope betrachtete, sah Antoni van Leeuwenhoek 1683 kugel-, spiral- und stäbchenförmige Wesen – Bakterien.

insgesamt 164 Briefe. So beschrieb er Protozoen in Regenwasser als »die ekelhaftesten Kreaturen, die ich jemals gesehen habe; denn wenn ... sie auf die Teilchen oder kleinen Fasern stoßen (von denen viele im Wasser sind, vor allem wenn es einige Tage gestanden hat), dann bleiben sie darin stecken; und dann ziehen sie ihren Körper zu einem Oval in die Länge und winden und strecken sich, um ihren Schwanz loszubekommen.«

Je verblüffender die Beobachtungen, umso lauter wurden die Stimmen der Skeptiker. Manches widersprach allgemeiner Auffassung, etwa der, dass Kleinstlebewesen aus toter Materie entstehen. Und da sich Leeuwenhoek weigerte, ein Mikroskop zu Testzwecken nach London zu schicken, reisten einige Mitglieder der Royal Society 1679 nach Delft. Offensichtlich waren die Herren beeindruckt. Denn ein Jahr später nahm die Society den Autodidakten in ihre Reihen auf.

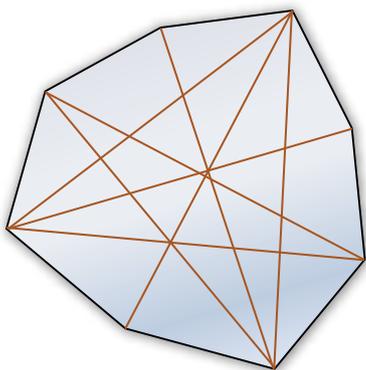
Die von ihm erreichte Vergrößerung sollte erst Carl Zeiss Mitte des 19. Jahrhunderts erreichen und übertreffen. Von den 500 Mikroskopen, die van Leeuwenhoek anfertigte, sind leider nur neun erhalten. Viele wurden wohl später zu Schmuck verarbeitet – für die Linsen hatte der Niederländer Halbedelsteine gewählt, für den Korpus Gold und Silber. Zwei Mikroskope mit Originallinsen erwarb Oskar von Miller 1906 für das von ihm gegründete Deutsche Museum in München. Trotz ihrer Unscheinbarkeit gehören sie zu den Schätzen der Wissenschaftsgeschichte.

### Sabrina Landes

Die Autorin ist Historikerin; sie leitet die Redaktion der Zeitschrift »Kultur & Technik« des Deutschen Museums.

# Die Geschichte von den DREI KLEINEN ACHECKEN

Die biedere Geometrie der Ebene bietet überraschenderweise Probleme, die ein Dreivierteljahrhundert einer Lösung widerstanden haben. Erst die modernsten Verfahren der numerischen Optimierung brachten den Durchbruch.



Von Charles Audet, Pierre Hansen und Frédéric Messine

Der Satz »Je symmetrischer, desto optimaler« gehört gewissermaßen zur mathematischen Folklore. Er stimmt ja auch, ebenso wie seine Umkehrung – meistens. Die Figur in der Ebene, die bei gegebenem Flächeninhalt den kleinsten Umfang hat, ist die symmetrischste aller Figuren: der Kreis. Umgekehrt ist auch der Kreis unter allen Figuren gegebenen Umfangs die mit der größten Fläche. Ähnliches gilt, wenn man sich auf Figuren beschränkt, die von geraden Linien begrenzt werden. Man verbinde  $n$  gleich lange Stangen durch Gelenke in den Endpunkten zu einem gleichseitigen, beweglichen Polygon (Vieleck). Dieses Gebilde schließt genau dann die maximale Fläche ein, wenn es ein regelmäßiges Vieleck ist, wenn also nicht nur alle Seiten, sondern auch alle Winkel gleich sind.

Umso überraschender ist es, dass diese Regel Ausnahmen hat. Unter allen Achtecken gegebener Größe ist das regelmäßige nicht dasjenige mit der größten Fläche! Aber was genau heißt »Größe«? Der Umfang einer Figur ist dafür ja nicht unbedingt ein geeigneter Maßstab – eher schon die Bildschirmdiagonale oder, wissenschaftlicher ausgedrückt, der Durchmesser, das heißt der größte Abstand zwischen zwei beliebigen Punkten des Gebildes.

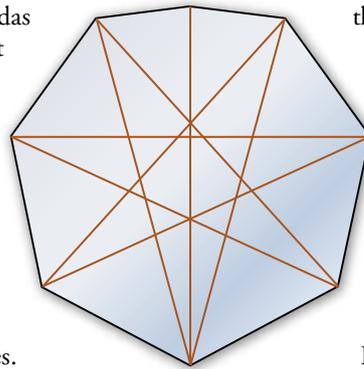
Wenn es sich um ein Vieleck handelt, sind diese zwei Punkte maximaler Entfernung stets Eckpunkte.

Wir wollen ein Vieleck »klein« nennen, wenn sein Durchmesser nicht größer als 1 ist (in einer beliebigen, aber festgelegten Längeneinheit). Da es darum geht, seine Fläche zu maximieren, können wir uns auf Vielecke beschränken, deren Durchmesser genau gleich 1 ist (Bilder auf dieser Doppelseite).

Was also ist das kleine Achteck maximaler Fläche? Die Suche begann 1922 mit den Arbeiten des deutschen Mathematikers Karl August Reinhardt (1895–1941). Im Jahr 1950 fand die Ehefrau des ungarischen Mathematikers István Vincze (1912–1999) ein kleines Achteck, das alle bisher gefundenen an Fläche übertraf. Ron Graham von den AT&T Bell Laboratories in Murray Hill (New Jersey) erarbeitete 1975 einen systematischen Ansatz, der die Sache erheblich weiterbrachte. Endgültig gelöst wurde das Problem erst in jüngster Vergangenheit mit einer Kombination

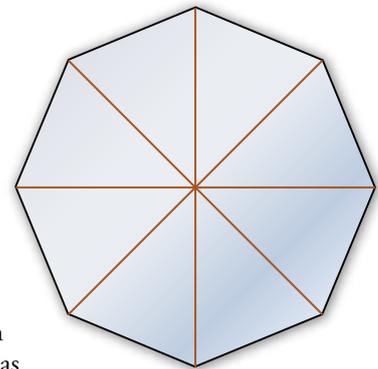
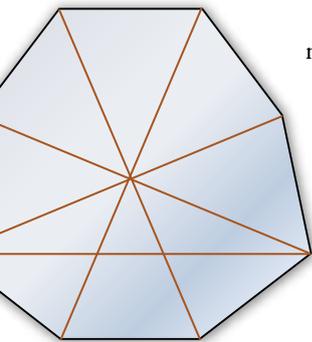
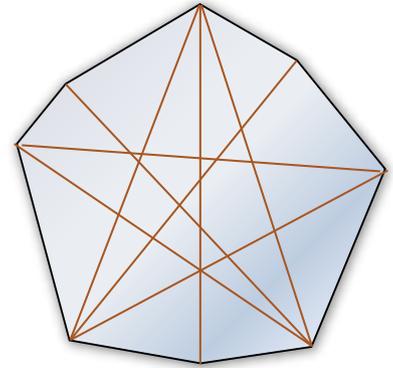
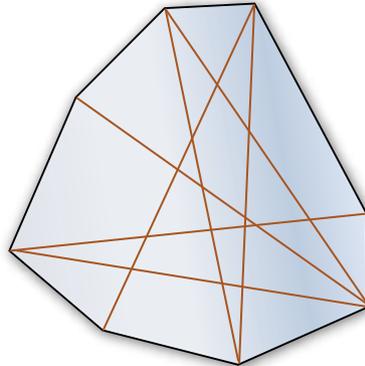
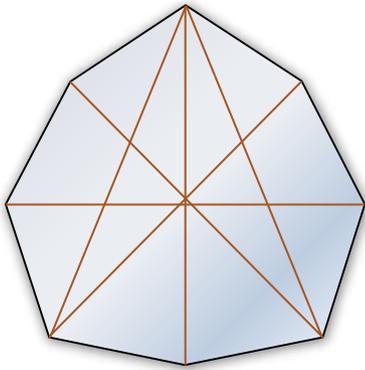
aus geometrischen Methoden und Algorithmen der so genannten globalen Optimierung.

Nach einem Vortrag, den Graham Ende der 1980er Jahre über die Rolle des Computers in der Mathematik hielt, kam ich (Hansen) auf die Idee, dass man das klei-



## In Kürze

- ▶ **Die Aufgabe:** Unter allen Polygonen mit gegebener Eckenzahl und gegebener Größe ist dasjenige mit maximalem Umfang oder mit maximalem Flächeninhalt zu finden.
- ▶ Dabei ist »Größe« definiert als maximaler Abstand zwischen zwei Ecken des Polygons.
- ▶ Bislang gibt es **befriedigende Lösungen** nur für ungerade Eckenzahlen  $n$  und einige gerade Werte von  $n$ .
- ▶ **Der Fall der Achtecke** ( $n=8$ ) wurde kürzlich von den Autoren zusammen mit Kollegen gelöst.



ne Achteck maximalen Flächeninhalts mit Hilfe der Methoden der globalen Optimierung bestimmen könne. Graham war sehr skeptisch; aber am Ende habe ich Recht behalten – allerdings erst zehn Jahre später.

Warum interessieren wir uns überhaupt für kleine Achtecke? Erstens ist ein ungelöstes Problem, vor allem wenn es so griffig zu formulieren ist, immer eine Herausforderung. Zweitens kam uns die Sache mit den kleinen Achtecken gerade recht als Übungsbeispiel für unsere Algorithmen zur globalen Optimierung, die eigentlich auf viel größere Probleme ausgelegt waren. Drittens hat diese spezielle Lösung sogar einen praktischen Nutzeffekt: Michael Mossinghoff vom Davidson College in Davidson (North Carolina) hat mit Hilfe von kleinen Achtecken die ideale Form einer – neu einzuführenden – Ein-Dollar-Münze ermittelt. Eine weitere Anwendung haben wir für die Glasindustrie gefunden; wir kommen am Schluss des Artikels darauf zurück.

Allgemein interessieren uns die Fragen: Welches kleine Polygon einer gegebenen Eckenzahl  $n$  hat den größten Flächeninhalt? Und welches den größten Umfang? Als Vorübung kann man dieselben Fragen unter Beschränkung auf gleichseitige – nicht notwendig gleichwinklige – Polygone stellen; selbst die sind noch ziemlich schwierig.

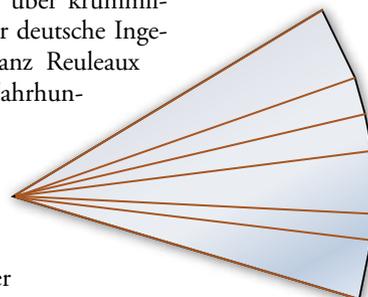
Für ungerade Eckenzahlen  $n$  fand Reinhardt 1922 eine vollständige Lösung: Unter allen kleinen Vielecken maximiert das regelmäßige sowohl den Flächeninhalt als auch den Umfang. Zum Beweis leitete er obere Schranken her, das heißt, er fand Werte für Flächeninhalt und Umfang, die kein kleines  $n$ -Eck überschreiten kann, und zeigte, dass das regelmäßige  $n$ -Eck diese Werte erreicht. Da ein regelmäßiges Polygon auch gleichseitig ist, hatte Reinhardt damit das auf gleichseitige Polygone beschränkte Problem gleich miterledigt. Allerdings sind diese Lösungen nicht notwendig die einzigen, wie wir unten sehen werden.

Der Fall  $n=4$  ist ebenfalls vollständig gelöst (Kasten S. 63). Aber für größere gerade Eckenzahlen sind bis heute nur Teillösungen bekannt.

### Gleich breit in alle Richtungen

Betrachten wir zuerst die Frage des maximalen Umfangs. Interessanterweise führt uns ein Umweg zum Ziel, und zwar über krummlinig begrenzte Figuren, die der deutsche Ingenieur und Mathematiker Franz Reuleaux (1829–1905) Ende des 19. Jahrhunderts betrachtet hat.

Ein Reuleaux-Dreieck entsteht aus einem gleichseitigen Dreieck, indem man dessen Seiten durch Kreisbögen ersetzt, deren jeder seinen Mittelpunkt in einem Eckpunkt des Dreiecks hat und durch die beiden anderen Eckpunkte verläuft (Kasten S. 62, a).



Ein konvexes Polygon heißt »klein«, wenn der größte Abstand zwischen zwei Eckpunkten gleich einer Längeneinheit ist. Hier wie in allen anderen Bildern dieses Artikels wird dieser größte Abstand (»Durchmesser«) der Länge 1 durch eine braune Strecke dargestellt. Unter den acht abgebildeten kleinen Achtecken sind drei, deren Umfang oder Flächeninhalt nachweislich maximal ist.

ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: POUR LA SCIENCE

Diese Konstruktion lässt sich auf – nicht unbedingt regelmäßige – Polygone mit ungerader Eckenzahl verallgemeinern, wobei die Radien der Kreisbögen alle gleich lang sein müssen.

Bemerkenswert an den Reuleaux-Polygonen ist, dass ihre »Breite« in allen Richtungen

gleich ist; sie werden daher auch »Gleichdicke« genannt. Dabei ist die Breite einer Figur in einer Richtung definiert als der Abstand der beiden Geraden senkrecht zu dieser Richtung, welche die Figur einschließen.

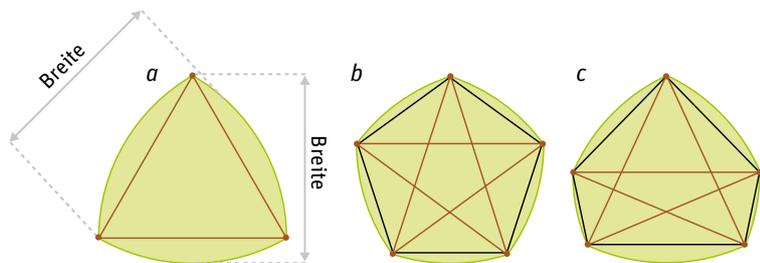
Der französische Mathematiker Joseph-Émile Barbier (1839–1889) hat um 1860 bewiesen, dass jede Kurve mit konstanter Breite  $L$  den Umfang  $\pi L$  hat. An den Beispielen im Kasten links findet man bestätigt, dass der Umfang eines Reuleaux-Polygons der Breite 1 gleich  $\pi$  und damit gleich dem Umfang des Kreises vom Durchmesser 1 ist. Also hat die Aufgabe, unter allen konvexen Figuren vom Durchmesser 1 diejenigen mit maximalem Umfang zu finden, als Lösung sowohl diesen Kreis als auch alle kleinen Reuleaux-Polygone, regelmäßig oder nicht. (Man muss fordern, dass die Figur konvex ist, das heißt, zu zwei beliebigen Punkten auch deren Verbindungsstrecke enthält. Sonst könnte man den Umfang einer Figur bei unverändertem Durchmesser beliebig in die Höhe treiben, indem man Einbuchtungen oder »Fjorde« hineingräbt.) Wie wir sehen werden, bleibt diese Maximalitätseigenschaft erhalten, wenn wir die krummen Ränder der Bogenvielecke ein bisschen begradigen.

Auf der anderen Seite hatte Reinhardt 1922 gezeigt, dass der Umfang eines kleinen Polygons mit  $n$  Ecken stets kleiner oder gleich  $2n \sin(\pi/(2n))$  ist. Diese Schranke wird von kleinen regelmäßigen Polygonen mit ungerader Eckenzahl erreicht; folglich sind diese optimal. Das gilt nicht mehr für  $n=4$ : Der Umfang des optimalen kleinen Vierecks beträgt  $2+4 \sin(\pi/12) \approx 3,0353$ ; das ist weniger als die obere Schranke  $8 \sin(\pi/8) \approx 3,0615$  (Kasten rechts).

Wie steht es mit anderen geraden Werten von  $n$ ? Betrachten wir ein kleines Polygon mit  $n$  Ecken, wobei  $n$  keine Potenz von 2 sein soll, das heißt,  $n$  schreibt sich in der Form  $m2^s$  mit natürlichen Zahlen  $s \geq 0$  und  $m > 1$ . Man beachte, dass dies auch ungerade Werte für  $n$  einschließt, nämlich für  $s=0$ .

Im ersten Schritt konstruieren wir ein regelmäßiges Reuleaux-Polygon mit  $m$  Seiten. Hierzu nehmen wir ein kleines regelmäßiges  $m$ -Eck und ersetzen jede Seite durch einen Kreisbogen mit Radius 1, der durch die Endpunkte der Seite geht und den gegenüberliegenden Eckpunkt zum Mittelpunkt hat. Dann zerlegen wir jeden dieser Kreisbögen in  $2^s$  gleiche Teile und verbinden aufeinander folgende Teilpunkte durch eine Strecke (Kasten links). Mit diesem kleinen Polygon, das gleichseitig, aber für  $s \neq 0$  unregelmäßig ist, wird die Schranke von Reinhardt erreicht. Denn die Kreisbögen des kleinen regelmä-

REULEAUX-POLYGONE

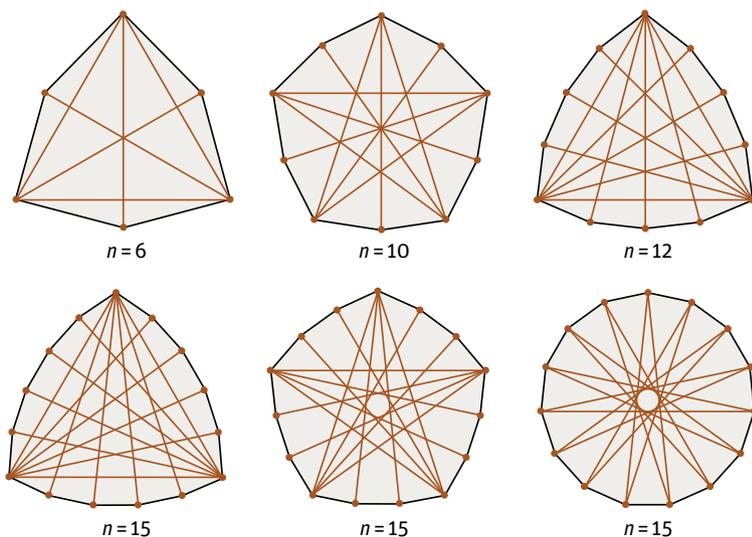


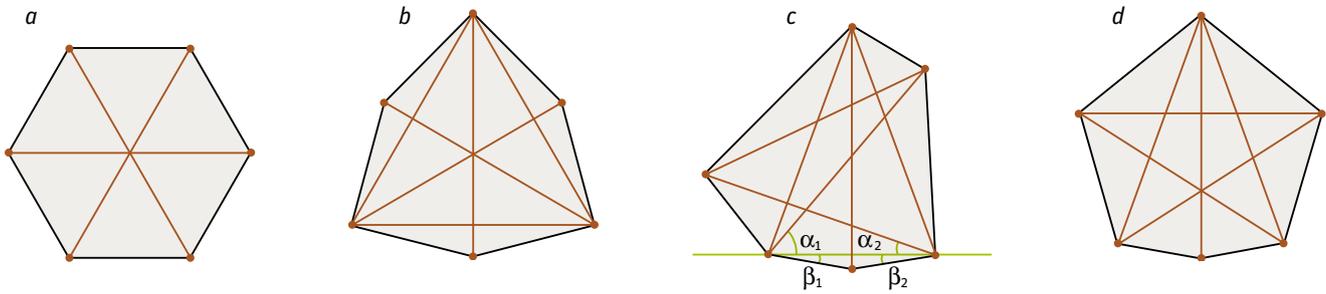
**Ein Reuleaux-Dreieck (a)** entsteht aus einem gleichseitigen Dreieck, indem man seine Kanten durch Kreisbögen mit dem Radius gleich der Kantenlänge und Mittelpunkt im gegenüberliegenden Eckpunkt ersetzt.

Allgemein hat ein Reuleaux-Polygon oder auch Bogenvieleck eine ungerade Eckenzahl und besteht aus lauter Kreisbögen mit demselben Radius ( $b, c$ ). Da der Mittelpunkt jedes Kreisbogens in der genau gegenüberliegenden Ecke des Polygons liegen muss, liegt einem Bogenvieleck stets ein – nicht notwendig regelmäßiges – Sternvieleck mit lauter gleich langen Seiten zu Grunde (braun gezeichnete Durchmesser). Charakteristische Eigenschaft eines Reuleaux-Polygons ist es, konstante Breite zu besitzen – unabhängig von der Richtung, in der man diese misst.

Aus einem Reuleaux-Polygon kann man auf elegante Weise ein maximales kleines Vieleck machen (unten): Man teile seine Kreisbögen in lauter gleiche Teile und verbinde die Teilungspunkte durch gerade Strecken. Da die Konstruktion mit einer ungeraden Eckenzahl beginnt, sind auf diese Weise kleine Polygone jeder Eckenzahl zu erreichen – mit Ausnahme der Zweierpotenzen.

Wenn die Eckenzahl  $n$  Produkt mehrerer Faktoren ist, gibt es mehrere gleichberechtigte Konstruktionswege und entsprechend mehrere kleine Polygone maximalen Umfangs (siehe das Beispiel unten für  $n=15$ ).





figen Reuleaux-Polygons überstreichen einen Winkel  $\alpha = \pi/m=2^s\pi/n$ ; der wird durch Zerlegen in  $2^s$  Teile der Größe  $\pi/n$  geteilt, also beträgt die Länge einer Kante des konstruierten Polygons  $2\sin(\pi/(2n))$ .

Damit sind kleine Polygone maximalen Umfangs gefunden für alle Eckenzahlen  $n$ , die nicht Zweierpotenzen sind. In vielen Fällen sind diese Lösungen nicht eindeutig, in anderen ist die Eindeutigkeit noch nicht geklärt. Der spezielle Fall  $n=4$  ist vollständig gelöst (Kasten rechts).

Für die anderen geraden Werte von  $n$  hat sich das Problem als hartnäckig erwiesen. Am Ende seines Artikels von 1922 erwähnt Reinhardt kurz Folgendes: Ist  $n$  gerade und mindestens gleich 6, so ist das regelmäßige Polygon niemals dasjenige mit größtem Flächeninhalt oder Umfang. Reinhardt selbst hat einen Teilbeweis geliefert, der später von anderen vervollständigt wurde.

Der erste noch gänzlich offene Fall ist demnach  $n=2^3=8$ .

### Welches Sechseck hat maximale Fläche?

Betrachten wir nun das Problem des maximalen Flächeninhalts. Für ungerade Eckenzahlen  $n$  liefern, wie wir gesehen haben, die regelmäßigen Polygone eine – nicht notwendig eindeutige – Lösung. Es scheint, dass für gerade  $n$  das regelmäßige Polygon immerhin unter den gleichseitigen kleinen Polygonen das mit der maximalen Fläche ist; aber das bleibt zu beweisen.

Was geschieht, wenn  $n$  gerade ist und man sich nicht auf die gleichseitigen Polygone beschränkt? Für  $n=4$  sind das Quadrat und alle Vierecke, die aus diesem durch Verschieben der Diagonalen entstehen, Figuren maximalen Flächeninhalts (Kasten rechts). Ab  $n=6$  wird es schwieriger. Graham fand 1975 ein unregelmäßiges kleines Sechseck, dessen Flächeninhalt ungefähr 3,92 Prozent größer ist als der des regelmäßigen. Er bewies, dass diese Lösung maximalen Flächeninhalt hat (Bild oben, *d*).

Um dies zu zeigen, betrachtete Graham den »Graphen der Durchmesser« oder auch »Durchmessergraphen« eines kleinen Poly-

Weder das regelmäßige kleine Sechseck (*a*) noch dasjenige, das man aus dem Reuleaux-Dreieck gewinnt (*b*), haben maximalen Flächeninhalt. Ron Graham hat 1975 bewiesen, dass die Durchmesser eines optimalen kleinen Sechsecks notwendigerweise aus einem Sternfünfeck plus einem Durchmesser entlang einer Winkelhalbierenden bestehen müssen (*c*). Zusätzlich kann man beweisen, dass ein kleines Sechseck maximaler Fläche achsensymmetrisch sein muss ( $\alpha_1 = \alpha_2, \beta_1 = \beta_2$ ), was zum Graham-Sechseck (*d*) führt.

### KLEINE VIERECKE ( $n = 4$ )

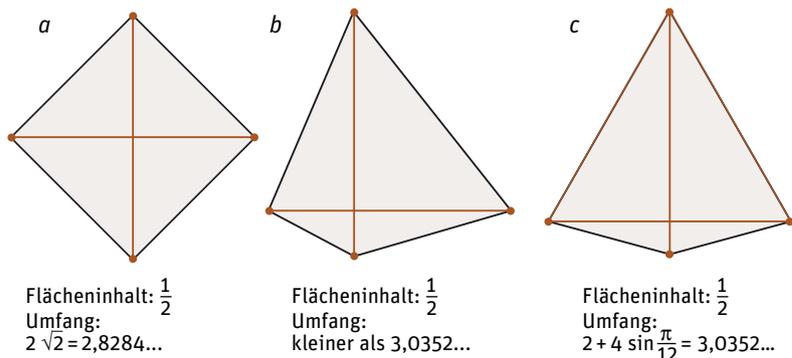
Bei einem Viereck ist die Eigenschaft »klein« einfach zu formulieren: Beide Diagonalen dürfen nicht länger als 1 sein.

Im Jahr 1922 bemerkte Karl Reinhardt, dass das Quadrat mit Diagonalenlänge 1 (*a*) sowohl gleichseitig als auch von maximalem Flächeninhalt ist (nämlich  $1/2$ ). Tatsächlich kann man zeigen, dass unter allen Vierecken mit vorgegebenen Diagonalenlängen nur diejenigen maximalen Flächeninhalt haben können, deren Diagonalen sich im rechten Winkel schneiden. Folglich ist das Quadrat unter den gleichseitigen Vierecken das einzige von maximalem Inhalt.

Lässt man aber Kanten zu, die nicht mehr gleich lang sind, so ist auch das Quadrat nicht mehr die einzige Lösung des Maximierungsproblems. Da sich die Fläche eines konvexen Vierecks nicht ändert, wenn man eine Diagonale parallel zu sich selbst verschiebt (diese Diagonale zerlegt das Viereck in zwei Dreiecke, deren Grundseite und Höhe und damit deren Flächeninhalt unverändert bleiben), ergeben sich unendlich viele Vierecke gleicher maximaler Fläche: alle, deren Diagonalen senkrecht aufeinander stehen und Länge 1 haben (*b*).

Und wie steht es mit dem Umfang? Unter den gleichseitigen Vierecken mit Diagonalenlänge 1 ist wieder das Quadrat dasjenige mit maximalem Umfang. Verlangt man nicht mehr die Gleichseitigkeit, so lässt sich dieses Ergebnis noch verbessern. Wie Nikolaos Tamvakis von der Griechischen Marineakademie 1987 mit analytischen Hilfsmitteln gezeigt hat, besitzt ein bestimmtes symmetrisches kleines Viereck (*c*), das vier Durchmesser der Länge 1 enthält, maximalen Umfang und ist das einzige Viereck mit dieser Eigenschaft.

Somit ist der Fall  $n = 4$  vollständig gelöst, und zwar ohne Computereinsatz.



Flächeninhalt:  $\frac{1}{2}$   
Umfang:  $2\sqrt{2} = 2,8284\dots$

Flächeninhalt:  $\frac{1}{2}$   
Umfang: kleiner als 3,0352...

Flächeninhalt:  $\frac{1}{2}$   
Umfang:  $2 + 4 \sin \frac{\pi}{12} = 3,0352\dots$

gons. Dessen Ecken sind die Ecken des Polygons, und zwei Ecken sind genau dann durch eine Kante verbunden, wenn sie den Abstand 1 haben, ihre Verbindungslinie also ein Durchmesser ist. Graham bewies: Ist der Flächeninhalt maximal, so ist der Durchmessergraph zusammenhängend, das heißt, zwei beliebige Ecken sind stets durch einen Kantenzug verbunden.

Mit dieser Information war es möglich, alle überhaupt denkbaren Durchmessergraphen für das Sechseck aufzuzählen – sie haben notwendigerweise fünf oder sechs Kanten –; es ergaben sich zehn Stück. Für neun hiervon konnte Graham mit Hilfe von geometrischen Überlegungen zeigen, dass der Flächeninhalt des zugehörigen Sechsecks nicht größer sein kann als 0,6495, derjenige des regelmäßigen

Sechsecks. Der zehnte Graph hat die Gestalt eines Sternfünfecks mit einem zusätzlichen Durchmesser, der eine Ecke mit der letzten noch freien Ecke verbindet (Bild S. 63 oben, c). Zusätzlich behauptete Graham, dass die optimale Lösung, die dieser Konfiguration entspricht, achsensymmetrisch sein müsse. Das war korrekt, aber wider Erwarten nur sehr mühsam zu beweisen. Erst 1997 füllte Bao Yuan, Student an der Universität Singapur, die Lücke. Mit diesen Vorgaben das optimale Sechseck und seinen Flächeninhalt auszurechnen, ist nicht mehr schwer.

Graham verallgemeinerte sein Resultat umgehend: Er vermutete, dass für gerade  $n$  die Durchmesser eines kleinen Polygons mit maximalem Flächeninhalt ein Sternviereck mit  $n-1$  Ecken plus eine Winkelhalbierende bilden. Diese Vermutung wurde 2007 von Jim Foster und Tamas Szabo von der Weber State University in Ogden (Utah) bewiesen.

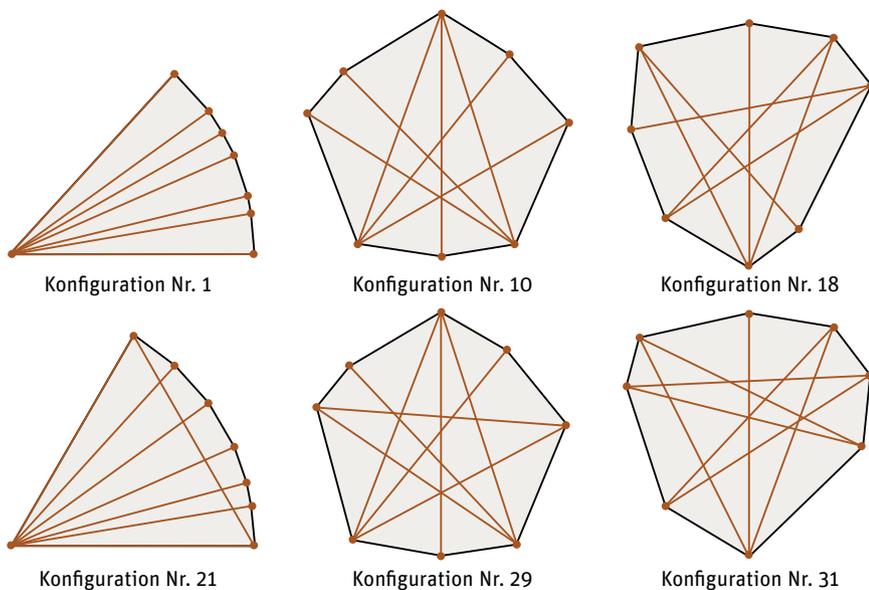
Nachdem damit der Fall  $n=6$  erledigt war, war der nächste noch offene Fall für die Fläche wie für den Umfang der des kleinen Achtecks ( $n=8$ ). Wir stellten uns die folgenden drei Fragen: Welches ist das kleine Achteck größten Flächeninhalts? Welches ist das kleine Achteck mit maximalem Umfang? Welches ist das kleine gleichseitige Achteck mit maximalem Umfang?

### Nach dem Sechseck das Achteck

Zusammen mit Sylvain Perron und Junjie Xi-ong haben wir zwischen 2002 und 2007 diese drei Fragen untersucht und beantwortet. Wie beim Sechseck haben wir zunächst die Durchmessergraphen für das kleine Achteck aufgezählt; es sind 31 Stück, und sie haben sämtlich sieben oder acht Kanten (Bild links). Von ihnen entsprach der letzte (Nummer 31) der (damals noch unbewiesenen) Vermutung von Graham. Unter allen Achtecken mit diesem Durchmessergraphen haben wir dasjenige mit dem größten Flächeninhalt ermittelt (Bild rechts oben), und zwar mit einem Verfahren der globalen Optimierung.

Das Programm arbeitete mit zehn Variablen und 23 quadratischen Nebenbedingungen, das heißt, in diesen werden Produkte zweier Variablen und quadrierte Variablen mit Konstanten multipliziert und aufaddiert. Dadurch wird ausgedrückt, dass gewisse Abstände zwischen zwei Punkten gleich 1 sein müssen und andere nicht größer als 1 sein dürfen. Auch die zu maximierende Funktion (die »Zielfunktion«) ist in diesem Sinne quadratisch; sie berechnet die Fläche des Achtecks.

Das so aufgestellte Optimierungsproblem gehört zu der großen Klasse der »quadratischen nichtkonvexen Probleme mit nicht-



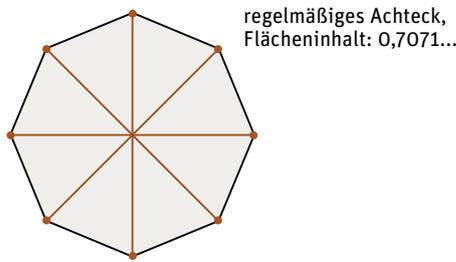
Wenn ein kleines Achteck maximalen Flächeninhalt oder maximalen Umfang hat, dann muss sein Durchmessergraph, das heißt alle Ecken samt den Verbindungen der Länge 1 zwischen ihnen, einem Sortiment von 31 Graphen angehören, von denen hier sechs beispielhaft gezeigt sind.



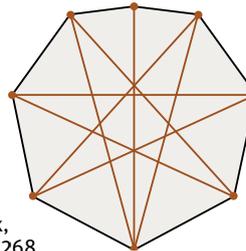
konvexen quadratischen Nebenbedingungen«. Für diese schweren Probleme sind die klassischen Methoden der Optimierung ungeeignet, und wir mussten uns eine neue ausdenken, den QP-Algorithmus (Kasten unten).

Schon 1997 war es uns nach 100 Stunden Rechenzeit auf einer Workstation gelungen, zum Durchmessergraphen Nummer 31 das kleine Achteck maximaler Fläche zu bestimmen. Sein Flächeninhalt beträgt 0,726867, wobei die ersten vier Stellen nach dem Komma gesichert sind. Diese Fläche ist rund drei Prozent größer als jene des regelmäßigen Achtecks.

Allerdings musste noch bewiesen werden, dass diese Lösung wirklich optimal ist (das Ergebnis von Foster und Szabo lag noch nicht vor). Hierzu mussten die verbleibenden 30



regelmäßiges Achteck, Flächeninhalt: 0,7071...



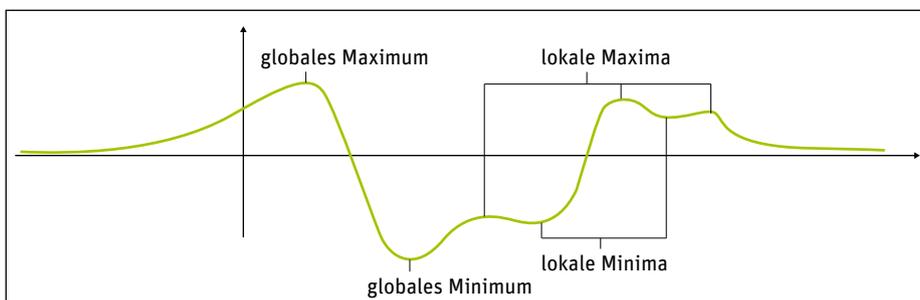
optimales Achteck, Flächeninhalt: 0,7268...

Das kleine Achteck maximalen Flächeninhalts entspricht der Konfiguration 31; seine Fläche ist etwa drei Prozent größer als die des kleinen regelmäßigen Achtecks.

## EXAKTE ALGORITHMEN FÜR DIE GLOBALE OPTIMIERUNG

**Im Prinzip verläuft die Suche** nach einem kleinen Polygon maximaler Fläche oder maximalen Umfangs genau so wie die Lösung der klassischen Maximierungsprobleme in der Schule. Man sucht den Wert  $x$ , für den die Zielfunktion  $f(x)$  (zum Beispiel der Flächeninhalt des Achtecks) ein Maximum annimmt. Nur ist die unabhängige Variable  $x$  nicht einfach eine reelle Zahl, sondern viele reelle Zahlen, in diesem Fall die Koordinaten der Eckpunkte des Achtecks. Entsprechend sucht man nicht nach einem Punkt auf der Zahlengeraden, sondern in einem 16-dimensionalen Raum. Der ist deutlich unübersichtlicher.

Wie in der Schule sucht man dann nach Punkten, in denen die Ableitung von  $f$  nach  $x$  gleich null ist, und schaut für jeden dieser Punkte nach, ob es sich auch wirklich um ein Maximum handelt. Es könnte auch ein Minimum oder ein Sattelpunkt sein; oder statt eines einsamen Gipfelpunkts zieht sich ein ganzer Bergrücken mit konstanter maximaler Höhe durch die abstrakte Landschaft, wie im Fall der kleinen Vierecke (Kasten S. 63). Jedenfalls findet man mit dieser Methode, wenn überhaupt, nur lokale Maxima: Der Funktionswert an einer solchen Stelle ist zwar größer als alle Funktionswerte in der unmittelbaren Umgebung, das schließt aber nicht aus, dass an anderer Stelle noch größere Funktionswerte auftreten (Bild).



Zusätzlich erschweren die Nebenbedingungen – der Abstand gewisser Punkte muss genau 1 sein, der Abstand anderer Punkte darf nicht größer als 1 sein – das Problem. Damit werden große

Teile des abstrakten Raums zu verbotenen Zonen erklärt, was das verbleibende Gebiet sehr zerklüftet macht.

**Für unsere Suche nach globalen Maxima** haben wir zwei Algorithmen entwickelt und eingesetzt: den QP-Algorithmus für die Lösung quadratischer Probleme und den IBBA-Algorithmus für allgemeinere Optimierungsprobleme.

QP (*quadratic programming*) ist eine Weiterentwicklung des RLT-Algorithmus (*reformulation-linearization technique*) von Hanif Sherali und Warren Adams. Dabei werden Terme wie  $x^2$  oder  $xy$  durch neue Variable ersetzt. In diesen neuen Variablen sind Zielfunktion und Nebenbedingungen lineare Funktionen, womit das Problem den mächtigen Werkzeugen der linearen Optimierung zugänglich wird (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 76). Diese dienen dazu, den Bereich des abstrakten Raums, in dem es nach einer Lösung zu suchen lohnt, zu verkleinern oder in zwei Teilbereiche aufzuspalten, in denen weitergesucht wird.

IBBA (*interval branch and bound algorithm*) arbeitet mit der Intervallarithmetik (Spektrum der Wissenschaft 9/2000, S. 54); dieses Rechenverfahren wurde 1966 von Ramon Monte an der University of Wisconsin in Madison vorgeschlagen. Man ersetzt

jede Zahl, mit welcher der Computer rechnet, durch ein Intervall, das neben der Zahl selbst auch die Genauigkeit wiedergibt, mit der diese Zahl bekannt ist. Indem man alle Rechenoperationen mit Intervallen statt Zahlen durchführt, erhält man Ergebnisse mit garantiert korrekten Fehlerschranken. Auch IBBA zerlegt den abstrakten

Raum der möglichen Lösungen in immer kleinere Teile (mehrdimensionale Verallgemeinerungen von Intervallen), bis eine Lösung auf mehrere Dezimalstellen genau ermittelt ist.



**Charles Audet** (oben) ist Professor am Forschungszentrum GERAD (Groupe d'étude et de recherche en analyse des décisions) in Montreal (Kanada) sowie an der École polytechnique de Montréal. **Pierre Hansen** (Mitte) ist Professor am GERAD und Inhaber des Lehrstuhls für Datenexploration an der HEC (École des hautes études commerciales) in Montreal. **Frédéric Messine** ist Maître de conférences am Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRT) und an der École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique, d'informatique, d'hydraulique et des télécommunications (ENSEEIH) in Toulouse.

**Audet, C., Hansen, P., Messine, F., Perron, S.:** The Minimum Diameter Octagon with Unit-Length Sides: Vincze's Wife's Octagon is Suboptimal. In: Journal of Combinatorial Theory A 108(1), S. 63–75, 2004. Online unter [www.gerad.ca/~charlesa/PUB/P\\_perimetre\\_JCTA.pdf](http://www.gerad.ca/~charlesa/PUB/P_perimetre_JCTA.pdf).

**Audet, C., Hansen, P., Messine, F.:** Extremal Problems for Convex Polygons. In: Journal of Global Optimization 38, S. 163–179, 2007.

**Audet, C., Hansen, P., Messine, F.:** The Small Octagon with Longest Perimeter. In: Journal of Combinatorial Theory A 114, S. 135–150, 2007.

**Audet, C., Hansen, P., Messine, F.:** Quatre petits octogones. In: MATAPLI 80, S. 39–59, 2006. Online unter [http://smi.emath.fr/matapli\\_pdf/matapli80.pdf](http://smi.emath.fr/matapli_pdf/matapli80.pdf).

**Mossinghoff, M. J.:** A \$1 Problem. In: American Mathematical Monthly 113(5), S. 385–402, 2006.

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037419](http://www.spektrum.de/artikel/1037419).

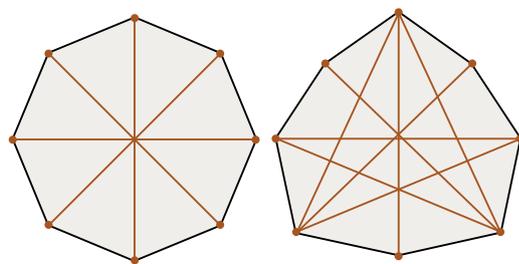
Durchmessergraphen ausgeschlossen werden. Das hat uns vier weitere Jahre Arbeit gekostet, wobei wir geometrische und numerische Methoden kombinierten. So ist es einfach einzusehen, dass die Konfigurationen Nummer 1 und Nummer 21 (Bild S. 64) Flächeninhalte liefern, die nicht größer als  $\pi/6 \approx 0,5236$  sein können. Dieser Wert liegt unter dem des regelmäßigen Achtecks von  $\sqrt{2}/2 \approx 0,7071$ . Folglich können diese beiden Konfigurationen nicht kleinen Achtecken mit maximaler Fläche entsprechen.

### Dank an die Ehefrau

Die Gleichungen, die sich für das kleine Achteck maximalen Umfangs ergeben, sind von denen für das kleine Achteck maximaler Fläche sehr verschieden. In der Zielfunktion treten trigonometrische Terme auf, und manche Variablen bezeichnen Winkel. Es war deshalb nötig, einen anderen Algorithmus zu entwickeln, den IBBA-Algorithmus (Kasten S. 65). Mit diesem gelang es uns 2004, den Maximalwert für den Umfang eines kleinen Achtecks nach drei Stunden Rechenzeit auf einem Netzwerk von 30 PCs der Université de Pau et des Pays de l'Adour (Südfrankreich) zu ermitteln. Das Ergebnis ist 3,121147 (alle Ziffern gesichert). Die vollständige Lösung, die wieder geometrische Überlegungen zusammen mit numerischen Methoden erforderte, hat zusätzlich ungefähr ein Jahr gebraucht. Sie zeigt, dass das Achteck maximalen Umfangs zum Durchmessergraphen Nummer 29 gehört und achsensymmetrisch ist (Bild rechts).

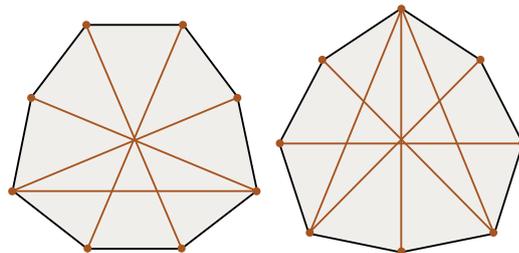
Das ermittelte Achteck ist nicht gleichseitig. Welches ist das gleichseitige Achteck maximalen Umfangs? István Vincze veröffentlichte 1950 eine Lösung (Bild rechts), die besser ist als das regelmäßige Achteck, und bedankte sich in einer Fußnote bei seiner Ehefrau für das Beispiel, ohne allerdings anzugeben, wie diese es gefunden hat. Aber dieses gleichseitige Achteck hat nicht maximalen Umfang, wie wir zusammen mit Sylvain Perron 54 Jahre später gezeigt haben.

Dazu haben wir zunächst bewiesen, dass die vier Hauptdiagonalen des Achtecks die Länge 1 haben müssen; diese Eigenschaft haben sowohl das regelmäßige als auch das Achteck von Vincze. Dann haben wir ein quadratisches Optimierungsprogramm formuliert, dessen Nebenbedingungen zum Ausdruck bringen, dass alle Kanten gleich lang sind, dass die Hauptdiagonalen die Länge 1 haben, dass alle Abstände zwischen zwei Eckpunkten kleiner oder gleich 1 sind und schließlich alle Kantenlängen zwischen derjenigen des regelmäßigen Achtecks und der Länge des zugehö-



regelmäßiges Achteck, Umfang = 3,0614...

Achteck mit maximalem Umfang = 3,1211...



Achteck von Frau Vincze, optimales gleichseitiges Achteck, Umfang = 3,0903...

Umfang = 3,0956...

**Das kleine Achteck maximalen Umfangs gehört zur Konfiguration 29. Unter den gleichseitigen Achtecken hat das von István Vincze 1950 veröffentlichte (und von seiner Frau entdeckte) einen größeren Umfang als das regelmäßige Achteck, ist aber immer noch nicht optimal. Das gleichseitige Achteck mit maximalem Umfang wurde 2007 gefunden.**

rigen Kreisbogens liegen. Dieses Problem löste der QP-Algorithmus in nur 45 Sekunden mit einer Genauigkeit von  $10^{-7}$ .

Somit haben wir die drei optimalen kleinen Achtecke ermittelt und damit Fragen beantwortet, die seit 1922, seit 1950 und seit 1975 offen geblieben waren. Die nächsten noch offenen Fälle sind:

- das kleine Zehneck – gleichseitig oder nicht – maximalen Flächeninhalts;
- das kleine Sechzehneck ( $n=2^4$ ) – gleichseitig oder nicht – maximalen Umfangs.

Darüber hinaus sind immer noch drei Fragen zu kleinen Achtecken ungelöst:

- Welches kleine Achteck hat maximale Breite?
- Welches gleichseitige kleine Achteck hat maximale Breite?
- Welches kleine Achteck ist so beschaffen, dass die Summe der Abstände zwischen je zwei Eckpunkten maximal wird?

Jeden, der eines dieser Probleme löst, werden wir in den exklusiven Kreis der »Oktogonisten« aufnehmen. Darüber hinaus setzen wir einen besonderen Preis aus: acht achtseitige (gefüllte) Whiskygläser, bei denen sowohl das Volumen als auch die Querschnittsfläche (bei gegebener Höhe und gegebenem Durchmesser) maximal sind. ◁



## KOMBINATORIK

# Der Stammbaum der Lösungen des Damenproblems

Neue Anwendungen der Gruppentheorie bringen Licht in die bekannten Lösungen einer klassischen Denksportaufgabe.

Von Matthias Engelhardt

Kann man acht Damen so auf ein Schachbrett stellen, dass keine von diesen eine andere schlagen kann? Und wenn ja, wie viele solche Stellungen gibt es? In diesem Artikel beantworten wir die Frage mit einem großen Bild, das alle Lösungen sauber geordnet enthält.

Aufgebracht hat die Frage vor gut 160 Jahren der Schachmeister Max Bezzel (1824–1871) aus Ansbach. Mit dem Schachspiel selbst hat das Problem eigentlich nichts zu tun. Schließlich kann es in einer echten Partie nicht vorkommen, dass acht Damen – und sonst keine Figur – auf dem Brett stehen.

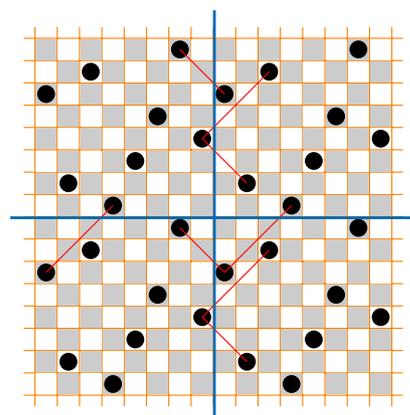
Abstrakt formuliert lautet das klassische Problem: Man besetze acht der 64 Felder eines Schachbretts derart, dass nirgends in ein und derselben waagerechten, senkrechten oder um 45 Grad geneigten Linie zwei besetzte Felder vorkommen. Damit wird es ein mathematisches Problem. Auch der große Carl Friedrich Gauß (1777–1855) hat sich damit auseinandergesetzt.

Im Prinzip kann man es durch erschöpfendes Durchprobieren lösen. Da-

durch wird es zur Übungsaufgabe für die Informatiker, die darum wetteifern, die Anzahl der Lösungen auf immer größeren Schachbrettern zu ermitteln. Eine Gruppe aus dem Institut für Informatik der TU Dresden hält gegenwärtig den Rekord mit dem 26·26-Brett. Ich selbst bin für die unten beschriebene Variante, das Torus-Damenproblem, bis zur Seitenlänge 31 vorgedrungen.

Das Damenproblem ist das bekannteste Beispiel für ein CSP (*constraint satisfaction problem*). Man sucht alle Konfigurationen, die gewisse Bedingungen (*constraints*) erfüllen: Welche Gegenstände aus einem gegebenen Sortiment passen nach Volumen und Gewicht auf den Lastwagen? Kann man in den Motorraum dieses Autos den PS-starken Motor und die große Variante der Klimaanlage zugleich einbauen?

Wie schon lange bekannt ist, hat das Problem 92 verschiedene Lösungen. Aber was heißt »verschieden«? Das Spiegelbild einer Lösung ist selbst eine Lösung, aber von dieser nicht sehr verschieden. Wenn man auch noch Lösungen, die sich nur durch eine Drehung um 90 Grad unterscheiden, als nicht sehr verschieden be-



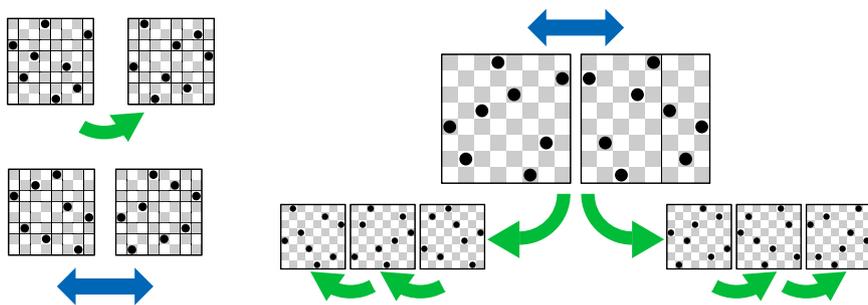
Grafiken des Artikels: Matthias Engelhardt

Eine Lösung des Damenproblems auf dem gewöhnlichen Schachbrett ist keine Lösung mehr, wenn man das Problem auf dem Torus, das heißt dem periodisch fortgesetzten Schachbrett stellt (hier sind 2·2 von den unendlich vielen Schachbrettern gezeichnet). Die neuen Zugmöglichkeiten ergeben neue Schlagmöglichkeiten (»Konflikte«). Von jedem Konflikt ist nur der kürzere Ast eingezeichnet.

trachtet, schrumpfen die 92 Lösungen auf zwölf »wesentlich verschiedene« zusammen, die man auch – ungenau, aber üblich – als »eindeutige Lösungen« oder »Fundamentallösungen« bezeichnet.

Was heute kaum bekannt ist: Man kann diese Anzahl auf sechs oder gar auf vier reduzieren. Dabei werden Lösungen als »wenig verschieden« oder »verwandt« angesehen, wenn sie durch eine Verallgemeinerung von Drehung oder Spiegelung, eine »Transformation«, auseinander hervorgehen. Auch Transformationen, die eine Lösung des Damenproblems mit einer Anordnung verbinden, die gar keine Lösung ist, erweisen sich als nützlich.

Das mathematische Mittel zur Beschreibung solcher Transformationen ist die Gruppentheorie. Eine Gruppe besteht



Eine Drehung um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn (links oben), eine Spiegelung an der vertikalen Mittelachse (links unten) und deren Kombinationen (rechts) ergeben eine Gruppe mit acht Elementen. Lässt man alle diese Elemente auf eine Lösung des Damenproblems wirken, so ergibt sich im Allgemeinen ein Achtergrüppchen von Lösungen.

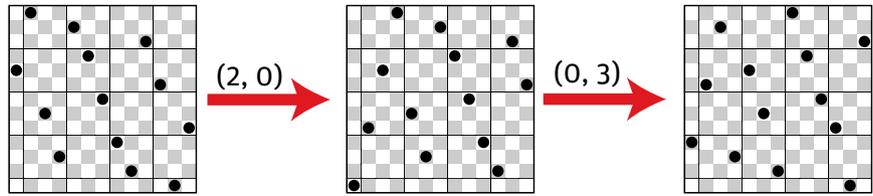
zum Beispiel aus allen Drehungen um Vielfache von 90 Grad und Spiegelungen des Schachbretts um geeignete Achsen. Man kann die Elemente einer Gruppe kombinieren; so entsteht zum Beispiel wieder ein Element der Gruppe, wenn man zuerst eine Drehung um 270 Grad und dann eine Spiegelung an der horizontalen Mittellinie ausführt. Zu jedem Gruppenelement gibt es das »inverse Element«, das dessen Aktion genau rückgängig macht; auch das Nichtstun ist ein Element der Gruppe, so wie die Null zu den Zahlen gehört. Unsere Beispielgruppe heißt »Diedergruppe« (gesprochen »Di-Eder«) und wird mit  $D_4$  bezeichnet.

Jedes Element der Diedergruppe macht aus einer Lösung des Damenproblems wieder eine Lösung. Indem man alle Elemente der Gruppe auf eine bestimmte Lösung des Damenproblems wirken lässt, erhält man ein »Grüppchen« von acht Lösungen (Bild links unten). Wenn eine Lösung punktsymmetrisch ist, fallen von den acht Grüppchenelementen je zwei zusammen, und es bleiben nur vier übrig. Auf diese Weise zerlegt die Gruppe die Menge der Lösungen in zusammengehörige Teilmengen und bringt damit eine Art Ordnung in die Menge.

### Streitbare Damen auf dem Autoschlauch

Was mit der Diedergruppe so gut funktioniert, lässt sich ausdehnen. Man erweitert die Gruppe um allgemeinere Transformationen und gewinnt dadurch einen noch besseren Überblick.

Um diese verallgemeinerten Transformationen zu verstehen, ist ein Umweg hilfreich, und zwar über eine Variante des Damenproblems, das Torus-Damenproblem. Man pflastert die Ebene mit lauter gleichen Exemplaren des Schachbretts mitsamt den Damen darauf und verlangt, dass keine der Damen eine andere schlagen kann, auch nicht über die Grenzen des ursprünglichen Schachbretts hinaus. So gestellt, wäre das Problem unlösbar, denn nach acht Schritten in einer beliebigen Richtung – waagrecht, senkrecht oder diagonal – trifft jede Dame ihr Ebenbild auf dem jeweiligen Nachbarschachbrett und könnte sie schlagen. Daher muss man die Reichweite jeder Dame begrenzen: auf sieben Schritte beim Standardschachbrett, alle-



mein auf  $n-1$  Schritte bei einem verallgemeinerten Brett aus  $n \cdot n$  Feldern.

Statt unendlich viele Exemplare eines Schachbretts in die Ebene zu legen, könnte man auch den rechten Rand des Bretts mit dem linken verbinden und den oberen mit dem unteren. Dazu muss man sich die quadratische Fläche des Schachbretts gummiartig deformierbar vorstellen; das Ergebnis ist so etwas wie ein Schwimmring oder Autoschlauch – das, was der Mathematiker einen Torus nennt.

Beim Übergang zum Torus nehmen die Damen in ihren schachlichen Möglichkeiten noch zu: Sie erreichen jetzt einige Felder, die vorher hinter dem Rand des Bretts lagen (Bild links). Auf dem klassischen  $8 \cdot 8$ -Brett werden sie sogar so kampfstark, dass acht von ihnen unter

Eine Lösung des Torus-Damenproblems auf einem  $13 \cdot 13$ -Brett wird durch Verschieben wieder zu einer Lösung. Über dem roten Pfeil ist der Verschiebungsvektor angegeben.

keinen Umständen in friedlicher Koexistenz leben können, es also gar keine Lösung des Damenproblems mehr gibt.

Befassen wir uns allgemeiner mit dem  $n \cdot n$ -Brett. Vor knapp 100 Jahren hat György Pólya (1887–1985) bewiesen, dass es eine Torus-Damenlösung nur dann gibt, wenn  $n$  weder durch 2 noch durch 3 teilbar ist (siehe das unten zitierte Buch von Wilhelm Ahrens). Es gibt also eine  $7 \cdot 7$ -Lösung, aber die ist langweilig: Alle Damen stehen auf einer Geraden, die sich allerdings mehrfach

ANZEIGE

**Sprachen lernen? Betrachten Sie es als ein Kinderspiel.**

Rosetta Stone ist eine einzigartige Sprachlern-Software, welche das Lernen von Sprachen so einfach macht wie nie zuvor. Unsere Methoden imitieren den Lernprozess, dem Sie sich schon als Kind zum Erlernen Ihrer Muttersprache bedient haben.

In 31 Sprachen erhältlich

6 MONATE GELD-ZURÜCK-GARANTIE

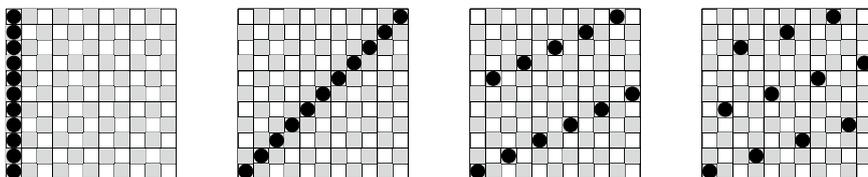
Informieren Sie sich jetzt unter  
**0800 200 11 887**  
[RosettaStone.de/sdw07](http://RosettaStone.de/sdw07)

**10% Rabatt + Gratis Lieferung**

Geben Sie 'sdw07' beim Bestellvorgang an

**RosettaStone**

©2010 Rosetta Stone Ltd. Alle Rechte vorbehalten. Schutzrechte angemeldet. Das Angebot kann nicht mit anderen Angeboten kombiniert werden. Sechs-Monate-Geld-zurück-Garantie gilt nur wenn Produkte direkt bei Rosetta Stone erworben worden sind. Voraussetzung für die Erstattung des Kaufpreises ist, daß alle Bestandteile bei der Rücksendung intakt sind (Anwendungs-CD, Sprach-CD, Bedienungsanleitung, und Lehrplan mit Ausnahme von Paschtu). Der Versand innerhalb von Deutschland ist kostenlos. Die Kosten für Rücksendungen werden nicht übernommen. \*Gegenüber dem Einzelkauf von Stufe 1, Stufe 2 und Stufe 3.



**Mehrfache Anwendung einer Scherung auf dem 11 · 11-Brett**

um den Torus windet (siehe unten). Auch mit 11 · 11 wird es nicht besser. Erst bei 13 · 13 gibt es eine ein bisschen unregelmäßige Lösung für das Torus-Damenproblem (Bild S. 69 oben). Kleinere unregelmäßige Lösungen gibt es nicht.

Torus-Lösungen kann man nun nicht nur spiegeln und drehen, sondern auch verschieben. Dabei erscheinen Damen, die bei einer horizontalen Verschiebung nach rechts aus dem Bild gewandert sind, auf der linken Seite wieder, entsprechend für oben und unten. Verschiebt man eine Torus-Lösung, so ergibt sich wieder eine Torus-Lösung.

Stanzt man aus der unendlichen Ebene ein Quadrat der Größe  $n \cdot n$  aus, so wird aus einer Torus-Lösung stets eine Lösung des ursprünglichen Problems. Beim Ausstanzen hat man die Freiheit, ein beliebiges Feld zur linken unteren Ecke zu machen. Mehr noch: Auch wenn eine Anordnung keine Lösung des Torus-Problems ist, kann durch Ausstanzen eine Lösung des ursprünglichen Problems entstehen, dann nämlich, wenn dabei alle Konfliktlinien (Bild S. 68 oben) zerschnitten werden.

An den Torus-Lösungen kann man noch eine weitere Transformation vornehmen: die zentrische Streckung. Dazu legen wir ein Koordinatensystem auf unser Brett; das Feld links unten bekommt die Koordinaten  $(0, 0)$ , allgemein wird jedes Feld durch einen Vektor mit zwei Komponenten beschrieben. Für jede Dame auf dem Brett multipliziert man den Vektor ihres Felds mit dem (ganzzahligen) Streckungsfaktor. Dabei wandern einige Damen aus dem Brett hinaus, aber das macht nichts: Dort draußen liegen ja weitere Exemplare desselben Bretts, und ein Feld auf einem fernen Brett ist »eigentlich« dasselbe wie das entsprechende Feld auf dem ursprünglichen Brett. Wir können also die entlaufenen Damen wieder zurückholen (Kasten unten).

Eine Streckung ist umkehrbar (könnte also Element einer Gruppe sein), wenn der Streckfaktor und die Brettgröße  $n$  teilerfremd sind. Streckt man eine Torus-Lösung, so ergibt sich wieder eine Torus-Lösung. Beim Übergang zum ursprünglichen Problem durch Ausstanzen ist es wie beim Verschieben: Die gestreckte Figur kann wieder eine Lösung

sein, aber es können auch neue Konflikte auftreten. Immerhin kommt es schon für  $n=8$  zweimal vor, dass die Streckung zu einer neuen Lösung führt.

Noch allgemeiner als Streckungen sind beliebige affine Abbildungen. In der Sprache der linearen Algebra ausgedrückt, multipliziert eine affine Abbildung den Vektor eines Schachbrettfelds mit einer Matrix und addiert einen konstanten Vektor hinzu (Letzteres läuft auf eine Verschiebung hinaus), und das alles über den ganzen Zahlen modulo  $n$ .

**Lösungen aus Nichtlösungen**

Zu den affinen Abbildungen gehören insbesondere Scherungen; das bedeutet zum Beispiel, dass man die unterste Zeile unverändert lässt, die nächste Zeile um eine Spalte nach rechts verschiebt, die übernächste um zwei Spalten, die dritte um drei Spalten und so weiter. Wieder sollen alle Figuren, die auf einer Seite aus dem Brett wandern, auf der gegenüberliegenden Seite neu auftauchen. So wird aus einer voll besetzten Spalte zunächst eine Diagonale, wenn man dieselbe Scherung erneut anwendet, eine Springer-Linie und dann eine noch flachere Linie (Bild oben).

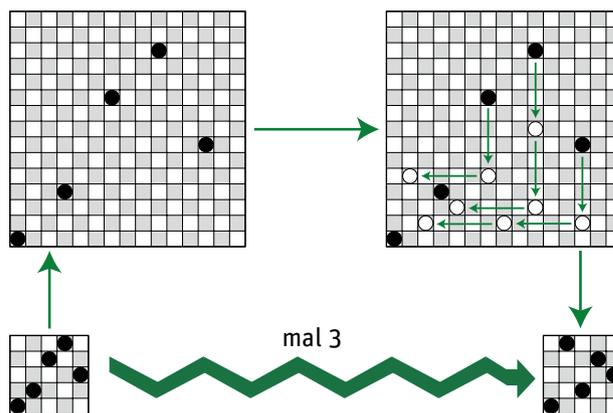
Überraschenderweise sind die letzten beiden Figuren bei dieser Scherung schon alle Torus-Lösungen für das 11 · 11-Brett, bis auf Drehungen und Verschiebungen. Das gilt auch für die Bretter mit den Seitenlängen 5 und 7: Es gibt nur Torus-Lösungen, die sich aus Scherung einer voll besetzten Spalte er-

**ZENTRISCHE STRECKUNG AUF DEM TORUS**

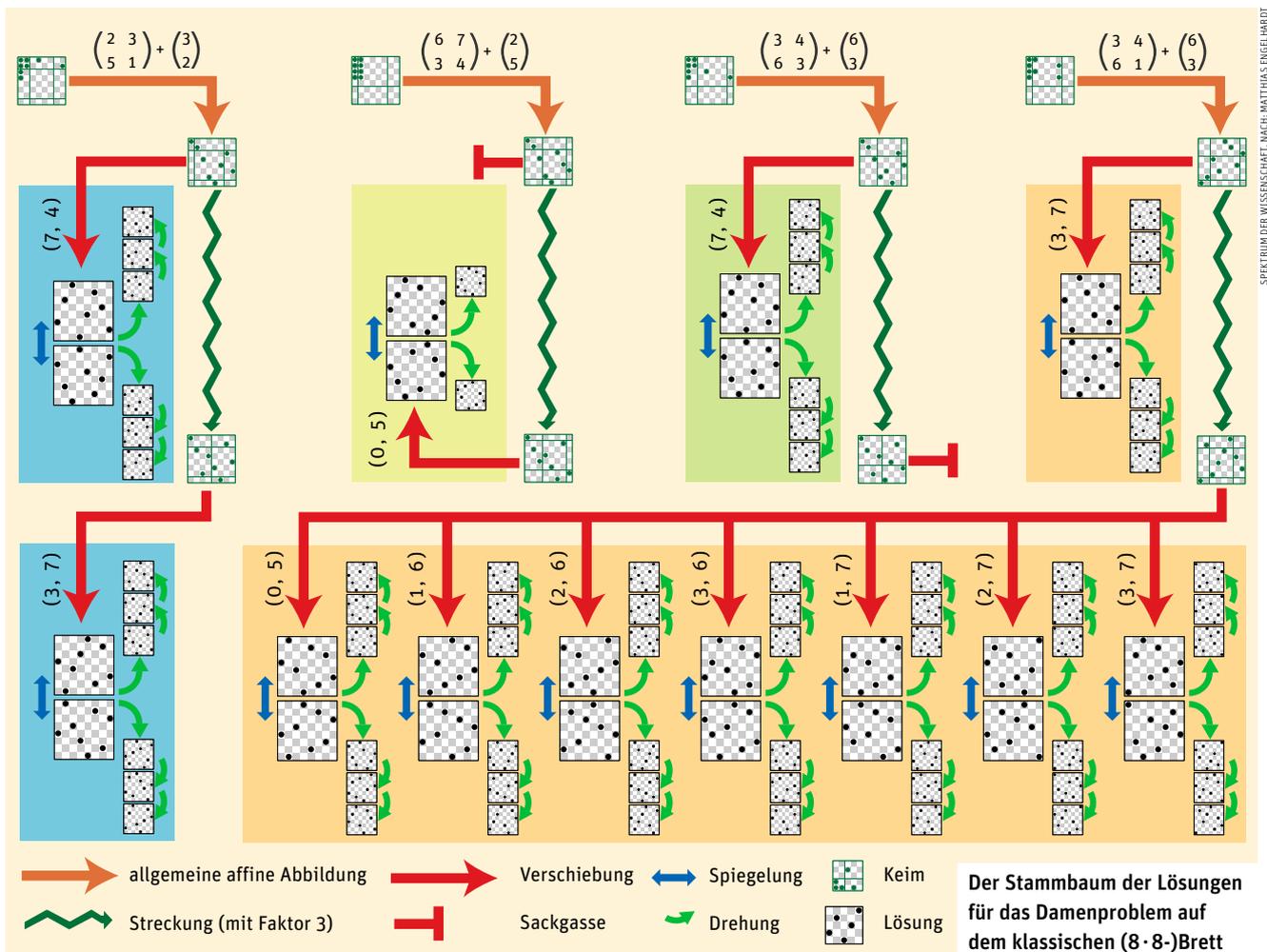
**Wir strecken eine Anordnung von Damen** auf dem 5 · 5-Brett mit dem Faktor 3. Für dieses Beispiel nehmen wir keine Torus-Lösung, damit es nicht zu groß und damit unübersichtlich wird. Wir nehmen fünf Damen auf einem 5 · 5-Brett. Die folgenden Zeilen zeigen die Wanderung jeder Dame in Einzelschritten, bis sie auf ihrem endgültigen Platz steht. Der erste Schritt ist immer die Multiplikation der Koordinaten mit dem Faktor 3. In den folgenden Schritten wird so oft 5 von einer der Koordinaten subtrahiert, bis die Dame wieder auf dem ursprünglichen Brett steht.

- $(0, 0) \rightarrow (0, 0)$
- $(1, 1) \rightarrow (3, 3)$
- $(2, 3) \rightarrow (6, 9) \rightarrow (6, 4) \rightarrow (1, 4)$
- $(3, 4) \rightarrow (9, 12) \rightarrow (9, 7) \rightarrow (9, 2) \rightarrow (4, 2)$
- $(4, 2) \rightarrow (12, 6) \rightarrow (12, 1) \rightarrow (7, 1) \rightarrow (2, 1)$

Was passiert bei diesem Algorithmus geometrisch? Beim ersten Schritt, der Multiplikation, kann eine Dame aus dem Brett hinauswandern. Dann passiert dasselbe wie beim Verschieben:



Sie kommt auf der anderen Seite wieder in den erlaubten Bereich. Eventuell durchwandert sie das Brett sogar mehrfach. Das macht die Operation unanschaulich.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MATTHIAS ENGELHARDT

geben. Wie oben gesagt: Erst bei der Zahl 13 wird es interessanter.

Was an diesen Beispielen offenbar geworden ist, gilt generell: Eine affine Abbildung macht im Allgemeinen aus einer Lösung des Damenproblems nicht wieder eine Lösung. Das gilt sowohl für das gewöhnliche Problem als auch für die Torusvariante. Umgekehrt kann eine affine Abbildung eine Nichtlösung durchaus in eine Lösung verwandeln.

Nach diesem Umweg kommen wir zurück zum Thema: Welche Lösungen gibt es für das einfache 8·8-Damenproblem? Es stellt sich heraus, dass alle 92 Lösungen auf vier so genannte Keime zurückgeführt werden können. Ein Keim ist eine Aufstellung von  $n$  Damen auf dem Schachbrett ohne weitere Bedingungen; interessant wird er dadurch, dass eine Lösung aus ihm entsteht, wenn man eine Verschiebung und/oder eine Streckung mit dem Faktor 3 auf ihn anwendet. Es stellt sich heraus, dass aus einem einzelnen Keim mehrere Grüppchen von Lösungen heranwachsen, im

Extremfall acht Stück (Bild oben). Alle Abkömmlinge eines Keims sind demnach fast so eng miteinander verwandt wie die Angehörigen eines Grüppchens untereinander – was man ihnen nicht unbedingt ansieht.

Die Menge aller 92 Lösungen zerfällt also in vier (ohne Streckung: sechs) Teilmengen mit der Eigenschaft, dass Lösungen aus verschiedenen Teilmengen nicht durch Streckung und Verschiebung (plus Drehung und Spiegelung) ineinander überführbar sind.

Diese Keime kann man sich wiederum durch affine Abbildungen aus noch ursprünglicheren »affinen Keimen« entstanden denken. Leider zeigen sich dadurch, anders als bei den Beispielen zu den Torus-Damen, keine neuen Verwandtschaftsverhältnisse.

In dem großen Bild sind oben die Keime der Lösungen eingetragen, zunächst die affinen Keime und dann die »gewöhnlichen«. Sie sind jeweils in der alphabetisch kleinsten Variante zu sehen, das heißt, unter allen denkbaren »Vor-

fahren« einer Lösung wählt man denjenigen, bei dem sich die besetzten Zellen so weit wie überhaupt möglich in der linken oberen Ecke des Bretts drängen.

Das ist also der Stammbaum der 8-Damen-Lösungen. Vermutlich hätte auch Gauß sich über das Bild gefreut. ◁



**Matthias Engelhardt** ist Mathematiker; seit dem Diplom 1975 arbeitet er in der IT-Branche, seit 2008 bei der Firma Tacton Systems AB in Stockholm. Er hält den Rekord für das Abzählen von Torus-Damenlösungen.

**Ahrens, W.:** Mathematische Unterhaltungen und Spiele. B. G. Teubner, Leipzig 1921.

**Engelhardt, M. R.:** A Group-Based Search for Solutions of the  $n$ -Queens Problem. In: Discrete Mathematics 307, S. 2535–2551, 2007.

**Rivin, I. et al.:** The  $n$ -Queens Problem. In: The American Mathematical Monthly 101(7), S. 629–639, 1994.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037434](http://www.spektrum.de/artikel/1037434).

Teil I: Zeitwahrnehmung in Altägypten

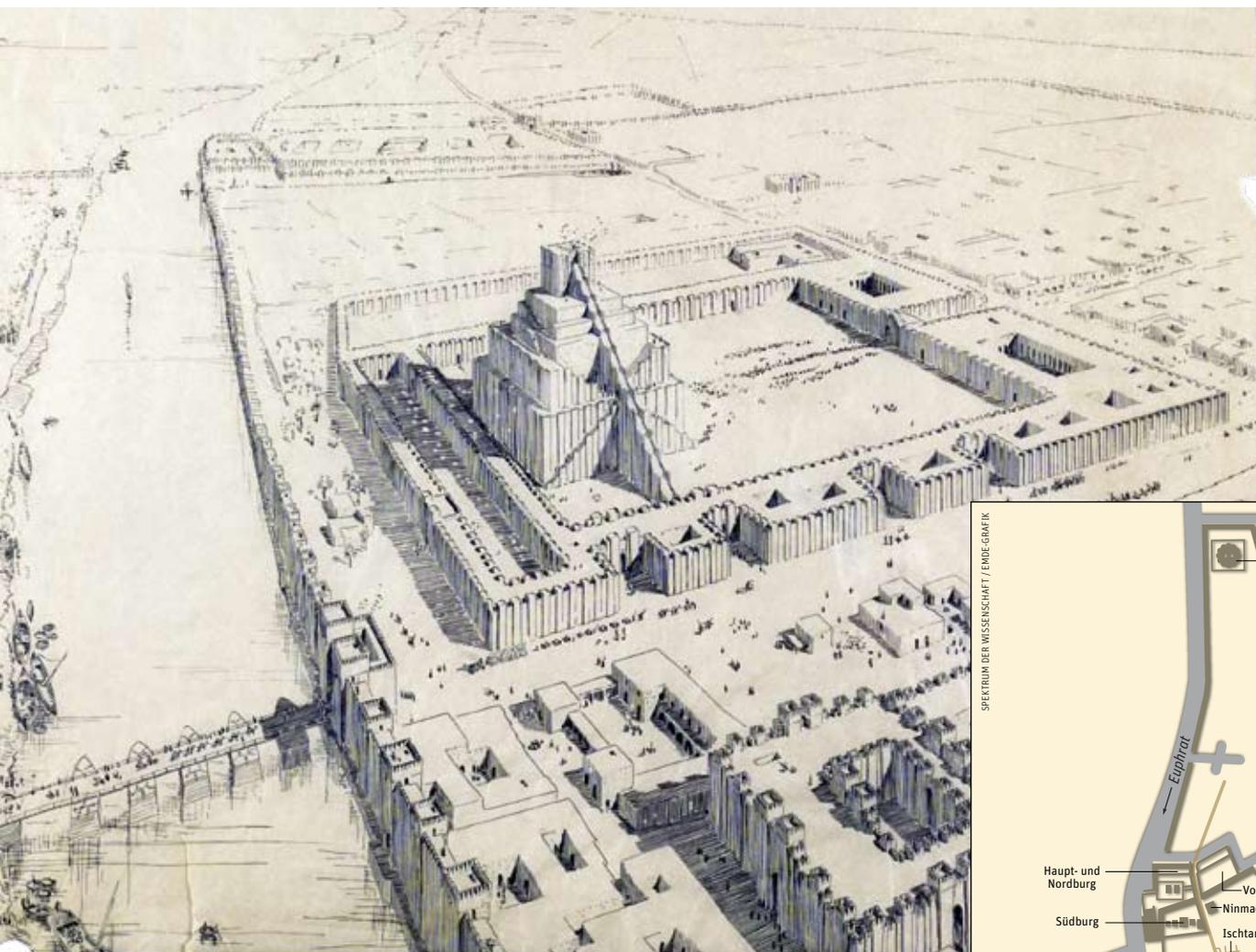
**TEIL II: VERGANGENHEITSKULT IN BABYLONIEN**

Teil III: Die Entdeckung des Fortschritts

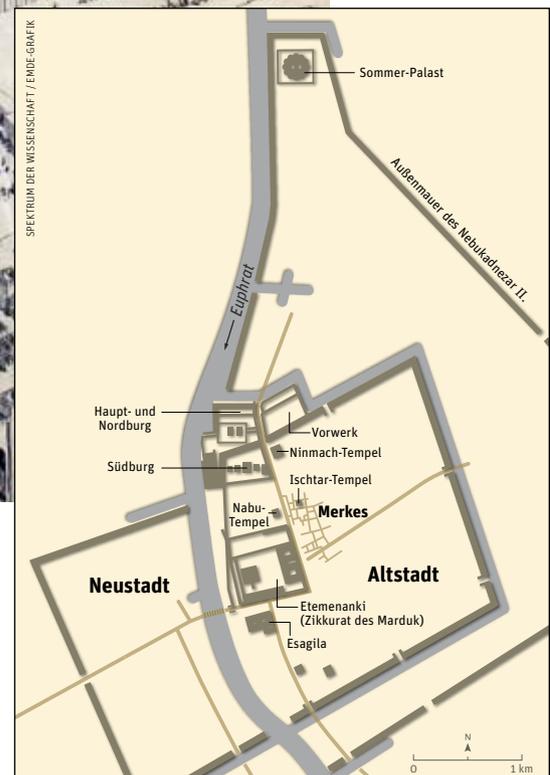
Teil IV: Die Zeit in den Naturwissenschaften

# Im Rückwärtsgang IN DIE ZUKUNFT

Nach dem Zeitverständnis des Alten Orients lag das Ideal von Gesellschaft und Staatswesen keineswegs in einer besseren Zukunft, sondern in einer fernen Vergangenheit.



DEUTSCHE ORIENT-GESELLSCHAFT, ARCHIV



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAPHIK

Für einen Bewohner Mesopotamiens war Babylon der Schnittpunkt zwischen der Sphäre der Menschen und jener der Götter. Ihre Blütezeit erlebte die Stadt wohl im 6. Jahrhundert v. Chr. (rechts Stadtplan) – ältere archäologische Schichten wurden bislang kaum erschlossen. Der Tempel des Stadtgottes Marduk galt schon in der Antike als Weltwunder (oben).

Von Stefan M. Maul

**W**er heute Passanten zu Füßen des Kölner Doms befragt, in welcher Blickrichtung die Zukunft und in welcher die Vergangenheit zu verorten wäre, dürfte wohl meist ein irritiertes Kopfschütteln ernten. Wie kann man eine solche Frage nur stellen? Selbstverständlich liegt das Vergangene hinter uns, während der Blick in die Zukunft nach vorn gerichtet ist.

Könnten wir uns nun mit einer Zeitmaschine zurück in das alte Zweistromland begeben, um die Umfrage im Schatten des Turms von Babylon (siehe Bild links) fortzusetzen, wäre die erste Reaktion vielleicht nicht anders, die Antworten hingegen würden völlig anders ausfallen. Die babylonischen Zeitbegriffe, die uns aus Keilschrifttexten wohlbekannt sind, zeigen dies deutlich. »Vergangenheit« wurde im Babylonischen (siehe Lexikon S. 74) nämlich wörtlich »Vorderseitiges« oder »im Angesicht Daliegendes« genannt, während der für »Zukunft« verwendete Begriff exakt übersetzt »das im Rücken Liegende« lautet.

Ein Babylonier meinte also auf eine vor ihm liegende Vergangenheit zu schauen, wohingegen er das Kommende hinter sich wähnte und damit der unmittelbaren Ansicht verschlossen. Während wir »der Zukunft zugewandt« auf der Zeitachse nach vorne zu schreiten glauben, bewegten sich die Mesopotamier nach eigenem Dafürhalten rückwärtsgehend in die Zukunft. Ihre Vergangenheit hielten sie dabei fest im Blick.

Wie stark das Augenmerk der mesopotamischen Kultur tatsächlich der Vergangenheit galt, wie mächtig die alles durchdringende normative Kraft des Alt(hergebrachten) war, zeigte sich im Babylonien des 2. und 1. vorchristlichen Jahrtausends auf Schritt und Tritt, sei es im Umgang mit Sprache und Schrift, sei es in Architektur, Handwerk und Kunst.

So wie jede andere Sprache wandelte sich im Lauf der Jahrhunderte auch das Babylonische. Vom Beginn des 2. vorchristlichen Jahrtausends bis zum Ende der Keilschriftkulturen um die Zeitenwende wurden Briefe, Abrechnungen und Verwaltungsurkunden, Testamente, Schuldscheine und andere Dokumente in der stets sich fortentwickelnden babylonischen Sprache des Alltags verfasst. Religiöse und gelehrte Texte, Epen, Mythen sowie nicht zuletzt Inschriften und offizielle Verlautbarungen der Herrscher Babyloniens und Assyriens schrieb man hingegen

immer in einer Sprachform des Babylonischen nieder, die über der Zeit stehen und dem zeitbedingten Wandel nicht unterworfen sein sollte. Diese literarische Kunstsprache, die im gesamten Alten Orient über zwei Jahrtausende breite Verwendung fand und dabei tatsächlich weit gehend unverändert blieb, versuchte das Babylonische der glanzvollen Zeit des Königs Hammurapi nachzuahmen. Dieser hatte im 18. Jahrhundert v. Chr. ganz Mesopotamien und Teile Syriens zu einem mächtigen Reich unter der Herrschaft seiner Stadt Babylon geeint. Damit war die Vormachtstellung des Zweistromlands im Vorderen Orient besiegelt, einerlei ob die Herrschaft in Händen Babyloniens oder des im Lauf der Zeit zur mächtigen Konkurrenz heranwachsenden Assyrien lag.

Doch damit nicht genug, ehrwürdiger noch als das Babylonische der Zeit Hammurapis galt das Sumerische. Zwar war dieses älteste, mit keiner uns bekannten Sprache verwandte Idiom des Zweistromlands schon um 2000 v. Chr. als gesprochene Sprache ausgestorben. Doch es lebte in jenen Liedern, Hymnen und Gebeten weiter, die bereits im 3. Jahrtausend v. Chr. entstanden waren und in den folgenden Epochen immer wieder studiert, abgeschrieben und mit babylonischen Übersetzungen versehen wurden. Bis ins 2. Jahrhundert n. Chr. nahmen diese uralten Texte neben zahlreichen Nachschöpfungen aus späterer Zeit im Kult Babyloniens eine wichtige Stellung ein.

Für die Tempel der Stadt Nippur, dem religiösen Zentrum der frühen sumerischen Hochkultur, ließen diesen alten Traditionen folgend sogar noch die assyrischen und babylonischen Könige des 1. Jahrtausends v. Chr. ihre Bau- und Weihinschriften in sumerischer Sprache verfassen. Ganz ähnlich wie das Lateinische in unserer Kultur überdauerte das Sumerische bis in die Spätzeit Babyloniens auch als Gelehrtensprache. Und so wie die Humanisten der frühen Neuzeit ihre Namen latinisierten, übertrugen die babylonischen Gelehrten ihre Namen gerne ins Sumerische.

Auch die im späten 4. Jahrtausend v. Chr. aufkommende mesopotamische Schrift blieb bis zu ihrem Untergang um die Zeitenwende einem steten Wandel unterworfen. Aus den mit einem Griffel in Ton geritzten Bildzeichen entstanden rasch abstrakt anmutende Zeichen, die im Lauf der Jahrhunderte aber immer weiter vereinfacht wurden. Während Briefe, Urkunden und alle Dokumente des Alltagslebens stets nicht nur den Sprach-, sondern auch den Schriftduktus ihrer Zeit aufweisen, wurden



**Vorbild für Generationen von Schreibern: das Babylonische des Königs Hammurapi, wie es im 18. Jahrhundert v. Chr. auf dessen Gesetzesstele zu sehen war (das Relief zeigt den König vor dem thronenden Gott der Gerechtigkeit).**

prunkvolle Königsinschriften nicht selten auch mit altertümlichen Schriftzeichen niedergeschrieben, die im Alltagsleben bereits seit Jahrhunderten außer Gebrauch gekommen waren.

Schon König Hammurapi ließ den Text seiner berühmten Gesetzesstele (siehe Bild S. 73) in einem Duktus abfassen, der einen über 600 Jahre älteren Entwicklungsstand der Keilschrift widerspiegelt. Auf diese Weise knüpfte er bewusst an die Zeit der altakkadischen Könige an, die im 24. Jahrhundert v. Chr. erstmals eine Einigung der mesopotamischen Stadtstaaten erzwungen hatten. Seinem Vorbild folgend ließ noch König Nebukadnezar II. (604–562 v. Chr.) bei dem prächtigen Ausbau Babylons das berühmte Ishtar-Tor (kleines Bild S. 77) mit einer Bauinschrift versehen, deren archaisch-feierlich wirkende Zeichen schon damals seit fast 2000 Jahren nicht mehr in allgemeinem Gebrauch waren (Bild rechts). Assurbanipal (669–627 v. Chr.), der letzte große König Assyriens, rühmte sich gar, Inschriften »aus der Zeit vor der Sintflut« entziffern zu können.

## LEXIKON

### BABYLONISCH

Das Babylonische ist wie das Assyrische ein Dialekt des Akkadischen. Als Akkadisch wird die älteste bekannte semitische Sprache bezeichnet, die in Keilschriftdokumenten aus der Zeit von zirka 2400 v. Chr. bis ins 1. Jahrhundert unserer Zeitrechnung überliefert ist. Das Babylonische wurde im südlichen, das Assyrische im nördlichen Mesopotamien gesprochen.

### SUMERISCH

Das Sumerische ist die älteste uns bekannte Sprache des Zweistromlands und weist keinerlei Ähnlichkeiten zu einer anderen Sprache auf. Als gesprochene Sprache starb es bereits um 2000 v. Chr. aus.

### Altehrwürdige Schriftzeichen

Dieses Wissen vermittelten im 2. und 1. Jahrtausend v. Chr. gelehrte Schreiber, die nicht anders als heute die Assyriologen paläografische Zeichenlisten (siehe Tabelle rechts) anlegten, alte Texte sammelten und studierten. Zudem fertigten sie derart perfekte Faksimiles, dass sich schon mancher moderne Gelehrte über das wahre Alter eines solchen Dokuments täuschen ließ.

Das Interesse an einer als klassisch bewerteten Vergangenheit manifestierte sich freilich auch in der materiellen Kultur Mesopotami-

ens. Immer wieder finden sich in Architektur, Handwerk und Kunst Rückgriffe auf weit zurückliegende Perioden. Es scheint, als habe man keine Mühe gescheut, um sich dafür authentisches Material zu beschaffen. Herrscher des Neubabylonischen Reichs gingen so weit, in seit Jahrtausenden bestehenden Tempelbezirken großflächig angelegte Ausgrabungen zu veranlassen, um Reste von uralten, manchmal längst nicht mehr bestehenden Kulteinrichtungen aufzuspüren. König Nabonid etwa, der Babylonien von 556 bis 539 v. Chr. regierte (siehe Bild unten), berichtete in einer Inschrift über solch ein Unterfangen:

*»Die Fundamentsteine des Tempels E-ulmasch in der Stadt Akkad aus der Zeit des Sargon, des Königs von Babylon, meines Vorgängers, der 2300 Jahre vor mir regierte, waren bis zu meiner Regierungszeit niemandem zu Gesicht gekommen. Kurigalzu, ein König von Babylon, der mir voranging (Kurigalzu regierte im 14. Jahrhundert v. Chr., d. Red.), hatte danach gesucht, aber sie nicht gefunden. Nebukadnezar, mein königlicher Vorgänger (er regierte 604 bis 562 v. Chr., d. Red.), entsandte seine Arbeitstruppen in großer Zahl, um nach jenen Fundamentsteinen des E-ulmasch zu suchen, er mühte sich ab, grub in die Tiefe, wiederholte seine Bemühungen, aber die Fundamentsteine fand er nicht. Ich dagegen, Nabonid, der König von Babylon, erschaute während meiner rechtmäßigen Regierung ... ein Traumgesicht, ... dass ich finden sollte die Fundamentsteine von E-ulmasch; ein günstiges Zeichen für die Festigkeit meines Königums. Meine Mannen in großer Zahl entsandte ich, zu suchen nach jenen Fundamentsteinen. Drei Jahre lang durchgrub ich die Senkschächte des Nebukadnezar. Rechts und links, vorwärts und rückwärts suchte ich, fand aber nichts.«*

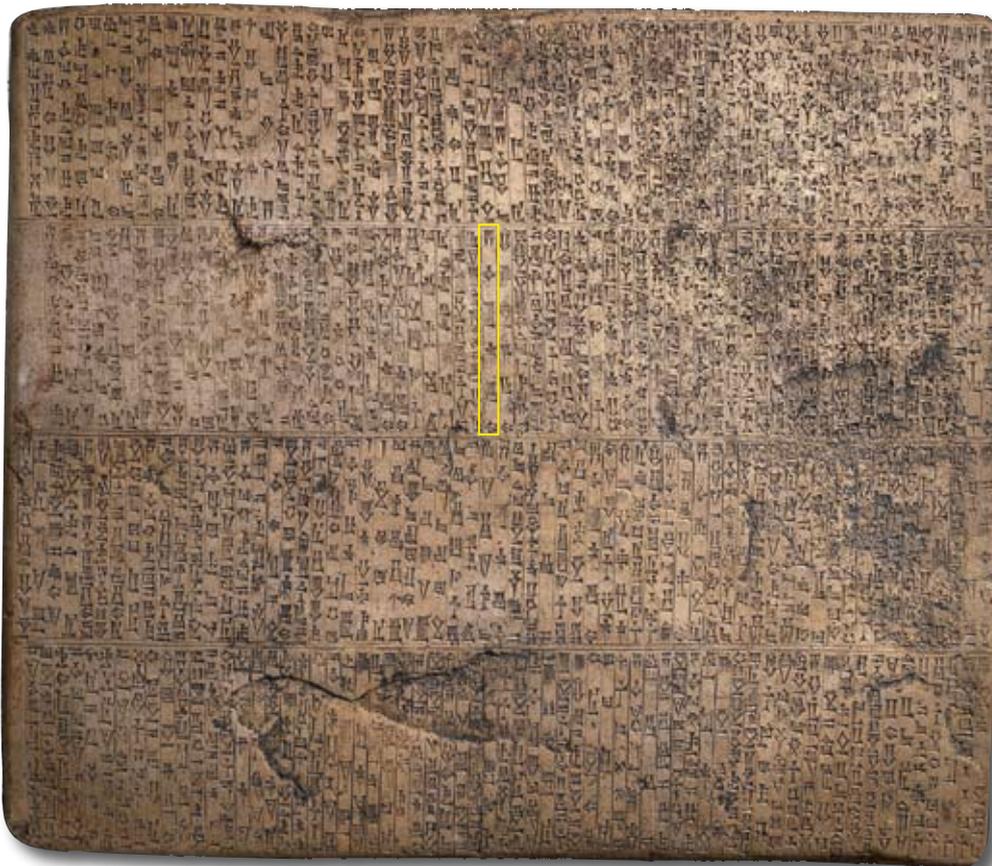
Doch Nabonid gab nicht auf. Nachdem die Fundamente einer vergleichsweise jungen Bauphase des Tempels aus dem 14. Jahrhundert v. Chr. abgetragen worden waren, stieß man auf die Reste des um 2350 v. Chr. errichteten sargonischen Baus. Auf diesen ließ Nabonid dann »keinen Finger breit zu weit vor springend oder zurücktretend über den alten Fundamentsteinen« das neue Fundament des Heiligtums anlegen.

Das Ziel derartiger Ausgrabungen bestand darin, den ältesten und damit ersten Bauzustand eines Tempels zu ermitteln. Das archäologische Interesse babylonischer Könige an der Tempelarchitektur ihres »Altertums« war freilich nicht in erster Linie architekturgeschichtlicher Art. Vielmehr wurde der ermittelte »antike« Bauplan benötigt, um den Tempel in seiner ursprünglichen, von allen Veränderungen der Zeiten unverfälschten Gestalt

König Nabonid (Regierungszeit 556–539 v. Chr.; zeitgenössische Basaltstele) ließ systematisch nach altbabylonischen Tempelfundamenten graben, um darauf neue Bauten zu errichten und sich so in die Reihe der ersten Herrscher zu stellen.



THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

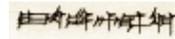


THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM



gelb umrandet:  
»in Babylon«,  
geschrieben mit Zeichenformen  
des 24. Jahrhunderts v. Chr.

Zur Zeit Nebukadnezars II. schrieb  
man diese Worte eigentlich  
in waagrechter Orientierung und  
mit diesen Schriftzeichen:



Seit dem Aufkommen der Keil-  
schrift im 4. Jahrtausend v. Chr.  
veränderten sich die Zeichen  
(unten). Ältere Formen verliehen  
wichtigen Texten aber die Aura  
des Altehrwürdigen. Als Beispiel  
eine Inschrift anlässlich der  
Neubauten Nebukadnezars II. im  
6. Jahrhundert. Exemplarisch  
wurde eine archaische Schreib-  
weise hervorgehoben.

wiederherzustellen. Bezeichnenderweise be-  
deutet die babylonische Wendung, die in den  
Wörterbüchern mit »wiederherstellen« oder  
»restaurieren« wiedergeben wird, wörtlich  
übersetzt »(eine Sache) wieder an den jeweils  
für sie vorgesehenen beziehungsweise an den  
ihr zugewiesenen Platz zurückführen«.

Dahinter ist deutlich die mesopotamische  
Vorstellung zu spüren, dass allen Dingen je-  
weils ein fester Platz in der Welt zukommt.  
Diesen vom Wandel der Zeiten immer wieder  
in Frage gestellten Zustand galt es mit der Re-  
konstruktion des ältesten Tempels wiederzu-  
gewinnen. Mythen erzählten zudem, dass die  
Gotteshäuser Babyloniens ursprünglich kei-  
neswegs von Menschenhand, sondern zu An-  
beginn der Zeiten von den Göttern selbst er-  
richtet worden seien. Ihre Wiederherstellung  
nach dem unverfälschten göttlichen Plan  
sollte den königlichen Bauherrn, seine Unter-  
tanen und das Staatswesen in den segens-  
reichen Uranfang zurückversetzen.

### Die Offenbarungen des Gottes Ea

Die Suche der Babylonier und Assyrer nach  
ihrem Altertum entpuppt sich somit als das  
Streben nach der klaren uranfänglichen Ord-  
nung, der die Götter selbst im Schöpfungsakt  
ihre Gestalt gegeben hatten. Bezeichnender-  
weise wird diese von Alterungsprozessen noch  
unbeschadete Urzeit stets unscharf als »ferne  
Zeit« angesprochen, gleichsam so, als könnten  
die lange zurückliegende Vergangenheit und  
die ferne Zukunft auf einer gebogenen Zeit-

Spät- Uruk um 3100 v. Chr.	Djemdet Nasr um 3000 v. Chr.	Früh- dyn. III um 2400 v. Chr.	Ur III um 2000 v. Chr.	Alt- assyrisch um 1900 v. Chr.	Alt- babylon. um 1700 v. Chr.	Mittel- assyr. um 1200 v. Chr.	Neu- babylon. um 600 v. Chr.	archaische Bedeutung
								SAG »Kopf«
								NINDA »Ration«
								GU, »Zuteilung«
								AB <sub>2</sub> »Kuh«
								APIN »Pflug«
								KI »Ort«

MIT FÖHL, GEN. VON STEFAN MAUL, ALIS, HANS J. NISSEN, PETER DAMEROW UND ROBERT K. ENGLUND: »FRÜHE SCHRIFT-  
UND TECHNIKEN DER WIRTSCHAFTSVERWALTUNG IM ALTEN VORDEREN ORIENT. INFORMATIONSSPEICHERUNG UND  
-VERARBEITUNG VOR 5000 JAHREN«, BERLIN 1990

achse zueinanderfinden und einander durch-  
dringen.

Ein Blick in die mythischen Texte Meso-  
potamiens zeigt, dass sämtliche kulturellen  
Errungenschaften, sei es die Architektur, sei  
es die Kunst der Schreiber, Goldschmiede,  
Schreiner oder das Wissen der Astronomen,  
als Offenbarungen des Weisheitsgottes Ea an-  
gesehen wurden. Dieser hatte sie der Mensch-  
heit zu Anbeginn der Zeiten in die Hand ge-  
geben. Noch Berossos, ein Priester des 3. vor-  
christlichen Jahrhunderts, der mit seinem  
griechischsprachigen Werk »Babyloniaka« der  
hellenistischen Welt Geschichte und Kultur

## CHRONOLOGIE BABYLONIENS

### 4. JAHRTAUSEND V. CHR.

Die frühe städtische Hochkultur im südlichen Mesopotamien entsteht. Zentrum ist die Stadt Uruk

### UM 3300 V. CHR.

Erfindung der Schrift

### 2800 – 2500 V. CHR.

frühdynastische Zeit, Blüte der sumerischen Staaten

### UM 2340 V. CHR.

Sargon von Akkad herrscht über ganz Mesopotamien; erste Texte in der semitischen Sprache Akkadisch

### 2112 – 2004 V. CHR.

Reich der III. Dynastie von Ur; Gebrauch des Sumerische als Verwaltungssprache

### UM 2000 V. CHR.

Das Sumerische als gesprochene Sprache stirbt aus

### 2000 – 1594 V. CHR.

altbabylonische Zeit; Hammurapi (1792 – 1750 v. Chr.) führt Mesopotamien und Teile Syriens zu einem Reich zusammen

### 1500 – 1000 V. CHR.

Das mittellassyrische und das mittelbabylonische Reich konkurrieren um die Vorherrschaft im Zweistromland

### 883 – 609 V. CHR.

neuassyrisches Reich; größte Ausdehnung (von Ägypten bis zum Zagrosgebirge, von Anatolien bis zur Arabischen Halbinsel) unter Assurbanipal (669 – 627 v. Chr.)

### 625 – 539 V. CHR.

neubabylonisches Reich; Vorherrschaft Babyloniens in Mesopotamien und Syrien

### 538 – 331 V. CHR.

Herrschaft der persischen Achämeniden über Mesopotamien und Syrien

### 330 V. CHR.

Alexander der Große zieht in Babylon ein. Babylonien gehört bis 140 v. Chr. zum Herrschaftsgebiet der griechischen Seleukidenkönige

### AB 140 V. CHR.

Babylonien zählt erneut zum Herrschaftsgebiet der Perser

seiner Heimat nahebringen wollte, hielt diese mesopotamische Lehre für wesentlich: Ein fischgestaltiges Wesen namens Oannes sei unmittelbar nach Erschaffung von Himmel, Erde und Menschen aus dem Meer gestiegen und habe »die Menschen die Schriftkunde und die mannigfaltigen Verfahrensweisen der Künste, die Bildungen von Städten und die Gründungen von Tempeln gelehrt«. Vor allem aber werde seit jener Zeit »von keinem anderen mehr auch nur irgendetwas erfunden«.

So verwundert es nicht, dass die altorientalischen Könige bemüht waren, die Zeiträume zu überwinden, die sie von dem Uranfang der Schöpfung trennten. Das babylonische Neujahrsfest legt ein beredtes Zeugnis dieses Bestrebens ab. In dem bedeutsamsten Staatsritual Babyloniens präsentierte sich der König seinem Volk Hand in Hand mit dem Weltengott (vertreten durch dessen Kultbild), um gemeinsam mit ihm im Kultgeschehen den uranfänglichen Kampf des Gottes gegen die Mächte des Chaos, den Sieg der Ordnung und die sich anschließende Erschaffung der Welt Jahr um Jahr nachzuvollziehen. Darüber hinaus legitimierten mesopotamische Herrscher ihren Machtanspruch nicht nur mit der Beteuerung, dass sie von »gehütetem Samen aus der Zeit vor der Sintflut« gezeugt und Sprosse eines »Stamms der Urzeit« waren. Sie galten auch als Auserwählte, da der Überlieferung zufolge die Götter sogleich nach der Menschenschöpfung den König eigens erschaffen hatten, damit er die Menschen leite. Die somit gottgewollte Aufgabe eines Königs bestand darin, die geordnete Welt zu bewahren, zu verteidigen und gegebenenfalls den unverfälschten Urzustand wiederherzustellen.

### Die ferne Vergangenheit als Utopie

Das Idealbild der Gesellschaft und des Staatswesens, das Utopia der Mesopotamier, war somit stets in der Urvergangenheit und nie in der Zukunft angesiedelt. Daher erstaunt es nicht, dass im 1. vorchristlichen Jahrtausend assyrische Könige ihre Feldzüge gegen die Feinde des Reichs als den sich immer wiederholenden Urkampf des Weltengottes gegen die Mächte des Chaos beschrieben. So bildete der Mythos sozusagen den Rahmen, in dem für Mesopotamien die Geschichte stets aufs Neue Gestalt annahm.

Ein Blick auf die Geschichte zeigt dennoch, dass die Kulturen des Zweistromlands keineswegs krampfhaft am Altbewährten festhielten. Geopolitische, ökonomische und nicht zuletzt auch ökologische Veränderungen erzwangen immer wieder neue Herrschaftsformen. Sie führten vom Priesterfürstentum der kleinflä-

chigen frühen sumerischen Stadtstaaten des 3. vorchristlichen Jahrtausends bis hin zum Großkönigtum des neuassyrischen Reichs, das ein Gebiet vom Zagrosgebirge bis einschließlich Ägypten, von Anatolien bis tief in die Arabische Halbinsel zu kontrollieren hatte. Immer wieder mussten neue, den veränderten Bedingungen angepasste Formen der Verwaltung, nicht zuletzt der Situation angemessene Mittel von Politik und Kriegsführung entwickelt werden. Im mittel- und neuassyrischen Reich etwa entstand ein ausgeklügeltes System der Provinzverwaltung, auf das die späteren persischen Achämenidenkönige ebenso zurückgreifen konnten wie auf das von den assyrischen Großkönigen ausgebaute Straßennetz.

Das Zweistromland wusste sich durchaus neue Technologien rasch nutzbar zu machen, sofern sie Vorteile versprachen. Von dort aus traten zum Beispiel Bronze und Eisen ihren Siegeszug an. Auch das Glas ist mesopotamischer Experimentierfreude zu verdanken. Das Streben, langfristig über das Wirken kausaler Zusammenhänge in der Welt genaueren Aufschluss zu erlangen, führte zu einem äußerst beweglichen Forschergeist. In den Tempeln Babyloniens wurden über Jahrhunderte hinweg die Bewegungen der Himmelskörper registriert und gemeinsam mit der Preisentwicklung ökonomisch wichtiger Güter, mit Wetterverhältnissen, Wasserständen und bemerkenswerten Vorkommnissen aufgezeichnet. Auf diese Weise hofften die Gelehrten, Koinzidenzen auszumachen und so Gesetzmäßigkeiten im Weltgeschehen zu ermitteln – und für das politische Handeln nutzbar zu machen. Dabei entstand im Babylonien des 1. vorchristlichen Jahrtausends auch die rechnende Astronomie.

Kurz, in ebendem Maß, in dem die mesopotamische Kultur das Vergangene im Blick hatte, war sie offen für Weiterentwicklungen und Neuerungen. Ein Widerspruch? Tatsächlich sucht man Begriffe wie »Fortschritt«, »Weiterentwicklung« oder »Neuerung« vergeblich im Wortbestand des Babylonischen oder anderer altorientalischer Sprachen. Allein ein Wort für »Veränderung« ist anzutreffen, allerdings mit einer ungunstigen Konnotation – es ist von einem Stamm gebildet, der »Feind« oder »Feindliches« bedeutet. War der Alte Orient also innovativ, gab sich aber gleichzeitig allem Neuen verschlossen?

Ganz so eindeutig scheint das Bild nicht, denn *labiru*, das »Alte«, meint nicht allein das Altehrwürdige, sondern kann auch für das brüchig Gewordene stehen, das nach Erneuerung verlangt. Das Ersetzen des brüchig Gewordenen durch etwas Neues ist in der Begrifflichkeit der Babylonier dennoch nicht »Fortschritt« oder »Neuerung«, sondern wird



BPK BERLIN / VORDERASIATISCHES MUSEUM, SMB / KLAUS GÖKEN

BPK BERLIN / VORDERASIATISCHES MUSEUM, SMB / JÜRGEN LIEPE

wie schon erwähnt als »ein Zurückführen an den seit alters vorgesehenen Platz« bezeichnet. Reformen wurden dementsprechend in Mesopotamien, wie sehr auch immer sie mit dem zuvor Gewesenen brachen, grundsätzlich als das Wiederherstellen einer nicht mehr intakten Ordnung beschrieben. Die enormen, für die Menschheitsgeschichte prägenden Entwicklungen, welche die Gesellschaft Mesopotamiens im Lauf von Jahrhunderten und Jahrtausenden durchmachte, wurden somit nicht als »Fortschritt« begriffen, sondern als Restauration, als »Rückschritt« hin zu einer uranfänglichen Ordnung und Stabilität.

Im Gewand des Althergebrachten präsentierte sich so das Neue. Mag uns diese Sicht auch fremd erscheinen, verbirgt sich dahinter doch eine kluge Strategie. Denn das Neue musste sich zuerst einmal mit dem Alten auseinandersetzen und plausibel damit verbinden, um als ein wiedergewonnenes, ehrwürdiges Gut gelten zu können. Angesichts der massiven Verwerfungen und Umstürze, der von Kriegen und Brüchen geprägten Geschichte Mesopotamiens ließ sich so die als brachial erlebte Gewalt des Neuen bändigen.

### Innovation und Tradition

Das Neue musste sich prüfen lassen und sich gegebenenfalls dem Rahmen des Bestehenden wie des Gewesenen anpassen. Es ist offensichtlich, dass die wichtige Frage, was denn alt am Neuen war, Teil eines solchen Prozesses des Aushandelns gewesen sein muss und auf ganz verschiedene Weise beantwortet werden konnte. Die Deutungshoheit über dieses gewichtige, mit Tradition und Geschichte eng verbundene Problem dürfte zunächst vorwiegend bei den Tempeln und ihren Priestern, mit zunehmender Komplexität der staatlichen

Gebilde aber immer mehr bei den mächtigen Königen und ihren gelehrten Beratern gelegen haben.

Gelang es, eine Innovation als Teil der eigenen Geschichte und Tradition plausibel zu machen, konnte das Neue als das Ureigene wahrgenommen werden und dadurch seinen potenziell bedrohlichen Charakter verlieren. Auch aus anderen Kulturen importierte Errungenschaften ließen sich, nahmen sie nur das Gesicht des Althergebrachten an, in das mesopotamische Kulturgut eingliedern. Nicht zuletzt diesem Mechanismus ist es geschuldet, dass es den Reichen des Zweistromlands über Jahrhunderte immer wieder gelang, sich zu reformieren und eine Globalkultur mit mesopotamischem Antlitz hervorzubringen.

Erst als Babylon im Jahr 539 v. Chr. in die Hände der persischen Achämeniden fiel und Mesopotamien damit ein für alle Mal die politische Oberhoheit über den Vorderen Orient verlor, schwand die normative Kraft seiner Traditionen. Das Aramäische und später das Griechische traten an die Stelle des Babylonischen als internationale Diplomaten-, Amts- und Gelehrtensprache; gleichzeitig verloren Keilschrift und Tontafel die Bedeutung, die sie mehr als zwei Jahrtausende im gesamten Vorderen Orient besessen hatten.

Als Alexander der Große die Perser aus Mesopotamien vertrieb und Babylon zur Hauptstadt seines Reichs erkor, war dies nur ein kurzes Innehalten der Geschichte. Die Formensprache der uralten mesopotamischen Kultur war nicht mehr länger geeignet, das Gefäß für Neuerungen zu liefern. Noch immer ging man rückwärts auf die Zukunft zu, doch erschien dies nun nicht mehr als kluge, auf Bewährtem aufbauende Strategie, sondern zunehmend als unzeitgemäß und veraltet. ◁

**Das berühmte Ishtar-Tor war Teil des Prozessionswegs, auf dem der König gemeinsam mit Standbildern der Götter beim Neujahrsfest in die Stadt einzog.**



**Stefan M. Maul** studierte Assyriologie, Vorderasiatische Archäologie und Ägyptologie. Er lehrt Assyriologie an der Universität Heidelberg. Einer breiteren Öffentlichkeit wurde er vor allem durch eine Neuübersetzung des berühmten Gilgamesch-Epos bekannt.



# Die Evolution der MINERALE

Fast alle der heute bekannten Minerale haben sich erst im Lauf der Erdgeschichte entwickelt. Mehr als die Hälfte verdankt ihre Existenz dem Leben in Form Fotosynthese treibender Organismen.

Von Robert M. Hazen

**V**or Urzeiten gab es nirgendwo im Weltall Minerale. In der extrem heißen Wolke aus Elementarteilchen, die dem Urknall folgte, könnten sich keinerlei feste Stoffe gebildet oder gar überlebt haben. Es dauerte eine halbe Million Jahre, bis die ersten Atome – Wasserstoff, Helium und etwas Lithium – dem Hellenkessel der Schöpfung entstiegen. Weitere Jahrmillionen vergingen, in denen die Schwerkraft diese Urgase zu Nebeln verdichtete und schließlich zu Sternen kollabieren ließ.

Die größten darunter explodierten nach einiger Zeit als Supernovae. Erst dabei wurden alle anderen chemischen Elemente synthetisiert und in den Weltraum geblasen. Frühestens jetzt könnten in den abgestoßenen Gashüllen der explodierten Sterne, während sie sich ausdehnten und abkühlten, die ersten festen Mineralbrocken entstanden sein. Doch auch zu diesem Zeitpunkt waren die meisten Elemente und ihre Verbindungen noch zu selten und zu weit verstreut oder zu flüchtig, um anders als in Form einzelner Atome und Moleküle in den frisch entstandenen Gaswolken aufzutreten. Selbst wenn sie vereinzelt winzige Festkörper bildeten, fielen diese nicht unter die Definition von Mineralen; denn es handelte sich nicht um Kristalle mit genau festgelegter chemischer Zusammensetzung, deren atomare Bausteine ein regelmäßiges Gitter bildeten.

Die ersten Minerale entstanden, als Gas- und Staubwolken, die Auswurfmaterial von Supernovae enthielten, zu Planetensystemen kondensierten. Den Anfang machten vermutlich mikroskopisch kleine Körner von Diamant und Graphit, den beiden wichtigsten

Modifikationen des häufigen Elements Kohlenstoff. Zu ihnen gesellte sich bald rund ein Dutzend weiterer widerstandsfähiger Mikrokristalle, darunter Moissanit (Siliziumkarbid), Osbornit (Titannitrid) sowie einige Oxide und Silikate. Mehrere zehn Millionen Jahre lang stellten diese wenigen frühen Mineralarten wohl die einzigen Kristalle im Universum dar.

Heute sind auf der Erde dagegen mehr als 4400 Minerale bekannt. Wie kam es zu dieser erstaunlichen Vermehrung? Zur Erklärung habe ich kürzlich gemeinsam mit sieben Kollegen das neue Konzept der »Mineralevolution« entwickelt. Seit Jahrhunderten behandeln Wissenschaftler Minerale nur als Objekte mit bestimmten chemischen und physikalischen Eigenschaften und ignorieren die Zeit als entscheidende vierte Dimension der Geologie. Bei unserem Ansatz versuchen wir dagegen die Minerale und ihre Herkunft vor dem Hintergrund der Erdgeschichte zu verstehen.

Offensichtlich begann die Evolution der Minerale mit dem Auftreten von Gesteinsplaneten; denn das ist ihr Reich, der Ort ihres Werdens und Vergehens. Die Erde selbst hat in den letzten 4,5 Milliarden Jahren mehrere Phasen durchgemacht. Wie auch schon andere Wissenschaftler vor uns erkannten, traten in jedem Stadium neue Phänomene auf, durch die sich die Mineralogie der Erdoberfläche dramatisch veränderte und vielfältiger gestaltete.

Die genauen Zusammenhänge sind Gegenstand wissenschaftlicher Debatten, und manche Details mögen sich im Licht zukünftiger Entdeckungen etwas anders darstellen. Doch an den Grundzügen der Mineralevolution ist kaum zu deuteln. Meine Kollegen und ich präsentieren denn auch keine kontroversen neuen Fakten oder umstürzlerischen Theorien über

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

## In Kürze

- Bei seiner **Entstehung vor 4,6 Milliarden Jahren** enthielt das Sonnensystem nur ein Dutzend Minerale, also kristalline Festkörper.
- Die **vielfältige Mineralogie der Erde** entwickelte sich über die Erdzeitalter hinweg, als immer neue mineralbildende Prozesse ins Spiel kamen.
- **Mehr als die Hälfte der bekannten Mineralarten** verdanken ihre Existenz dem Leben, das vor über zwei Milliarden Jahren anfang, in die Geologie der Erde einzugreifen.



das, was sich in den einzelnen Phasen der Erdgeschichte ereignete. Vielmehr zeichnen wir ein umfassenderes Bild der Entwicklung unseres Planeten, indem wir das Geschehen unter dem Aspekt der Mineralevolution neu aufrollen.

Eine verblüffende Erkenntnis haben wir allerdings zu bieten: Die meisten irdischen Minerale verdanken ihre Existenz dem Leben. Die unbelebte Natur ist keineswegs die immer gleiche Bühne, auf der die Organismen ihr evolutionäres Drama aufführen. Vielmehr haben die Schauspieler ihr Theater stetig umgestaltet. Das ist auch von Bedeutung für die Suche nach außerirdischem Leben: Hinweise darauf finden sich vielleicht eher in robusten, beständigen Mineralen als in vergänglichen organischen Resten.

### Aus Staub geboren

Planeten bilden sich in stellaren Urnebeln, die Material von Supernovae enthalten. Der größte Teil einer solchen Wolke kollabiert rasch und bildet den Zentralstern. Um diesen rotiert das verbliebene Material als riesige Gas- und Staubscheibe. Deren Bestandteile vereinigen sich zu immer größeren Gebilden. So entstehen erst sandkorn-, dann kiesel- und schließlich faustgroße Gesteinsbrocken. Diese setzen sich aus einem begrenzten Fundus von rund einem Dutzend urtümlicher Minerale sowie einem Sortiment freier Atome und Moleküle zusammen.

Dramatische Veränderungen finden statt, wenn der Protostern »zündet« und die Staub- und Gaswolken in der Nähe seinem läuternden Feuer aussetzt. In unserem Sonnensystem geschah das vor knapp 4,6 Milliarden Jahren.

Hitze-Wellen, die von der jungen Sonne ausgingen, schmolzen Festkörper auf und mischten die Elemente neu, wobei Kristalle entstanden, die eine Fülle bis dahin nicht existierender Minerale verkörperten. Zu den Produkten dieses Frühstadiums der Mineralevolution zählten die ersten Eisen-Nickel-Legierungen, Sulfide, Phosphide und eine Vielzahl von Oxiden und Silikaten. Die meisten finden sich in den urtümlichsten Meteoriten als »Chondren« – kristallin erstarrte Tröpfchen einst geschmolzenen Gesteins. (Chondritische Meteoriten liefern auch Hinweise auf die vorher vorhandenen Urminerale: Diese lassen sich darin in Form mikro- oder sogar nur nanoskopischer Körner aufspüren.)

Im solaren Urnebel klumpten die Chondren rasch zu Planetesimalen zusammen, von denen einige mehr als 150 Kilometer Durchmesser erreichten. Bei dieser Größe staute sich die Zerfallswärme radioaktiver Elemente im Inneren der Körper, so dass sie teilweise aufschmolzen. In der Schmelze kam es zur Stoff-

**Viele Minerale dienen dank ihrer intensiven Farbe, hohen Brechkraft oder großen Härte als Schmuck- oder Edelsteine.**

# SCHNAPPSCHÜSSE DER MINERALGESCHICHTE

In den **4,6 Milliarden Jahren** seit der Entstehung des Sonnensystems ist dessen Bestand an Mineralen von etwa einem Dutzend im präsolaren Nebel auf mehr als 4400 auf der heutigen Erde angewachsen. Unser Planet hat eine Reihe von Stadien durchlaufen, in denen verschiedene mineralbildende Prozesse abliefen. Fünf davon sind rechts und auf den folgenden Seiten dargestellt. In einigen Stadien entstanden vollkommen neue Minerale, in anderen verhalfen tief greifende Veränderungen der Erdoberfläche zuvor seltenen Mineralen zu allgemeiner Verbreitung.

Olivinkristalle in einem Pallasiten (einem Stein-Eisen-Meteoriten)



## DIE ENTSTEHUNG DER ERDE

**Vor 4,6 Milliarden Jahren:** Millionen von Planetesimalen, die sich aus Staubteilchen zusammengeballt haben, kreisen in der Staub- und Gasscheibe, die um die soeben entzündete Sonne (im Hintergrund) rotiert. Durch Zusammenstöße bilden sie unter anderem die Erde (glühende Kugel). In den Planetesimalen entstehen durch Schmelzprozesse, Erschütterungen bei Kollisionen und Reaktionen mit Wasser, das sich in Rissen gesammelt hat, mehr als 200 Mineralarten, darunter Olivin und Zirkon. Viele davon finden sich heute noch in chondritischen Meteoriten.



Zirkon



ILLUSTRATION: RON MILLER; PALLASIT: NATURAL HISTORY MUSEUM LONDON; ZIRKON: GETTY IMAGES / SCIENTIFICA; CHONDRIT: PHOTO RESEARCHERS / MASSIMO BREGA

trennung unter dem Einfluss der Gravitation. Bei der anschließenden Kristallisation bildete sich eine zwiebelartige Schalenstruktur mit unterschiedlichen Mineralen in den aufeinander folgenden Schichten und einem massiven, metallischen Kern im Zentrum.

Gesteinskörper, die in der überfüllten Umgebung der Sonne umherschirrten, stießen häufig zusammen. In den größten Planetesimalen ließ die starke Erschütterung und Hitzeentwicklung bei solchen Kollisionen neue Minerale entstehen. Auch Wasser spielte dabei eine Rolle. Es war von Beginn an vorhanden und lag im präsolaren Nebel in Form von Eispertikeln vor. Diese schmolzen in den Planetesimalen. Das Wasser, das sich in Spalten und Rissen sammelte, reagierte mit dem Umgebungsgestein und schuf dabei neue Minerale.

Im Verlauf dieses dynamischen Prozesses der Planetenbildung entstanden vielleicht 250 verschiedene Mineralarten. Diese stellen das Rohmaterial für jeden Gesteinsplaneten dar, und sie alle finden sich noch heute in den Meteoriten, die auf dem Erdball niedergehen.

In der Frühzeit des Sonnensystems schluckten große Planetesimale Tausende von kleineren und wuchsen dabei immer weiter an. In der Umlaufbahn der Erde gab es so schließlich nur noch zwei Körper von beträchtlichen Ausmaßen: den Vorläufer unseres Planeten und einen deutlich kleineren Rivalen mit etwa dem Umfang des Mars. Dieser wird nach der Mutter der griechischen Mondgöttin auch Theia genannt. Bei einer finalen Kollision von un-

vorstellbarer Gewalt ramnte er die Protoerde und brachte deren äußere Schichten zum Verdampfen. 100 Trillionen Tonnen gasförmigen Gesteinsmaterials wurden so in den Weltraum geblasen. Daraus bildete sich der Mond.

Dieses Szenario erklärt den hohen Drehimpuls des Erde-Mond-Systems und viele Eigentümlichkeiten unseres Trabanten – etwa seine große Ähnlichkeit in der chemischen Zusammensetzung mit dem Erdmantel. Das ist die etwa 2850 Kilometer dicke Schicht, die heute zwischen dem Eisen-Nickel-Kern und der damals noch nicht vorhandenen fünf bis 50 Kilometer mächtigen Erdkruste liegt.

### Die schwarze Erde

Nach dieser Kollision vor 4,5 Milliarden Jahren begann sich die glutflüssige Erde abzukühlen – ein Vorgang, der bis heute andauert. Waren vorher an ihrer Oberfläche Dutzende seltener Elemente wie Uran, Beryllium, Gold, Arsen und Blei vorgekommen, die eine ganze Reihe von Mineralen hätten bilden können, wurde beim Aufsprall von Theia, der wie ein kosmischer »Reset« wirkte, die äußere Hülle unseres Planeten wieder gründlich durchmischelt. Dadurch lagen die ohnehin nicht sehr häufigen Elemente nun viel zu verteilt vor, um sich zu Kristallen verbinden zu können.

Diese erste Phase der Erdgeschichte, die bis vor rund vier Milliarden Jahren andauerte, trägt die treffende Bezeichnung Hadaikum (von Hades, der griechischen Unterwelt); denn es herrschten wahrhaft höllische Bedin-



Chondrit (Steinmeteorit)

In der **ersten Phase der Erdgeschichte** herrschten wahrhaft **höllische Bedingungen**



## SCHWARZE ERDE

**Vor 4,4 Milliarden Jahren:** Weithin bedeckt schwarzer Basalt aus erstarrtem glühflüssigem Magma die Oberfläche der jungen Erde. In den folgenden zwei Milliarden Jahren entstehen etwa 1500 Mineralarten. Durch wiederholtes teilweises Schmelzen von Gestein und fraktioniertes (teilweises) Kristallisieren des Magmas reichern sich seltene, verstreut vorkommende Elemente wie Lithium (im Mineral Lepidolit), Beryllium (im Beryll) und Bor (im Turmalin) an. Auch chemische Reaktionen sowie die Verwitterung durch die frühen Ozeane und die noch sauerstofffreie Atmosphäre fördern den Konzentrationsprozess. Unter hohem Druck entstandene Minerale wie Jadeit gelangen durch plattentektonische Hebungen an die Oberfläche.

ILLUSTRATION: RON MILLER; LEPIDOLIT: PHOTO RESEARCHERS / BIOPHOTO ASSOCIATES; BERYLL: GETTY IMAGES / SCIENTIFICA; TURMALIN: PHOTO RESEARCHERS / JACANA

gungen. Unser Planet war eine unwirtliche, trostlose Welt, unablässig bombardiert von vagabundierenden Kleinkörpern, die als Bodensatz des solaren Urnebels umherschirrten. Fetzen aus schwarzem Basalt, zu dem auch heute noch Lava erstarrt, bedeckten große Teile der Erdoberfläche.

Trotzdem erhöhte sich in diesem Äon die mineralogische Vielfalt der Erde allmählich. In erster Linie geschah dies durch wiederholtes Schmelzen und Erstarren der Basaltdecke, aber auch durch Verwitterungsvorgänge; denn einschlagende Kometen, die überwiegend aus Eis bestanden, hinterließen Wasser, das verdampfte und als heißer Regen niederging. Über unzählige Zyklen hinweg konzentrierten sich durch das partielle Schmelzen und Wiederverfestigen größerer Gesteinsmengen sowie durch Interaktionen mit Wasser, das beispielsweise selektiv bestimmte Verbindungen löste, an der Erdoberfläche genügend ungewöhnliche Elemente, um neue, exotische Minerale zu bilden.

Nicht überall im Sonnensystem herrschten derart günstige Bedingungen für den Mineralisationsprozess. Der kleine, wasserlose Merkur und der ebenfalls trockene Erdmond erstarrten beim Erkalten relativ schnell, ohne dass es immer wieder zum erneuten Aufschmelzen von schon verfestigtem Gestein kam. Unserer Schätzung nach dürften dort deshalb allenfalls etwa 350 verschiedene Mineralarten zu finden sein. Der Mars mit seinen bescheidenen Wasservorkommen könnte eine etwas größere Vielfalt bieten. Zu erwarten sind dort Tonmi-

nerale als Verwitterungsprodukte sowie Evaporite, die sich beim Austrocknen von Meeren bilden. Insgesamt werden die NASA-Sonden auf dem Roten Planeten vermutlich um die 500 verschiedene Minerale identifizieren.

Die Erde ist größer, wärmer und feuchter als der Mars. Deshalb kann sie mit mehr Feinheiten der Mineralbildung aufwarten. Auf allen Gesteinsplaneten gab es Vulkanismus, bei dem sich Basalt über die Oberfläche ergoss. Doch nur die Erde und vielleicht die etwa gleich große Venus waren im Inneren heiß genug, um einen Teil des Basalts erneut zu schmelzen und dabei in Granitoide umzuwandeln: eine Klasse magmatischer Gesteine, zu der die von Bordsteinen und Arbeitsplatten vertrauten, graubräunlichen Granite gehören. Dabei handelt es sich um grobkörnige Gemische aus mehreren Mineralen, darunter Quarz (aus dem meist die Sandkörner an Stränden bestehen), Feldspat (das häufigste Mineral der Erdkruste) und Glimmer (der glänzende, blättrige Schuppen bildet). Sie alle entstanden in äußerst geringen Mengen schon in den großen Planetesimalen. Doch erst die Granit bildenden Prozesse auf der Erde machten sie zu sehr häufigen Mineralen.

Auf unserem Planeten konzentrierten sich durch wiederholtes Verflüssigen und fraktioniertes (teilweises) Kristallisieren von Magma in der Restschmelze mit der Zeit seltene »inkompatible« Elemente, die nicht in das Kristallgitter der üblichen Minerale passen. Die aus ihnen schließlich gebildeten Gesteine be-



Turmalin



## ROTE ERDE

Querschnitt durch einen fossilen Stromatolithen



**Vor zwei Milliarden Jahren:** Fotosynthese treibende Lebewesen haben der Erdatmosphäre einige Prozent Sauerstoff beigemischt, der die chemischen Eigenschaften der Luft dramatisch verändert. Sie oxidiert nun Minerale mit zweiwertigem Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ), einem Hauptbestandteil von schwarzem Basalt, zu rostroten Verbindungen mit dem dreiwertigen Metall ( $\text{Fe}^{3+}$ ). Unter dem Einfluss der sauerstoffhaltigen Atmosphäre entstehen mehr als 2500 neue Minerale, darunter Rhodonit (in Manganerzen) und Türkis. Mikroorganismen (grün) lagern geschichtete Stromatolithen ab, die aus Mineralen wie Kalzit bestehen.

Türkis



ILLUSTRATION: RON MILLER; STROMATOLITH: PHOTO RESEARCHERS / TED KINSMAN; TÜRKIS: PHOTO RESEARCHERS / E. R. DEGGINGER; RHODONIT: GETTY IMAGES / SCIENTIFICA

stehen aus mehr als 500 verschiedenen Mineralarten. Einige davon kommen in Form riesiger Kristalle vor, in denen Lithium, Beryllium, Bor, Zäsium, Tantal, Uran und ein Dutzend anderer seltener Elemente angereichert sind. Es dauerte lange – nach manchen Schätzungen mehr als eine Milliarde Jahre –, bis diese Elemente Konzentrationen erreichten, die eine Mineralbildung ermöglichten.

Zum Mineralreichtum der Erde trug auch der weltweite Prozess der Plattentektonik bei. Im Zusammenhang damit entsteht frische Kruste an Vulkanketten, während alte in Subduktionszonen verschluckt wird. Dort schiebt sich jeweils eine der rund zwei Dutzend frei beweglichen Platten, in welche die feste Erdschale zerfällt, unter die angrenzende und sinkt in den Erdmantel zurück. Gewaltige Mengen wasserhaltigen, chemisch sehr unterschiedlichen Krustengesteins schmelzen dabei partiell, wodurch sich ebenfalls seltene Elemente anreichern. Im Lauf dieses seit Jahrmilliarden ablaufenden Vorgangs sind in mächtigen Sulfidablagerungen, die heute zu den reichsten Erzvorkommen der Erde gehören, Hunderte neuer Minerale entstanden. Zudem haben tektonische Kräfte immer wieder Gesteine aus großen Tiefen angehoben. Dadurch gelangten noch einmal einige hundert unter hohem Druck gebildete Minerale an die Erdoberfläche. Zu ihnen zählt beispielsweise Jadeit, eine der beiden Komponenten des Schmucksteins Jade.

Insgesamt dürften durch dynamische Prozesse, die im Bereich von Erdkruste und

-mantel abliefen, während der ersten zwei Milliarden Jahre der Erdgeschichte ungefähr 1500 verschiedene Minerale entstanden sein, die an der Erdoberfläche oder dicht darunter vorkommen. Doch heute gibt es mehr als 4400. Wie kam es zu dieser Vermehrung auf fast das Dreifache?

### Die rote Erde

Verantwortlich dafür war das Leben. Was die Erde von allen anderen bekannten Planeten und Monden unterscheidet, ist ihre Biosphäre. Sie hat die Umwelt in Oberflächennähe unwiderruflich verändert und dabei nicht nur am Boden, im Wasser und in der Luft ihre Spuren hinterlassen, sondern auch in Gesteinen und Mineralen.

Die ersten Organismen können allerdings noch keinen großen Einfluss auf den Mineralbestand der Erde gehabt haben. Es handelte sich um primitive Einzeller, die in Gesteinen gespeicherte chemische Energie für ihren Stoffwechsel nutzten. Zwar haben Geologen 3,5 Milliarden Jahre alte Formationen gefunden, die ihre Entstehung biologischen Vorgängen verdanken, darunter Riffe aus Kalziumkarbonat (Kalk) und gebänderte Eisenerze (in denen offenbar der erste durch Lebewesen produzierte Sauerstoff in Form von Eisenoxiden gebunden wurde). Doch das Land war noch kahl, in der Atmosphäre fehlte der Sauerstoff, die Verwitterung an der Oberfläche lief langsam ab, und die Aktivität der frühesten Lebensformen hatte so gut wie keinen



Rhodonit



## WEISSE ERDE

**Vor 700 Millionen Jahren:** Bedingt durch Klimaänderungen bedeckt über Jahrmillionen hinweg ein einziges Mineral – Eis – die gesamte Erdoberfläche. Schließlich löst von Vulkanen ausgestoßenes Kohlendioxid eine globale Erwärmung aus, die durch Selbstverstärkung außer Kontrolle gerät. Danach pendelt der Planet mehrfach zwischen Sauna und Gefrierschrank hin und her. In den Hitzephasen entstehen an Land durch Verwitterung große Mengen feinkörniger Tonminerale wie Kaolinit. In warmen, flachen Meeresregionen lagern sich Schichten aus charakteristischen Karbonathüten (*cap carbonate*) ab, die bis zwei Meter große Kristalle enthalten.

ILLUSTRATION: RON MILLER; KAOLINIT: PHOTO RESEARCHERS / TED KINSMAN; EISKRISTALL: PHOTO RESEARCHERS / SCIENCE SOURCE; KARBONATHÜTE: ALAN JAY KAUFMAN, UNIVERSITY OF MARYLAND

Einfluss auf die Zahl oder Verteilung der vorhandenen Minerale.

Diese Situation änderte sich – nach geologischen Zeitmaßstäben – von jetzt auf nachher, als neue Formen von Bakterien und Algen die moderne Form der Fotosynthese erfanden, bei der Sauerstoff freigesetzt wird. Dieser reichte sich rasch in hoher Konzentration in der Atmosphäre an. Es herrscht immer noch keine Einigkeit darüber, wann dieser Übergang, im englischen Sprachraum als Great Oxygenation Event bezeichnet, genau stattfand und wie schnell er ablief. Doch vor 2,2 Milliarden Jahren war der Sauerstoffgehalt der Luft schon auf mehr als ein Prozent des heutigen Werts gestiegen – eine relativ geringe Menge, die aber ausreichte, um die Mineralogie der Erdoberfläche für alle Zeiten zu verändern.

Chemische Simulationen durch meine Kollegen und mich legen nahe, dass der Great Oxygenation Event den Weg für mehr als 2500 neue Minerale ebnete. Bei vielen davon handelt es sich um hydratisierte, oxidierte Verwitterungsprodukte anderer Minerale. Sie hätten sich in einer sauerstofffreien Umgebung schwerlich gebildet. Somit scheinen biochemische Vorgänge direkt oder indirekt für die Entstehung des Hauptteils der über 4400 bekannten Mineralarten auf der Erde verantwortlich zu sein.

Die meisten neuen Vertreter bildeten dünne Überzüge oder Krusten aus umgewandeltem Material auf vorhandenen Gesteinen. Viele seltene Mineralarten kennt man nur von einer

Hand voll kostbarer Kristalle, die weniger als ein Gramm wiegen. Doch der Great Oxygenation Event hatte auch globale Auswirkungen auf die Mineralogie. Vor allem begann der Planet zu rosten. Rund um den Erdball färbte sich der zuvor schwarze Basalt rot, weil sich das zweiwertige Eisen ( $\text{Fe}^{2+}$ ) darin durch Oxidation in Hämatit und andere rötliche Verbindungen mit dreiwertigem Eisen ( $\text{Fe}^{3+}$ ) verwandelte. Aus dem Weltraum mögen die irdischen Kontinente vor zwei Milliarden Jahren fast wie der heutige Mars ausgesehen haben; allerdings gab es auf der Erde auch blaue Ozeane und weiße Wolken, die für Farbkontraste sorgten.

Der Mars verdankt seine rote Färbung ebenfalls Oxidationsprozessen, doch der dazu nötige Sauerstoff wurde von Sonnenstrahlen produziert, die Wassermoleküle hoch oben in der Atmosphäre in ihre Bestandteile zerlegten. Dabei entwich der Wasserstoff ins All. Auf diese Weise entstand hinreichend Sauerstoff, um die relativ kleine Oberfläche des Planeten rosten zu lassen, doch nicht genug, um wie auf der sauerstoffreichen, geologisch aktiveren Erde Tausende von Mineralarten zu erzeugen.

### Die weiße Erde

In der Jahrtausende nach dem Great Oxygenation Event scheint wenig mineralogisch Interessantes passiert zu sein. Dieses Intervall, im englischen Sprachraum Intermediate Ocean oder auch scherzhaft Boring Billion (»langweilige Milliarde«) genannt, war wohl eine Zeit der Stagnation auf dem Gebiet der Bio-



Karbonathüte

Als die ersten primitiven Organismen die moderne Form der Fotosynthese erfanden, begann die Erde zu rosten



## GRÜNE ERDE

**Vor 400 Millionen Jahren:** Vielzellige Organismen sind entstanden, und Pflanzen haben das Land besiedelt, gefolgt von Tieren. Biochemische Zersetzung durch Pflanzen und Pilze beschleunigt die Verwitterung von Gesteinen und die Entstehung von Tonen (Gemischen aus hydratisierten Mineralen) um den Faktor zehn und mehr. Die Erdoberfläche nimmt ihr heutiges Erscheinungsbild an – auch mit der aktuellen Mineralverteilung. Lebewesen selbst produzieren allgegenwärtige Minerale wie Aragonit und Kalzit, die sich in Trilobiten ebenso wie in menschlichen Knochen finden, aber auch extreme Raritäten wie den vom Autor entdeckten Hazenit, den Mikroorganismen ablagern.



Aragonit



fossiler Trilobit

ILLUSTRATION: RON MILLER; ARAGONIT: PHOTO RESEARCHERS / E. R. DEGGINGER; TRILOBIT: CHIP CLARK, SMITHSONIAN INSTITUTION, NMNH, MIT FRDL. GEN. VON ROBERT M. HAZEN; HAZENIT: HEXIONG YANG, UNIVERSITY OF ARIZONA

logie und Mineralogie. Das Wort »intermediate« (dazwischen liegend) bezieht sich auf den Gehalt der Ozeane an Sauerstoff. Nahe der Oberfläche hatte er sich im Meerwasser angereichert, während die tiefen Schichten frei davon blieben. Die Grenze zwischen beiden Zonen verschob sich allmählich nach unten, doch es traten weder grundsätzlich neue Lebensformen auf noch entstanden viele zuvor nicht existente Mineralarten.

Auf die langweilige Milliarde folgte dagegen eine höchst dramatische und folgenreiche Zeit. Vor etwa 800 Millionen Jahren waren die meisten Erdteile zum Superkontinent Rodinia in Äquatornähe vereint. Dann spalteten plattentektonische Kräfte diese riesige Landmasse auf. Die Folge waren längere Küstenlinien, stärkere Regenfälle und eine beschleunigte Verwitterung. All das entzog der Atmosphäre vermehrt das Treibhausgas Kohlendioxid. Dadurch kühlte sich die Erde ab, die Pole froren dauerhaft zu, und die Eisdecke rückte von dort immer weiter zum Äquator hin vor.

Die sich ausdehnenden Eis- und Schneeflächen warfen mehr Sonnenlicht in den Weltraum zurück, wodurch sich der wärmende Effekt der Sonne abschwächte. Folglich kühlte die Erde noch mehr ab, und die Gletscher stießen weiter vor. So wurde unser Planet für mindestens zehn Millionen Jahre schließlich zu einem riesigen Schneeball, aus dessen weißer Hülle nur ein paar aktive Vulkane ragten. Einigen Schätzungen zufolge sackte die globale Mitteltemperatur auf –50

Grad Celsius ab (Spektrum der Wissenschaft, 4/2000, S. 58).

Doch die Erde blieb nicht auf Dauer im Eis erstarrt. Vulkane stießen wie eh und je Kohlendioxid aus. Da bei den extrem tiefen Temperaturen nur wenig Niederschläge fielen und kaum Verwitterung stattfand – Vorgänge, die der Atmosphäre das Treibhausgas hätten entziehen können –, stieg dessen Konzentration in der Luft langsam, aber stetig an und erreichte schließlich ein Mehrhundertfaches des heutigen Werts. Der resultierende Treibhauseffekt heizte die Erde zunehmend auf. Wie zuvor die Abkühlung war auch diese Erwärmung irgendwann ein sich selbst verstärkender Vorgang, der eine rasante Eigendynamik entfaltete. Von dem Moment an, als das Eis am Äquator abgeschmolzen war, wurde die Erde deshalb in kürzester Zeit vom Gefrierschrank zur Sauna.

In den folgenden 200 Millionen Jahren pendelte sie einige Male zwischen diesen Extremen hin und her. Zwar traten während dieser turbulenten Phase offenbar nur wenige oder gar keine neuen Mineralarten auf. Dennoch änderte sich die Verteilung der Minerale an der Erdoberfläche mit jedem neuen Vereisungszyklus drastisch. So nahm während der Saunaphasen in der kahlen, felsigen Landschaft, die ungeschützt der Erosion preisgegeben war, die Bildung feinkörniger Tone und anderer Verwitterungsprodukte stark zu. In flachen Bereichen der sich erwärmenden Ozeane fielen Karbonate in Form riesiger Kristallfächer aus.



Hazenit

**Die drastisch gesteigerte Verwitterungsrate durch Landpflanzen sorgte für eine starke Zunahme der Tonminerale**

Tief greifende Konsequenzen hatten die Schneeball-Sauna-Zyklen auch für das Leben. Nur die widerstandsfähigsten Organismen überlebten den mehrfachen Wechsel zwischen so extremen Bedingungen. Die biologische Produktivität sank in den Gefrierschrankphasen fast auf null und explodierte in den Hitzeperioden geradezu. Dadurch stieg der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre rasant und erreichte am Ende der letzten großen Vereisung – unter anderem durch großflächige Algenblüten an den Küsten – etwa 15 Prozent. Viele Biologen sehen in diesem hohen Wert eine entscheidende Voraussetzung für das Auftreten und die weitere Entwicklung großer Tiere, die für ihren bedeutenden Stoffwechsel sehr viel Sauerstoff benötigen. Tatsächlich tauchen nur fünf Jahrmillionen nach der letzten großen weltweiten Vereisung die ältesten bekannten Fossilfunde vielzelliger Organismen auf.

Parallel zur Biosphäre entwickelte sich auch die Geosphäre weiter. Für einen besonderen Schub sorgten Mikroorganismen und Tiere, die lernten, ihre eigenen schützenden Schalen aus Mineralen aufzubauen. Die Erfindung der Karbonatskelette führte zur Ablagerung mächtiger Kalkriffe, deren Erosion zerklüftete Landschaften hervorbrachte, die zu den reizvollsten auf der heutigen Erde zählen. Derartige Minerale waren nicht neu, aber nie zuvor hatte es sie in solchen Mengen gegeben.

## Die grüne Erde

Während des größten Teils der Erdgeschichte war das Festland unbewohnbar. Ultraviolette Sonnenstrahlung zerstörte lebenswichtige Biomoleküle und tötete die meisten Zellen ab. Mit steigendem Sauerstoffgehalt der Atmosphäre entstand jedoch eine schützende stratosphärische Ozonschicht, die den Planeten vor den UV-Strahlen genügend abschirmte, um eine terrestrische Biosphäre zu ermöglichen.

Dennoch dauerte es eine Weile, bis das Leben das Festland eroberte. Nach dem Ende der Vereisungen gediehen in Sumpfbereichen vielleicht Algenmatten. Doch die größte Veränderung auf den Kontinenten fand erst mit der Entwicklung der Moose – der frühesten echten Landpflanzen – vor etwa 460 Millionen Jahren statt. Weitere zehn Millionen Jahre vergingen, bis die damals neu entstandenen Gefäßpflanzen, deren Wurzeln in felsigen Untergrund eindringen, sich dort verankern und Wasser aufnehmen, das Land großräumig besiedelten.

Gemeinsam mit den Pilzen zersetzten sie das Gestein auf biochemischem Weg. So beschleunigte sich die Verwitterungsrate auf mehr als das Zehnfache. Die Häufigkeit von Tonmineralen und die Geschwindigkeit der Bodenbildung nahmen erheblich zu. Dadurch

entstand ein stetig wachsender Lebensraum für weitere und größere Pflanzen und Pilze.

Vor etwa 400 Millionen Jahren, im Zeitalter des Devon, sah die Erdoberfläche erstmals ähnlich aus wie heute – mit grünen Wäldern, bevölkert von einer zunehmenden Anzahl von Insekten, Landwirbeltieren und anderen Lebewesen. Und die tief greifenden Einflüsse des Lebens hatten auch die oberflächennahe Mineralogie der Erde auf ihren modernen Stand gebracht, was Vielfalt und Vorkommen der Mineralarten betrifft.

## Minerale auf Io und Titan

Die Betrachtung der irdischen Mineralogie als dynamischen Prozess, der stetigen Veränderungen unterliegt, eröffnet einige interessante Perspektiven für die künftige Forschung – vor allem, was extraterrestrische Körper betrifft. Wie wir gesehen haben, erreichen Planeten und Monde je nach ihrer Beschaffenheit und Größe unterschiedliche Stadien der Mineral evolution. Diese kann in Welten mit völlig abweichender chemischer Zusammensetzung auch ganz andere Formen annehmen als auf der Erde. Beispiele sind der schwefelreiche Jupitermond Io und der kohlenwasserstoffreiche Saturnmond Titan. Ihr Mineralbestand sollte sich von dem irdischen stark unterscheiden. Das Gleiche gilt für den Jupitermond Europa und den Saturnmond Enceladus. Beide enthalten unter der eisigen Oberfläche vermutlich Ozeane aus flüssigem Wasser – Voraussetzung für Leben.

Die Evolution der Minerale lässt sich auch als Paradigma für die generelle Entwicklung von Systemen im Weltall auffassen, veranschaulicht sie doch die in vielen Zusammenhängen zu beobachtende Tendenz zu wachsender Komplexität. Diese zeigt sich ja nicht nur bei der mineralogischen Evolution auf Planeten, sondern auch schon bei der Evolution chemischer Elemente in Sternen sowie bei der molekularen Evolution im Vorfeld der Entstehung von Leben und schließlich bei der vertrauten biologischen Evolution durch natürliche Auslese.

Wir leben also in einem Universum, das darauf angelegt ist, immer komplexer zu werden. Aus Wasserstoffatomen entstehen Sterne, in denen die chemischen Elemente entstehen; diese Elemente verbinden sich zu Gesteinen, die Planeten aufbauen, auf denen sich eine zunehmende Vielfalt an Mineralen entwickelt. Letztere katalysieren die Bildung von Biomolekülen, die Leben hervorbringen können, das schließlich Geist und Bewusstsein erlangt. In diesem Staunen erregenden Szenario sind Minerale ein Rädchen in der Evolution eines Kosmos, der dabei ist, sich selbst zu begreifen. <



**Robert M. Hazen** ist leitender Wissenschaftler am Geophysikalischen Labor der Carnegie Institution in Washington D. C. und Professor für Geowissenschaften an der George Mason University in Fairfax (Virginia). Er hat 1975 an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) in Geowissenschaften promoviert. Als Autor von 20 populärwissenschaftlichen Büchern präsentiert er häufig Wissenschaft für Laien in Radio, Fernsehen, öffentlichen Vorträgen und Videokursen. Das Mineral Hazenit, das von Mikroorganismen im stark alkalischen Mono Lake in Kalifornien abgelagert wird, ist nach ihm benannt.

**Hazen, R. M. et al.:** Mineral Evolution. In: *American Mineralogist* 93, S. 1693–1720, 2008.

**Knoll, A. H.:** *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth*. Princeton University Press, 2003.

**Morowitz, H. J.:** *The Emergence of Everything: How the World Became Complex*. Oxford University Press, 2002.

**Papike, J. J. (Hg.):** *Planetary Materials*. Mineralogical Society of America, 1998.

**Zaikowski, L., Friedrich, J. M. (Hg.):** *Chemical Evolution across Time and Space: From Big Bang to Prebiotic Chemistry*. American Chemical Society, 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037417](http://www.spektrum.de/artikel/1037417).

# ECHTER ALS DIE WIRKLICHKEIT?



MIT FROL. GEN. DER UBISOFT GMBH

Fotorealismus, 60-mal pro Sekunde – so lautet das Ziel der milliarden-schweren Computerspiele-Industrie. Erst dann könnten interaktive virtuelle Welten nicht mehr von der Wirklichkeit zu unterscheiden sein.

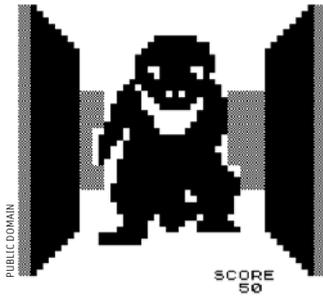


Fantasievolle Welten jenseits unserer Wirklichkeit, dabei aber fotorealistisch anzusehen – der Sciencefiction-Film »Avatar«, der im vergangenen Jahr in die Kinos kam, erfüllte diesen Wunsch dank des massiven Einsatzes von Hard- und Software. Für manches Einzelbild rechneten mehrere zehntausend Prozessoren zwei Tage lang, im Kino sah der Zuschauer 24 Bilder pro Sekunde. Es überrascht daher nicht, dass das entsprechende Computerspiel »Avatar« weit weniger realistisch anmutet: Die für Action-szenen erforderliche Interaktivität verlangt bis zu 60 Bilder pro Sekunde. Da bleibt so mancher Lichteffect auf der Strecke.



20TH CENTURY FOX FILM CORPORATION

Von Henrik Wann Jensen  
und Tomas Akenine-Möller



So sah 3-D-Grafik um 1981 aus:  
das Monster Maze auf einem Sinclair ZX81.

**T**räumen ist erlaubt: Schon Ende der 1960er Jahre, als Computermonitore erstmals dreidimensionale Grafiken zeigten, prophezeiten Visionäre der Branche, eines Tages die Grenzen der künstlichen Bilder zum Fotorealismus zu überschreiten. Mögliche Anwendungen der 3-D-Computergrafik waren schnell gefunden, angefangen von der Konstruktion neuer Produkte mittels Computer Aided Design (CAD) über Architektur und Lichtplanung, der Visualisierung wissenschaftlicher Daten und der Computersimulation bis zur Unterhaltungsbranche. Inzwischen treiben die Computerspiele- und die Filmindustrie die Entwicklung maßgeblich voran. Doch trotz immer ausgefeilterer Algorithmen und immer leistungsfähigerer Hardware liegt das Ziel real wirkender Virtualität noch in weiter Ferne. Es sei denn, man bringt viel Zeit mit: Die Bildsynthese (Rendering), soll sie wirklichkeitsnahe Resultate liefern, beschäftigt selbst schnelle Maschinen heute noch mehrere Stunden lang – für nur ein einziges Bild (Frame).

Zu den Meilensteinen gehört sicher der im vergangenen Jahr in den Kinos angelaufene 3-D-Film »Avatar«. Manche Einzelbilder erforderten zwei Tage Rechenzeit, obwohl dafür mehrere zehntausend Prozessorkerne eingesetzt worden waren. Für Computerspiele völlig undenkbar, denn dort wird meist eine Bildrate von 60 Frames pro Sekunde verlangt, um Interaktivität in Echtzeit zu gewährleisten. Geschwindigkeit ist seit jeher ein wichtiger Kaufanreiz in der Gamerszene. Das führte zu einer eigenständigen Hardwareentwicklung: Viele Grafikberechnungen wurden von der zentralen Recheneinheit (CPU, Central Processing Unit) in spezielle Grafikchips (GPU) verlagert. Wie bei den CPUs löste auch bei der Grafikhardware eine neue, schnellere Generation die alte nach wenigen Monaten ab. Auf jedes Mehr an Hardwareleistung wiederum reagierten die Softwareentwickler mit noch besseren Algorithmen. In dieser Koevolution von Programmen und Elektronik liegt die Chance, das hochgesteckte Ziel zu erreichen.

Ein Maler, der eine Stadtlandschaft samt ihren Bewohnern auf seine Leinwand bannen möchte, kann sich bei der Vorskizze geometrischer Konstruktionen bedienen – Wolkenkratzer entsprechen in erster Näherung aus Quadern, die Körperteile von Menschen ähneln Kugeln oder Zylindern. Ein Grafikchip bedient sich ebenfalls einer solchen »Diskreti-

sierung« der Welt, doch während der Künstler seine geometrischen Vorformen übermalt, bleibt der Computer bei diskreten Werten. Um dem Auge kontinuierliche Farb- und Schattenverläufe vorzugaukeln, werden die sichtbaren Oberflächen aller Objekte einer Szene in eine Vielzahl winziger Punkte, Linien, Dreiecke und manchmal auch komplexerer Polygone zerlegt. Je feiner diese Zerlegung, desto realistischer zwar das Resultat, desto höher aber auch der Rechenaufwand (siehe Bild rechts oben).

Die ersten 3-D-Spiele mussten mit wenigen hundert Dreiecken auskommen. Gegenwärtige GPUs verarbeiten schon mehrere Millionen Dreiecke pro Frame. Setzt sich dieser Trend fort, könnten es in naher Zukunft Milliarden sein. Doch wie viele solche Elemente benötigt 3-D-Fotorealismus? Einer der Gründer von Pixar Animation Studios, die Kinserfolge wie »Toy Story« und »Ratouille« produzierten, hält 80 Millionen für ausreichend. Ist es also nur eine Frage der Zeit, bis wir über die nötige Hardware verfügen, um alle Geometrieberechnungen in Echtzeit zu bewältigen? Leider beinhaltet Fotorealismus weit mehr als das Zählen von Polygonen.

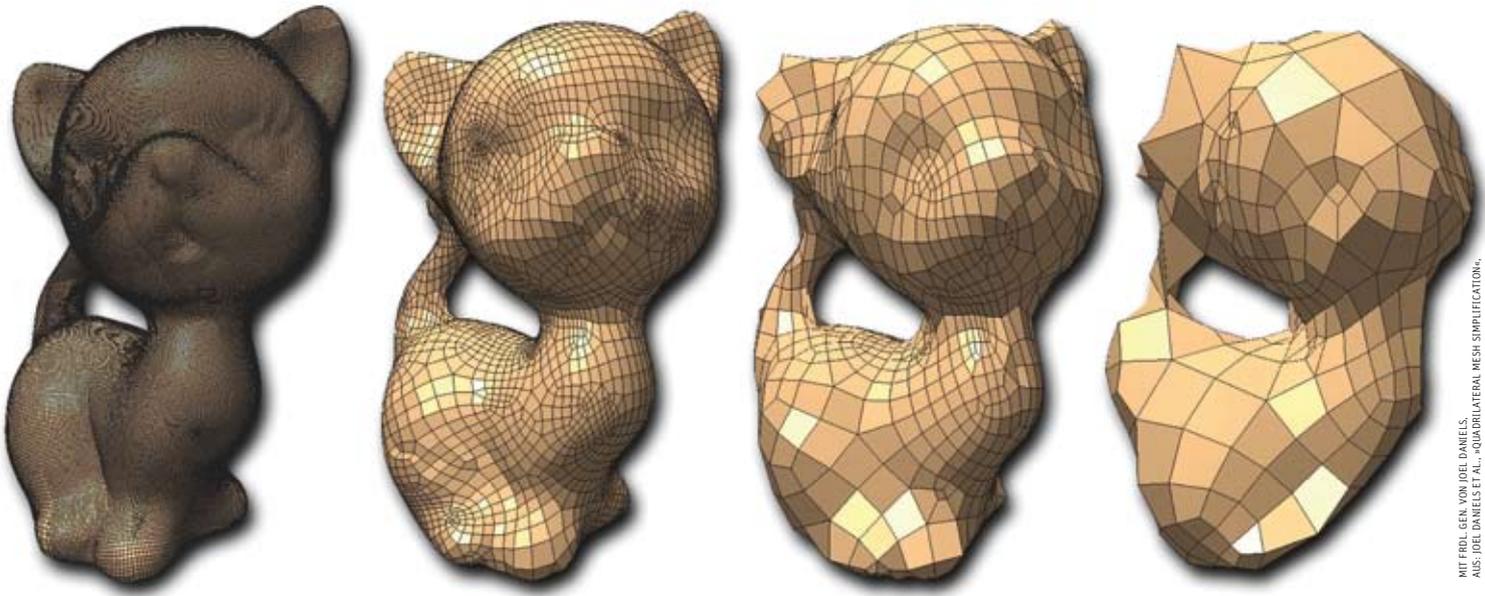
### Vorgetäuschte Unebenheiten sparen Rechenzeit

Die schnellste Methode, 3-D-Daten in ein räumlich wirkendes Monitorbild umzuwandeln, ist die Rasterisierung. Ein Algorithmus prüft, welche Geometrieelemente einer Szene sichtbar sind, dann werden diese auf ein Raster von Bildpunkten (Pixeln) projiziert (siehe Bild rechts unten). Um Kanten zwischen den geometrischen Elementen zu vermeiden, werden die Farbwerte der unmittelbaren Nachbarn an der Grenze gemittelt. Shader genannte Algorithmen ordnen den Dreiecken Farbe und Charakteristika der darzustellenden Oberfläche zu, beispielsweise Rauheit oder Glanz. Meist verwendet man dazu Texture Maps, das sind digitale Bilder, die auf ein Objekt projiziert werden und so zum Beispiel dem Abbild einer Apfelsine wächsernen Glanz verleihen. Im Produktionsablauf der großen Studios widmen sich manche Künstler ausschließlich dem Entwurf von Texture Maps.

Eine Variante davon sind so genannte Bump Maps (siehe Bild S. 92), eine Erfindung des Computergrafikpioniers James F. Blinn. Diese speziellen Texturen bestehen aus feinen Hell-dunkel-Strukturen. Statt Unebenheiten einer Oberfläche durch entsprechende Geometrien modellieren und dann Licht und Schatten »rendern« zu müssen, gaukeln solche Bump Maps dem Auge Unebenheit vor – und

## In Kürze

- ▶ **Jedes Einzelbild (Frame) eines Films** oder eines Computerspiels muss berechnet werden.
- ▶ Die schnellste und daher gängigste Methode dafür ist die **Rasterisierung**. Die Szene wird in geometrische Elemente zerlegt, ein Algorithmus projiziert die vom Kamerastandpunkt aus sichtbaren Pixel auf das Raster der Monitorpixel.
- ▶ Komplexere Beleuchtungseffekte, die entscheidend zum fotorealistischen Eindruck beitragen, erfordern **das aufwändigere Raytracing**.
- ▶ Die Koevolution von Hard- und Software könnte in einigen Jahren **Fotorealismus** bei einer Frame-rate von 60 Bildern pro Sekunde liefern.



MIT FROL. GEN. VON JOEL DANIELS.  
AUS: JOEL DANIELS ET AL., "QUADRILATERAL MESH SIMPLIFICATION",  
PROCEEDINGS OF ACM SIGGRAPH ASIA, VOL. 27, ISSUE 5, DEC. 2008

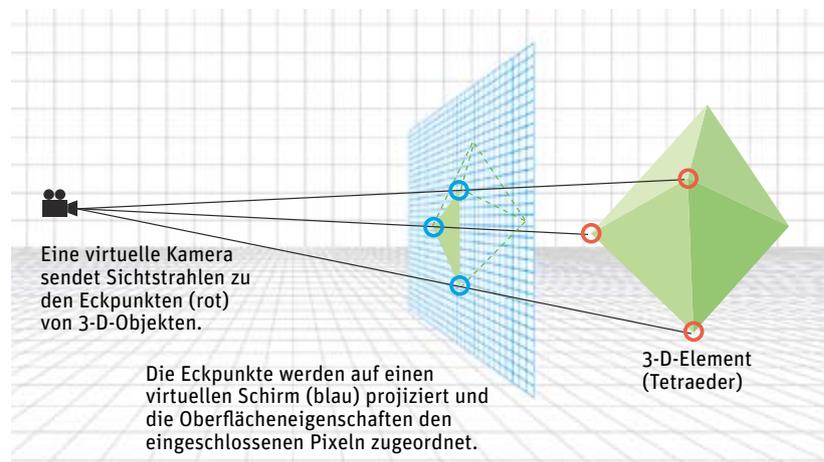
sparen somit erheblich Rechenzeit. Das kritische Element bei der Beleuchtung einer 3-D-Umgebung sind aber die in der Szene platzierten virtuellen Lichtquellen. Beim Rastern errechnet der Grafikchip mit ein paar einfachen Gleichungen, wie viel Licht von einer solchen Quelle einen bestimmten Punkt eines Dreiecks erreicht und wie viel davon zum Beobachter reflektiert wird.

Nicht weniger entscheidend für den optischen Eindruck sind Schatten; sie werden oft durch mehrfaches Rendern ermittelt. Zum Beispiel kann ein Algorithmus zunächst die Szene aus Sicht einer Lichtquelle in eine Shadow-Map abbilden. Diese enthält Informationen über jene Dreiecke, die von der Lichtquelle aus sichtbar sind. Ein zweiter Durchlauf dient der Farbberechnung aus Sicht der Kameraposition. Dabei wird die Shadow-Map befragt, ob das gerade zu berechnende Dreieck aus Sicht der Lichtquelle im Schatten liegt und seine vom Beobachter wahrgenommene Farbe angepasst werden muss.

Jedes Objekt einer Szene muss in geometrische Elemente zerlegt werden, um es für den Computer berechenbar zu machen. Je feiner diese Zerlegung ist, desto näher kommt das Ergebnis dem Original, desto aufwändiger ist aber jede Bildberechnung. Deshalb optimieren Algorithmen auch die Zahl der Polygone des 3-D-Modells hinsichtlich Geschwindigkeit und Genauigkeit. Für eine Bildberechnung mittels Rasterisierung würden die mittleren Modelle viel schneller bearbeitet als das linke, während das rechte zu ungenau wäre. Mit zunehmendem Abstand des Objekts zur virtuellen Kamera lässt sich die Zahl der Polygone ebenfalls reduzieren.

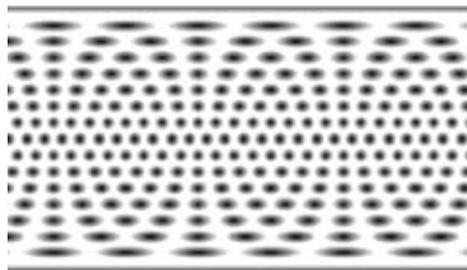
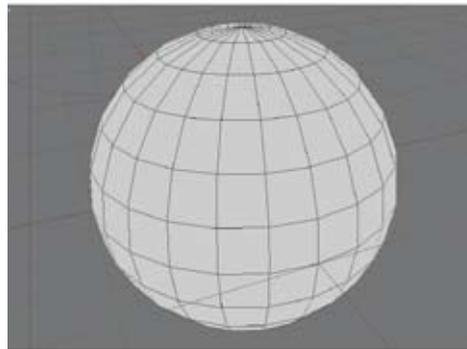
In der realen Welt wird Licht diffus gestreut, an den Übergängen zwischen Medien verschiedener optischer Dichte gebrochen, an spiegelnden Flächen reflektiert. Gelänge es, solche Effekte zu simulieren, würde das den Eindruck enorm verstärken, eine echte Szene zu sehen. Umgekehrt ist Bildern, denen dergleichen fehlt, eine künstliche Anmutung eigen. Weil ein Shader in einer Rasterisierungs-Pipeline aber in der Regel nur lokal arbeitet und damit keinen Zugriff auf den Rest der Szene hat, lassen sich solche globalen Phänomene damit nur sehr schwer imitieren.

**Rasterisierungs-Algorithmen** rendern Szenen durch Projektion der Sichtstrahlen zu den Eckpunkten der geometrischen Objekte der jeweiligen Szene. Diese Punkte werden samt ihrer Eigenschaften auf Pixel abgebildet; so entsteht ein Bild.



AMERICAN SCIENTIST

Bump Mapping ist sehr effizient, um feine Oberflächenstrukturen (hier auf eine Kugel) zu zaubern, indem es durch helle und dunkle Regionen eine unebene Topografie simuliert.



Bump Map



Helle und dunkle Bereiche der Bump Map erscheinen dem Betrachter als Höheninformationen.



ALLE DREI: AMERICAN SCIENTIST

Um Fotorealismus zu erreichen, bedarf es eines **fundamentalen Wandels** im Umgang mit der Geometrie und Beleuchtung einer Szene

Das gilt auch für das Color Bleeding, einen Effekt, der mitunter bei indirekter Beleuchtung auftritt. Zum Beispiel wirft ein roter Teppich einen schwachen Rotton auf weiße Wände. Ein anderes schwer mit der Rasterisierung zu erfassendes Phänomen sind Lichtbündelungen (fachlich Kaustiken): Figuren von intensiver Helligkeit, die bei Lichtbrechung oder Reflexion entstehen können, wie zum Beispiel die schimmernden Lichtwellen am Boden eines sonnenbeschieneenen Schwimmbeckens. Zu nennen wäre auch die Volumenstreuung, die immer dann auftritt, wenn Licht oberflächlich in eine Substanz eindringt und dabei gestreut wird. Der schimmernde Glanz von Jade beruht auf die-

sem Effekt, aber auch das Aussehen menschlicher Haut.

Schnellere Hardware ist ein Teil der Lösung. Heutige GPUs erreichen ihre Leistung durch einen hohen Grad an Parallelisierung, bei der das Rendern einer Szene in viele kleinere Aufgaben zerlegt wird, die spezialisierte Recheneinheiten innerhalb der GPU gleichzeitig bearbeiten. Eine gerade mal fünf Jahre alte Entwicklung in der Grafikprozessortechnik ist die Programmierbarkeit. Vor zehn Jahren waren GPUs im Prinzip fest verdrahtete Funktionseinheiten, die sich mit ein paar Parametern an bestimmte Anforderungen der Berechnungen anpassen ließen. Heute kann ein Programmierer die Beleuchtungsmodelle der GPU gegebenenfalls auf den neuesten Stand bringen und so das Potenzial der Hardware optimal nutzen. Programmierbare Hardware hat auch eine Tür für Zaubertricks geöffnet, um die inhärenten Beschränkungen der Rasterisierung zu überwinden. So genannte approximative Multipass-Algorithmen ermöglichen es auch, auf Rasterprozessor-Hardware Color Bleedings, Kaustiken und Volumenstreuung zumindest zu imitieren. In der Regel wird eine Szene dazu aus verschiedenen Blickwinkeln gerendert (daher der Name); die Zwischenergebnisse werden geschickt kombiniert. Das Color Bleeding eines roten Teppichs auf eine weiße Wand lässt sich beispielsweise durch zusätzliche rot erstrahlende Lichtquellen auf den Teppichflächen nachstellen. Doch mögen die Ergebnisse auch bezaubern, Fotorealismus erreichen sie nicht. Dazu bedarf es eines fundamentalen Wandels im Umgang mit Geometrie und Beleuchtung. Eine dieser Optionen ist das Raytracing.

Vom Ansatz her hat es durchaus Gemeinsamkeiten mit der Rasterisierung: Beide ermitteln die Sichtbarkeit einer Oberfläche entlang eines Lichtstrahls. Doch Raytracing schickt gleich mehrere Strahlen auf die Reise. Es erkennt, wenn diese diffus gestreut, reflektiert oder gebrochen werden, und verfolgt sie weiter. So lässt sich Beleuchtung physikalisch richtig simulieren, spezielle Effekte wie Color Bleeding und Kaustiken inklusive.

Raytracing benötigt auch vergleichsweise wenig Softwarecode. Paul Heckbert, Spezialist für 3-D-Architektur beim Grafikkartenhersteller NVIDIA, hat einen funktionierenden Raytracer geschrieben, dessen Programm noch lesbar auf eine Visitenkarte gedruckt werden kann. Ein einfacher Algorithmus bringt allerdings nicht unbedingt auch hohe Rechengeschwindigkeit. Die Rasterisierung ist nämlich so schnell, weil sie jedes durchgerechnete Dreieck wieder vergisst und zum nächsten

weitergeht. Beim Raytracing hingegen bleibt die gesamte Szene immer im Blick, wenn ein Lichtstrahl darin umherspringt. Deshalb konvertieren Programme die gesamte Geometrie erst einmal in eine so genannte Beschleunigungsstruktur, in der sie schneller entscheiden können, ob ein Lichtstrahl ein bestimmtes Dreieck trifft oder nicht. Verschiedene Beleuchtungseffekte benötigen aber oft unterschiedliche Beschleunigungsstrukturen. Forscher suchen daher für jeden Schritt im Renderingprozess nach Möglichkeiten, sie zu optimieren.



### Evolution und Koevolution – die Strategie der Hersteller

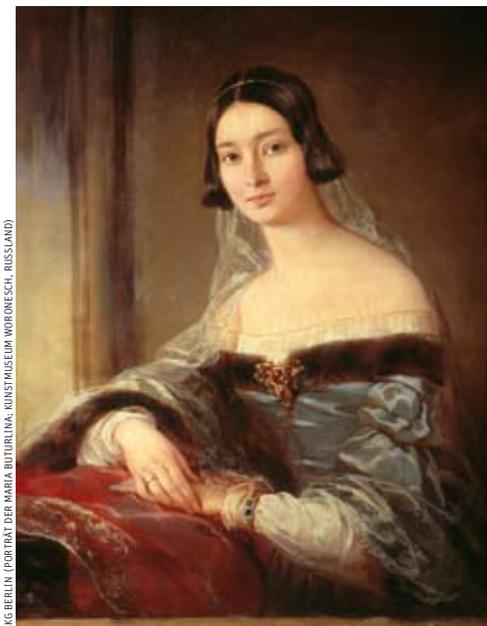
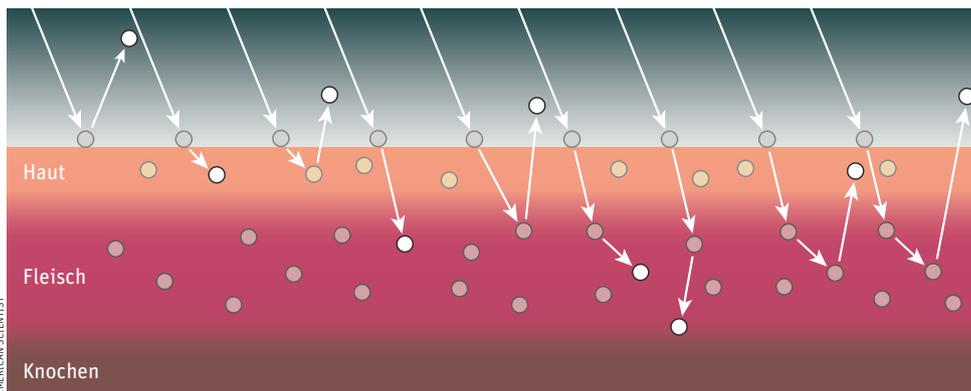
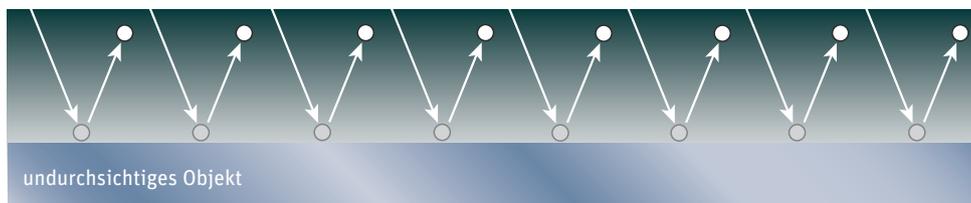
Mitunter müssen mehrere Millionen Lichtstrahlen für einen einzigen Frame individuell verfolgt werden, da komplexe Effekte die Anzahl der Strahlen rasch wachsen lassen. Das Ergebnis besticht aber durch seine realistische Anmutung. Betrachtet man die Geschwindigkeitsvorteile der Rasterisierung und die Leistungsanforderungen des Raytracings, dürfte die nächste GPU-Generation wohl beide unterstützen. Das ist auch die Strategie der drei großen Grafikkartenhersteller Intel, NVIDIA und AMD/ATI, die 2008 zusammen 97,8 Prozent des Marktes abdeckten. Sie setzen auf eine evolutionäre Weiterentwicklung der existierenden Architekturen, wobei Raytracing die Rasterisierung immer stärker ergänzt.

Heutige Hardware kann viele Millionen Lichtstrahlen pro Sekunde verarbeiten. Obwohl das sehr beeindruckend klingt, ist es noch weit entfernt von der Zielmarke: 60 Frames pro Sekunde und bei High-Definition-

Auflösung 1920 mal 1080 Pixel pro Bild. Rechnet man mit beispielsweise 16 Strahlen pro Pixel – eine gute Zahl, um Beleuchtungseffekte simulieren zu können –, wären pro Sekunde zwei Milliarden Strahlen zu verfolgen. Das sind zwei Größenordnungen mehr als heutige Hardware leisten kann. Ein großer Vorteil des Raytracings ist aber, dass es sich gut parallelisieren lässt: Jeder einzelne Strahl kann für sich kalkuliert werden. NVIDIA, AMD/ATI und Intel setzen deshalb auch auf Parallelverarbeitung. Die neuesten Grafikkprozessoren besitzen Hunderte von unabhängigen Recheneinheiten, von denen jede in der Lage ist, Lichtstrahlen individuell zu verfolgen.

Folgt die Entwicklung der Halbleiterindustrie weiter der als Mooresches Gesetz bekannten Beobachtung, verdoppelt sich die Rechenleistung der Computerchips alle 18 Monate. In gut zehn Jahren also könnten die GPUs die heute verlangten zwei Milliarden Lichtstrahlen verarbeiten. Doch wer wüsste

Licht, das auf eine transluzente Oberfläche wie Haut trifft, dringt etwas ein, wird gestreut und beleuchtet die Oberfläche nun von innen. Volumenstreuung ist ein Algorithmus, der diesen Effekt einschließt, indem er Lichtstrahlen verfolgt, deren Schicksal auf den Materialeigenschaften des jeweiligen Objekts basiert. Künstler wie die schottische Malerin Christina Robertson (1796–1854) meisterten diese Herausforderung mit einer Lasurtechnik, die den Effekt durch mehrere lichtdurchlässige Pigmentschichten erzielt.



ANGEBILIN (PORTRÄT DER MARIA BUTURLINA; KUNSTHAUSEM WROZNESEH, RUSSLAND)

AMERICAN SCIENTIST

## INTERVIEW

## »Industrielle Anwendungen haben andere Qualitätsansprüche als Computerspiele«



Johannes Behr



André Stork

BEIDE FOTOS: FRAUNHOFER IGD

Verlangt die Industrie von Computersimulationen Fotorealismus? »Spektrum der Wissenschaft« sprach mit den Informatikern Johannes Behr und André Stork vom Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt.

**Spektrum der Wissenschaft:** Computerspiele brauchen Interaktivität in Echtzeit und möglichst auch fotorealistische Bilder. Welche Anforderungen stellen industrielle Anwendungen?

**Dr. Johannes Behr:** Das kommt natürlich stark auf das Gebiet an. Industrielle Anwendungen haben andere Qualitätsansprüche als Computerspiele. Automobildesigner wollen durchaus eine fotorealistische Darstellung, etwa um eine neue Lackierung oder die Sichtbarkeit der Instrumente im Cockpit zu testen. Dabei kann die gewünschte Auflösung sogar weit jenseits von HDTV liegen – im Fraunhofer IGD bieten wir beispielsweise eine stereoskopische Display-Wand mit 8400 mal 4200 Pixeln.

**Dr. André Stork:** Allerdings lässt sich maximale Darstellungsqualität noch nicht in Echtzeit realisieren. Um in dem Beispiel zu bleiben, ist das aber gar nicht problematisch. Denn in manchen Phasen der virtuellen Produktentwicklung ist es absolut akzeptabel, auch mal mehrere Minuten auf ein Bild zu warten. Das Ziel ist vor allem Bildqualität, und dafür kommen dann in der Regel auch höherwertige Materialmodelle und Renderingverfahren zum Einsatz als in Computerspielen.

**Spektrum:** Wie wichtig sind dabei komplexe Lichteffekte wie diffuse Streuungen oder Reflexionen?

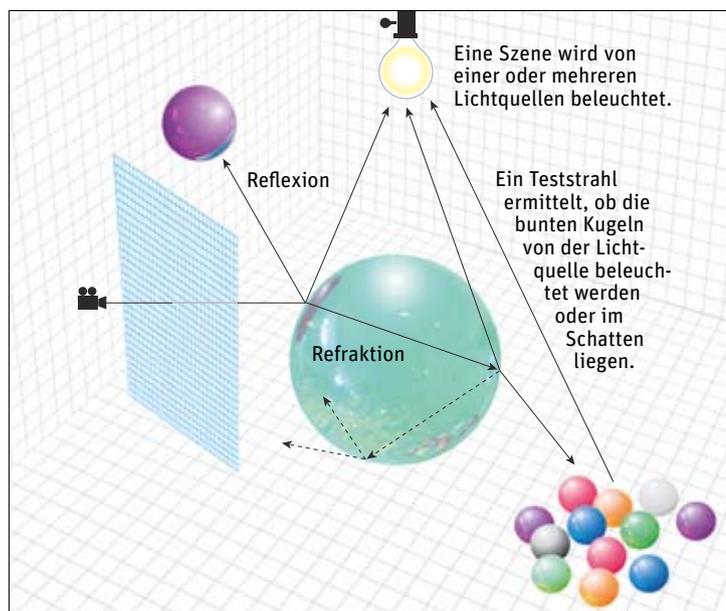
**Behr:** Sie steigern natürlich den Eindruck, eine echte Szene zu sehen. Und

in Designanwendungen sind sie mitunter unabdingbar.

**Spektrum:** Mit welcher Methode berechnen Sie die virtuelle Beleuchtung eines Objekts?

**Behr:** Bei den angesprochenen Effekten fällt das Licht nicht einfach direkt von der Quelle auf eine Oberfläche und von dort dann weiter in die virtuelle Kamera. Sondern es interagiert mehrfach mit der Szene. Die Rasterisierung, wie sie derzeit in Spielen verwendet wird, hat damit Probleme, weil es ihr beispielsweise nur eingeschränkt möglich ist, zu ermitteln, welches Objekt von einem reflektierten Lichtstrahl getroffen wird. Algorithmen, die auf Raytracing basieren, haben es hier leichter, da sie, wie

Beim Raytracing wird ein Lichtstrahl durch jedes Pixel eines virtuellen Bildschirms geschossen, zudem wird berechnet, ob er die geometrischen Objekte in der Szene trifft. Entstehen an Schnittpunkten neue Strahlen, lassen sich diese weiterverfolgen und so Reflexionen oder Brechungen simulieren. Andere Strahlen von Objekten zu den Lichtquellen testen, ob Ersterer überhaupt beleuchtet werden. Für sehr detaillierte Szenen können aber Millionen von Strahlen erforderlich sein.



AMERICAN SCIENTIST

der Name schon sagt, die Lichtstrahlen einzeln verfolgen.

**Stork:** Das erkauft man sich aber mit einem höheren Rechenaufwand. Wir versuchen daher zurzeit, Rasterisierung und höherwertige Algorithmen zu kombinieren, berechnen zum Beispiel dynamische weiche Schatten mit PRT, Lichtbrechung mit Raytracing.

**Spektrum:** Wofür steht dieses Akronym PRT?

**Stork:** Beim Precomputed Radiance Transfer wird der Lichttransport durch eine Szene vorausberechnet und mathematisch so transformiert, dass die Szene anschließend unterschiedlich beleuchtet werden kann. PRT ist sozusagen für berechnungsintensive Effekte wie weiche Schatten geeignet. Ergänzend wird High Dynamic Range Imaging, kurz HDRI,

eingesetzt. Hier geht es um Bilder mit einem höheren Dynamikumfang, also größerem Kontrast zwischen dunklen und hellen Bereichen. Mit bis zu 32 Bit statt nur acht pro Bildpunkt und Farbkanal lassen sich Helligkeitsstufen entsprechend präzise angeben. Das Ergebnis kommt den natürlichen Verhältnissen etwa an einem sonnigen Tag sehr viel näher. Beide Verfahren kommen übrigens heutzutage in einfachen Varianten durchaus in Computerspielen zum Einsatz.

**Behr:** Außerdem verwenden wir Materialmodelle, die in abstrakter Form beispielsweise Reflexionseigenschaften und deren Varianz über die Oberfläche der Materialien beschreiben. Das setzt sehr aufwändige Messungen voraus und hat nur noch wenig mit den Texture Maps der Computerspiele zu tun. Auch in der

Filmindustrie spielt die Materialvermessung eine große Rolle. Beispielsweise erfassen spezielle Scanner Gesichter, das so gewonnene Modell enthält alle Informationen über die Reflexionseigenschaften der Haut und kann in virtuellen Umgebungen beliebig neu beleuchtet werden.

**Spektrum:** Hard- und Software entwickeln sich also gemeinsam?

**Behr:** Die GPU avanciert vom reinen Grafikbeschleuniger zu einem programmierbaren Streaming-Koprozessor, der Anteil der Spezialhardware wird künftig abnehmen. Schon bald könnte die Beleuchtung dynamischer Szenen auch in sehr interaktiven Anwendungen mit allen Beleuchtungseffekten weitgehend korrekt durchgeführt werden.

**Stork:** Interessant ist, dass die Wirklichkeitstreue physikalischer Effekte dabei immer mehr zunimmt. Wenn ein virtueller Akteur – ob in einem Spiel, Film oder einer entsprechenden Anwendungssimulation – seinen Arm in eine Flüssigkeit eintaucht, dann verdrängt er sie und löst Wellen aus, seine Kleidung wird nass und verändert ihr Erscheinungsbild. All das sind Phänomene, die heute noch eine computergenierte Szene künstlich wirken lassen, aber das dürfte sich im Lauf der nächsten Jahre ändern.

Das Interview führte Redakteur **Klaus-Dieter Linsmeier**.

FRAUNHOFER IGD, MIT FROIL. GEN. VON ITALDESIGN GUGLIARDO



Designsimulation mit physikalisch korrekten Lichteffekten: Die Spiegelungen wurden hier mittels Raytracing berechnet, die weichen Schatten mit dem im Interview beschriebenen PRT-Verfahren.

Viele Effekte erfordern ein mehrstufiges (Multipass-) Rendering. Im finalen Bild werden die Informationen der verschiedenen Schritte kombiniert. Das Bild oben links ist das Ergebnis einer Tiefenberechnung der Szene, wobei ein spezialisierter Algorithmus zur Bestimmung von Schatteninformation verwendet wurde. Oben rechts sieht man diffuse Farben ohne Schatten. Das Bild unten links ist eine Kombination aus den beiden ersten, das unten rechts wurde zusätzlich durch Beleuchtungseffekte wie Glanz verbessert.



MIT FROIL. GEN. BEF. CRYTEK GMBH

Lichtbündelungen (fachlich Kaustiken) entstehen, wenn Licht reflektiert (links) oder gebrochen wird (rechts), sich verstärkt oder gegenseitig auslöscht. Dabei entstehen exotische Formen und Farben, die der Betrachter vielleicht nur unbewusst wahrnimmt.



MIT FRIEDRICH VON TOMAS AKENINE-MÖLLER



**Henrik Wann Jensen** (links) lehrt Computergrafik an der University of California in San Diego. Er forscht dort zur Synthese realistisch wirkender Bilder. **Tomas Akenine-Möller** lehrt Computerwissenschaft an der Universität Lund (Schweden) und arbeitet für das Unternehmen Intel. Seine Spezialgebiete sind Computergrafik und Bildverarbeitung.

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

**Akenine-Möller, T. et al.:** Real-Time Rendering. A. K. Peters Ltd., Natick, Massachusetts 2008.

**Jensen, H. W.:** Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping. A. K. Peters, Natick, Massachusetts 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1037421](http://www.spektrum.de/artikel/1037421).

schon zu sagen, welche Anforderungen in zehn Jahren an Spiele und Echtzeitgrafik gestellt werden? Zudem mögen 16 Strahlen pro Pixel noch immer nicht genug sein, um alle Beleuchtungseffekte für ein fotorealistisches Raytracing zu erfassen. Auf absehbare Zeit dürfte deshalb die Kombination von Rasterisierung und Raytracing die besten Ergebnisse in der Echtzeitanwendung liefern. Dabei steuert Erstere die Informationen bei, welche Dreiecke auf dem Bildschirm sichtbar sind und welche Eigenschaften sie haben, das Raytracing berechnet die Beleuchtung inklusive Reflexion und Brechung.

### Realistische Echtzeitsimulation transluzenter Haut

Auch Pixar verwendet eine hybride Rendering-Technik, das vom Pixar-Vorläufer Lucasfilm's Computer Graphics Research Group entwickelte Reyes-Verfahren (eine Abkürzung für *renders everything*). Eine Szene wird zur Laufzeit in pixelgroße Dreiecke oder Vierseiter zerlegt (Mikropolygone), komplexe Geometrieeffekte lassen sich dann mittels eines Verfahrens namens Displacement Mapping erzeugen. Wie beim Bump Mapping kommt eine Textur zum Einsatz, die in Graustufen ein Höhenprofil kodiert. Nur wird sie nicht einfach auf die Oberfläche projiziert. Stattdessen berechnet ein Algorithmus daraus Höheninformationen des Oberflächenprofils und speichert sie in der Height Map.

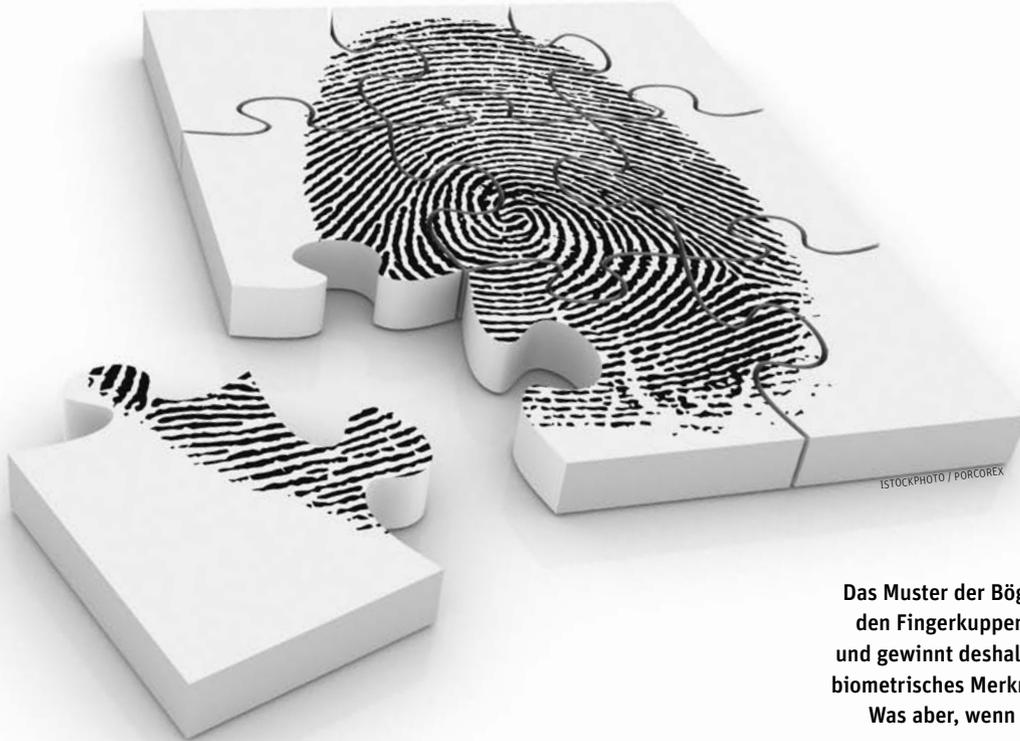
Gegebenenfalls wird die Geometrie noch durch zusätzliche Elemente verfeinert, anschließend werden die betreffenden Gitter-

punkte gemäß einer Height Map ihrer Höhe entsprechend angehoben. Statt nur den Anschein einer Topografie zu erwecken, entsteht diese tatsächlich. Ein derart modifiziertes Objekt lässt sich also auch von der Seite noch betrachten, ohne den Eindruck winziger Unebenheiten zu verlieren. Eine sehr effektive Technik, um beispielsweise Hautporen darzustellen. Um zudem komplexe Beleuchtungseffekte zu berücksichtigen, kombiniert man dieses Mikropolygon-Rendering mit Raytracing. Allerdings muss Pixar keine Echtzeitanforderungen erfüllen, obgleich natürlich in der Filmindustrie Zeitgewinn ebenfalls einiges an Geld wert ist.

Deshalb behelfen sich Trickfilmstudios ebenso wie Computerspiele-Entwickler gern auch mit Tricks, um über die Schwächen von Hard- und Software hinwegzutäuschen. So wie das Bump Mapping Unebenheiten nur vortäuscht, gelang es beispielsweise NVIDIA unlängst, die Transluzenz der Haut – ein Teil des Lichts dringt ein und wird an tiefer liegenden Hautschichten gestreut – mit raffinierten Filtertechniken so täuschend zu imitieren, dass nur wenige Experten einen Unterschied zu Bildern erkannten, die aufwändig mit Raytracing berechnet worden waren. Leider ist jeder Trick auf eine bestimmte Aufgabe zugeschnitten, und selten funktioniert der eine gut mit anderen zusammen. Und darin liegt letztlich der Charme des Raytracing: Sollen weitere Beleuchtungseffekte berücksichtigt werden, bringen die Algorithmen einfach ein paar weitere Lichtstrahlen ins Spiel. ◀

# Können sich Fingerabdrücke verändern?

Die amerikanische Wissenschaftsjournalistin Katherine Harmon befragte Experten.



**Das Muster der Bögen und Wirbel auf den Fingerkuppen ist stets einmalig und gewinnt deshalb als individuelles biometrisches Merkmal an Bedeutung. Was aber, wenn es verloren ginge?**

Wer mit bloßen Fingern einen Gegenstand berührt, hinterlässt eine Spur. Denn das Rillenmuster auf den Fingerkuppen, genauer gesagt die Endungen und Verzweigungen der Papillarleisten der Haut, überträgt wie ein Stempel den stets vorhandenen Film aus Wasser und Fett auf die Oberfläche. Und dieser Abdruck lässt sich sichtbar machen und abnehmen.

Schon seit dem 19. Jahrhundert dient diese Technik dazu, Personen zu identifizieren. Auch wenn neuerdings kritische Stimmen bemängeln, dass die theoretischen Grundlagen der so genannten Daktyloskopie (nach griechisch *daktylos* = Finger) wissenschaftlich nicht bewiesen sind, zweifelt niemand daran, dass die Methode sehr verlässlich ist. Denn das Muster, das sich beim Fingerwachstum ausbildet, scheint genetisch als auch von Umwelteinflüssen bestimmt zu sein – es unterscheidet sich sogar bei eineiigen Zwillingen.

Fingerabdruckscanner kommen auch in der Zugangskontrolle in Mode, ersetzen beispielsweise die Passworteingabe bei Computern; seit Ende 2007 werden in deutschen Reisepässen Fingerabdrücke elektronisch gespeichert. Dass dieses Muster aber nicht ein Leben lang erhalten bleiben muss, berichtete ein Onkologe im Mai 2009: Bei der Einreise in die USA war ein Patient von ihm vorläufig festgenommen worden, da ihm die Beamten keine Fingerabdrücke abnehmen konnten – der Mann besaß keine.

Es handelte sich um eine bis dahin wenig bekannte Nebenwirkung des Wirkstoffs Capecitabin, der beispielsweise bei Dickdarm- oder Magenkrebs eingesetzt wird. Zu den unange-

nehmen Begleiterscheinungen gehört eine als Hand-Fuß-Syndrom bezeichnete Entzündung der Haut von Handflächen und Fußsohlen. Schmerzhaftes Schwellen und Taubheitsgefühle gehören zu den häufigen Symptomen, in schweren Fällen können sich sogar Hautschichten ablösen – und dabei gehen Papillarleisten verloren.

Laut Edward P. Richards, Leiter des Studiengangs für Medizinrecht an der Louisiana State University, können aber auch schon Ausschlag oder Hautkontakt mit Giftpflanzen die Handrillen vorübergehend zerstören. »Allerdings erneuert sich die Haut gewöhnlich sehr schnell, solange im Gewebe kein größerer Schaden entstanden ist.«

Der US-amerikanische Forensiker Kasey Wertheim kennt aus der täglichen Praxis weitere Möglichkeiten: Maurer, die mit ungelöschtem Kalk und rauem Stein arbeiten, weisen oft keine intakten Papillarleisten auf, ebenso Bürokräfte nach einem Tag, an dem sie nur Papiere sortiert haben. Des Weiteren hinterlassen alte Menschen oft kaum erkennbare Abdrücke, denn nachlassende Hautelastizität lässt die Rillen ihrer Fingerkuppen breiter und flacher werden.

Verbrennungen, Verätzungen und mechanische Verletzungen könnten die Rillenmuster zwar unwiederbringlich zerstören, so Wertheim. Allerdings seien, wenn tatsächlich keine intakten Hautreste mehr übrig bleiben, die dabei entstehenden Narben meist so einzigartig, dass sie es gleichfalls ermöglichen, einen Menschen zu identifizieren. Ganz so einfach lässt sich dieses Instrument der Kriminalistik also nicht aushebeln.

## Haben auch Sie eine Frage zur Wissenschaft im Alltag?

Dann schreiben Sie an [redaktion@spektrum.com](mailto:redaktion@spektrum.com)

## Die Evolution der Evolution

Ein anspruchsvoller Sammelband folgt dem Zentralbegriff der Biologie von den historischen Anfängen bis zu den jüngsten Verzweigungen.



» Evolution« ist ein sehr fassettenreicher Begriff, vor allem wenn man ihn nicht auf die Entstehung der biologischen Arten beschränkt. Die Akademie der Wissenschaften in Göttingen hat zusammen mit der Universität im Wintersemester 2007/2008 eine Ringvorlesung mit diesem Generalthema veranstaltet. Im vorliegenden Buch sind die Beiträge von 17 Wissenschaftlern aller Couleur versammelt, darunter Prominente wie Manfred Eigen, Bert Hölldobler und Friedemann Schrenk. Wie der kreativistisch anmutende Untertitel »Zufall und Zwangsläufigkeit der Schöpfung« schon andeutet, versuchen etliche Autoren auch Brücken zu den traditionellen – und durch die Evolutionstheorie heftig angefochtenen – religiösen Vorstellungen zu bauen.

Nur mühsam lässt sich die Themenvielfalt in drei große Gruppen zusammenfassen: die Evolution der Evolutionsforschung selbst, kontroverse Evolutionstheorien und die Auseinandersetzung mit den molekularen Hintergründen genetischer Vielfalt. Drei Beiträge seien exemplarisch herausgegriffen.

Rainer Willmann, Professor für Zoologie in Göttingen, vermittelt in seinem Aufsatz

eindrücklich, auf welche Weise Darwins Evolutionstheorie nach 1859 unterschiedliche Weltanschauungen ins Wanken gebracht hat. »Schönheit liegt im Auge des Betrachters« und nicht im schönen Gegenstand selbst, sagt das Sprichwort – und wird von Darwins Theorie der sexuellen Selektion relativiert. In ihrer Ausprägung als sexuelle Attraktivität ist nämlich Schönheit sehr wohl »etwas Objektives«, nämlich »ein Satz von Eigenschaften, der innerhalb der ganzen Art als attraktiv, als schön gilt«.

Eine hohe, durch sorgfältige Recherche erreichte Informationsdichte erwartet den Leser insbesondere im zweiten Teil dieses Aufsatzes, in dem Willmann detailliert den historischen Weg bis hin zur darwinschen Evolutionstheorie darstellt. Sein Szenario umfasst chronologisch Darwins geistige Vorläufer, Ideengeber und Korrespondenzpartner einschließlich Originalzitate. Der Autor bekennt sich klar zur Evolutionstheorie als einer der wenigen, die »als wahr akzeptiert« werden – und vermeidet mit dieser zurückhaltenden Formulierung jeden Anschein eines unzulässigen Anspruchs auf absolute Wahrheit.

Willmann geht auch auf den Missbrauch der Evolutionstheorie in Form von Sozialdarwinismus, Rassismus und den Vorstellungen von der Minderwertigkeit der Frau ein – und schließt mit dem unerwarteten, aber seine Gedanken logisch abrundenden Fazit, dass wir Menschen die Einzigen sind, die es in der Hand haben, die biologische Vielfalt zu gefährden oder zu erhalten.

Einem völlig anderen Gebiet widmet sich der Münchener Biochemiker Günter Wächtershäuser, im Hauptberuf Patentanwalt. Er stellt seine »Eisen-Schwefel-Theorie« zur Entstehung des Lebens vor, einen Gegenentwurf zu der bislang verbreiteten Vorstellung, nach der durch Anreicherung organischer Moleküle in einer »Ursuppe« ein hochmolekularer, zur Selbstreplikation fähiger »Ur-Organismus« entstanden sei. Wächtershäuser postuliert einen »Pionier-Organismus«, ein wesentlich einfacher gebautes Verbundsystem aus einem »anorganischen Unterbau« mit aufgelagertem »organischem Überbau«. Demnach wäre die frühe biochemische Evolution vornehmlich auf der Basis von anorganischen Katalysatoren abgelaufen. Es ist die Auseinandersetzung mit einer solchen Alternativerklärung, die dieses Kapitel so reizvoll macht.

Eher traditionell beginnt Werner Arbers Aufsatz über die molekularen Ursachen von Evolution, in dessen Fokus genetische Vielfalt und Biodiversität stehen. Der Autor, emeritierter Professor für molekulare Mikrobiologie in Basel, beginnt mit lehrbuchmäßig aufbereitetem Hintergrund- und Basiswissen zu den Evolutionsfaktoren Mutation, Selektion und Isolation. Bei diesen »Eckpfeilern« findet zunächst der eigentliche »Motor der Evolution«, die Rekombination, noch keine Berücksichtigung, wird aber umso ausführlicher in den Folgekapiteln analysiert, die sich vornehmlich mit Erkenntnissen aus der mikrobiellen Genetik befassen.

Im Schlusskapitel skizziert Arber »Wege, die zu einem Einvernehmen über unser Verständnis der Entwicklung der Vielfalt des Lebens ... führen können«, und zwar zwischen der Wissenschaft und religiösen Glaubensrichtungen sowie traditionellen Weltanschauungen, wobei er die Kernfrage nach dem Ursprung des Lebens ausdrücklich ausklammert. Das ist alles ohnehin recht inhaltsschwer; obendrein macht der Autor

**Das Wandelnde Blatt zählt zu den zahlreichen Stab- und Gespenstschrecken, die im Lauf der Evolution ihre Flügel verloren haben.**





**Schönheit – hier der männlichen Paradiesvögel – ist objektiv, wenn sich die weiblichen Paradiesvögel darüber einig sind.**

durch eine umständliche Schreibweise mit einem Übermaß an Füllwörtern das Lesen zusätzlich mühsam. Seine Wertschätzung für die theologischen Schöpfungsmythen fasst er in die treffenden Worte: »Kurz gesagt, die permanente Schöpfung mittels biologischer Evolution ist Gott ein wichtiges Anliegen, er liebt sie als Quelle der biologischen Vielfalt.«

In fast allen Aufsätzen erleichtern Grafiken und Fotos das Verständnis und erfüllen damit ein dringendes Bedürfnis. Die

vorliegende Textsammlung ist nämlich keine leichte Lektüre »zur geistigen Entspannung zwischendurch«. Vielmehr verdient jeder Beitrag ungeteilte Aufmerksamkeit und Konzentration.

*Christiane Högermann*

Die Rezensentin ist in der Erwachsenenbildung tätig und unterrichtet Biologie und Französisch am Abendgymnasium Sophie Scholl in Osnabrück.

Norbert Elsner, Hans-Joachim Fritz, Stephan Robbert Gradstein, Joachim Reitner (Hg.):

**Evolution**

Zufall und Zwangsläufigkeit der Schöpfung

Wallstein, Göttingen 2009.

462 Seiten, € 28,80

**PHYSIK**

## Die theoretische Physik – kompletter Blödsinn?

Ein Physiker findet starke Worte gegen alles, was den modernen Theoretikern lieb und teuer ist.

Dieses Buch ist in einem renommierten, seriösen Verlag erschienen. Man muss das betonen, denn was Alexander Unzicker, studierter Physiker und Gymnasiallehrer in München, in Richtung moderner theoretischer Physik an Verbalinjurien abfeuert, will auch von Freunden klarer Worte erst mal verkräftet werden. Da werde »viel Lächerliches unter dem Namen der Physik« feilgeboten, die sich in »abstrusen Konstrukten verloren« habe und »wirres Zeug über Phantasie-Universen« erzähle. Es sei beispielsweise albern anzunehmen, dass die Stringtheorie, deren Geltungsbereich noch unterhalb der Planck-Länge von  $10^{-35}$  Meter liegt, jemals experimentell überprüft werden kann. Die Konstruktion der Planck-Länge selbst sei möglicherweise »kompletter Blödsinn«, da sie auf der Gravitationskonstanten aufbaue, an der »etwas faul« sei.

Und so geht es weiter: Der »Large Hadron Collider« in Genf könne sich als letztlich nutzloses Großspielzeug erweisen – so wie sich schon jetzt herausgestellt habe, dass die Theorie der kosmischen Inflation und die Stringtheorie mit ihren »Extradimensionen«, »Branen« und »Antibranen« in höherdimensionalen Räumen nichts weiter seien als »Geschwätz« jenseits aller experimentellen Überprüfbarkeit. Ihren Vertre-

tern, diesen »Karrieretypen«, die an »Realitätsverlust« und »Wahnvorstellungen« litten, solle man am besten einen Arzt schicken, weil bei ihnen »alle Sicherungen durchgeknallt« seien.

Und so geht das noch 300 Seiten weiter! Ist da vielleicht eher der Autor durchgeknallt als die Opfer seines Verbalfurors? Nein. Das frech, ja giftig formulierte Buch hat das Lektorat ganz zu Recht ohne inhaltliche Beanstandung passiert. Was Unzicker schreibt, hat Hand und Fuß, ist fundiert, informiert und zeugt von großer Belesenheit.

Auf Unzickers Negativliste ganz oben steht die Stringtheorie, genauer: ihre inzwischen  $10^{1500}$  Versionen. (Unzicker verwendet diese absurd hohe Zahl an Stelle der üblichen, geringfügig weniger absurden  $10^{500}$ .) Seit 30 Jahren erzählten uns die Stringtheoretiker, dass sie kurz vor dem Durchbruch seien und, wenn nicht gleich die Weltformel, so doch einen fundamentalen Beitrag zu einer quantenfeldtheoretischen Erklärung der Gravitation leisten könnten. Nur fehlt, so Unzicker, bis heute jede experimentelle Bestätigung auch nur einer der Hypothesen der Theorie, die immerhin  $10^{1500}$  Möglichkeiten hat, irgendetwas, was auch immer, vorherzusagen. Da der Gültigkeitsbereich der Theorie, wie gesagt, im Bereich der Planck-Länge liegt, sei



auch nicht zu befürchten, dass sich an dieser Situation in absehbarer Zeit etwas ändere.

Ebenso frei von jedem empirisch-experimentellen Nachweis ist nach Unzicker die ominöse Dunkle Materie: »Seit 75 Jahren sucht man erfolglos nach der Dunklen Materie ... und hat infolgedessen nicht die geringste Ahnung, woraus sie bestehen könnte. Aber trotzdem fangen wir an, sie in Untersorten zu klassifizieren.« Analoges gelte für die Dunkle Energie, die »1998 eingeführt« wurde, weil man sich das, was man beobachtete, anders nicht mehr erklären konnte. »Einführen« ist übrigens eine nette Untertreibung; immerhin verzwanzigfach sich dadurch der Energie- und Materiegehalt des Weltalls.

Die Einführung von immer mehr und immer abstruseren Parametern, die durch kein Naturgesetz fundiert und durch kein Experiment bestätigt sind, in weiten Teilen der theoretischen Physik gleiche mehr und mehr dem Anhäufen von Epizyklen im ptolemäischen geozentrischen Weltbild. Und das treffe nicht nur beim Standardmodell der Kosmologie, sondern auch bei dem der Teilchenphysik zu. Dort sei man sogar gerade dabei, nicht nur ein, zwei neue freie Parameter einzuführen, sondern in Gestalt der Theorie der »Supersymmetrie« den Satz der bereits vorhandenen freien Parameter der Teilchenphysik glatt zu verdoppeln.

Was Unzicker als (halbwegs) gesichert erachtet, ist der Kern der klassischen Physik, die klassische Quantenmechanik und -elektrodynamik sowie die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (SRT und ART). Er glaubt jedoch, dass die Naturgesetze von der »kosmologischen Evolution«

nicht ausgenommen sind – und damit die Gravitationskonstante auch nicht. Das ist auch meine Überzeugung. Alles andere würde einen platonischen Naturgesetzeshimmel voraussetzen, der schon immer und ewig existierte und existieren wird.

Nur Einsteins SRT und ART nimmt Unzicker von dieser Wandelbarkeit zunächst aus. Kritiker der Relativitätstheorie fertigt er in der ihm eigenen charmanten Art ab: »Einstein ist nun mal eine Ikone ..., die fast magisch pinkelnde Hunde anzieht.«

Plötzlich lesen wir aber doch von einem Problem: »Heute nennt man es Flachheitsproblem, da der merkwürdige Grenzfall in der allgemeinen Relativitätstheorie durch das Verschwinden einer raumzeitlichen Krümmung beschrieben wird.« Indem die ART auf der riemannschen Differenzialgeometrie aufbaut, verkörpert sie ein modelltheoretisches Vorurteil zu Gunsten einer gekrümmten Raumzeit. Je nachdem, welche konkreten Werte (etwa der Materiedichte des Weltalls) man einsetzt, ergeben die Feldgleichungen der ART Lösungen mit den unterschiedlichsten Krümmungen der Raumzeit. Nun hat sich die Natur, wie die Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung ergeben hat, aber ausgerechnet für ein brettflaches Universum entschieden. Interessant!

Wir lesen weiter: »Wenn nach dem Äquivalenzprinzip aber Schwerfeld und Be-

schleunigung gleich zu behandeln sind, dann müssten in einem Gravitationsfeld ruhende Ladungen »einfach so« Energie abstrahlen – ein nicht ganz geklärtes Problem.« In der Tat.

Schließlich lesen wir: »Einsteins Relativitätstheorie (beruht) gerade darauf, dass man mit keinem Experiment ... unterscheiden kann, ob man »ruht« oder sich mit gleichmäßiger Geschwindigkeit bewegt. Seit Kurzem gibt es dieses Experiment doch. Die Signale des Mikrowellenhintergrunds sagen ganz klar, dass wir nicht ruhen, sondern uns mit 370 Kilometern pro Sekunde in Richtung des Sternbilds Becher bewegen ... Fakt ist, dass der kosmische Mikrowellenhintergrund ein absolutes Bezugssystem definiert.« Ist Unzicker klar, was er da geschrieben hat? Ob Einstein je seine SRT und ART ausformuliert hätte, wäre damals ein »Äther« namens kosmische Hintergrundstrahlung als absolutes Bezugssystem bekannt gewesen?

Das Buch ist eine intelligent ausformulierte Provokation, die man gelesen haben sollte. Es tut regelrecht gut, von einem Physiker die massiven Zweifel bestätigt zu bekommen, die wohl jeden kritischen, dem erkenntnistheoretischen Realismus und Physikalismus verpflichteten Geist befallen, wenn er die hier thematisierten Entwicklungen der theoretischen Physik betrachtet. Diese Zweifel ergeben sich auch aus meiner

distanzierten, von der Sprach- und Naturphilosophie geprägten, aber, mit Verlaub, naturwissenschaftlich wohl informierten Perspektive. Fast alles, was Unzicker ganz zu Recht kritisiert, ist meines Erachtens nackte Metaphysik in des Wortes direkter Bedeutung.

Aber auch etwas Unbehagen bleibt nach der Lektüre zurück. Ich hätte mir beispielsweise gewünscht, etwas mehr zu erfahren zu den drei genannten Problemen der ART. Und unbefriedigend ist auch, dass Unzicker Einstein zunächst *expressis verbis* zur »Ikone« stilisiert und SRT wie ART für sakrosankt erklärt – und damit dem grundlegenden wissenschaftlichen Falsifikationsprinzip enthebt. Einstein, diesem kritischen Geist, wären darob ganz sicher die Haare noch mehr zu Berge gestanden als so und so schon. Und womöglich hätte er dem Unzicker für diese Zicke sogar die Zunge herausgestreckt.

*Egbert Scheunemann*

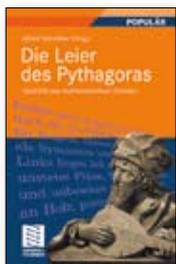
Der Rezensent, freier Publizist in Hamburg, hat Politik und Philosophie studiert und beschäftigt sich seit langer Zeit mit Erkenntnistheorie und Naturphilosophie.

Alexander Unzicker

**Vom Urknall zum Durchknall**

Die absurde Jagd nach der Weltformel

Springer, Berlin 2010. 330 Seiten, € 24,95



DICHTKUNST

## Lyrik und Mathematik – ein fruchtbares Verhältnis

Was zunächst unvereinbar erscheint, hat erstaunlich viele Berührungspunkte.

Dichtung ist der kunstvolle Ausdruck subjektiven Empfindens, Mathematik der wissenschaftliche Ausdruck höchster Objektivität. Über diesen himmelweiten Unterschied möchte Alfred Schreiber, emeritierter Professor für Mathematik und ihre Didaktik in Flensburg, auch gar nicht hinwegtäuschen. Vielmehr geht es ihm mit seiner Anthologie darum, dass Inhalte und Methoden dieser Wissenschaft sowie Reflexionen über sie die Lyrik beeinflusst haben – zum Beispiel über den »Rückgriff auf Elemente aus der mathematischen Sprach- und Vorstellungswelt« oder »die Nutzung von Strukturen, Schemata und Ob-

jekten der Mathematik als methodische Hilfsmittel.«

Die Nutzung der Strukturen ist im ersten Kapitel »Zählen und Zahlen« noch wenig tiefsinnig (»1 2 3 / ich bin ein Ei«, Rafael Al-

### ORT DER WAHRHEIT

*Es meinte ein Küster aus Chur,  
 $\pi$  sei 3, und bestand darauf stur.*

*Da riet man ihm dringend,  
zu sagen, dass zwingend  
in Chur sei dies zutreffend nur.*

Richard Erbefels

berti). Der Kreis hingegen, Thema des zweiten Kapitels, ist sowohl mathematisches Objekt mit vielen, auch ästhetischen Eigenschaften als auch beliebte Metapher in der Dichtung (»Die Ewigkeit ist wie ein Kreis«, Angelus Silesius). Im dritten Kapitel »Rätselpoesie« geht es zum Beispiel um poetische Gleichnisse. Der vierte, logisch wie literarisch anspruchsvolle Teil »Selbstbezüglichkeit« befasst sich inhaltlich mit Reflexionen über die Mathematik, dazu mit Texten, die einen Sachverhalt erschaffen, den sie selbst sprachlich ausdrücken (»ipsografische Texte«, zum Beispiel »Dieser Text besteht aus sechs Worten«).

Der Mathematiker Jakob Bernoulli wird selbst zum Dichter, indem er die Grenzwertbestimmung einer unendlichen Reihe zum Gegenstand einer theologischen Spekulation macht: »Zu schaun im Unermessnen das Kleine / Und im Kleinen zu schaun ihn, den unendlichen Gott.« Johann Wolfgang von Goethe preist die Lehre von den Längen und Winkeln in den höchsten Tönen: »Doch erst

zur Tat erregt den tiefsten Sinn / Geometrie, die Allbeherrscherin: / Sie schaut das All durch Ein Gesetz belebt, / Sie misst den Raum und was im Raume schwebt.« Und Novalis fasst gar die Mathematik als Spielart der Romantik auf. In Anlehnung an Fichte geht er davon aus, dass unser Intellekt die Gegenstände unserer Betrachtungen selbst erzeugt: Der Begriff der Anschauung wird daher verstanden als »schaffende Betrachtung, ... wo Hervorbringung und Wissen in der wundervollsten Wechselverbindung stehen«.

So wie sich Poesie aus der Vorstellungswelt entlehnt, so konstruiere die Mathematik ihre Gegenstände ohne Rückgriff auf Empirisches. Dies deutet an, dass die Mathematik nicht nur ihren Beitrag zur Harmonisierung der in »Vernunft« und »Gefühl« unterteilten Welt leisten soll, sondern als gutes Beispiel

**DER MENSCH BRAUCHT – OHNE SICH ZU SPÜTEN –**  
Zum Kilometer zwölf Minuten.

Die Wanderratte läuft so weit  
In ungefähr derselben Zeit.

Da nun genannte Wanderratte

Bis dato stets vier Beine hatte,

Wie schnell läuft da ein Tausenfuß? –

Ich weiß es wirklich nicht. Weißt Du's?

Joachim Ringelnatz

vorangeht: »Mathematik = Magie« und »Alle Wissenschaften sollen Mathematik werden!«

Wollte man alle Gedanken niederschreiben, die in dieser Sammlung – explizit oder zwischen den Zeilen – angesprochen werden, müsste man vermutlich ungleich mehr Seiten füllen. Der Zugang zu den Gedichten ist nicht immer leicht, doch Schreiber gibt zu jedem Teil eine Einleitung, viele Interpretationsansätze sowie Zusatzinformationen im Anhang. Diese sind aber meist recht knapp und wissenschaftlich formuliert. Während das Layout die anspruchsvolle Sammlung noch veredelt, erinnert der Einband eher an ein Studienbuch.

In der Tat erhebt die Sammlung den Anspruch, auch einen Beitrag zum fächerübergreifenden Unterrichten leisten zu können. Wie dieser Anspruch einzulösen wäre, erscheint weniger klar. Das Buch wird wohl vor allem den geneigten, den mathematisch, philosophisch oder literarisch nicht unbedarften Leser ansprechen. Dieser wird die sorgfältig ausgewählten und eingeleiteten Gedichte schätzen.

Alfred Schreiber hat mit seinem Unternehmen, Lyrik nach mathematischen Einflüssen abzusuchen, einen Spagat unternommen. Ihm ist ein wertvolles interdisziplinäres Kunststück gelungen.

Roland Pilous

Der Rezensent studiert Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin. Dort beschäftigt er sich vornehmlich mit den Grundlagen topologischer Räume.

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

Alfred Schreiber

**Die Leier des Pythagoras**

Gedichte aus mathematischen Gründen

Vieweg Teubner, Wiesbaden 2010.  
244 Seiten, € 19,90

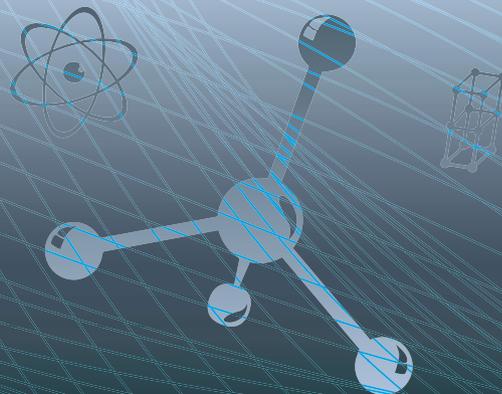
Anzeige

# 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
- unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

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

## GEOGRAFIE

# Reise-, Natur- und Kulturführer in einem

Der Rheinländer Bruno P. Kremer weiß über Europas bekanntesten Fluss immer noch Neues und Überraschendes zu erzählen.

**B**runo P. Kremer lehrt seit 1980 am Institut für Biologie und ihre Didaktik der Universität Köln und ist seit Langem bekannt als Autor zahlreicher Bücher zum Fach. Mit »Der Rhein – Von den Alpen bis zur Nordsee« bietet er eine »Freizeitlectüre für Naturfreunde« und schafft es, anspruchsvolle Themen wie Hydrologie und Geologie, Botanik und Zoologie anschaulich und leicht verständlich darzustellen. So umfassend, unterhaltsam und allgemein bildend ist keines der vielen anderen Werke zum Thema.

Kremer beginnt mit einem kulturhistorischen Überblick. Schließlich ist der Rhein kein deutscher, sondern ein europäischer

den verschiedenen Abschnitten des Rheins. Dabei bringt er immer wieder verblüffende Fakten: So sammelt der Rhein bis zur Mündung in den Bodensee das Schmelzwasser von etwa 150 Alpengletschern ein. Die Größe des Bodensees veranschaulicht Kremer mit dem Hinweis, dass man von Bregenz aus die Dächer von Konstanz nicht erkennen kann, weil sich das Bodenseewasser unterwegs rund 80 Meter hoch aufwölbt; das andere Ufer liegt unter dem Horizont.

Wie eine Landschaft durch geologische Veränderungen entsteht und wie sie durch den Menschen modifiziert wird, sieht man am besten am Beispiel des Oberrheingrabens. Zwischen Basel und Mainz durchströmt der Rhein einen Abschnitt des mitteleuropäischen Rifts, eines 2000 Kilometer langen Sprungs in der Erdkruste. Das bezeugen gleichartige geologische Strukturen auf beiden Seiten der Bruchkante: Vogesen und Schwarzwald sowie Pfälzer Wald und Odenwald; auch der Vulkanismus, der den Kaiserstuhl bei Freiburg erzeugt hat, ist ein Zeichen für die bewegte Erdgeschichte. Anschauliche Diagramme erleichtern das Verständnis dieser komplexen Zusammenhänge.

Bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts erstreckte sich im Oberrheingraben eine weite Auenlandschaft; der Fluss war in unzählige Seitenarme aufgefasert und Malariagebiet. Der badische Strombaudirektor Johann Gottfried Tulla (1770–1828) begann 1817 mit der Begradigung dieses Flussabschnitts, die erst 50 Jahre später abgeschlossen war. Der Oberrhein wurde so um 80 Kilometer verkürzt. Anfang des 20. Jahrhunderts konnte auf dem Wasserweg Ruhrkohle von Duisburg bis nach Basel verschifft werden.

Heute sind 95 Prozent des ursprünglichen Auenraums zerstört. Doch kleine, aber feine Naturschutzgebiete erinnern an die ehemaligen Vegetationsstrukturen. Noch heute findet man dort eine an Überschwemmungen und wechselnde Fließgeschwindigkeiten angepasste Flora und Fauna, die Kremer mit vielen Fotografien veranschaulicht. In farbig unterlegten Kästen weist er immer wieder auf Informationszentren, Führungen

in den Naturschutzgebieten, Radwanderwege, Aussichtspunkte oder Ähnliches hin.

Ganz anders präsentiert sich der Strom im nächsten Abschnitt, dem »romantischen« Mittelrhein. Hier erklärt der Autor die Geologie und Biologie des Rheinischen Schiefergebirges und die Flora und Fauna der warmen und sonnigen Trockenhänge.

Am Niederrhein hat der Fluss die Mittelgebirge endgültig verlassen und wird wieder von Rheinauen und Auenwäldern begleitet. Der Bergbau beeinflusst spürbar die Landschaft: Hier ist »Bergsenkungsgebiet«, und die Geländesenkungen erweitern die Auenlandschaft mit deutlichen Folgen für Schifffahrt und Deichanlagen. Kapitel über die Mündung in einem Delta, über Hydrologie und historische und aktuelle Aspekte der Rheinschifffahrt runden das Buch ab.

Mit dem Layout bin ich nicht immer glücklich: Die Abbildungen stehen zum Teil zu weit vom entsprechenden Text entfernt, und man muss hin und her blättern. Gut finde ich die farblich abgesetzten Informationskästen mit Exkursen oder Hinweisen auf Museen und Sehenswürdigkeiten.

Bruno P. Kremer gelingt es immer wieder, den Leser zu überraschen, zum Beispiel mit der Erklärung, wo, wie und warum zeitweilig Donauwasser in den Rhein abfließt. Indem er Ursachen und Folgen darlegt, macht er auch dem naturwissenschaftlichen Laien komplexe Zusammenhänge offenkundig. Für mich ist das Buch Reise-, Natur- und Kulturführer in einem.

Eigentlich sollte ich mich am Rhein auskennen – ich bin dort geboren, und diffuse Erinnerungen an den Heimatkundeunterricht an einer Mannheimer Grundschule blitzen zwischendurch wieder auf. Doch wie blind habe ich viele Phänomene bisher betrachtet! Mit dem hier vermittelten Hintergrundwissen kann man auf einen Blick begreifen, wie sich die theoretischen naturwissenschaftlichen Phänomene in der jeweiligen Landschaft offenbaren und welche Biotope, Pflanzen- und Tiergesellschaften sich daraus zwangsläufig ergeben.

*Ursula Loos*

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und arbeitet nach langjähriger Mitarbeit bei Spektrum Akademischer Verlag als freie Übersetzerin, Autorin und Lektorin.



**Schiffmühlen – im Strom verankerte Wassermühlen – waren am Rhein weit verbreitet, sind aber inzwischen völlig verschwunden. Das abgebildete Exemplar steht in Minden an der Weser.**

Fluss: Von der Quelle bis zur Mündung durchfließt er vier Staaten, streift zwei und empfängt Wasser aus drei weiteren. Autobahnen und Schienen folgen seinem Verlauf, Ballungsräume und Industriekonzerne haben sich an seinen Ufern angesiedelt. Trotzdem ziehen noch manche Städte, darunter Mainz und Köln, Trinkwasser aus seinem Uferfiltrat. Und vom Bodensee leitet man Trinkwasser bis nach Stuttgart, von wo es als Abwasser in den Neckar und über diesen Nebenfluss wieder in den Rhein gelangt.

Mit seiner Gliederung folgt der Autor – ausgehend von den beiden Quellgebieten –

Bruno P. Kremer

### Der Rhein

Von den Alpen bis zur Nordsee

Mercator, Duisburg 2010.

240 Seiten, € 24,80



Mehr, als das Magazin zu bieten hat: Auf [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) finden Sie Artikel, Sonderhefte und das gesamte Archiv. Und sind nur einen Klick von den Angeboten entfernt, die wir Ihnen hier auf dieser Seite vorstellen.

## FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

### »Wenn der Weiße Berg ruft«

Der Gipfel des hawaiianischen Mauna Kea gehört zu den Lieblingsorten professioneller Astronomen. Die Mauna Kea Observatories stehen aber auch Besuchern offen, die hier einzigartige Einblicke in die modernsten Sternwarten gewinnen und faszinierende Details über den 4205 Meter hohen Vulkanberg erfahren können

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

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

## FREIGESCHALTET

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

### »Lohnende Bigamie«

Die Ehe galt den Assyern als heilige Angelegenheit. Doch wer fern der Heimat Handel trieb, durfte dort einer zweiten Gattin Treue schwören. Ein Abkommen, von dem auch die Frau daheim profitierte

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

[www.epoc.de/artikel/1038854](http://www.epoc.de/artikel/1038854)

### »Im Bann des Vorurteils«

Unser Selbstbild entscheidet mit über Erfolg und Misserfolg im Leben. Nicht nur wer unsicher ist, verkauft sich häufig unter Wert – auch Klischees, die uns im Alltag begegnen, können die eigene Leistung schmälern. Laut der Kognitionsforscherin Claudia Christine Wolf von der Ruhr-Universität Bochum lautet ein möglicher Ausweg: Ändern Sie Ihren Blickwinkel!

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

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1035256](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1035256)

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

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

## spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

### Die Eroberung der Meere?

Längst leiden die Ozeane unter der menschlichen Zivilisation. Nun richten sich auch auf maritime Ressourcen wie Mineralien und Gezeitenenergie immer begehlichere Blicke. **spektrumdirekt** berichtet unter anderem über die Ölkatastrophe im Golf, Baugebiete für Menschen auf dem Meer und steigende Wasserspiegel

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

### Dem Denken zugeschaut

Immer tiefer blicken Forscher in das menschliche Gehirn. Warum beschränkt die Zahl der Hirnhemisphären die Zahl paralleler Handlungsziele? Wie bewahren Genshalter Erinnerungen? Und warum lässt ein Antipsychotikum das Gehirn in Rekordzeit schrumpfen? Lesen Sie die Antworten auf

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

## WissensLogs

Die Wissenschaftsblogs

### Wissenschaftler auf die Bühne!

Wie können Nachwuchsforscher ein größeres Publikum für ihre Arbeit begeistern? Seit einigen Jahren bieten ihnen die so genannten Science Slams dafür eine Bühne und zehn Minuten Zeit. Erlaubt ist alles, was die Zuhörer fesselt. Wie gut das funktioniert, lesen und sehen Sie bei unserem neuen Blog **Science@Stage**

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

## Spektrum in den sozialen Netzwerken



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



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



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



## International Foundation for Research in Paraplegia - IRP

Internationale Stiftung für Forschung in Paraplegie

Fondation internationale pour la recherche en paraplégie

The IRP Foundation Zurich/Geneva invites applications and nominations for the

### IRP - Schellenberg Prize 2011

The IRP - Schellenberg Prize for Research will be awarded on the basis of scientific merit to recognize recent achievements in the cellular, molecular and clinical aspects of **spinal cord development, plasticity and regeneration following lesions**.

Eligible for the Prize are young but established group leaders with outstanding achievements in experimental research related to spinal cord injury and repair.

The Prize sum of **150'000 Swiss Francs** is to be used for research purposes (personnel, equipment or supplies) and will be handed over to the winner at an award ceremony in spring 2011 in Switzerland by the IRP Foundations.

Applications should include:

- 1) description of his/her accomplishments in spinal cord research (max. 4 pages)
- 2) reprints or preprints of relevant publications
- 3) curriculum vitae and list of all publications over the last 5 years.

Applications and nominations are due by **October 1st, 2010**.

They can be sent to the address below or submitted on the website [www.irp.ch](http://www.irp.ch), where further information, including the IRP - Schellenberg Prize regulations, can be found.

**International Foundation for Research in Paraplegia - IRP,**

Internationale Stiftung für Forschung in Paraplegie Rämistrasse 5, CH-8001 Zurich. email: [info@irp-zh.ch](mailto:info@irp-zh.ch)

Fondation internationale pour la recherche en paraplégie, Rue François-Perréard 14, CH-1225 Chêne-Bourg



## International Foundation for Research in Paraplegia - IRP

Internationale Stiftung für Forschung in Paraplegie

Fondation internationale pour la recherche en paraplégie

The IRP Foundation Geneva / Zurich invites applications for

### Research Grants

in the field of

**Basic and Clinical Research on**

**CNS Regeneration / Neuroprotection and Functional Restoration**

**with special emphasis on the spinal cord.**

Funds for one or two years will be allocated up to **75'000 Swiss Francs** for one year, **150'000 Swiss Francs** for two years on the basis of scientific quality and relevance to paraplegia for research proposals studying mechanisms of injury and repair, as well as long term recovery.

Applications from start up groups are welcome.

IRP Foundation Geneva will also award one **fellowship** for up to two years to support post-doctoral research in paraplegia.

Applications will be reviewed by an international panel of basic and clinical neuroscientists.

Deadline for applications: **October 31st, 2010**

Please use the corresponding online form to submit your application on our website: [www.irp.ch](http://www.irp.ch)

For more information please contact email: [info@irp-zh.ch](mailto:info@irp-zh.ch)

## Der Dunklen Materie auf der Spur

Anfang 2011 fliegt der milliardenteure Teilchendetektor AMS (blauer Kreis) auf die Internationale Raumstation. Von dort aus wird er in der kosmischen Strahlung nach Hinweisen auf die Natur der Dunklen Materie suchen



ILLUSTRATION: NASA

### WEITERE THEMEN IM SEPTEMBER

#### Kann man Menschen unbemerkt manipulieren?

In Filme eingebendete Spots sollen die Kauflaune steigern oder das Wahlverhalten ändern. Doch so einfach lassen wir uns nicht betrügen

#### Urmenschen auf der Spur

Der Paläoanthropologe Friedemann Schrenk schildert, warum der Mensch viel früher aus Afrika ausgewandert sein dürfte als vermutet

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)



JON KRAULSE

#### Stumm, aber folgenreich

Mutationen in einem Gen können bedeutsam sein, auch wenn sie das zugehörige Protein nicht verändern. Deshalb haben sie große Bedeutung für Medizin und Biotechnologie

#### Kampf gegen Wilderer

Das illegale Schlachten afrikanischer Elefanten für den Elfenbeinexport ist heute schlimmer als in den 1980er Jahren. DNA-Analysen sollen jetzt die Herkunft der Schmuggelware klären



GETTY IMAGES / JEFF HUTCHENS