

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT



ROM  
Die mythischen  
Anfänge  
des Weltreichs

MÄRZ 2014

METEORITEN

Die ältesten Gesteine im  
Sonnensystem

LUFTSICHERHEIT

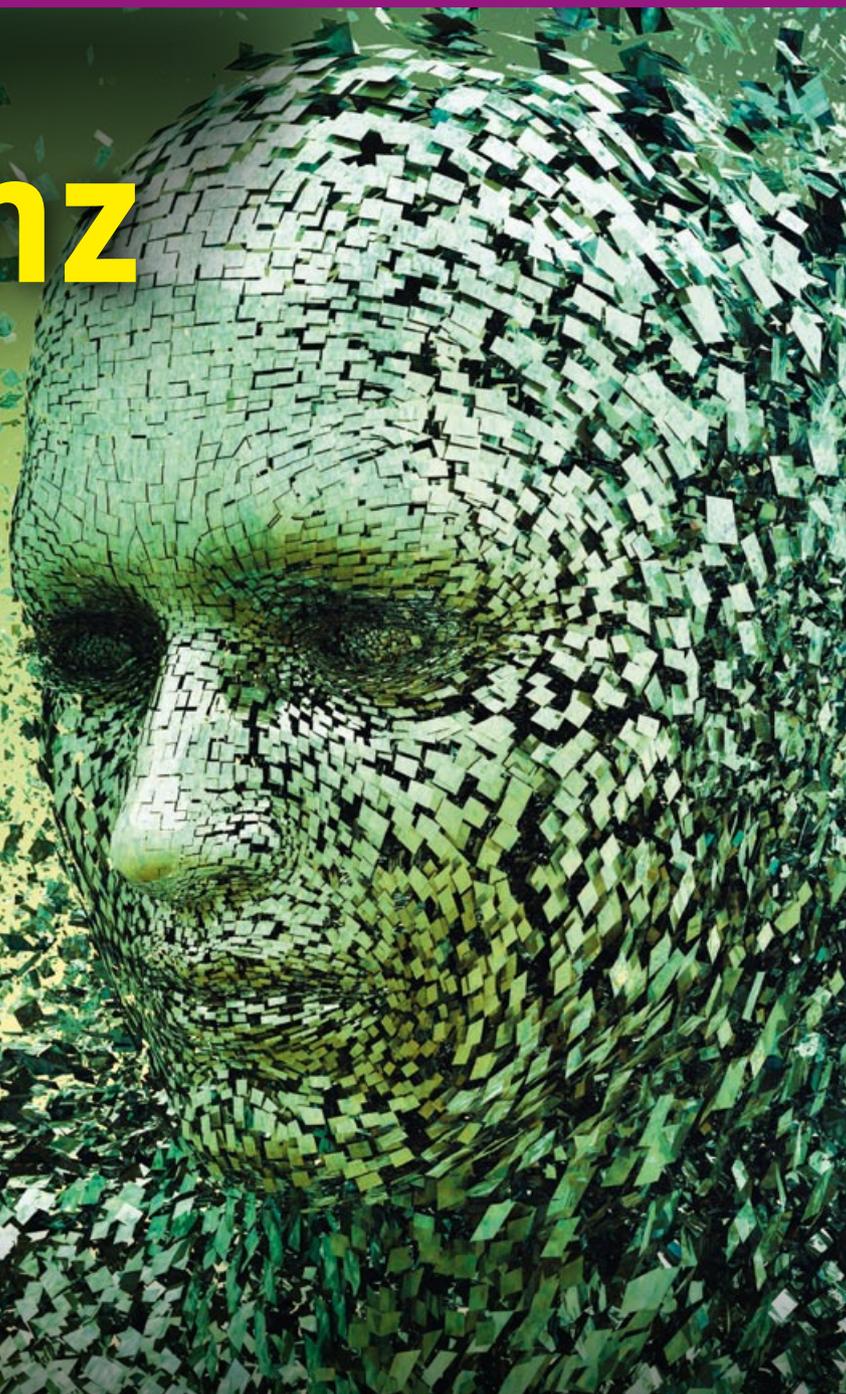
Drohnen auf Abwegen –  
ein Risiko

KOMMUNIKATION

Was Meisen sich erzählen

## Die Wurzeln der Demenz

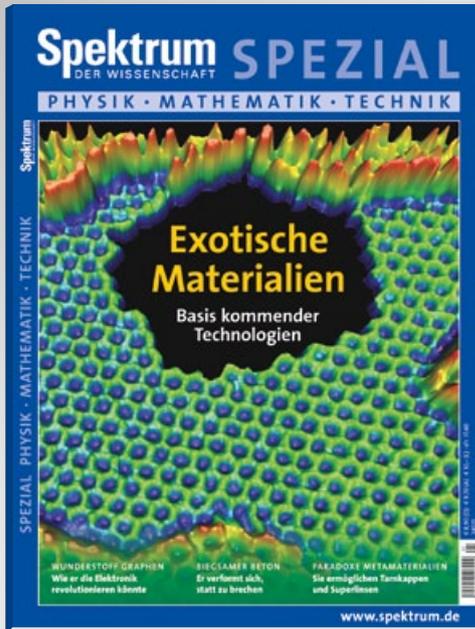
Ein molekularer  
Dominoeffekt  
verursacht Alzheimer



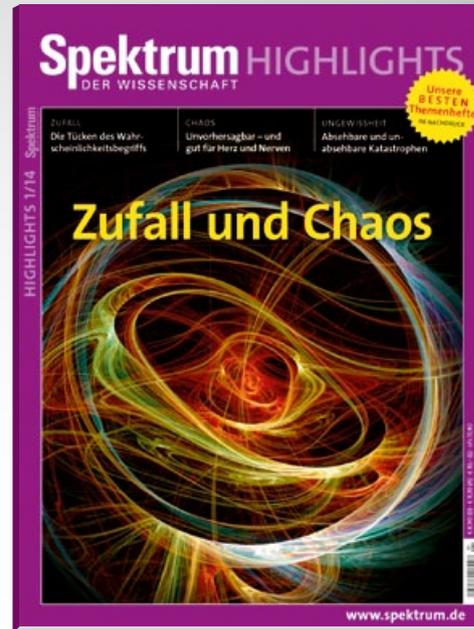
8,20 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.  
D6179E



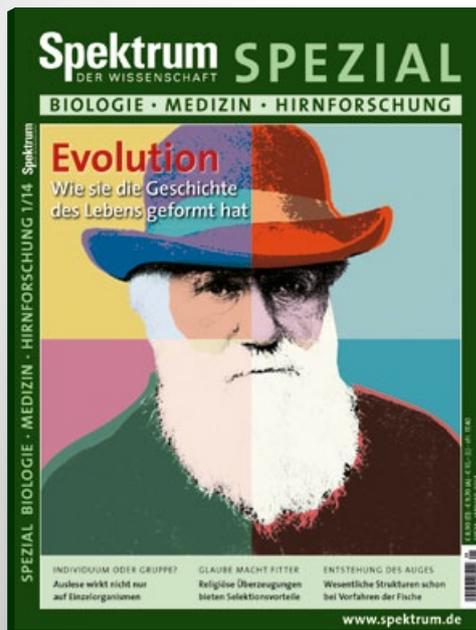
# UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Quantentheorie: Wunderstoff aus dem Bleistift • Optik: Die Superlinse • Bildgebung: Antennen und Kameras der Zukunft • Baustoffe: Biegsamer Beton • € 8,90, erscheint am 25.2. 2014



Philosophie: Zufall und Determinismus • Genetik: Die Rolle des Zufalls bei der Genexpression • Wie sieht man das Unvorhersehbare vorher? • € 8,90, erscheint am 4.3. 2014



Selektion: Missverständnisse à la Darwin • Religion: Glaube macht fitter • Entstehung des Auges • Ursuppe: Schwieriger Beginn • Fortpflanzung: Die Pioniere des Sex • € 8,90



Können Kinder schon im Bauch gefördert werden? • Wie kümmern sich Väter am besten um den Nachwuchs? • Brennpunktthema: Wochenbettdepression • € 8,90

So einfach erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**

**[www.spektrum.com/sonderhefte](http://www.spektrum.com/sonderhefte)**

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

Hier QR-Code  
per Smartphone  
scannen!





Carsten Könneker  
Chefredakteur  
koenneker@spektrum.de

## Prionen-Paradigma auf dem Vormarsch

Eine knappe Million Menschen in Deutschland leiden an Alzheimerdemenz – Epidemiologen zufolge könnte sich diese Zahl bis zur Jahrhundertmitte sogar noch verdoppeln. Angehörige und Freunde müssen dem unerbittlich fortschreitenden Gedächtnis- und Persönlichkeitsverlust der Betroffenen tatenlos zusehen, bis sie nur noch dem charakteristischen leeren Blick begegnen. Ein weiteres Kennzeichen der Erkrankung sind die berüchtigten Plaques in den Gehirnen der Patienten. Dabei handelt es sich um massenhafte Anhäufungen falsch gefalteter Amyloid-Beta-Proteine. Die Klumpen sind so groß, dass man sie unter dem Lichtmikroskop gut erkennen kann. Wo immer sie entstehen, scheinen sie die Hirnzellen zu schädigen, bis diese schließlich absterben. Der Prozess beginnt bereits viele Jahre vor dem Auftreten der ersten Symptome.

Doch wie kommt es zu der folgenschweren Verklumpung? Weltweit suchen Forscher nach der Antwort auf diese Frage. Jetzt zeichnet sich ein Paradigmenwechsel auf dem Gebiet ab, berichten Lary C. Walker von der Emory University in Atlanta und Mathias Jucker vom Hertie-Institut für klinische Hirnforschung in Tübingen in unserer Titelgeschichte ab S. 22. Sie konnten nachweisen, dass falsch gefaltete Amyloid-Beta-Proteine allein durch ihre besondere Form anderen Exemplaren dieses Eiweißes die krank machende Gestalt aufzwingen und miteinander verklumpen. Bereits kleine lösliche »Keime« deformierter Proteine in geringer Konzentration genügen, um in den Gehirnen von Versuchstieren den fatalen molekularen Dominoeffekt anzustoßen. Das bedeutet: Alzheimer breitet sich über ähnliche Mechanismen im Gehirn aus wie Prionenerkrankungen.

Prionen sind die prototypischen Beispiele für abnormal gefaltete Proteine, die andere Proteine dazu bringen, sich ebenfalls zu deformieren – und zusammenzuballen. Die »klassischen« Prionenerkrankungen wie Rinderwahnsinn und Creutzfeldt-Jakob sind ansteckend, Demenzen wie Morbus Alzheimer nach heutigem Wissensstand nicht. Dies könnte indes der einzige wesentliche Unterschied sein.

Das neue Verständnis von Alzheimer als »prionenartige keiminduzierte Proteinverklumpung« könnte dazu beitragen, die Erkrankung künftig weit früher zu diagnostizieren und möglicherweise gar ihre Entstehung zu verhindern: indem man die pathologische Kettenreaktion schon an ihrem Ausgangspunkt unterbindet. Und auch andere neurodegenerative Störungen wie Parkinson, die sich ähnlich im Gehirn ausbreiten, könnten wir bald besser verstehen und hoffentlich eines Tages auch effektiv therapieren.

Angesichts des menschlichen Leids, das alle diese Krankheiten verursachen, ist zu wünschen, dass sich die Forschung auf diesem Feld entscheidend weiterentwickelt. Denn trotz tieferer Einsicht sind wir von neuen Medikamenten leider noch weit entfernt.

Herzlich Ihr

*Carsten Könneker*

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



Roms sagenumwobene Königszeit fasziniert die Historikerin **Charlotte Schubert** von der Universität Leipzig (ab S. 52). Entstand die Tibermetropole womöglich tatsächlich in einem Gründungsakt?



Die Chemiker **Stefanie Dehnen** und **Thomas F. Fässler** befassen sich mit einer paradoxen Stoffklasse: Metalle, die zugleich Salze sind (ab S. 72). Fernziel ist die Synthese maßgeschneiderter Nanoteilchen.



Drohnen als Paketzusteller? Die Luft- und Raumfahrt-Ingenieure **Todd Humphreys** (links) und **Kyle Wesson** sind skeptisch und zeigen Sicherheitslücken auf (ab S. 82).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Dunkle Materie im Sog der Sonne • Stammzellen einfacher herstellen • Entstehung landlebender Tiere • Schmelzwasser in Grönlands Schnee • Mutationen bei Krebs • Weiße Haie werden 70 und älter

11 Bild des Monats

Hurrikan auf der Seifenblase

12 Forschung aktuell

Versinkendes Flussdelta

Die Absenkung der Küste von Bangladesch

Am Rand des Alls

Fernste Galaxien entziehen sich den Teleskopen

Spuren im Erbgut

Das Wirrwarr der Krebsmutationen lichtet sich

Künstliche Kernbase

Ein neuer Baustein verbessert den Nachweis von DNA-Sequenzen

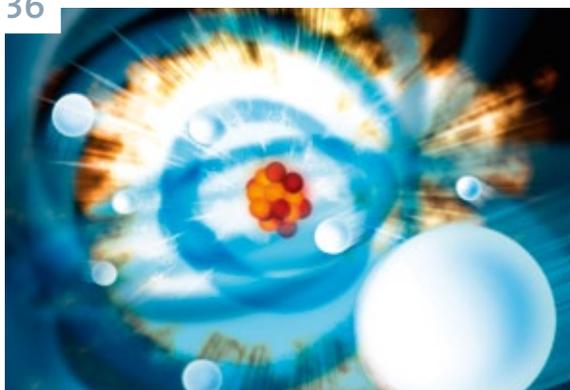
SPRINGER'S EINWÜRFE  
**Ist die Naturwissenschaft unmoralisch?**

Wer sie studiert, könnte das soziale Gespür verlieren

28



36



52



..... BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 28 Was Meisen sich erzählen

*Todd M. Freeberg, Jeffrey R. Lucas und Indriķis Krams*

Manches an den komplexen »Chick-a-dee«-Rufen von Meisen erinnert an Merkmale der menschlichen Sprache.

..... PHYSIK & ASTRONOMIE

36 Extreme Atome

*Richard van Noorden*

Physiker manipulieren Atome schon fast nach Belieben.

SCHLICHTING!

42 Lass knacken!

*H. Joachim Schlichting*

Flüssigkeiten können aufmucken: durch geräuschvoll implodierende Gasbläschen.

▶ 44 Urtümliche Meteoriten

*Alan E. Rubin*

Unter dem Mikroskop enthüllen die ältesten Gesteine im Sonnensystem die Geschichte eines staubigen Anfangs.

..... MENSCH & KULTUR

▶ SCHWERPUNKT: ITALIKER

52 Brudermord und Fremdherrschaft

*Charlotte Schubert*

Was verraten Mythen über die Gründung Roms?

60 Das Volk des Spechtes

*Alessandro Naso*

Die Picener: gewiefte Krieger und Händler.

64 Stolze Burgen für stolze Bürger

*Agnes Henning*

Die Lukaner waren friedfertiger, als ihr Ruf vermuten lässt.

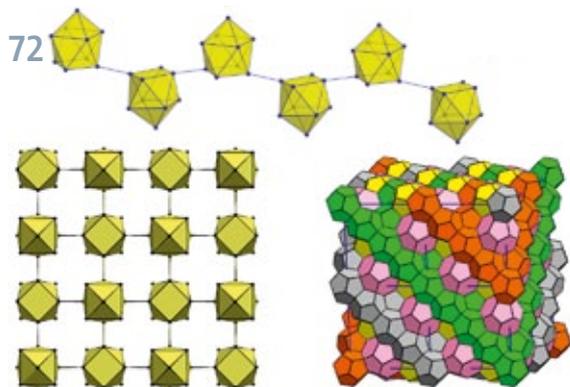
► TITELTHEMA

NEUROLOGIE

## 22 Wurzeln der Demenz

Lary C. Walker und Mathias Jucker

Bei Prionenkrankheiten erzeugt eine fatale Kettenreaktion massenhaft toxische Proteine im Gehirn. Der molekulare Dominoeffekt scheint auch Alzheimer, Parkinson und andere neurodegenerative Erkrankungen zu verursachen.



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### 68 Do-it-yourself-Ornamente

Christoph Pöppe

Zaubern Sie Muster mit speziellen Symmetrien auf Ihren Bildschirm – und gewinnen Sie bei unserem Wettbewerb.

ERDE & UMWELT

### 72 Von salzartigen Metallen zu maßgeschneiderten Nanoteilchen

Stefanie Dehnen und Thomas F. Fässler

Negativ geladene polyedrische Verbände von Metallionen versprechen vielerlei Anwendungen von der Katalyse bis zur Fotovoltaik.

TECHNIK & COMPUTER

► 82 Drohnen auf Abwegen

Todd Humphreys und Kyle Wesso

Unternehmen erwägen den Einsatz unbemannter Flugkörper. Doch die Risiken für die Luftfahrt sind erheblich.

### 88 Rezensionen

Hans-Joachim Flügel: Blütenökologie • Lorenz Kloska, Jörg Richter: Joseph v. Fraunhofer • Heinz Penzlin: Das Phänomen Leben • Ulf von Rauchhaupt: In den Sternen • Joachim Ehlers: Otto von Freising • Klaus Bödl: Götter und Mythen des Nordens u. a.

### 95 Wissenschaft im Rückblick

Vom Frostwächter zum Mondauto

### 96 Futur III

Ronald D. Ferguson: Der Sinn des Lebens

### 98 Vorschau

Titelmotiv: fotolia / Adimas  
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

ARCHIV DIETER HOFFMANN



## Zu Unrecht vergessen

Der Physiker und Wissenschaftshistoriker Dieter Hoffmann erinnerte an die Leistungen und das schwierige Leben von Friedrich Houtermans. (»Ein Physiker zwischen Hitler und Stalin«, Februar 2014, S. 62)

**Ansgar Hofmann, Heidelberg:** Vielen Dank für diesen sehr informativen Artikel über einen interessanten deutschen Physiker und Menschen, der wirklich zu Unrecht nicht bekannt ist. Sein Leben und Wirken verdient es in Erinnerung gerufen und gehalten zu werden. Der Autor hat es verstanden, die Ein-

**Trotz seiner vielfältigen Leistungen kennt heute kaum noch jemand den Physiker Friedrich Houtermans (1903–1966).**

flüsse auf Houtermans und dessen Einflüsse auf seine Kollegen und Wissenschaft gut darzustellen.

## Vorsicht vor teleologischem Denken!

*Das Genom des urtümlichen Fisches gibt Hinweise auf die Entwicklungen, die nötig waren, um aus dem Wasser an Land zu gehen, so die Biologen Axel Meyer und Manfred Schartl. (»Zeitreise mit dem Quastenflosser«, November 2013, Forschung aktuell, S. 16)*

**Karl Edlinger, Wien:** Der Beitrag ist informativ und spannend. Er gewönne noch an Qualität, wenn er nicht eine logische Verwirrung in Form des Terminus »Voranpassung« enthielte. Von »Präadaptation« oder Vorausanpassung schwadronierte einst Günther Osche. Nicht wissend, dass er damit teleologischem Denken Tür und Tor öffnete, versuchte er mit diesem an sich

der Logik widersprechenden und damit unsinnigen Begriff die altdarwinistische Anpassungshypothese zu retten. Doch die ist passee. Organismen haben schlicht und einfach oft die Fähigkeit, in vorher fremden Umwelten beziehungsweise ökologischen Nischen zu überleben, auch zu expandieren und sich weiterzuentwickeln. »Voranpassung« durch »Voraussetzung« zu ersetzen, würde den Beitrag konsistenter machen.

### Antwort des Autors Axel Meyer:

Herr Edlinger weist auf ein wichtiges Problem hin: das teleologische (zielgerichtete) Denken, das sich oft eher unbewusst in evolutionsbiologische Diskussionen einschleicht. Der berühmte Evolutionsbiologe Ernst Mayr hatte sich auch dieses Themas angenommen und an verschiedenen Stellen seines Werks immer wieder darauf hingewiesen, dass Evolution kein Ziel verfolgt, also beispielsweise keine Perfektion anstrebt oder einen Grad höherer Komplexität. Der etwas unglückliche Begriff »Voranpassung« scheint auch dieses teleologische Denken widerzuspiegeln in dem Sinn, dass die fleischflossigen Fischvorfahren der späteren Landwir-

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)

**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)

**Redaktion:** Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke,

Antje Findekle (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com

**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer

**Art Direction:** Karsten Kramarczik

**Layout:** Anne Angowski, Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer

**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

**Referentin des Chefredakteurs:** Kirsten Baumbusch

**Redaktionsassistenz:** Erika Eschwei

**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 -751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck

**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com

**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Bernhard Gerl, Dr. Uschi Loos, Dr. Michael Springer, Dr. Ute Weber.

**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

### Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80,

70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366,

E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner der Nationales Institut für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Prof. Dr. Carsten Könneker.

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis.

Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF

Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Nicole Klemmer, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1373

**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. 35 vom 1.1.2014.

**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:

© 2014 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordertes eingedachte 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, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss

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

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH.

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

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

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

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

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

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

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

beltiere bestimmte Merkmale schon hatten, die dann später bei der Besiedelung des Landes von Nutzen waren und beibehalten wurden. Selbstverständlich hatten weder diese Fische noch die Evolution das »Ziel«, aus Fischen einmal Amphibien entstehen zu lassen, dennoch ist es so passiert. Daher halte ich den Begriff der Präadaptation nicht für nur schlecht, solange man sich in der Argumentation immer bewusst ist, dass das drohende teleologische Schwert über einem schwebt. Denn ein Merkmal als Präadaptation zu beschreiben, lässt erkennen, dass einige Eigenschaften dieser Fische beim Landgang der Wirbeltiere durchaus von selektivem Vorteil gewesen sein könnten. Ob der Begriff »Voraussetzung«, wie von Herr Edlinger vorgeschlagen, aber wirklich die Teleologie besser aus dieser Art zu denken und zu beschreiben fernhält, bin ich mir allerdings nicht sicher.

## Es geht auch einfacher

*Die von Schrödinger in die Quantentheorie eingeführte Wellenfunktion gebe nur das wieder, was ein Beobachter erwartet, so der theoretische Teilchenphysiker Hans Christian von Baeyer. (»Eine neue Quantentheorie«, November 2013, S. 46).*

**Walter Heintel, Fürstenfeldbruck:** Mit Interesse habe ich als ehemaliger Physiklehrer in Ihrem Novemberheft den Artikel gelesen. Dieser erscheint mir allerdings sehr sophisticated. Es geht auch einfacher: Die Wellenfunktion hat keine physikalische Realität (komplexe Funktion). Ihr Betragsquadrat gibt zum Beispiel die Aufenthaltswahrscheinlichkeit an einem Ort an. Der genaue Ort ist warum auch immer nicht bekannt. Beim Doppelspaltversuch wird für ein Teilchen ein wahrscheinlicher Auftreffpunkt angegeben. Für viele Teilchen entsteht ein reales Muster. Bei der Messung eines Teilchens ergibt sich ein schwarzer Punkt. Die Wahrscheinlichkeit ist zur Realität geworden. Wie schon in einer Leserschrift im Dezember ausgeführt, ändern sich Wahrscheinlichkeiten mit dem Wissens-

stand. Über die tatsächliche Dynamik subatomarer Teilchen ist nichts bekannt. Schließlich verletzen virtuelle Teilchen kurzzeitig auch Energie- und Impulssatz. Mathematik kann nur analoge (kontinuierliche) und keine digitalen (spontanen) Prozesse beschreiben.

## Entscheidendes Temperaturgefälle

*Michael Springer fragte sich, ob im frühen, warmen Universum trotz weniger Planeten die Bedingung für Leben günstiger waren als heute. (»Leben schon nach dem Urknall?«, Februar 2014, Springers Einwürfe, S. 20)*

**Georg Schön, Landau/Pfalz:** Ein Leser von Monod sollte wissen, dass Leben nur in einem »Temperaturgefälle« existieren kann. Wir leben zwischen der Sonnentemperatur (Licht, Fotosynthese) und der Weltraumkälte. Das treibt unsere biologischen Maschinen an, das ist schlicht zweiter Hauptsatz. Ein Universum homogen erfüllt mit 300 K Strahlung ist so tödlich wie der »Wärmemethod«, der um die vorletzte Jahrhundertwende eine Neuheit war.

**Rudolf Mierau, Eschweiler:** Michael Springer ist vorsichtiger geworden: In der Märzausgabe 2012 schrieb er noch: »... angesichts der Unzahl der Sterne und Planeten gibt es unter ihnen sicher auch solche, die Leben beherbergen.« Im jetzigen »Einwurf« kommt es ihm »doch sehr unwahrscheinlich vor«, dass die vielen erdähnlichen Planeten kein Leben beherbergen sollen.

Aber es gibt zurzeit keinerlei Handhabe zu ermitteln, wie wahrscheinlich die Entwicklung von Leben auf erdähnlichen Planeten ist. Solange die Stichprobe für die Abschätzung dieser Wahrscheinlichkeit aus exakt einem einzigen Exemplar eines solchen Planeten (unserem eigenen) besteht, bleibt eine solche Schätzung völlig spekulativ. Wenn Leben zum Beispiel mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu 20 Billionen entsteht, dann stehen die Chancen für die geschätzten 20 Milliarden erdähnlichen Planeten in der Milchstraße

FOLGEN SIE UNS  
IM INTERNET



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



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



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



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

doch nicht so gut. Wir wissen es einfach nicht. Auch Michael Springer nicht.

## Erratum

*Im Leserbrief von Max Kobbert aus Münster »Physik im Dialog mit der Psychologie«, Februar 2014, S. 6 gingen leider einige Worte verloren, was den Sinn entstellte. Hier die korrekte Formulierung (Wiedereingefügtes gefettet):*

... Ich sehe es als begrifflich problematisch an, davon auszugehen, dass die Wellenfunktion **die persönliche Überzeugung** eines Beobachters über eine spezielle Eigenschaft des Quantensystems ausdrückt. Vielleicht sollte man besser von der **Erwartung** des Beobachters sprechen ...

## BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

Spektrum der Wissenschaft  
Leserbriefe  
Sigrid Spies  
Postfach 10 48 40  
69038 Heidelberg

E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)  
Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

PHYSIK

# Dunkle Materie im Sog der Sonne

Bei der Suche nach Dunkler Materie müssen Physiker den Einfluss der Sonne stärker berücksichtigen. Zu diesem Schluss kommen Forscher um Samuel K. Lee von der Princeton University (New York). Ihren Berechnungen zufolge bündelt unser Zentralgestirn den Strom Dunkler-Materie-Teilchen, der das Sonnensystem ständig durchdringt. Das hat Einfluss darauf, wann im Jahresverlauf Detektoren für solche Teilchen maximal ausschlagen.

Die Dunkle Materie besteht vermutlich aus bisher unbekanntem, schwer nachweisbaren Elementarteilchen, die sich wie ein feiner Nebel zwischen den Sternen verteilen. Auf seinem Weg um das galaktische Zentrum pflügt unser Sonnensystem permanent durch diesen Nebel. Die Folge davon ist ein ständiger »Fahrwind« aus Dunkler Materie, der die Erde kontinuierlich

durchdringt. Forscher versuchen schon seit Jahren, die exotischen Teilchen mit speziellen Messgeräten (Detektoren) im Untergrund einzufangen.

Bewegt sich die Erde auf ihrem Sonnenlauf in dieselbe Richtung wie das Sonnensystem, ist ein besonders starker »Fahrwind« zu erwarten. Die Dunkle-Materie-Detektoren sollten dann ausnehmend viele Signale ver-

zeichnen. Nach bisherigen Rechnungen tritt dies jeweils Anfang Juni ein. Die Forscher um Lee kommen jedoch zu einem anderen Schluss. Gemäß ihren Berechnungen zieht die Sonne mit ihrer Schwerkraft den Dunkle-Materie-Strom auf sich und bündelt ihn in ihrem »Kielwasser«. Dort bewege sich die Erde hindurch – und spüre den maximalen »Fahrwind« deshalb schon im Mai statt im Juni. Der Effekt trete bei Dunkle-Materie-Teilchen mit Massen oberhalb von 15 Gigaelektronenvolt auf.

Der Dunkle-Materie-Detektor DAMA im italienischen Gran-Sasso-Untergundlabor registriert seit Jahren ein schwankendes Signal, das stets im Mai am stärksten ist – in Übereinstimmung mit den neuen Ergebnissen. Allerdings sind die Resultate des DAMA-Teams bisher nicht von anderen Experimenten bestätigt worden.

*Physical Reviews Letters 112, 2014, 011301*



Ein Techniker bei der Arbeit am Dunkle-Materie-Detektor DAMA in Italien.

LUCAS/INPN

**Spektrum** DER WISSENSCHAFT **DIE WOCHE**



**Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin**

Jeden Donnerstag neu!  
52-mal im Jahr mehr als 40 Seiten  
News, Kommentare, Analysen und  
Bilder aus der Forschung

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

BIOTECHNOLOGIE

# Stammzellen noch einfacher hergestellt

Seit 2006 ist klar, dass ausgereifte Körperzellen in so genannte induzierte pluripotente Stammzellen (ipS) umgewandelt werden können. Diese haben das Potenzial, sich in unterschiedlichste Zellsorten zu differenzieren. Um ipS-Zellen zu erzeugen, sind nur wenige Regulationsmoleküle erforderlich, die eine Art »Rücksetzen«-Schalter in der Zelle betätigen. Nun zeigt sich, dass die Sache sogar noch einfacher sein könnte: Womöglich genügt bereits Stress, um die Rückprogrammierung einzuleiten.

Forscher um Haruko Obokata vom Riken Center for Developmental Biology in Kobe (Japan) berichten, dass sie Körperzellen von Mäusen in pluripotente Stammzellen umwandeln, indem sie sie mechanischem Druck, Hitze, Nährstoffmangel oder hohen Kalziumkonzentrationen aussetzen. Als beson-

ders wirksamer Faktor erweist sich hier ein niedriger pH-Wert. Tests mit Mäusen belegen, dass die dabei entstehenden Zellen tatsächlich Eigenschaften pluripotenter Stammzellen besitzen: Sie wandern in verschiedene Körpergewebe der Tiere ein und differenzieren sich dort in unterschiedliche Zelltypen.

Die neuen, so genannten Stap-Zellen (von: Stimulus-Triggered Acquisition of Pluripotency) zeigen einen noch höheren Grad an Vielseitigkeit als ipS- oder embryonale Stammzellen. Denn sie können sogar Plazentazellen hervorbringen. Womöglich sei es ein bis dato übersehener, aber durchaus gängiger Vorgang im Organismus, nach Stresswirkung pluripotente Zellen zu produzieren, um eventuelle Schäden zu beseitigen, spekulieren die Forscher.

*Nature 505, 641–647, 2014*

*Nature 505, 676–680, 2014*

## Wie die Tiere laufen lernten

Der amphibisch lebende *Tiktaalik roseae* gilt als Übergangsform zwischen Fisch und Landlebewesen. Seine Fossilien sind in Sedimenten des Devons (von vor 420 bis vor 360 Millionen Jahren) nachweisbar. Lange gab es nur



NEIL H. SHUBIN, UNIVERSITY OF CHICAGO

Nicht nur im Wasser, auch an Land beweglich: *Tiktaalik roseae*.

Überreste von der vorderen Hälfte des Fleischflossers. Nun hat ein Team um Neil Shubin von der University of Chicago neue Fossilfunde untersucht, in denen auch das Becken und die hinteren Flossen erhalten sind.

Demnach war der Beckengürtel bei *Tiktaalik roseae* beinahe genauso groß wie der Schultergürtel – wie bei heutigen Vierfüßern. Zudem verfügte das Tier über Hüftgelenkspfannen, die bewegliche Oberschenkelknochen aufnahmen. Die hinteren Flossen waren ganz ähnlich gebaut wie die Brustflossen und auch von vergleichbarer Größe. Auf ihnen konnte sich das fischähnliche Wesen an Land hochstemmen. Größe, Beweglichkeit und Robustheit des Beckengürtels sprechen dafür, dass das Tier sowohl paddeln als auch laufen konnte – und zwar jeweils unter Einsatz aller Flossen.

Mit einer Länge von etwa einem Meter könnte *T. roseae* äußerlich einem kleinen Krokodil geähnelt haben. Aus seinen fossilen Überresten lässt sich schließen, dass die Hinterbeine landlebender Tiere wohl aus verlängerten und verstärkten Hinterflossen von Fischen hervorgingen. *T. roseae* stand demnach am Übergang vom »Vorderradantrieb« der Fische zum »Allradantrieb« der Vierfüßer.

PNAS 111, S. 893–899, 2014

## Riesiger Schmelzwasservorrat auf Grönland versteckt

Unter der Schneedecke im südlichen Grönland verbirgt sich ein rund 70 000 Quadratkilometer großer Flüssigwasserspeicher, den Geologen von der University of Utah in Salt Lake City jetzt mittels Bohrungen und Radaraufnahmen nachgewiesen haben. Die Schicht beginnt einige Meter unter der Oberfläche und hält Schmelzwasser fest, das aus vorherigen Sommern stammt. Unter der isolierenden Schneedecke gefriert es an-

scheinend selbst während der kalten Winter nicht.

Die Wissenschaftler um Richard Forster bestätigen damit frühere Vermutungen, wonach im grönländischen Firn – der Übergangszone zwischen Schnee und darunterliegendem Gletscher – enorme Wassermassen zumindest vorübergehend gespeichert werden. Der Firn hat nicht mehr die feine Kristallstruktur von Schnee, ist aber auch noch nicht so stark verdichtet wie Eis. Schmelzwasser, das während der warmen Jahreszeit in ihn einsickert, wird nach Ende des Sommers rasch von einer Schicht frisch gefallenen Schnees

isoliert. Der Winterfrost dringt offenbar nicht durch sie hindurch, und die von unten kommende Kälte der Gletscher scheint nicht auszureichen, um das Schmelzwasser vollständig gefrieren zu lassen. Zwischen 320 und 1290 Milliarden Tonnen Wasser kann der grönländische Firn schätzungsweise aufnehmen, bis seine Poren gesättigt sind.

Forster und seine Kollegen vermuten, dass sich die Flüssigwasserspeicher vor allem in den niedrigen Breiten Grönlands ausbilden. Denn dort gibt es starke Niederschläge und ausgeprägte sommerliche Tauperioden. Auch im Westen der Insel wurden schon solche Speicher nachgewiesen. Indem der Firn das Schmelzwasser festhält, verlangsamt er – zumindest bislang – dessen Abfließen in Richtung Ozean und damit den Anstieg des Meeresspiegels.

Nature GEO 10.1038/NGEO2043, 2013

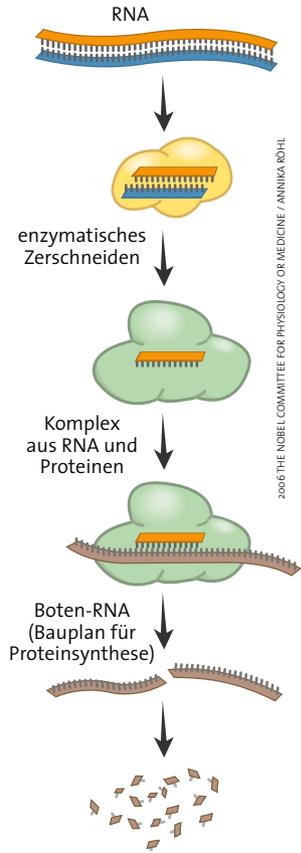


LUDOVIC BRULICER, NASA/GSFC

Bei minus 15 Grad Celsius entnehmen Forscher eine Probe aus dem grönländischen Firn – und stellen überrascht fest, dass reichlich Wasser heraustropft.

ONKOLOGIE

## Wichtige und unwichtige Mutationen bei Krebs



Krebs entsteht, wenn – meist mehrere – Veränderungen im Erbgut eine Körperzelle dazu bringen, sich ungehemmt zu teilen. Bisher ist es schwierig, Mutationen, die der Krankheit Vorschub leisten, von zufälligen, nicht bedrohlichen Erbgutveränderungen zu unterscheiden. Elaine Fuchs von der Rockefeller University in New York und ihre Kollegen glauben nun, eine Möglichkeit hierfür gefunden zu haben. Sie schalteten in Labormäusen nacheinander einzelne Gene ab und prüften jeweils, ob dies bei den Tieren vermehrt bestimmte Hauttumoren (Plattenepithelkarzinome) entstehen ließ. Hierfür bedienten sich die Forscher der so genannten RNA-Interferenz, also des zielgerichteten

Bei der RNA-Interferenz zerschneidet ein zelleigenes Enzym (gelb) zunächst doppelsträngige RNA (ganz oben) in kleine Stücke. Diese binden in einem Komplex mit Proteinen (grün) an Boten-RNA, die zu ihnen passt (braun), worauf Letztere abgebaut wird.

Stilllegens von Erbanlagen mit Hilfe kurzer RNA-Stücke (siehe Grafik links).

Insgesamt untersuchte das Team den Einfluss von 347 verschiedenen Mutationen. Dabei traten sieben neue »Krebsgene« zu Tage. Dazu zählt etwa die Erbanlage *Myh9*, die für ein bestimmtes Myosinprotein kodiert. Das Eiweißmolekül spielt bei Bewegungsprozessen in Zellen eine Rolle, ist aber offenbar auch für die Funktion des Proteins p53 wichtig, dem eine entscheidende Bedeutung bei Tumorerkrankungen zukommt. Bei Patienten mit Plattenepithelkarzinomen, deren *Myh9*-Gen mutiert ist, verläuft die Krankheit tatsächlich meist schwerer als bei Menschen ohne diese Genveränderung, wie aus Krebsdatenbanken hervorgeht. Nach Ansicht der Forscher könnte die neue Methode dabei helfen, krebswichtige Mutationen von unwichtigen zu unterscheiden, um so aus individuellen Erbgutanalysen mehr über das Krankheitsrisiko der Betroffenen herauszulesen.

*Science* 343, S. 309–313, 2014

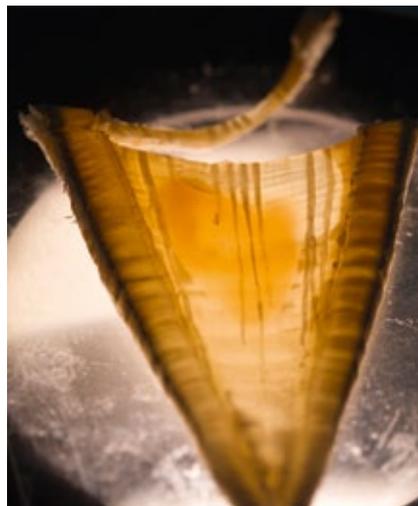
BIOLOGIE

## Weißer Hai werden überraschend alt

Der Weiße Hai kann ein Alter von über 70 Jahren erreichen und lebt damit rund dreimal so lang wie bisher angenommen. Zu diesem Schluss sind Wissenschaftler um Li Ling Hamady von der Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts, USA) gekommen, indem sie die Wirbelkörper von Haien mit zwei verschiedenen Methoden untersuchten. Zum einen schätzten sie das Alter der Tiere anhand der Bänderung, die im Querschnitt der Wirbelkörper erkennbar ist. Dieses Verfahren beruht auf der Annahme, dass jedes Jahr ein neues Band hinzukommt – ähnlich wie bei Jahres-

ringen von Bäumen. Bei großen Exemplaren des Weißen Hais trifft das aber offenbar nicht zu. Das zeigten die Forscher, indem sie in den Haiwirbeln die Konzentration von Radiokohlenstoff bestimmten, also des Kohlenstoff-Isotops mit der Massenzahl 14. Dieses war in den 1950er und 1960er Jahren

bei Atombombentests in großen Mengen in die Ozeane gelangt, wo die Meerestiere es mit ihrer Nahrung aufnahmen. Bei Weißen Haien, die zu dieser Zeit gelebt haben, ist der erhöhte Kohlenstoff-14-Anteil noch heute in den damals angelegten Wirbelbändern nachweisbar. Vergleicht man die dort gemessenen Werte mit historischen Daten zum Eintrag von Kohlenstoff-14 in die Ozeane, lässt sich das Lebensalter der Tiere exakter ermitteln als zuvor. Der älteste männliche Hai, den die Forscher untersuchten, wurde demnach 73 Jahre alt, das älteste Weibchen 40 Jahre. Weiße Haie gehören damit zu den langlebigsten bekannten Knorpelfischen. Die neuen Erkenntnisse erlauben präzisere Aussagen über das Wachstumstempo der Tiere, den Zeitpunkt ihrer Geschlechtsreife und ihre Fortpflanzungsrate.



THOMAS N. KEINDIGET, WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION (WHOI)

Schnitt durch einen Haiwirbel. Die Querbanderung ist deutlich zu erkennen. Aus ihr leiten die Forscher ab, wie alt die Tiere werden. Allerdings kommt bei Weißen Haien nicht – wie bisher angenommen – jedes Jahr ein neues Band hinzu.

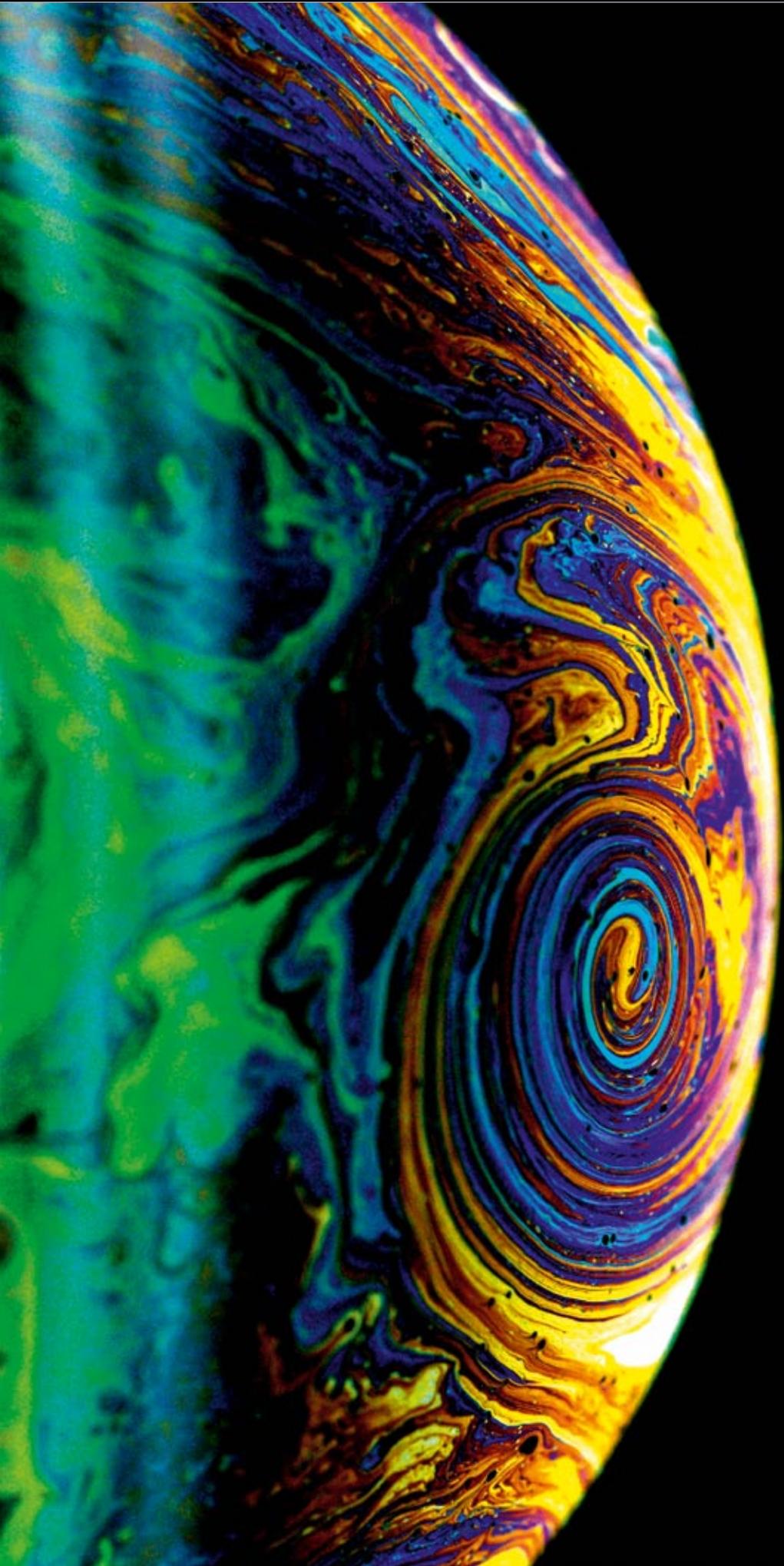
*PLoS ONE* 10.1371/

*journal.pone.0084006*, 2014

## HURRIKAN AUF DER SEIFENBLASE

Wirbelstürme im Kleinen erzeugten französische Forscher auf Seifenblasen: Das Team um Hamid Kellay von der Université Bordeaux 1 erwärmten die auf einer Messingplatte ruhende Halbkugel aus Seifenlaug von unten und analysierten unter verschiedenen Bedingungen, wie Verwirbelungen entstehen und sich entwickeln. Rotierte die Seifenblase, förderte dies Strudel in Polnähe, verkürzte aber gleichzeitig die Lebensdauer der Wirbel. Einige Verhaltensmuster stimmten gut mit denen tropischer Hurrikane überein, so die Forscher.

*Scientific Reports* 3, 3455, 2013



GEOLOGIE

# Versinkendes Flussdelta

Untersuchungen an ehemaligen Salzsiedeöfen und Wurzelresten von Mangroven zeigen, dass die Küste von Bangladesch rapide absinkt. Das verschärft die Bedrohung des Landes durch den globalen Anstieg des Meeresspiegels als Folge der Erderwärmung.

VON TILL J. J. HANEBUTH UND HERMANN R. KUDRASS

**D**eltas entstehen, wo Flüsse große Mengen Gesteinsmaterial aus dem Hinterland zum Meer transportieren. Es setzt sich im Bereich der Mündung ab und schiebt diese immer weiter vor. Dabei bildet sich eine weite Küstenebene, die wegen ihrer Fruchtbarkeit meist dicht besiedelt ist und intensiv landwirtschaftlich genutzt wird.

Deltas erheben sich nur geringfügig über den Meeresspiegel, so dass extreme Wetterereignisse wie Starkregen oder Sturmfluten verheerende Überschwemmungen verursachen können. Zudem reagieren sie empfindlich auf Änderungen in der Sedimentzufuhr und sind anfällig für Stürme und Strömungen, die Teile von ihnen ins Meer reißen.

Am stärksten wirkt sich jedoch eine Änderung des Meeresspiegels aus. Dieser hebt sich schon seit dem 19. Jahr-

hundert beständig. In Zukunft dürfte er durch die globale Erwärmung noch schneller steigen, was wie ein Damoklesschwert über vielen Deltas schwebt.

Zu diesem globalen Effekt kommt ein weiterer hinzu: die lokale Absenkung der Landoberfläche, Subsidenz genannt. Sie resultiert aus der Kombination von zwei abwärtsgerichteten Bewegungen. Zum einen senkt sich die Erdkruste unter dem Gewicht des Deltakörpers ab; zum anderen verdichten sich die oberen Sedimentschichten mit der Zeit und werden dadurch niedriger.

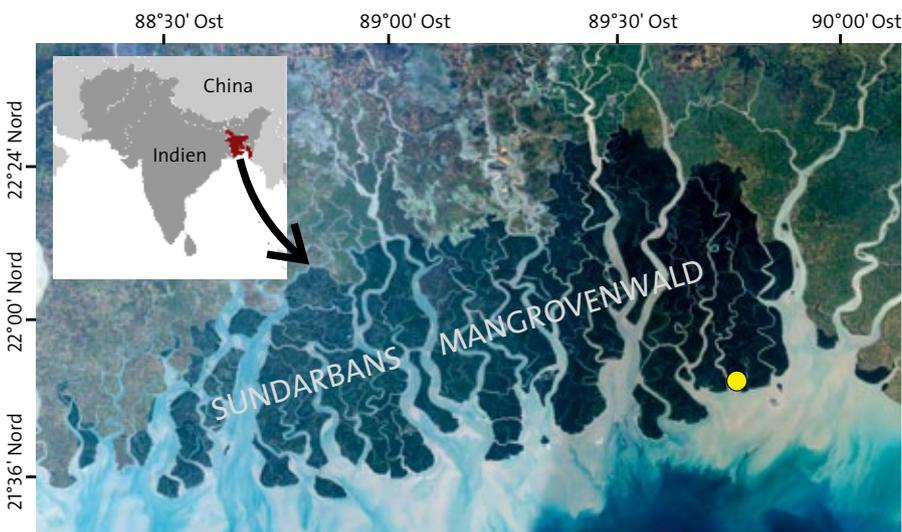
Eine vorausschauende Planung der sozioökonomischen Entwicklung eines Deltas muss diese Effekte berücksichtigen. Um mit wasserbaulichen Maßnahmen rechtzeitig vorsorgen zu können, ist es unerlässlich, sowohl die landseitige Subsidenzrate als auch die seeseitige Meeresspiegeländerung präzise zu ermit-

teln. Aktuelle Werte für diese Größen lassen sich durch Höhenvermessung per Satellit und GPS-Netzwerke gewinnen. Für zuverlässigere Voraussagen ist es aber wichtig, auch die Absenkungsrate in der Vergangenheit zu rekonstruieren; denn der momentane Betrag muss nicht unbedingt repräsentativ sein. Hier kommen Geologen ins Spiel.

## Ehemalige Salzsiedeöfen in Mangrovenwäldern von Bangladesch

Bangladesch zählt zu den Ländern, die am stärksten vom prognostizierten Anstieg des Meeresspiegels bedroht sind. Hier führen Ganges, Brahmaputra und Meghna jährlich rund eine Billion Tonnen Sediment aus dem Himalaja heran und haben so ein riesiges Delta aufgeschüttet, in dem 143 Millionen Menschen leben. Die küstennahe Region ist im Osten dicht besiedelt und wird dort landwirtschaftlich intensiv genutzt. In den »Sundarbans« des westlichen Deltas, die als UNESCO-Naturerbe geschützt sind, erstrecken sich dagegen dichte Mangrovenwälder.

Auch hier gibt es jedoch Spuren ehemaliger Besiedlung. So wurden an drei Strandabschnitten während einer geologischen Exkursion 1999 die Fundamente von Salzsiedeöfen entdeckt. Nach historischen Berichten aus dem Jahr 1848, als die Region britische Kolonie war, haben damals Zehntausende von Menschen entlang dieser Küste das »weiße Gold« für den indischen Markt gewonnen. Dazu ließen sie Meerwasser zunächst in Salzgärten verdunsten und dampften die rückgewonnene Sole dann in Siedeöfen ein. Sowohl die Beckenränder als auch die Ofenfundamente waren knapp oberhalb des



Dieses Satellitenbild der Sundarbans mit ihren Mangrovenwäldern im Westen von Bangladesch zeigt die verästelten Flussläufe der Deltaregion. Das Untersuchungsgebiet der Autoren ist durch einen gelben Punkt gekennzeichnet.



GERTRUD NEUMANN-DENZAU

Niveaus des winterlichen Springtide-Hochwassers angelegt.

Überreste der einstigen Siedeöfen, die der Wirbelsturm »Sidr« 2007 freigespült hat, liegen heute an zurückweichenden Küstenabschnitten der Sundarbans wieder für kurze Zeit zu Tage, ehe das vordringende Meer sie verschlingen wird. Einige davon haben wir nun mit Unterstützung der deutschen Forschungsgemeinschaft und in Kooperation mit dem Archäologen Jörg Linstädter, der Geografin Anja Zander und der Geophysikerin Gertrud Neumann-Denzau frei gelegt und gründlich untersucht (*Geology* 41, S. 987, 2013).

Wie die Ausgrabungen ergaben, häuften die Sieder einfach einen Hügel aus Schlamm auf, aus dem sie die Ofenkammer ausschachteten. Diese füllten sie nach dem Anbringen seitlicher Belüftungslöcher mit Brennmaterial und deckten sie mit einer Tonplatte ab, die mit zahlreichen Löchern versehen war. Das erste Anfeuern diente dazu, den Schlamm beziehungsweise Ton zu trocknen und durch Brennen auszuhärten. Die tönernen Siedetöpfe, von denen sich heute noch unzählige in den Mangrovenwäldern finden, wurden direkt auf die Deckplatte gestellt.

Alle 20 untersuchten Ofenfundamente enthielten an ihrer Basis eine

**Tideströmung und Stürme legen an den Küsten der Sundarbans immer wieder Mauern ehemaliger Salzsiedeöfen frei.**

dicke Lage aus Holzkohle. Diese Schichten befinden sich sämtlich in zwei Tiefenniveaus: bei rund 75 und 155 Zentimetern unter dem heutigen winterlichen Springtide-Hochwasserpegel. Etwa 135 und 230 Zentimeter unter der jetzigen Winterflutmarke haben sich zudem zwei Horizonte mit Wurzel-

stümpfen von Mangroven erhalten. Diese Bäume wachsen knapp über dem Springtideniveau, auf dem auch die Ofenfundamente zu finden sind. Deshalb liefern sowohl die Wurzelreste als auch die Holzkohleschichten präzise Informationen über die ehemaligen Meeresspiegelstände.



GERTRUD NEUMANN-DENZAU

**Während des Niedrigwassers haben die Autoren zusammen mit einem Kollegen und lokalen Helfern eine der beiden Kammern eines Salzsiedeofens ausgegraben und vermessen sie, um die Funktionsweise zu rekonstruieren.**



JÖRG UNSTÄDTER

In dieser aus dem Wattschlick freigelegten Ofenkammer wurde vor 300 Jahren Salz gewonnen. Die perforierte Deckplatte, auf der bis zu 50 Siedetöpfe aufgestellt waren, fehlt; vermutlich hat sie der Wucht der damaligen Flutwelle nicht standgehalten. Am Boden erkennt man Holzkohlereste, die zur Datierung dienen.

Zugleich zeugen sie von katastrophalen Ereignissen. Die Siedeföfen wurden überstürzt verlassen – die Holzkohle ist nur halb verbrannt – und später nicht wieder in Betrieb genommen. Auch die Stubben sind allein deshalb noch so gut erhalten, weil sich sehr schnell eine Schlickdecke über sie gelegt hat. Die Messung der optisch stimulierten Lumineszenz an Proben aus fünf Ofenwänden ergab als Zeitpunkt der letzten Befuerung das Jahr 1705 mit einer Unsicherheit von 35 Jahren. Radiokohlenstoffdatierungen der Holzkohle von den Ofenbasen bestätigten diesen Wert. Die Bäume des unteren Wurzelstumpfhorizonts sind dagegen wahrscheinlich schon um 1650 abgestorben.

Die Salzsiederei muss durch eine verheerende Flutwelle beim Durchzug eines Wirbelsturms beendet worden sein. Zeitlich am besten passt ein historisch dokumentierter Zyklon im Jahr 1699 mit mindestens 50 000 Todesopfern. Die gute Erhaltung der beiden Wurzelstumpfhorizonte legt dagegen ein plötzliches Absacken mit sofortiger Einbettung nahe. Das spricht für Erdbeben als Auslöser. Seismische Erschütterungen

treten in dieser Region immer wieder einmal auf, und dabei kann sich der Boden ruckartig absenken. Zwei starke regionale Erdbeben sind beispielsweise für die Jahre 1676 und 1762 dokumentiert. Damit zeigt sich, dass die Subsidenz von Bangladeschs Küstenregion teilweise abrupt abläuft. Die per Satellit gemessene aktuelle Geschwindigkeit entspricht also nicht zwangsläufig dem langfristigen Durchschnitt.

### Bedrohliche Absenkung der Küstenregion

Unsere Daten erlauben es nun, die mittlere Subsidenzrate für das zentrale küstennahe Delta zu kalkulieren. Das untere Ofenniveau hat sich in den gut 300 Jahren seit 1705 um etwa 155 Zentimeter gegenüber dem heutigen Meeresspiegel abgesenkt, was einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 5,2 Millimetern pro Jahr entspricht. Beim unteren Mangrovenhorizont beträgt der Wert 230 Zentimeter in maximal 360 Jahren, also 6,4 Millimeter pro Jahr. Zieht man nun den globalen Anstieg des Meeresspiegels von insgesamt 25 Zentimetern seit Beginn des 18. Jahrhunderts ab,

bleibt eine regionale Subsidenz von 4,1 bis 5,7 Millimetern pro Jahr.

Unter der Annahme, dass diese mittlere Absenkungsrate für die nächste Zeit gleich bleibt und sich der globale Meeresspiegel gemäß der Prognose des UN-Klimarats IPCC um 2,7 bis 7,1 Millimeter pro Jahr heben wird, wird das Meeresniveau entlang der Sundarbans-Küste in den kommenden Jahrzehnten um 7 bis 13 Millimeter im Jahr steigen. Dieser Wert entspricht grob der Erhöhung des Bodens durch Ablagerung von Sedimenten in den nicht eingedeichten Deltabereichen bei den Monsun-Überschwemmungen. Sofern sich der Anstieg des globalen Meeresspiegels jedoch beschleunigt, wie Klimaforscher annehmen, sind insbesondere die mit Deichen geschützten Bereiche des äußeren Deltas, die heute schon unter Normalnull liegen, extrem gefährdet.

Es gibt nur wenige Möglichkeiten, einer solchen Bedrohung zu begegnen. Die komplette Eindeichung birgt das Risiko von katastrophalen, schlecht drainierbaren Überflutungen der tiefer gelegenen Bereiche des Deltas, die überdies nicht mehr mit Sediment aufgefüllt würden. Auch eine Umsiedelung der Einwohner in höhergelegenes Terrain ist wegen der gewaltigen Dimensionen kaum umsetzbar. Als einzig sinnvolle Maßnahme erscheint, die natürliche Auflandung während der monsunalen Überschwemmungszeiten zur systematischen Erhöhung des Bodens kontrolliert zuzulassen. Das setzt allerdings voraus, dass nationale Politiker und Wissenschaftler die Existenz der Küstenabsenkung anerkennen. So wurde erst kürzlich wieder in einem Artikel im »Daily Star« vehement bestritten, dass überhaupt eine Subsidenz stattfindet.

---

**Till J.J. Hanebuth** ist Privatdozent am Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) der Universität Bremen und forscht derzeit im Rahmen seines Heisenberg-Stipendiums als Gastwissenschaftler an der Woods Hole Oceanographic Institution (Massachusetts).

**Hermann R. Kudrass** war als Geologieprofessor langjähriger Direktor in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover und betreibt seine Forschung auch am MARUM.

# Galaxien am Rand des Alls

Bei der Erforschung der ältesten Sternsysteme im Universum stoßen Astronomen zunehmend auf Hindernisse. Sind selbst die größten Teleskope zu klein, um die Geschichte der ersten Galaxien zu entschlüsseln?

VON JAN HATTENBACH

Vor wenigen Monaten verkündete ein Team um Steven Finkelstein von der University of Texas in Austin einen neuen Rekord: Die Astronomen glauben, die bislang entfernteste Galaxie entdeckt zu haben (*Nature* 502, S. 524–527, 2013). Schon vor rund 13 Milliarden Jahren, als das Universum gerade einmal 800 Millionen Jahre alt war, hat sich das Licht dieser damals jungen Milchstraße, die aus sehr heißen Sternen sowie Gas und Staub besteht und auf den Namen z8\_GND\_5296 hört, auf den Weg zu uns gemacht. Damit gehört sie zu den jüngsten Sternsystemen, die Astronomen je beobachtet haben – und gerade in den Unterschieden zu ihren heutigen Verwandten hoffen Forscher, Hinweise darauf zu finden, wie diese zu dem wurden, was sie heute sind.

Doch die Freude ist getrübt, denn die Beobachtungen hatten sich alles andere als einfach gestaltet. Bei 42 weiteren Galaxien misslang die Entfernungsmessung. Anscheinend fällt es Astronomen mit der heutigen Technologie schwer, Galaxien in solch großer Entfernung präzise zu erfassen.

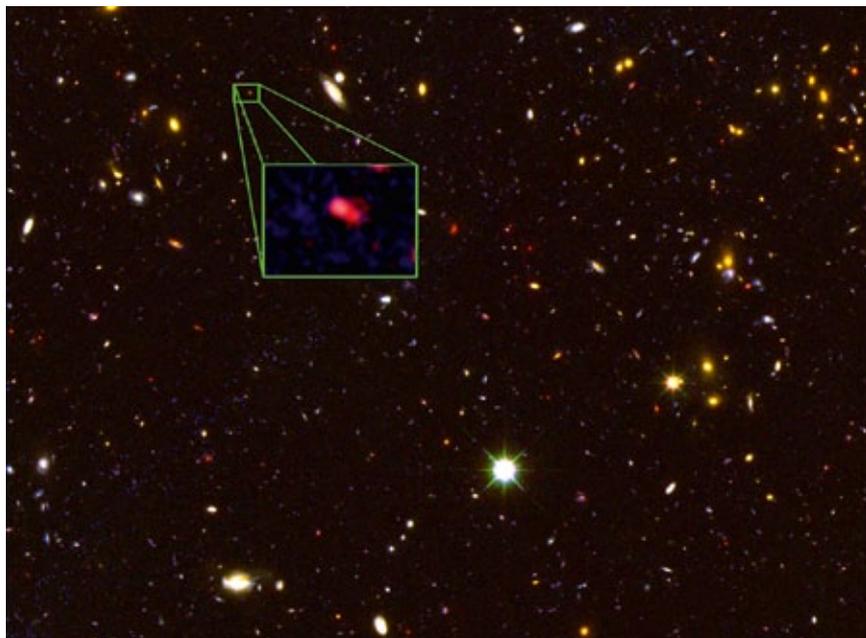
Während z8\_GND\_5296 angesichts ihres jugendlichen Zustands vergleichsweise wenige Sterne zählt und im Wesentlichen aus Wasserstoff und Helium besteht, ist unsere Heimatgalaxie längst »erwachsen«. Sie enthält hunderte Milliarden Sterne, in denen Kernfusionsprozesse Wasserstoff und Helium zu schwereren Elementen verschmelzen, sowie Abermillionen Sonnenmassen Gas und Staub. Doch wie genau altert eine Galaxie? Astronomen hoffen, dass sie mit Hilfe von Exemplaren wie z8\_GND\_5296 in eine etwa 800 Millionen Jahre währende Epoche zurückschauen können, in der sich das Antlitz des Universums grundlegend wandelte.

Zum Beginn dieser Zeitspanne, rund 200 Millionen Jahre nach dem Urknall, bestand das Weltall ausschließlich aus kaltem Wasserstoff- und Heliumgas. Nun aber entstanden die ersten Sterne: Gaswolken zogen sich so lange zusammen, bis in ihrem Inneren Regionen hoher Materiedichte entstanden, die sich schließlich zu leuchtenden Himmelskörpern entwickelten. Zum ersten Mal seit seiner Geburt erhellte energiereiches Licht das bis dahin dunkle Universum. Dabei erhitzte und ionisierte es große Teile des bereits abgekühlten Wasserstoffgases, trennte also die Wasserstoffkerne von den sie umkreisenden Elektronen. Astronomen sprechen vom Zeitalter der Reionisation, denn schon einmal, kurz nach dem Urknall, hatte das Gas in seinen einzelnen Be-

standteilen vorgelegen. Erst als die Reionisation vollendet war, hatte sich das Universum in den Kosmos aus leuchtenden Sternen und Galaxien verwandelt, den wir heute kennen.

Die Untersuchung dieser Epoche steht ganz oben auf der Agenda der Astronomen. Doch oft scheitern sie an der Herausforderung. Denn die jugendlichen Galaxien sind nicht nur wesentlich kleiner als heutige Sternsysteme – z8\_GND\_5296 besitzt nur ein Tausendstel der Masse der Milchstraße –, auch die seit dem Urknall andauernde Expansion des Kosmos macht den Forschern zu schaffen. Ihretwegen liegt z8\_GND\_5296 heute nicht nur 13, sondern 30 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt.

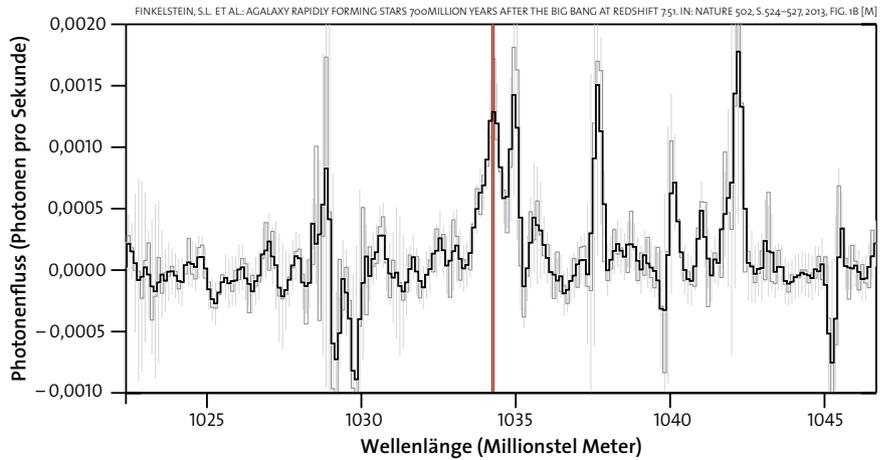
Noch problematischer ist ein dritter Effekt: Die kosmische Expansion hat das



So sah das Weltraumteleskop Hubble die 30 Milliarden Lichtjahre entfernte Rekordgalaxie z8\_GND\_5296 (vergrößerte Darstellung im grünen Rahmen), die nur im Infrarotlicht zu erkennen ist. Von wenigen Ausnahmen abgesehen stellt jeder Fleck auf dieser lang belichteten Aufnahme einer Region im Sternbild Großer Bär eine Galaxie dar.

WITH TAL TUWI & CASEY RIMOVICH, TAMU / STEVEN L. FINKELSTEIN, UNIVERSITY OF TEXAS / THE CANDLES TEAM / NASA-HST

Für bodengebundene Teleskope ist die Lyman- $\alpha$ -Linie einer weit entfernten Galaxie kaum identifizierbar. Das mit einem Spektrografen am Keck-I-Teleskop auf Hawaii gewonnene Spektrum (grau; geglättet: schwarz) von z8\_GND\_5296 zeigt die Linie bei einer Rotverschiebung von  $z = 7,51$ , entsprechend 1034 Nanometer (rot). Sie ist schwächer als die meisten übrigen Linien, die alle durch den Airglow in der Erdatmosphäre verursacht werden, und ragt kaum über das Hintergrundrauschen hinaus.



von den jungen Objekten ausgesendete Licht gedehnt, also seine Wellenlängen in Richtung des roten Spektralbereichs verschoben; die von Finkelstein und seinen Mitarbeitern ermittelte Rotverschiebung des Lichts von z8\_GND\_5296 beträgt 7,51. Die markante Lyman- $\alpha$ -Spektrallinie des Wasserstoffs, die man für solche Messungen typischerweise verwendet, liegt in diesem Fall daher nicht im Ultravioletten, sondern bei einer Wellenlänge von etwa 1000 Nanometern – also im Infraroten. Das Problem: Auch die Atmosphäre der Erde leuchtet in diesem Wellenlängenbereich und überstrahlt daher das schwache Galaxienlicht. Dieses als Airglow bekannte Phänomen setzt erdgebundenen Teleskopen ein natürliches Limit. In manchen Fällen, so auch bei z8\_GND\_5296, können Astronomen das Licht der Galaxien zwar trotzdem aus dem Atmosphärenleuchten herausfiltern. Meist aber gelingt das nicht.

**Selbst die besten Teleskope spüren die Galaxie nur mit Mühe auf**

Entdeckt wurde z8\_GND\_5296 auf lang belichteten Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble, das weit oberhalb des Airglow-Leuchtens die Erde umkreist. Auf seinen Bildern haben Astronomen in den vergangenen Jahren viele weitere Galaxien identifiziert, die nur im Infrarotlicht strahlen. Doch die Messinstrumente des Weltraumveteranen erlauben es leider nicht, die Rotverschiebung der Lyman- $\alpha$ -Linie zu messen.

Die Astronomen haben noch ein weiteres Problem: Die Linie erscheint in den Galaxienspektren weit schwächer

als Theoretiker erwarten. Obwohl Finkelstein und seine Kollegen das Keck-I-Teleskop auf Hawaii nutzen konnten – mit seinem Zehn-Meter-Hauptspiegel eines der größten der Welt –, gelang die Messung nur bei einem einzigen der 43 von Hubble gelieferten Kandidaten für extrem weit entfernte Galaxien. Bei den anderen verschwindet die Linie im Rauschen. Schon zuvor hatten Astronomen von diesem Problem berichtet. Im Jahr 2010 kam es sogar besonders dick: Ein europäisches Team war mit einem der vier 8,2-Meter-Instrumente des Very Large Telescope (VLT) der Europäischen Südsternwarte in Chile bei einer Rotverschiebung von 8,6 fündig geworden. Doch als eine andere Forschergruppe diese Messungen wiederholen wollte – ebenfalls am VLT –, konnte es die Lyman- $\alpha$ -Linie der vermeintlichen neuen Rekordgalaxie HUDF-YD3 nicht mehr nachweisen.

Über den Grund für die schwach ausgeprägten Linien herrscht bislang keine Einigkeit. Sterne produzieren die Galaxien jedenfalls in so hoher Rate – bei z8\_GND\_5296 ist sie sogar hundertmal höher als in der Milchstraße –, dass sich die Lyman- $\alpha$ -Linie gut nachweisen lassen müsste. Finkelstein vermutet jedoch, dass gerade dieser Umstand auf den Kern des Problems hindeutet: Er lässt nämlich auf enorme Mengen Wasserstoff schließen. Denkbar ist, dass die Galaxien von dichten Wasserstoffwolken umgeben sind, die wiederum das Licht der Sterne im Innern verschlucken. Kalter Wasserstoff absorbiert die Lyman- $\alpha$ -Linie nämlich ebenso stark, wie heißer, ionisierter Wasserstoff sie

emittiert. Womöglich verstecken sich die Galaxien also einfach nur vor den neugierigen Blicken der Astronomen.

Finkelstein befürchtet, dass erst die nächste Teleskopgeneration mit ihren 30- und 40-Meter-Spiegeln genügend Licht sammeln könnte, um das schwache Glimmen der wolkenverhüllten Galaxien spektroskopisch untersuchen zu können. Eine Alternative böten Radioteleskope, allen voran das neue ALMA-Teleskop in den chilenischen Anden. Diese arbeiten bei noch längeren Wellenlängen und könnten sogar die kalten Wasserstoffwolken selbst »sehen«.

Ob z8\_GND\_5296 seinen Rekordtitel behält oder das Schicksal von HUDF-YD3 teilt, werden erst Nachuntersuchungen zeigen. Wie lange der Rekord dann hält, ist ohnehin ungewiss: Hubble hat bereits Objekte mit Rotverschiebungswerten von zehn und mehr entdeckt, die sich als Galaxien erweisen könnten, aber alle noch auf eine spektroskopische Bestätigung warten.

Die Forscher hoffen indes nicht nur auf größere Instrumente, sondern auch auf günstige Umstände. Denn manchmal wird das schwache Glimmen ferner Galaxien aus der Epoche der Reionisation auf ganz »natürliche« Weise verstärkt – durch die Schwerkraft von Galaxienhaufen nämlich, die auf der Sichtlinie zum irdischen Beobachter liegen. In diesen Fällen taugen unsere heutigen Teleskope vielleicht auch weiterhin zur Rekordjagd.

Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist in Aachen und Autor des »Himmelslichter«-Blogs auf [scilogs.de](http://scilogs.de).

# Was die Entartung vorantreibt

Forscher können aus dem Erbgut von Krebszellen herauslesen, welche Faktoren das Tumorwachstum auslösen.

VON EMMANUELLE VANIET

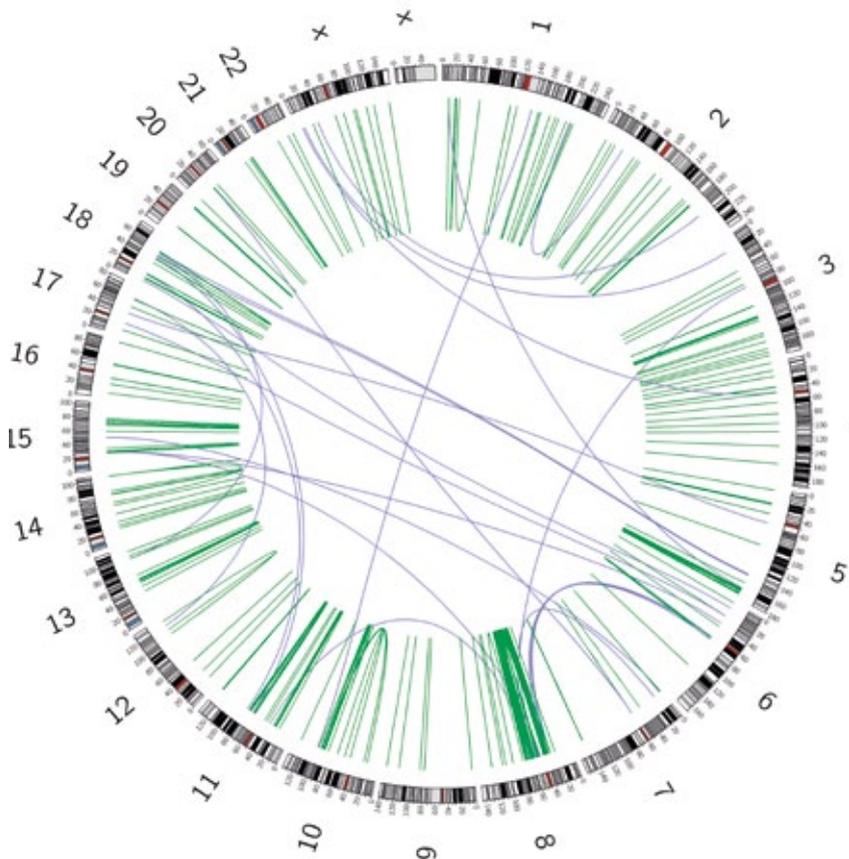
Vor 13 Jahren gelang es einem internationalen Forschungsverbund, im Rahmen des Humangenomprojekts das menschliche Erbgut vollständig zu entziffern. Zehn Jahre intensiver Sequenzierungsarbeit, ausgeführt von Wissenschaftlern an weltweit mehr als 40 Instituten, waren notwendig gewesen, um die 3,4 Milliarden Bausteine unseres Genoms zu erfassen und zu dokumentieren.

Kaum jemand hätte damals gedacht, dass diese Aufgabe ein gutes Jahrzehnt später gerade mal noch ein paar Tage in Anspruch nehmen würde. Die unglaubliche Beschleunigung ist den Sequenzierungsmethoden der so genannten zweiten Generation zuzuschreiben. Stützte sich das Humangenomprojekt noch auf die »Sanger-Methode«, die jeweils einen bestimmten DNA-Abschnitt linear ausliest, analysieren die meisten Sequenziergeräte heute Millionen verschiedener DNA-Bruchstücke gleichzeitig. Die ermittelten Teilstrecken werden dann von Computerprogrammen zur vollständigen Sequenz zusammengesetzt. Dieses massive Parallelarbeiten hat den Vorgang nicht nur sehr viel schneller, sondern auch billiger gemacht. Binnen zwölf Jahren sanken die Kosten für die Entzifferung eines menschlichen Genoms von 100 Millionen auf 5000 Dollar.

Davon profitiert unter anderem die Onkologie. 2008 schlossen sich die weltweit führenden Zentren der Genomforschung zum »International Cancer Genome Consortium« zusammen (sinngemäß: internationales Krebsgenomprojekt, ICGC). Sein Ziel lautet, 25000 Genome zu entziffern, welche die 50 wichtigsten Krebsarten repräsentieren. Denn schon lange ist klar: Kaum eine Krankheit hat eine so

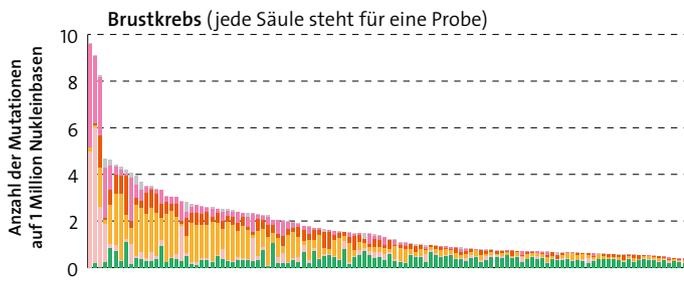
ausgeprägte genetische Komponente wie Krebs. Sowohl spontan als auch durch Umwelteinflüsse entstehen jeden Tag Veränderungen in den DNA-Molekülen. Meist korrigiert die Zelle sie mit einer ausgefeilten Reparaturmaschinerie. Manchmal aber bleiben die Veränderungen bestehen und manifestieren sich als genetische Mutationen. Diese können eine Zelle entarten lassen – insbesondere wenn sie Gene betreffen, deren Produkte die Teilungsaktivität der Zelle kontrollieren.

Ein solches Kontrollprotein ist p53. Forscher entdeckten den Eiweißstoff Ende der 1970er Jahre. Mittlerweile zählt der DNA-Abschnitt, der die Bauleitung für dieses Protein enthält, zu den bekanntesten »Krebsgenen«. Er erweist sich in mehr als der Hälfte aller untersuchten Tumoren als mutiert. Veränderungen in diesem DNA-Abschnitt entstehen beispielsweise durch Rauchen oder infolge von UV-Strahlung. Sie können so schwerwiegend sein, dass das Gen nur noch funktions-

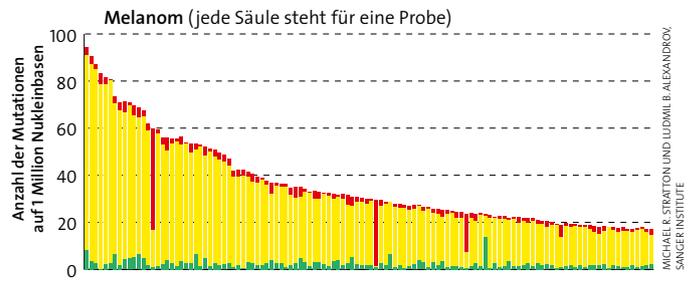


Genetische Veränderungen in einer Brustkrebszelle. Das Genom der Zelle ist als Kreis dargestellt, unterteilt in die 22 Chromosomen plus zwei Geschlechtschromosomen. Die Linien zeigen an, wo Erbgutabschnitte ausgetauscht sind (grün: innerhalb ein und desselben Chromosoms, blau: zwischen verschiedenen Chromosomen).

MICHAEL R. STRATTON, SERENA NIK-ZAINAL, MANASA RAMAKRISHNA UND SUSANNA L. COOKE, SANGER INSTITUTE



Die Zahl genetischer Mutationen, die Krebs entstehen lassen, ist je nach Tumorart verschieden. Hier sind typische Mutationsmuster (»Signaturen«) durch je eigene Farben gekennzeichnet. Links: Brustkrebszellen tragen häufig Erbgutveränderungen, die durch



APOBEC3-Enzyme verursacht werden (hell- und dunkelrosa). Rechts: In Hautkrebszellen herrschen Mutationen vor, die durch Einwirken von UV-Strahlen entstehen (gelb). Auch das Krebsmedikament Temozolomid hinterlässt typische Erbgutschäden (rot).

MICHAEL STRATTON UND LUDWIG B. ALEXANDROV, SANGER INSTITUTE

lose p53-Proteine hervorbringt. Die betroffenen Zellen können unter anderem ihre DNA-Schäden nicht mehr reparieren und sind nicht mehr in der Lage, in den programmierten Zelltod zu gehen. Dies begünstigt die Entstehung etwa von Lungen- oder Hautkrebs.

Der Zusammenhang zwischen Veränderungen im p53-Gen und dem Risiko für bestimmte Krebsarten ist mittlerweile gut erforscht. Auch kennt man inzwischen einige weitere Gendefekte, die etwa das Brust- oder Darmkrebsrisiko erhöhen. Der nächste Schritt besteht darin, vollständige Genome von entarteten Zellen zu sequenzieren, um krebstypische Mutationsmuster zu finden sowie zu ermitteln, was diese Mutationen auslöst. Eine solche Komplettssequenzierung erfasst jeweils tausende Veränderungen im gesamten Erbgut der untersuchten Zelle statt nur einiger weniger in ausgesuchten Genen. Wenn man das an vielen Tumorzellen wiederholt, schälen sich bestimmte Mutationsmuster heraus, denen jeweils wahrscheinlich die gleiche Ursache zu Grunde liegt. »Wir erhalten also eine Art Fingerabdruck erbgutverändernder Prozesse«, sagt Michael Stratton vom Wellcome Trust Sanger Institute in Hinxton (England) und Mitbegründer des internationalen Krebsgenomprojekts. »Das Ziel lautet, aus den Mutationsmustern abzuleiten, wie sie jeweils erzeugt wurden – um so zu ermitteln, was das Tumorstadium ausgelöst hat.«

Strattons Team hat 5 Millionen Mutationen in Zellen aus 7000 Tumorproben analysiert (*Nature* 500, S. 415, 2013),

die insgesamt 30 verschiedene Tumorarten repräsentierten. Die Forscher erfassten jeweils, um welchen Defekt es sich genau handelte – etwa den Austausch, den Einschub oder das Fehlen von Nukleotiden – sowie den Ort auf dem DNA-Strang, an dem er auftrat. Mit Hilfe eines mathematischen Modells extrahierten sie aus den Ergebnissen 21 häufige Mutationsmuster, die sie zum Teil bestimmten Ursachen zuordnen konnten.

Eines davon ließ sich auf den Einfluss von Tabakrauch zurückführen: Die Forscher fanden dieses Muster in 70 Prozent aller Lungentumoren. Es zeichnet sich dadurch aus, dass die Nukleinbase Guanin, sofern sie in der Sequenz nach einem Cytosin auftaucht, häufig durch Thymin ersetzt ist. Dies geschieht, weil die im Tabakrauch enthaltenen polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe sich an solche Guaninmoleküle anlagern. Infolgedessen erkennt die zelluläre Replikationsmaschinerie den Guaninbaustein nicht mehr. Anstatt nun an der entsprechenden Stelle des neu synthetisierten Strangs ein Cytosin einzubauen (nach dem Prinzip der komplementären Basen), fügt sie dort ein Adenin ein. Dies führt in der nächsten Zellgeneration zu einem Thyminbaustein im wiederum komplementären DNA-Strang – an Stelle des eigentlich korrekten Guanins.

Ein anderes Muster lässt sich auf den Einfluss von UV-Strahlung zurückführen. Hier verknüpft die Energie der Photonen benachbarte Cytosine im DNA-Strang, so dass sie für den Replikations-

apparat nicht mehr lesbar sind. Die Replikationsmaschine baut nun auf dem gegenüberliegenden Strang zwei Adenine ein statt zweier Guanine – was in der darauf folgenden Zellgeneration zu einer Thymindublette im wiederum komplementären Strang führt. In Strattons Studie wiesen 90 Prozent aller Melanomzellen diese Signatur auf.

### Kollateralschaden im Körper

Die Untersuchungen legten jedoch auch ein bis jetzt völlig unbekanntes Muster zu Tage. Hier ist Cytosin durch Guanin oder Thymin ersetzt – und zwar in ganz bestimmten Abschnitten des Erbguts, die in vielen Krebszellen massiv verändert sind. Diese »Kataegis-Regionen«, benannt nach dem griechischen Wort für »Sturm«, hatten die Forscher um Stratton im vorvergangenen Jahr bei Brustkrebszellen entdeckt (*Cell* 149, S. 979, 2012). Den neuen Untersuchungen von Strattons Team zufolge lassen sich Kataegis-Regionen sogar bei der Hälfte aller analysierten Tumorproben nachweisen.

Die Forscher führen das auf eine bestimmte Gruppe von körpereigenen Enzymen zurück, die so genannten APOBEC3s. Diese Enzyme spielen eine Rolle in der Immunreaktion gegen bestimmte Retroviren. Sie greifen in das Erbgut der Viren ein, verändern dort Cytosinbausteine und setzen so die Eindringlinge außer Kraft. Es scheint, postulieren die Forscher, als ob diese Enzyme gelegentlich auch auf das körpereigene Genom losgingen und dort sozusagen Kollateralschäden anrichtete-

ten. Hinterlassenschaften der APO-BEC3s fanden die Forscher in 75 Prozent der Proben von Gebärmuttertumoren, sowie in 50 Prozent der untersuchten Blasen Tumoren.

Komplexere Mutationen, etwa Chromosomenbrüche oder epigenetische Veränderungen, die zunehmend in den Fokus der Krebsforscher rücken, erfasste Strattons Team vorerst nicht. Das soll später geschehen und wird wohl – auch

angesichts der schnell wachsenden Zahl sequenzierter Krebsgenome – bald weitere Mechanismen der Krebsgenetik offenlegen. »Schon jetzt kommen Mutationsauslöser ans Licht, mit denen wir überhaupt nicht gerechnet hatten«, sagt Stefan Pfister vom Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg, der an dem Projekt beteiligt war. Beim Medulloblastom, einem Hirntumor, der oft Kinder trifft, konnten er

und seine Gruppe ein neues Mutationsmuster identifizieren. Es geht offenbar auf eine genetische Veränderung in der Keimbahn zurück, die das p53-Gen betrifft. Solche Erkenntnisse sind nicht nur wichtig, um besser zu verstehen, wie Krebs entsteht; sie erlauben auch, die Therapie besser abzustimmen.

**Emmanuelle Vaniet** ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

CHEMIE

## Künstliche Base zum Nachweis von DNA-Sequenzen

Die Bindung zwischen den beiden DNA-Bestandteilen Thymin und Adenin ist schwächer als die zwischen Guanin und Cytosin. Das kann genetische Untersuchungen erschweren. Ein nun entwickelter künstlicher Ersatz für Thymin behebt dieses Problem.

VON MARCO MINUTH UND CLEMENS RICHERT

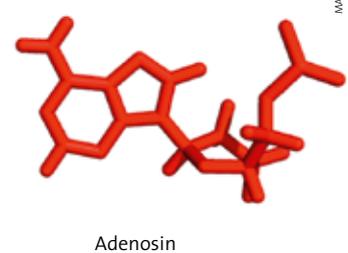
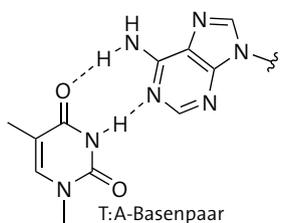
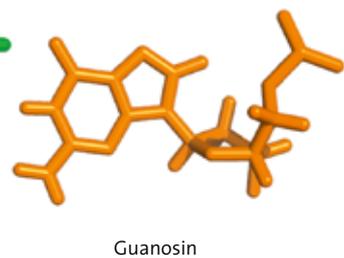
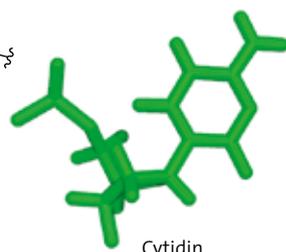
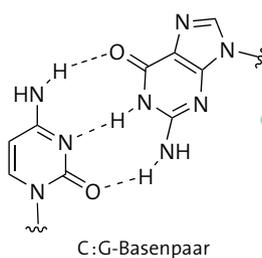
Alle bekannten Lebewesen nutzen die Erbsubstanz DNA als Informationsspeicher. Normalerweise liegt sie als Doppelhelix vor, deren zwei Nucleinsäurestränge sich zu einer räumlichen Struktur umeinander winden, die an eine Wendeltreppe erinnert. Darin bilden Paare von so genannten Nuclein- oder Kernbasen die Treppenstufen und halten die Stränge zusammen. Die Paarung erfolgt dabei spezifisch nur zwischen den »komplementären« Basen Adenin (A) und Thymin (T) beziehungsweise Guanin (G) und Cytosin (C).

Wenn eine Zelle vor der Teilung eine Kopie ihres Erbguts anfertigt, wird die Doppelhelix in die beiden Stränge aufgespalten und zu jedem von ihnen ein neuer Gegenstrang hergestellt. Ähnliches geschieht beim Ablesen von Genen, nur dass der Gegenstrang in diesem Fall aus RNA besteht, die sich nach der Synthese ablöst und zu den Ribosomen wandert, wo sie als Vorlage zum Zusammenbau von Proteinen dient.

Das Prinzip der Paarung zwischen komplementären Kernbasen liegt auch dem direkten Nachweis von genetischem

Material zu Grunde, der in der Medizin, der Biologie und der Forensik inzwischen eine wichtige Rolle spielt. Dabei geht es darum, schnell mit hoher

Treffer Sicherheit festzustellen, ob bestimmte DNA-Sequenzen – also Abfolgen von Basen – vorliegen oder nicht. Das geschieht üblicherweise dadurch,



Die Erbsubstanz DNA enthält die vier Basen Cytosin, Guanin, Thymin und Adenin. Sie sind rechts als dreidimensionale Modelle zusammen mit der Desoxyribose dargestellt, mit der sie die Nucleoside Cytidin, Guanosin, Thymidin und Adenosin bilden. Die Strichzeichnungen links zeigen, wie sich jeweils zwei der Basen über Wasserstoffbrücken (gestrichelte Linien) paaren. Cytosin und Guanin sind über drei solche Bindungen verknüpft, Thymin und Adenin dagegen nur über zwei. Die T:A-Paarung ist deshalb schwächer.

## Ist die Naturwissenschaft unmoralisch?

**Wer sie studiert, könnte das soziale Gespür verlieren.**

Nichts verändert die moderne Welt unmittelbarer als Technik und Wissenschaft. Darum sollten Menschen, die deren Entwicklung vorantreiben, von der Pike auf lernen, sich ihrer sozialen Verantwortung bewusst zu sein. Wie steht es darum? Bekommen die Studenten beigebracht, sich über die gesellschaftlichen Auswirkungen ihrer Arbeit Gedanken zu machen?

Die Soziologin Erin A. Cech von der Rice University in Houston (Texas) befragte 300 angehende Ingenieure zu Beginn und am Ende ihres Studiengangs nach ihrer sozialen Einstellung. Dabei zeigte sich ein ernüchternder Trend: Das Interesse an den gesellschaftlichen Aspekten wissenschaftlich-technischer Forschungsarbeit ist vor dem Studium größer als danach (*Nature* 505, S. 477, 2014).

Ganz allgemein nimmt laut der Studie die Sensibilität für die Verantwortung des Forschers mit fortschreitendem Studium stetig ab. Die Bereitschaft, auf Missstände im eigenen Umfeld hinzuweisen, erlahmt ebenso wie der generelle Wunsch, die Gesellschaft zu verbessern und den Mitmenschen zu helfen.

**Doch nicht nur allgemeine moralische Einstellungen bleiben auf der Strecke;** auch spezifische Fragen zur Anwendung technischer Geräte – wer nutzt sie? wem nützen oder schaden sie? – nehmen die Studenten im Lauf der Ausbildung eher auf die leichte Schulter. Die anwendungsblinde Gedankenlosigkeit kann, wie Cech an zwei Beispielen zeigt, direkt berufsschädigende Folgen haben. So legte die US-Autoindustrie in den 1990er Jahren die neuen Airbags nur für männliche Erwachsene aus, was Verletzungen und Todesfälle unter Frauen und Kindern zur Folge hatte. Und da eine Computertechnik, die aus den Lichtreflexen, welche vom Gesicht einer Person ausgehen, auf deren emotionalen Zustand schließen sollte, nur bei Weißen erprobt wurde, versagte sie bei Menschen anderer Hautfarbe.

Cech ist über das Ergebnis ihrer Studie ziemlich entsetzt und sucht nach Gründen für die soziale Abstumpfung unter amerikanischen Technikstudenten – wobei die Situation hier zu Lande, wie ich vermute, ganz ähnlich sein dürfte. Die Sozialwissenschaftlerin unterstellt externe Ursachen im ideologischen Bereich, das heißt falsche gesellschaftliche Ansichten über Technik und Wissenschaft: Die Studenten verinnerlichen ein verbreitetes Klischee des Forschers als einer unpolitischen, wertfreien und allein der Naturerkenntnis verpflichteten Person.

Doch in diesem Punkt missversteht die Soziologin Cech das Wesen der Wissenschaft, behaupte ich. Das vermeintliche Klischee vom moralfreien Forscher ist gar keine Fehlannahme, sondern beschreibt zunächst durchaus zutreffend die wissenschaftliche Methode, die nur frei von vorgefassten Meinungen, ohne moralische Scheuklappen Naturtatsachen aufzuspüren vermag. Forschung funktioniert vorurteilslos.

Darum ist es für mich gar kein Wunder, dass ein naturwissenschaftliches Studium ganz von selbst eine objektiv-wertfreie, nicht moralische Einstellung fördert. Erst wo diese Grundhaltung betriebsblind wird und wichtige Parameter ausblendet wie in den zwei von Cech genannten Beispielen, geht sie offensichtlich in die Irre und muss korrigiert werden.

Das heißt aber, nun wieder durchaus in Cechs Sinn: Nicht von außen sollen der wissenschaftlichen Ausbildung Ethik-kurse aufgepfropft werden; sie bleiben immer Fremdkörper im Forschungsprozess. Vielmehr wird aus den komplexen Problemen von heute wie von selbst ihr sozialer Aspekt hervorgehen – sofern man ihn nicht gewaltsam unterdrückt, sondern gebührend hervorhebt.



Michael Springer

dass man zu einer einzelsträngigen DNA-Probe »Sonden-Stränge« bekannter Sequenz hinzugibt. Enthalten beide komplementäre Abschnitte, vereinigen sich diese zu einem Doppelstrang. Diese Duplexbildung lässt sich sichtbar machen und zeigt, dass die Probe die gesuchten Sequenzen enthielt.

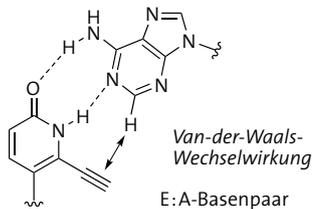
### Mangelnder Zusammenhalt

Ein Problem bei dem Verfahren ist, dass die Stabilität der Duplexe zwischen Sonden- und Probensträngen stark von der Basensequenz abhängt. Bei Guanin und Cytosin sorgen drei Wasserstoffbrücken für einen starken Zusammenhalt. Adenin und Thymin werden dagegen nur über zwei Wasserstoffbrücken verknüpft und haften deshalb nicht so fest aneinander.

Die unterschiedliche Stärke der Basenpaarung ist für die Organismen nützlich. So unterliegen viele Pflanzen und wechselwarme Tiere im Lauf ihres Lebens starken Temperaturschwankungen und müssen auch in der Kälte eine gewisse Genaktivität aufrechterhalten. Da ist es günstig, dass sie über den G/C-Gehalt die Energie anpassen können, die aufzuwenden ist, um an bestimmten Stellen der DNA die beiden Stränge der Doppelhelix zum Ablesen von Genen vorübergehend zu trennen. Auch bei Warmblütern finden sich besonders viele schwache Basenpaare in DNA-Bereichen, in denen die Strangtrennung beim Abschreiben eines Gens beginnt. Man bezeichnet den kurzen Abschnitt vor dem Startcodon daher als »TATA-Box«. Die Natur hatte also keinen Anreiz, im Verlauf der Evolution gleich starke Kernbasenpaare zu entwickeln.

Die unterschiedliche Stabilität der Duplexe zwischen Sonden- und Zielsträngen stört dagegen, wenn es um den simultanen Nachweis mehrerer DNA-Sequenzen im Labor geht. Er gelingt dadurch bei einem hohen Anteil der sich schwach paarenden Kernbasen Adenin und Thymin weniger gut. Abhilfe versprechen hier synthetische Sonden mit künstlichen Basen, die für eine festere Bindung mit dem Zielstrang sorgen.

Als besser haftenden Ersatz für Adenin kennt man schon seit Langem eine



MARCO MINUTH UND CLEMENS RICHERT

Das neu entwickelte Thymidinanalogen »E« trägt eine Ethingruppe, welche die Paarung mit dem Adenosin vermutlich durch anziehende Van-der-Waals-Wechselwirkungen verstärkt.

Variante mit einer zusätzlichen Aminogruppe (NH<sub>2</sub>), die eine dritte Wasserstoffbrücke bilden kann. Wie Untersuchungen ergaben, bietet sie vor allem bei der parallelen Analyse von mehreren tausend DNA-Proben auf so genannten Mikroarrays Vorteile. Allerdings ist sie teuer und zersetzt sich leichter. Am Thymin ließe sich zwar auch eine weitere Aminogruppe anbringen, doch wäre sie nutzlos, weil dem Paarungspartner Adenin eine geeignet platzierte Andockstelle für eine weitere Wasserstoffbrücke fehlt.

An der Universität Stuttgart konnten wir nun ein Thymin-Analogon entwickeln, das über eine zusätzliche Van-der-Waals-Wechselwirkung eine festere Bindung an Adenin ermöglicht (*Ange wandte Chemie* 125, S. 11074, 2013). Genauer gesagt, erzeugten wir einen Ersatz für Thymidin. So bezeichnet man die Base, wenn sie mit dem Zucker Desoxyribose verbunden ist und somit als »Nukleosid« vorliegt, wie das in der DNA der Fall ist. Bei der neuen Substanz handelt es sich um 6-Ethynylpyridon-C-Nukleosid, dem wir das Buchstabenkürzel »E« gaben.

Dieses Molekül bildet wie Thymin zwei Wasserstoffbrücken zu Adenin. Außerdem aber trägt es an jener Kante, die bei der Paarung zum Gegenstrang zeigt, eine Atomgruppe, die sich vom Ethin ableitet und eine Kohlenstoff-Kohlenstoff-Dreifachbindung aufweist. Dieser Ethin-»Stab« tastet das komplementäre Adenin gewissermaßen zusätzlich ab und nähert sich dabei einem Wasserstoffatom, so dass zwischen beiden vermutlich eine anziehende Van-der-Waals-Wechselwirkung auftritt. Das ist so ähnlich, als hätte man bei einem Schlüssel den Bart verlängert, damit er nur noch

in ein bestimmtes Schloss unter mehreren ähnlichen passt.

Der verbesserte Ersatzstoff für Thymin sieht zwar nach einem recht einfachen Molekül aus, doch seine chemische Synthese erwies sich als äußerst knifflig. Etliche Versuche endeten in einer Sackgasse. Erst nach mehr als zehn Jahren war schließlich eine Syntheseroute erfolgreich, die ausgehend von der Desoxyribose nicht weniger als 14 Reaktionsschritte umfasste. Sie lieferte einige Milligramm der gesuchten Substanz.

Damit bauten wir dann DNA-Stränge auf, welche die künstliche Base an Stelle von Thymin enthielten. Das geschah – mit Ausnahme eines Schritts, den wir vorsichtshalber von Hand durchführten – in einem DNA-Syntheseautomaten. In Hybridisierungsexperimenten mit den so hergestellten Sonden konnten wir schließlich zeigen, dass diese sich sowohl mit DNA- als auch mit RNA-Zielsträngen, die reich an Adenin sind, stabiler und selektiver paarten als entsprechende thyminhaltige Stränge.

Der Erfolg war keineswegs selbstverständlich. Denn so plausibel unsere Überlegungen klangen, ließ sich das Ergebnis nicht mit Sicherheit vorhersagen. Die hohe Spezifität von E dürfte auch damit zusammenhängen, dass der Ethin-Stab bei Paarungen mit anderen Basen als Adenin im Weg ist und so die Ausbildung von Wasserstoffbrücken unterbindet. Mit unserer neuen Kernbase besteht nun die Hoffnung auf diagnostische Tests, die noch genauer, selektiver und empfindlicher sind als die bisher verwendeten.

**Marco Minuth** ist Doktorand und **Clemens Richert** Professor am Institut für Organische Chemie der Universität Stuttgart.

## GEHIRN UND GEIST



Christiane Gelitz (Hrsg.)

### Profiler & Co

Kriminalpsychologen auf den Spuren des Verbrechens

Ein Ehemann, der seine Frau erwürgt. Eine Krankenschwester, die ihre Patienten ermordet. Kriegsverbrecher, die Lust am Töten haben.

Im Dienste der Wahrheit arbeiten Polizei und Gerichte mit Psychologen und Hirnforschern zusammen. Wissenschaftler und Journalisten schildern, welche Methoden den Strafverfolgern beim Ermitteln helfen – Profiling, Computerprogramme, Verhörtechniken, Aussageanalyse, Lügendetektoren.

Fundiert und eindrücklich ergründen die Autoren Motive und Hintergründe von Verbrechen, erstellen psychologische Täterprofile und analysieren die Ursachen von Gewalt.

Auch die Bedeutung psychologischer und neurobiologischer Befunde für die Rechtsprechung wird beleuchtet. Wissenschaftler und Journalisten erzählen dazu wahre Geschichten aus der kriminologischen Forschung und Praxis.

2013. 172 Seiten, 16 Abb., kart.  
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)  
ISBN 978-3-7945-2962-9

Jetzt bestellen!

Internet: [www.schattauer.de/shop](http://www.schattauer.de/shop)  
E-Mail: [order@schattauer-shop.de](mailto:order@schattauer-shop.de)



 **Schattauer**  
[www.schattauer.de](http://www.schattauer.de)

# Wurzeln der Demenz

Eine Kettenreaktion, die im Gehirn massenhaft toxische Proteine produziert, liegt den so genannten Prionenkrankheiten zu Grunde. Nach neuen Erkenntnissen könnte dieser Mechanismus aber auch eine mögliche Ursache für Alzheimer, Parkinson und andere todbringende Erkrankungen darstellen.

Von Lary C. Walker und Mathias Jucker

Untersucht ein Pathologe eine Gewebeprobe aus dem Gehirn eines Alzheimerpatienten unter dem Mikroskop, kann er um die geschädigten Nervenzellen herum seltsame Proteinklumpen erkennen. Woher sind sie gekommen, und was haben sie mit der unheilbaren Erkrankung zu tun? Die Suche nach Antworten auf solche Fragen hat zu einer überraschenden Erkenntnis geführt: Die verklumpten Proteine, die bei der Alzheimerkrankheit und anderen schweren neurodegenerativen Störungen zu finden sind, verhalten sich ähnlich wie Prionen – jene ansteckenden Moleküle, die bei der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit oder beim Rinderwahnsinn das Gehirn zerstören.

Prionen sind deformierte, sehr widerstandsfähige Proteine, die ihresgleichen dazu veranlassen, sich ebenfalls falsch zu falten und dadurch schließlich miteinander zu verklumpen. Dies löst eine Kettenreaktion aus, die letztlich ganze Hirnregionen zerstört. In den letzten zehn Jahren haben Forscher herausgefunden, dass ein ähnlicher Prozess auch bei schweren neurodegenerativen Erkrankungen ablaufen könnte, etwa der Alzheimer- und der Parkinsonkrankheit, der amyotrophen Lateralsklerose (ALS) sowie dem mit Gehirnerschütterungen zusammenhängenden Demenstyp, unter dem zum Beispiel manche Boxer leiden.

Nun sind diese Störungen nach derzeitigem Wissen nicht ansteckend wie Creutzfeldt-Jakob und andere Prionenkrankheiten. Die neuen Erkenntnisse liefern jedoch einen Angriffspunkt für Therapien gegen eine ganze Reihe zerstörerischer Erkrankungen des Gehirns. Gegen Alzheimer entwickelte Medikamente etwa könnten dann auch bei Parkinson oder Hirntraumata wirken.

Die Entdeckungsgeschichte der Prionen führt zurück zum Beginn des 18. Jahrhunderts, als Berichte über eine seltsame, tödlich verlaufende Krankheit bei Schafen auftauchten, die Scrapie (im Deutschen Traberkrankheit) genannt wurde. Sie erhielt ihren englischen Namen, weil sich die betroffenen Tiere zwanghaft ihre Wolle von der Haut scheuerten (to scrape = kratzen, schaben). Als Forscher später begannen, die Krankheit näher zu untersuchen, bemerkten sie unter dem Mikroskop, dass das Gehirn der Schafe wie ein Schwamm durchlöchert war. In den 1930er Jahren stellten französische und britische Wissenschaftler dann fest, dass Scrapie von einem Schaf auf ein anderes übertragen werden kann. Doch der eigentliche Krankheitserreger blieb schwer zu fassen und wies seltsame Eigenschaften auf: Die Inkubationszeit zwischen Ansteckung und dem Auftreten von Symptomen war viel länger als bei konventionellen Keimen wie Bakterien oder Viren, und es fehlte die typische Immunreaktion, die normalerweise eintritt, um solche Angreifer abzuwehren.

Zwar deuteten derlei Besonderheiten bereits auf eine unübliche Krankheitsursache hin, aber noch etwa 20 Jahre nach diesen Berichten galt Scrapie bloß als obskure Tierseuche. In den 1950er Jahren bemerkte dann William Hadlow, der damals in der British Agricultural Research Council Field Station (Feldstation des britischen Landwirtschaftsforschungsrats) in Compton arbeitete, auffällige Ähnlichkeiten zwischen den Gehirnveränderungen bei Scrapie und einer menschlichen Krankheit namens Kuru. Dabei handelt es sich um eine neurodegenerative Erkrankung, die fast ausschließlich beim Volk der Fore auf Papua-Neuguinea auftritt und bei der eine kontinuierliche Abnahme der Koordinationsfähigkeit und der geistigen Fähigkeiten ausnahmslos zum Tod führt. Etwas später stellte man fest, dass Kuru bei den Fore

## AUF EINEN BLICK

### DOMINOEFFEKT IM GEHIRN

**1** Bei Creutzfeldt-Jakob-Krankheit und Rinderwahnsinn spielen abnormale, toxisch wirkende Formen bestimmter Proteine – **Prionen** genannt – eine Rolle. Sie bringen die normalen Exemplare dieser Proteine dazu, sich ebenfalls zu verformen.

**2** Solche Prozesse scheinen ebenfalls für schwere neurodegenerative Erkrankungen verantwortlich zu sein, etwa die **Alzheimer- und die Parkinsonkrankheit** sowie ALS, auch wenn sie die Krankheit nicht von Mensch zu Mensch übertragen.

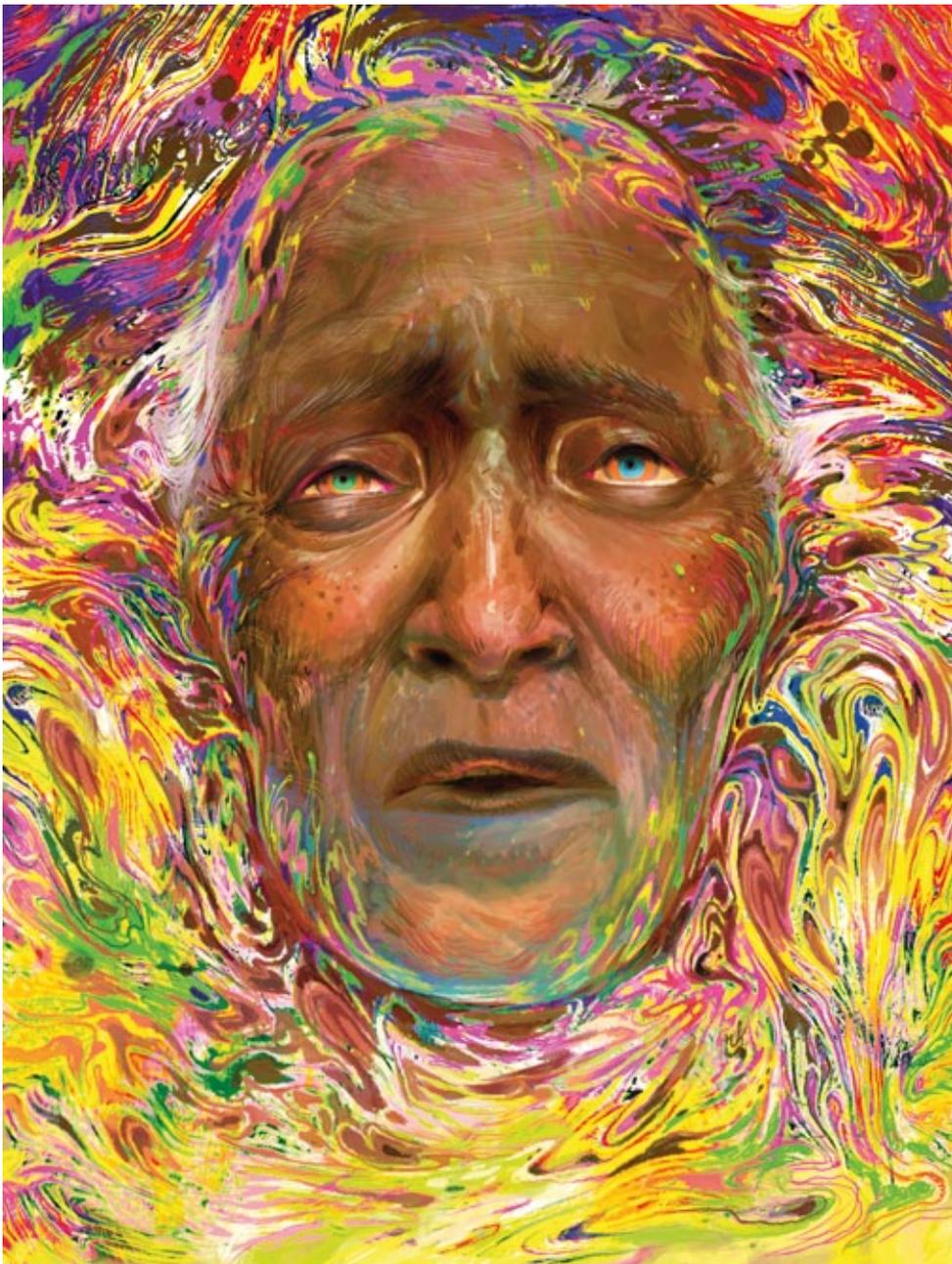
**3** Erkenntnisse darüber, wie sich solche **Proteine verformen**, könnten zu neuen Wegen führen, über die sich einige der weltweit verbreitetsten neurologischen Krankheiten behandeln lassen.

vom rituellen Verzehr des Fleisches von Angehörigen herührt, die an der Krankheit gestorben waren.

In den 1960er Jahren zeigten Daniel Carleton Gajdusek von den National Institutes of Health der USA und seine Kollegen, dass sich Kuru durch Injektion von Gehirngewebe aus Kuru-Opfern in die Gehirne von Primaten übertragen lässt. Das Team erkannte zudem Parallelen zwischen Kuru und der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, einer schnell fortschreitenden Demenz, an der etwa einer von einer Million Menschen weltweit leidet. Letztere ist in derselben Weise übertragbar wie Kuru, auch wenn sie beim Menschen meist spontan auftritt.

Schließlich identifizierte Stanley Prusiner von der University of California in San Francisco in den 1980er Jahren den

Erreger, der Scrapie und verwandte Erkrankungen verursacht. Diese sind kollektiv als übertragbare spongiforme Enzephalopathien (schwammartige Hirnleiden) bekannt, weil das Gehirn durch sie das Aussehen eines Schweizer Käses bekommt (siehe SdW 3/1995, S. 44). Prusiner und seine Mitarbeiter häuften überzeugende Belege dafür an, dass der Krankheitserreger lediglich die fehlgefaltete Version eines harmlosen Proteins namens PrP darstellt. Dafür prägte Prusiner den Begriff »Prion«. Heute beginnt man diesen auch für Proteine zu verwenden, die ihre Form ähnlichen Eiweißen aufzwingen, aber nicht ansteckend sind. Prusiners Idee, ein Protein könne eine Krankheit übertragen, löste zwar zunächst eine Kontroverse aus – doch 1997 erhielt er für seine Arbeiten den Nobelpreis.



Bei der Alzheimererkrankung und anderen Demenzen gehen nach und nach die kognitiven Fähigkeiten verloren, bis sich zuletzt oft sogar die Persönlichkeit auflöst. Eine wichtige Rolle im Krankheitsverlauf spielen Klumpen aus zusammengeballten Proteinmolekülen im Gehirn – sowohl innerhalb als auch außerhalb der Nervenzellen.

RONALD KURNIAWAN

In letzter Zeit zeichnet sich ab, dass neurodegenerative Erkrankungen wie Alzheimer in ähnlicher Weise entstehen und sich im Gehirn ausbreiten könnten – auch wenn ihnen die Infektiosität klassischer Prionenkrankheiten fehlt. Den zu Grunde liegenden Prozess nennen wir pathogene Eiweißkettenreaktion. Wie die Prionen, die für Scrapie und verwandte Erkrankungen verantwortlich sind, werden die verursachenden Protein-Aggregationskeime von Zellen transportiert, freigesetzt und von anderen Zellen wieder aufgenommen. Das könnte erklären, wie sich die Krankheit von einem Ort zum anderen ausbreitet. Damit stellt das Prionenparadigma eine mögliche Verbindung zwischen scheinbar unterschiedlichen Erkrankungen her.

Den ersten Hinweis darauf gab es schon in den 1960er Jahren. Damals stellten Forscher bei ihrem Bemühen, die rätselhaften Prionenkrankheiten zu begreifen, Ähnlichkeiten mit den hirngeweblichen Veränderungen fest, die bei anderen neurodegenerativen Erkrankungen auftreten, insbesondere der Alzheimerkrankheit. Diese häufigste Ursache von Demenz bei alternden Menschen taucht schleichend auf und entwickelt sich dann unerbittlich über viele Jahre hinweg weiter. Sie raubt dem Opfer sein Gedächtnis, seine Persönlichkeit und schließlich das Leben. Die Häufigkeit von Alzheimer verdoppelt sich ab einem Alter von 65 Jahren alle fünf Jahre, bis mit 90 rund ein Drittel aller Erwachsenen betroffen ist.

Die Forscher jener Zeit wussten, dass an dieser Krankheit eine Verklumpung von Proteinen beteiligt war. Im Jahr 1906 hatte Alois Alzheimer, nach dem sie benannt ist, die Demenz als Erster mit zwei nur im Mikroskop erkennbaren Anomalien im Gehirn in Verbindung gebracht: senilen Plaques, die sich außerhalb der Zellen befinden, sowie Neurofibrillenbündeln in den Neuronen. Bei Ersteren handelt es sich um zusammengeklumpte Ansammlungen eines fehlgefalteten Proteinbruchstücks namens Amyloid-Beta, kurz A $\beta$ ; Letztere sind Fäden, die aus vielen Exemplaren des Proteins Tau bestehen. Unter dem Elektronenmikroskop zeigen sich lange Polymerketten aus A $\beta$  oder Tau. Außerdem bilden die Proteine kleinere Aggregate, Oligomere und Protofibrillen. Alle diese Gebilde können die normale Funktion der Neurone stören.

Ende der 1960er Jahre versuchte Gajduseks Arbeitsgruppe herauszufinden, ob die Alzheimerkrankheit genauso übertragbar sein könnte wie Scrapie, Kuru und Creutzfeldt-Jakob. Die Forscher injizierten dazu Hirnsubstanz von Alzheimerpatienten in die Gehirne nichtmenschlicher Primaten. Unabhängig davon führte etwas später ein Team unter Rosalind Ridley und Harry Baker, damals am britischen Clinical Research Centre in Harrow, ähnliche Experimente durch. Gajduseks Studien ergaben keine klaren Resultate; und auch die britischen Forscher schafften es nicht, auf diese Weise voll entwickelten Alzheimer hervorzurufen. Immerhin fanden sie jedoch einen gewissen Effekt: Nach mindestens fünf Jahren waren bei den behandelten Krallenaffen weitaus mehr A $\beta$ -Plaques vorhanden als in einer Vergleichsgruppe.

Damals überlegten unsere Teams bereits zu untersuchen, ob kleine Ansammlungen von fehlgefaltetem A $\beta$  als Keim-

zelle einer Kettenreaktion von Proteinfehlfaltung und Verklumpung dient, die schließlich zu der Art von Proteinablagerungen führt, wie sie das Gehirn bei der Alzheimerkrankheit überschwemmen. Die fünfjährige Inkubationszeit für die Plaquebildung bei Affen entmutigte uns jedoch zunächst.

Die Situation änderte sich Mitte der 1990er Jahre. Damals kamen »APP-transgene« Mäuse auf, die durch gentechnische Veränderung das Vorläuferprotein produzieren konnten, aus dem das menschliche A $\beta$ -Fragment hervorgeht: APP, nach der englischen Bezeichnung »amyloid precursor protein«. Zusammen mit Kollegen und Studenten starteten wir eine Reihe von Experimenten, um die A $\beta$ -Keim-Hypothese an diesen Mäusen zu erforschen. Die Tiere zeigen nicht alle Merkmale der Alzheimerkrankheit, die in ihrer vollen Ausprägung nur beim Menschen aufzutreten scheint, doch sie bieten erhebliche Vorteile für unsere Versuche: Sie sind klein, leicht zu halten und kurzlebig, und jede transgene Maus entwickelt mehr oder weniger im selben Alter spontan A $\beta$ -Ablagerungen im Gehirn.

### **Was löst das Zusammenklumpen von Proteinen im Gehirngewebe aus?**

Bei unseren Studien haben wir uns auf A $\beta$  und nicht auf Tau konzentriert, obwohl sowohl Plaques als auch Fibrillenbündel zur Nervenzellschädigung bei Alzheimerdemenz beitragen. Denn viele Forschungsergebnisse sprechen dafür, dass fehlgefaltetes A $\beta$  die Entwicklung der Krankheit entscheidend vorantreibt. In der Tat beeinflussen viele der bekannten genetischen Risikofaktoren für Alzheimer die Produktion, Faltung, Aggregation oder Abspaltung von A $\beta$ . Bei den häufigsten Mutationen verändern sich das APP oder die Enzyme, die A $\beta$  aus dem Vorläufer ausschneiden (siehe SdW 9/2006, S. 28). Die Forscher wissen jetzt auch, dass das Gehirn bereits ein Jahrzehnt oder mehr vor dem Auftreten von Symptomen Anzeichen von Alzheimer zu zeigen beginnt und dass sich die abnormen Proteinklumpen in einem sehr frühen Stadium der Krankheit bilden. Daher wollten wir wissen, was genau die Proteinaggregation im Gehirn auslöst.

Zunächst untersuchten wir, ob Gehirngewebeextrakte von verstorbenen Alzheimerpatienten in den transgenen Mäusehirnen A $\beta$ -Ansammlungen erzeugen. Könnten wir also die Proteine so verklumpen lassen, wie es die Prionen bei den spongiformen Enzephalopathien machen? Mit Methoden, die für die Prionenforschung entwickelt worden waren, entnahmen wir zunächst kleine Gehirnproben von Alzheimerpatienten sowie zur Kontrolle von Patienten, die an anderen Ursachen als Alzheimer gestorben waren. Wir zerkleinerten das Gewebe und zentrifugierten die Proben kurz, um größere Stücke zu entfernen. Dann injizierten wir etwas von dem verdünnten Extrakt in die Gehirne junger transgener Mäuse.

Und tatsächlich: Drei bis fünf Monate später, also noch bevor die Mäuse sonst anfangen, von sich aus A $\beta$ -Plaques zu produzieren, waren substanzuelle Ansammlungen des Proteins in den Gehirnen jener Tiere zu erkennen, die den Alzheimerextrakt erhalten hatten. Das Ausmaß der Plaquebildung

## Gewaltmarsch durchs Gehirn

Einer Reihe von neurodegenerativen Erkrankungen einschließlich der Alzheimerkrankheit liegen Proteine zu Grunde, die sich zu abnormen Formen verdrehen – und dann andere Proteine dazu bringen, dasselbe zu tun. Bei Alzheimer dient ein fehlgefaltetes Amyloid-Beta-Protein (A $\beta$ ) als »Keim«, der zur Bildung kleiner und großer Proteinklumpen führt, die Nervenzellen schädigen und letztlich abtöten.

### Dominoeffekt falsch gefalteter Proteine

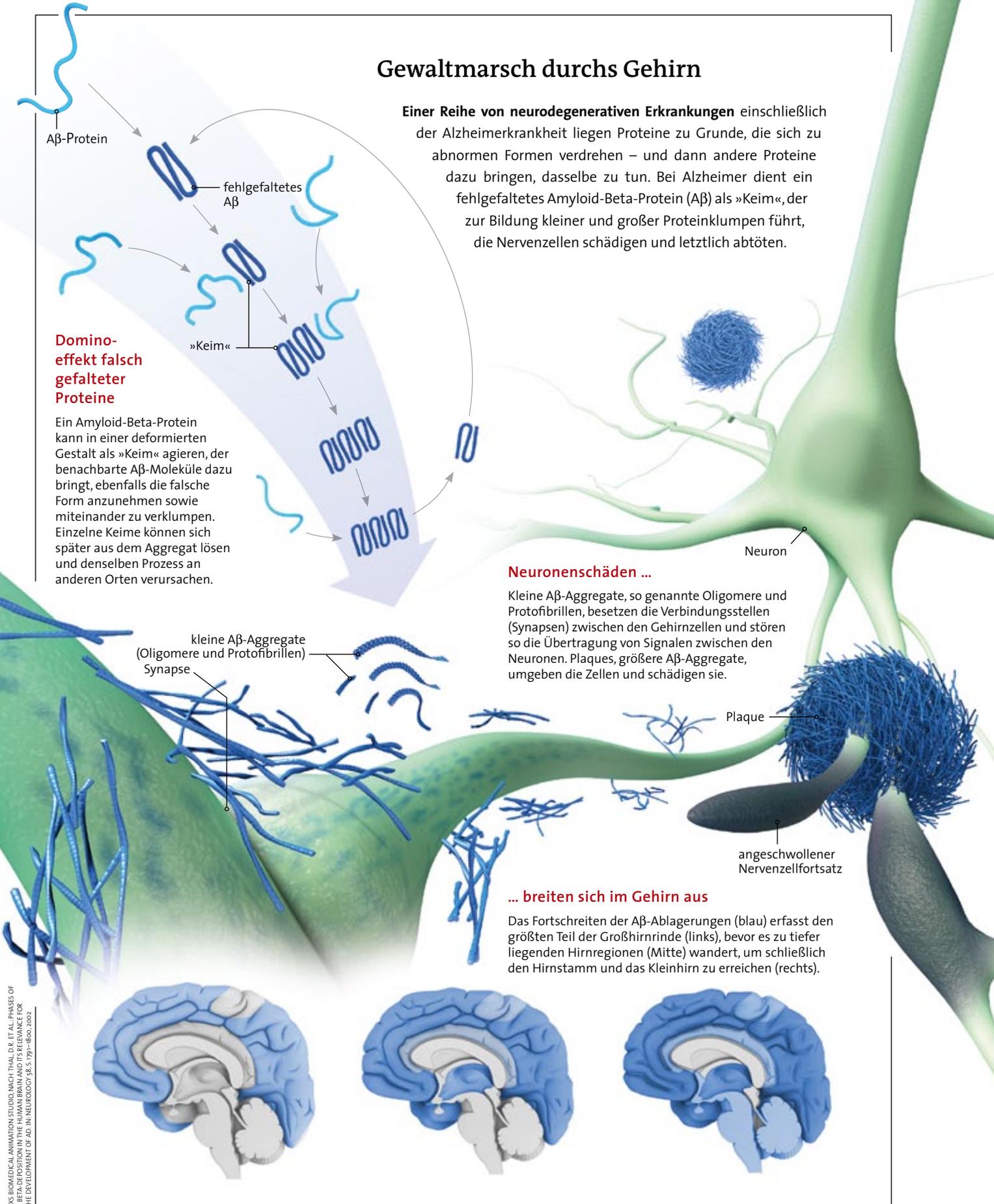
Ein Amyloid-Beta-Protein kann in einer deformierten Gestalt als »Keim« agieren, der benachbarte A $\beta$ -Moleküle dazu bringt, ebenfalls die falsche Form anzunehmen sowie miteinander zu verklumpen. Einzelne Keime können sich später aus dem Aggregat lösen und denselben Prozess an anderen Orten verursachen.

### Neuronenschäden ...

Kleine A $\beta$ -Aggregate, so genannte Oligomere und Protofibrillen, besetzen die Verbindungsstellen (Synapsen) zwischen den Gehirnzellen und stören so die Übertragung von Signalen zwischen den Neuronen. Plaques, größere A $\beta$ -Aggregate, umgeben die Zellen und schädigen sie.

### ... breiten sich im Gehirn aus

Das Fortschreiten der A $\beta$ -Ablagerungen (blau) erfasst den größten Teil der Großhirnrinde (links), bevor es zu tiefer liegenden Hirnregionen (Mitte) wandert, um schließlich den Hirnstamm und das Kleinhirn zu erreichen (rechts).



AXIS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO, MACH THAL, D. & ET AL. PHASES OF THE PATHOLOGY OF THE HUMAN BRAIN AND ITS RELEVANCE FOR THE DEVELOPMENT OF AD. IN: NEUROLOGY 35:3, 1977-8000, 2002

entsprach der Menge an A $\beta$  im Extrakt und der seit der Injektion verflissenen Zeit. Dies würde man auch so erwarten, wenn die Extrakte die Klumpen verursachten. Gleichzeitig löste aber das Vergleichsnervengewebe ohne aggregiertes A $\beta$  keine solche vorzeitige Plaquetbildung bei den Mäusen aus.

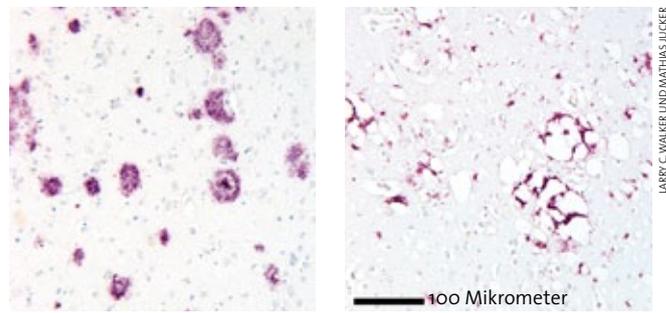
Das bewies allerdings noch nicht, dass das A $\beta$  in den Extrakten für die Plaques verantwortlich war. Hierzu galt es einige weitere Fragen zu beantworten. Zuerst klärten wir, ob es sich bei den A $\beta$ -Ablagerungen in den Mäusen vielleicht um nichts anderes als das injizierte Material selbst handelte. Dies war jedoch nicht der Fall, da die Plaques erst nach einer Wartezeit von einem Monat oder länger erschienen.

Zweitens zogen wir die Möglichkeit in Betracht, dass irgendein anderer Bestandteil des Hirnextrakts die Plaquetbildung angeregt haben könnte – vielleicht ein Virus. Aber als wir zum Vergleich Extrakte von älteren, pathogenfreien APP-transgenen Mäusen verwendeten, wirkten sie genauso effektiv wie die menschlichen, solange sie reichlich aggregiertes A $\beta$  enthielten. Und weil Proben von Gehirnen aus der Kontrollgruppe keine A $\beta$ -Verklumpung verursachten, konnten die Plaques auch nicht einfach eine Reaktion auf die Gewebeverletzung während der Injektion sein.

### Schritt für Schritt zum sicheren Beweis

Zusammengenommen wiesen diese Ergebnisse bereits deutlich darauf hin, dass das A $\beta$  tatsächlich verantwortlich war, aber wir wollten noch direktere Beweise finden. In einem weiteren Schritt entfernten wir mit Hilfe von spezifisch bindenden Antikörpern das A $\beta$  aus den Alzheimergehirnextrakten. Danach konnten diese keine Plaques mehr auslösen. Und schließlich verursachten die Proben auch dann keine Verklumpungen mehr, wenn wir die fehlgefaltete dreidimensionale Proteinstruktur mittels starker Säure zerstörten. Die Form des Proteins bestimmt also seine Fähigkeit, die Fehlfaltung und Aggregation anderer A $\beta$ -Moleküle anzuregen.

Damit schien uns hinreichend sicher, dass fehlgefaltetes A $\beta$  den aktiven Keim in den Gehirngewebsproben darstellt. Dann sollte man aber auch die Plaquetbildung allein durch künstlich hergestelltes A $\beta$  anstoßen können, das man in einem Reagenzglas zum Verklumpen bringt, ohne all die anderen Substanzen im Gehirn. Allerdings hatten Studien mit Prionen gezeigt, dass solches Labormaterial subtile, aber offenbar wichtige Unterschiede zu Gewebe aufweist, das direkt dem Gehirn entstammt.



Violett: A $\beta$ -Plaques im Gehirn eines Alzheimerpatienten (links) und Prion-Aggregate bei der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit (rechts).

Daher waren wir nicht allzu überrascht, als wir verschiedene Formen synthetischen, aggregierten A $\beta$ s in APP-transgene Mäuse injizierten und nach drei bis fünf Monaten keine offensichtliche Plaquetbildung entdecken konnten. Vor Kurzem haben nun aber Stanley Prusiner und einige Kollegen an der University of California in San Francisco synthetische A $\beta$ -Fasern in die Gehirne APP-transgener Mäuse gespritzt. Nach einer ausgedehnten Inkubationszeit von mehr als sechs Monaten gab es bei den Mäusen endlich klare Hinweise auf dadurch hervorgerufene A $\beta$ -Ablagerungen im Gehirn. Auch wenn sich die synthetischen Keime damit als weniger wirksam erwiesen als die natürlichen, zeigt dies doch, dass reines aggregiertes A $\beta$  allein, in Abwesenheit anderer Faktoren, Plaquetbildung im Gehirn anregen kann.

In neueren Experimenten haben wir begonnen, jene Merkmale von A $\beta$ -Keimen zu untersuchen, dank denen sie die Proteinverklumpung im Gehirn fördern. Da in den Extrakten der größte Teil des A $\beta$ -Proteins in Form langer, unlöslicher Fasern vorkommt, gingen wir zunächst davon aus, dass diese Fasern auch die effektivsten Keime wären. Indem wir die A $\beta$ -reichen Gehirnextrakte bei hoher Geschwindigkeit zentrifugierten, teilten wir sie in zwei Portionen auf: einen unlöslichen Niederschlag am Boden des Zentrifugenröhrchens, hauptsächlich aus A $\beta$ -Fasern, und darüber eine klare Flüssigkeit, die sehr kleine, lösliche Formen des A $\beta$ -Proteins enthält. Wie erwartet, fand sich der weitaus größte Teil des A $\beta$ s im Niederschlag. In die Gehirne transgener Mäuse gespritzt, löste er genauso effektiv eine A $\beta$ -Aggregation aus wie der Gesamthirnextrakt. Unerwarteterweise rief der lösliche Teil jedoch ebenfalls starke Plaquetbildung hervor, obwohl er nicht einmal ein Tausendstel so viel A $\beta$  enthielt wie der Niederschlag.

Kleine lösliche Keime, die sich leichter durchs Gehirn bewegen können als die größeren Fasern, wirken demnach besonders gut. Andererseits baut das Enzym Proteinase K sie sehr schnell ab, was für die Möglichkeit spricht, sie therapeutisch direkt aus dem Gewebe beseitigen zu können. Zudem wäre es denkbar, dass die löslichen Keime auch einfacher in Körperflüssigkeiten zu entdecken sind und so als molekularer Hinweis zur Früherkennung von Alzheimer dienen können, möglicherweise noch bevor Demenz einsetzt. Da die

**W I S** wissenschaft  
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht  
zum Thema »Alzheimer« können Sie kostenfrei  
herunterladen unter

[www.wissenschaft-schulen.de/demenz](http://www.wissenschaft-schulen.de/demenz)

pathologische Eiweißkettenreaktion anscheinend in den frühesten Krankheitsphasen beginnt, könnte das Neutralisieren der Keime Gehirnschäden und Demenz verhindern.

Die Natur nutzt ein und denselben Mechanismus gern für unterschiedliche Zwecke, und die keiminduzierte Proteinaggregation stellt da keine Ausnahme dar: Sie findet sich auch bei nützlichen Vorgängen. In den 1990er Jahren stellte Reed Wickner von den National Institutes of Health die Idee vor, dass einige Pilzproteine diese Strategie verwenden, weil sie den Zellen einen Überlebensvorteil verschafft. Inzwischen haben zahlreiche Arbeitsgruppen sie bestätigt. Darüber hinaus haben Susan Lindquist vom Massachusetts Institute of Technology und Eric R. Kandel von der Columbia University die faszinierende Hypothese aufgestellt, dass die Ausbreitung spezifischer Proteinformen nach Prionenart Gehirnschaltkreise stabilisiert und so Langzeiterinnerungen bewahrt.

### Das Prion-Prinzip tritt in vielerlei Gestalt zu Tage

Bisher drehen sich jedoch die meisten Forschungsergebnisse zur keiminduzierten Proteinaggregation um ihre Rolle bei Krankheiten. Im Gehirn ließen sich folgende Eiweiße damit in Verbindung bringen: das  $\alpha$ -Synuklein (bei der Parkinsonkrankheit), die Superoxid-Dismutase-1 (bei ALS), TDP-43 (ALS und frontotemporale Demenz), Huntingtin (Chorea Huntington) und Tau (verschiedene neurodegenerative Krankheiten). Darüber hinaus sind bei vielen weiteren Hirnerkrankungen Proteinaggregationen beteiligt. Es bleibt zu sehen, ob auch hier das Prion-Prinzip eine Rolle spielt.

Nun haben Forscher bei einigen RNA-bindenden Proteinen, die an der Regulierung der Genaktivität mitwirken, eine »prionenähnliche Domäne« entdeckt, die es dem Eiweiß ermöglicht, ähnlichen Molekülen die eigene Struktur aufzuzwingen. Diese Proteine neigen von Natur aus zum Verklumpen, was bestimmte Mutationen noch fördern können. Und ein Team unter der Leitung von J. Paul Taylor vom St. Jude Children's Research Hospital in Memphis und James Shorter von der University of Pennsylvania fand heraus, dass Mutationen in den prionenähnlichen Domänen zweier Nukleinsäure bindender Proteine – hnRNPA2B1 und hnRNPA1 – eine so genannte multisystemische Proteinopathie verursachen. Dabei handelt es sich um eine komplexe Krankheit, die das Nervensystem ebenso wie Muskeln und Knochen angreift. Darüber hinaus ließen sich experimentell durch Keime Proteine aggregieren, die Erkrankungen außerhalb des Nervensystems verursachen, zum Beispiel Amyloidosen, bei denen veränderte Eiweiße zwischen Körperzellen abgelagert werden.

Kürzlich wurde sogar berichtet, dass in speziellen Formen von Krebs das tumorunterdrückende Protein p53 durch einen prionenähnlichen Mechanismus zusammenklumpt, wodurch p53 seine Schutzfunktion verliert. Vermutlich werden Forscher in Zukunft noch weitere Erkrankungen identifizieren, die mit prionenartiger Ausbreitung von Proteinstrukturen einhergehen.

Wie ermöglicht uns das wachsende Verständnis des Keimbildungskonzepts, Therapien zu entwickeln? Zunächst gilt es

zu klären, auf welche Weise fehlgefaltete Proteine Zellen und Gewebe beeinflussen. Mit diesem Wissen ließen sich selbst dann Schäden vermeiden, wenn die unerwünschte Verklumpung nicht aufzuhalten wäre. Forschungsergebnissen zufolge können Proteinaggregate etwa mit Bestandteilen der Zelle interagieren oder andere Eiweiße daran hindern, ihre zugeordneten Bestimmungsorte zu erreichen.

Wir müssen aber auch besser begreifen, wie solche toxischen Proteine entstehen und wieder vergehen, unter welchen Bedingungen sie sich falsch falten und Ansammlungen bilden. Das Fortschreiten der Krankheit hängt wiederum davon ab, wie Zellen Protein-»Keime« aufnehmen, transportieren und weitergeben. Und schließlich ist bisher unbekannt, warum das Altern das Risiko für neurodegenerative Krankheiten so sehr erhöht. Antworten auf all diese Fragen könnten letztlich zu neuen Methoden führen, mit denen sich pathogene Eiweiße unschädlich machen lassen.

Durch eine einfache Formveränderung kann also ein Protein vom Freund zum Feind werden. In seiner Nobelpreis-Rede sagte der Prionenentdecker Prusiner voraus, dass der grundlegende Prozess, durch den Prionen bei Rinderwahnsinn und verwandten Krankheiten ihre toxischen Eigenschaften auf normale Proteine übertragen, auch bei anderen degenerativen Krankheiten wirken könnte. Im letzten Jahrzehnt ist diese Prognose experimentell bewiesen worden. Tatsächlich könnte die prionenartige keiminduzierte Proteinverklumpung den Ursprung einiger der gefürchtetsten Krankheiten des Alters erklären – und damit als Ausgangspunkt für Behandlungsmaßnahmen dienen, die dem unerbittlichen Fortschreiten neurodegenerativer Störungen Einhalt gebieten. ~

### DIE AUTOREN



**Lary C. Walker** (links) ist Professor am Yerkes National Primate Research Center und außerordentlicher Professor für Neurologie an der Emory University in Atlanta, US-Bundesstaat Georgia.

**Mathias Jucker** ist Professor am Hertie-Institut für klinische Hirnforschung in Tübingen sowie am Deutschen Zentrum für Neurodegenerative Erkrankungen (DZNE) am Standort Tübingen. Beide Autoren haben in den letzten 20 Jahren gemeinsam intensiv zur Alterung des Gehirns und über die Alzheimerkrankheit geforscht.

### QUELLEN

**Jucker, M., Walker, L. C.:** Self-Propagation of Pathogenic Protein Aggregates in Neurodegenerative Diseases. In: *Nature* 501(7465), S. 45–51, 2013

**Jucker, M., Walker, L. C.:** Pathogenic Protein Seeding in Alzheimer Disease and other Neurodegenerative Disorders. In: *Annals of Neurology* 70, S. 532–540, 2011

**Polymeridou, M., Cleveland, D.W.:** Prion-Like Spread of Protein Aggregates in Neurodegeneration. In: *Journal of Experimental Medicine* 209, S. 889–893, 2012

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221319](http://www.spektrum.de/artikel/1221319)

# Was Meisen sich erzählen

Manche Rufe von Meisen erinnern an Merkmale der menschlichen Sprache. Forscher ergründen die unterschiedlichen Bedeutungen des komplexen »Chick-a-dee«-Systems.

Von Todd M. Freeberg, Jeffrey R. Lucas und Indriķis Krams

Viele Singvögel beeindrucken mit ihrem Gesang, verwenden ansonsten aber bei ihrer Kommunikation nur wenige, schlichte Rufe. Umgekehrt die Meisen: Auch sie zählen zu den Singvögeln, doch wirkt ihr Gesang in der Regel recht einfach und besteht nur aus wenigen Noten, während sich ihre Rufe durch erstaunliche Mannigfaltigkeit auszeichnen. Bei vielen Meisenarten fällt hier besonders der hochkomplex gestaltete »Chick-a-dee«-Ruf auf.

Genauer gesagt handelt es sich dabei um eine Folge eng aneinandergereihter unterschiedlicher Einzellaute, welche diese Vögel je nach Situation vielfältig kombinieren. Die lautmalersche Umschreibung stammt aus Nordamerika. Eine Gruppe dort heimischer Meisenarten heißt auf Amerikanisch nicht wie auf Englisch »tit«, sondern nach ihren charakteristischen Rufen »chickadee«. In Europa finden sich für ähnliche Meisenlaute sprachliche Wiedergaben wie »tsi-dää« oder »tsi-tsi-dää-dää«, etwa für die Weidenmeise (*Poecile montanus*) der Ruf »si-tää«.

## AUF EINEN BLICK

### MEISTER DER KOMMUNIKATION

**1** Der **Gesang von Meisen** wirkt recht einfach und monoton. Umso variabler sind andere ihrer Lautäußerungen. Darunter sticht besonders der vielgestaltige **»Chick-a-dee«-Ruf** hervor – das für viele Arten charakteristische schwätzende »Tsi-tsi-dää-dää-ää«.

**2** Manches an der Verwendung der verschiedenen Elemente von Chick-a-dee-Rufen erinnert an Regeln von **menschlicher Sprache**. Die Vögel teilen einander damit vielerlei differenziert mit: Futterquellen, Gefahren, Aufenthalt, aktuelles Verhalten und Befinden, ja sogar Absichten.

**3** Das hochkomplexe Chick-a-dee-System dürfte zum Nutzen der **Schwärme** entstanden sein, in denen viele Meisen außerhalb der Brutzeit leben. Ihr **sozialer Zusammenhalt** im Winter ist für Singvögel ungewöhnlich.

Der Chick-a-dee-Ruf einiger amerikanischer Arten steht schon seit einigen Jahrzehnten im Zentrum von Forschungen. Ein Beispiel ist die etwa blaumeisengroße, schwarz-weiß gezeichnete Carolinameise (*Poecile carolinensis*, Bild rechts), die im Südosten der Vereinigten Staaten häufig vorkommt und bis hin nach Texas, Ohio und New Jersey verbreitet ist. Carolinameisen leben in lichten Wäldern, an Waldrändern und in baumbestandenen Stadtgebieten. Im Frühjahr und Sommer verteidigen die Paare Brutreviere. Für den Winter ziehen diese Vögel jedoch nicht in den Süden – wie auch die meisten anderen Meisenarten normalerweise nicht fortfliegen.

Die Carolinameisen bilden vielmehr ab dem Spätsommer im Umkreis ihrer Brutreviere relativ feste, größere Schwärme mit Rangbeziehungen. Ein solcher Trupp beansprucht ein Territorium, in dem die Mitglieder im Verband Nahrung suchen. Gewöhnlich gehören einem Schwarm verschiedene Meisenarten an und zeitweise noch weitere kleine Singvögel oder sogar Spechte. Meisen bilden aber den Kern der Winterschwärme, und ihre fortwährenden Rufe sind in der kalten Jahreszeit vielerorts die einzigen Vogellaute, die man ständig hört.

Das »Chick-a-dee« zählt zu den komplexesten Signalsystemen von Tieren überhaupt, die Forscher kennen. Während der Gesang von Vögeln vor allem in der Fortpflanzungszeit auftritt und sich typischerweise an Geschlechtspartner und Rivalen richtet, die es anzulocken beziehungsweise fernzuhalten gilt, haben ihre verschiedenen Rufe vielerlei andere Funktionen: Vögel benutzen sie beispielsweise, um sozialen Kontakt herzustellen oder zu halten, um andere über Futter zu informieren, Alarm zu geben oder um – oft im Pulk – auf einen Raubfeind zu »hassen«, also ihn laut schreiend zu attackieren und so zu vertreiben.

Meisen verfügen für solche Zwecke über ein äußerst differenziertes Lautrepertoire, aus dem sich das Chick-a-dee-Rufsystem noch besonders hervorhebt. Und nicht nur ihre verschiedenen Arten verständigen sich untereinander mit dieser breiten Palette an unterschiedlichen Äußerungen, sondern

auch andere Vögel wissen damit offensichtlich etwas anzufangen. Deswegen interessiert uns, woher diese Rufe evolutionär stammen, weshalb sie entstanden, was sie ökologisch bedeuten und auf welche Weise junge Vögel sie womöglich erst erwerben und verstehen lernen. Wichtige Anhaltspunkte dafür versprechen wir uns von Vergleichen verschiedener Meisen. Ein Ziel unserer Forschungen ist es, Zusammenhänge zwischen der Evolution dieser auffallend komplexen Äußerungen und den jeweiligen ökologischen Bedingungen und sozialen Mustern zu verstehen.

Denn die einzelnen Meisenarten, immerhin weltweit rund 50, verhalten sich sozial durchaus nicht alle gleich. Insbesondere unterscheidet sich ihr Zusammenleben außerhalb der Brutzeit. Schlichtmeisen (*Baeolophus inornatus*) etwa, die im Westen der USA vorkommen, streifen selbst im Winter vorzugsweise nur als Paar umher. Doch viele Spezies

treten nun wie beschrieben in kleinen oder größeren Scharen auf. Manche mischen sich mit anderen Arten, andere bleiben unter sich. Diese Verbände sind oft recht stabil und vielfach ortstreu. Kohlmeisen (*Parus major*) hingegen erscheinen in dieser Hinsicht auffallend flexibel. Ihre Schwärme können 50 Artgenossen umfassen. Der Zusammenhalt ist allerdings locker, so dass zwischendurch oft Mitglieder fortfliegen oder andere neu hinzukommen. Auch verhalten sich Kohlmeisen im Winter nicht territorial, und ihre Trupps streifen weit umher, ziehen nicht selten sogar in die Ferne. In Mitteleuropa beobachten Ornithologen in manchen Wintern etwa Kohlmeisen aus Russland.

So ungewöhnlich sonst für Singvögel ein mehr oder weniger festes, monatelanges Zusammenleben miteinander nicht verwandter Individuen sein mag: Für Meisen, die zu den intelligentesten Vögeln zählen, ist gerade das typisch. Solche



Carolinameisen (*Poecile carolinensis*) gehören zu den amerikanischen »chickadees«, die sich durch ein äußerst variantenreiches Rufsystem auszeichnen. Je nach Situation kombinieren sie die Komponenten des bezeichnenden »Chick-a-dee«-Rufs zwar völlig unterschiedlich, aber nach Regeln. Die Anzahl von Rufvarianten scheint unbegrenzt.



Die ebenfalls in Nordamerika heimischen Schwarzkopfmeisen (*Poecile atricapillus*) ähneln den Carolinameisen stark. Bei der Verbreitungsgebiete überschneiden sich an den Rändern. Dennoch unterscheiden sich ihre Chick-a-dee-Rufe deutlich.

Verbände stellen hohe Anforderung an die Kommunikation. Wahrscheinlich hat der Chick-a-dee-Ruf in diesem Zusammenhang seine komplexe Struktur und Vielfalt entwickelt. Das heißt: Evolutionskräfte haben dafür gesorgt, dass die Vögel ihre Stimme differenziert für unterschiedlichste soziale Zwecke einsetzen können, die es in einem solchen Schwarm zu regeln gilt.

In seiner Struktur weist das Tsi-tsi-dää verschiedener Meisenarten einige Gemeinsamkeiten auf, die durchaus an Merkmale der menschlichen Sprache erinnern. So setzt sich ein solcher Ruf aus unterschiedlich gestalteten einzelnen Lauten oder »Noten« zusammen, die unser Ohr auseinanderhalten kann. Die physikalisch-akustischen Eigenschaften dieser Notentypen lassen sich auch grafisch als Sonagramme aufzeichnen und so bildlich veranschaulichen. 2012 haben zwei von uns (Freeberg und Lucas) bei einer Population von Carolinameisen im östlichen Tennessee sechs Notentypen beschrieben, die wir als A, E, B, C, D<sub>h</sub> und D bezeichnen (siehe Kästen S. 31 und S. 32 – wobei die Buchstaben nichts mit Musiknoten zu tun haben). Die gleichen Elemente für diese und andere Chickadee-Spezies hatten einige Jahre zuvor schon Christopher Sturdy und seine Kollegen von der University of Alberta in Edmonton (Kanada) erfasst.

Die Noten A, E und B klingen wie klare Pfiffe mit oft beträchtlicher Frequenzmodulation, also Änderung der Tonhöhe innerhalb der Note. Dagegen ist das C ein schnarrender, geräuschhafter Laut – besteht also aus diversen unharmonischen Frequenzanteilen – und steigt gewöhnlich in die Höhe. Auch das D wirkt geräuschhaft, bleibt aber weitgehend auf gleicher Höhe. Anscheinend enthält das D zwei verschiedene Grundfrequenzen zugleich mitsamt den zugehörigen Obertönen. Der Stimmapparat der Singvögel macht so etwas möglich. Ihr »unterer Kehlkopf«, Syrinx genannt, sitzt an der Stelle, wo am Ende der Luftröhre die beiden Bronchien ansetzen. Diese können dadurch unterschiedlich vibrieren, so dass der Vogel zweistimmig zu singen und zu rufen vermag. Als Hybrid-D-Note (D<sub>h</sub>) bezeichnen wir einen Laut, der wohl als A

oder B beginnt und dann in ein D übergeht. In der von uns untersuchten Meisenpopulation war er nur selten zu hören.

Normalerweise sind die einzelnen Notentypen einem bestimmten Abschnitt im Chick-a-dee-Ruf zugeordnet. Ein Ruf besteht bei unserer Population typischerweise aus durchschnittlich zwei Anfangsnoten – eine Kombination von A-, E- oder B –, dann oft einer C-Note und am Schluss drei D-Noten. Somit baut sich der Ruf aus klar voneinander unterscheidbaren Lauten auf, ähnlich den Phonemen der menschlichen Sprache.

### Unendlich variable Rufe

Die einzelnen Notentypen stehen außerdem in einer festen Reihenfolge. Abgesehen von ganz wenigen Ausnahmen ist dies A-E-B-C-D<sub>h</sub>-D, wobei Elemente – manchmal vielfach – wiederholt werden oder wegfallen können. Bei über 5000 aufgezeichneten Rufen fanden wir so gut wie immer dieses Grundmuster. Das erinnert daran, dass in den Wörtern menschlicher Sprachen die Reihenfolge der Phoneme jeweils bestimmten Gesetzmäßigkeiten gehorcht und manche Folgen in einzelnen Sprachen nicht vorkommen.

Des Weiteren fiel uns auf, dass die Kombinationsmöglichkeiten der Noten im Chick-a-dee-Ruf wohl unbegrenzt sind. Immer wieder stoßen wir auf für uns neue Varianten, auch wenn wir schon Tausende dieser Lautäußerungen analysiert haben. Wir haben das Phänomen mit informationstheoretischem Rüstzeug untersucht. Sogar die Rufe ein- und desselben Vogels erscheinen demnach äußerst und offenbar unbegrenzt variabel, wenn man sie über einen längeren Zeitraum verfolgt. Diese Eigenschaft dürfte einen der Hauptunterschiede zum eingeschränkten Ruf- und Gesangsrepertoire der meisten Singvögel darstellen. Für die menschlichen Sprachen ist sie dagegen charakteristisch.

Nach der Informationstheorie würde man postulieren, dass die diversen Varianten des Chick-a-dee-Rufs jeweils unterschiedliche Informationen enthalten, also wohl eine große Bandbreite an Botschaften übermitteln könnten. Somit

würde ein Vogel, der einen solchen Ruf hört, darüber jeweils etwas Bestimmtes über den Produzenten des Signals und womöglich ebenso dessen nächste Verhaltensabsicht erfahren. Nach den Verhaltensanalysen trifft das auf diese Meisenrufe tatsächlich zu. Denn wie diverse Studien von uns und anderen Forschern zeigen, teilen Meisen einander oder auch anderen Vögeln mit den Rufvarianten offenbar jeweils etwas Bestimmtes über die momentane soziale und sonstige Umwelt oder ihr nächstes Vorhaben mit. Die Botschaft richtet sich oft, aber nicht nur, an Schwarmmitglieder.

Für einen umherstreifenden Meisentrupp kann es von Vorteil sein, stets im Rufkontakt zu bleiben und einander über alle wichtigen Vorkommnisse zu informieren. Auf Futtersuche im Geäst bewegen sich die einzelnen Tiere häufig außer Sichtweite voneinander. Da hilft es, durch Lautäußerungen sofort von Raubfeinden oder guten Futterstellen zu erfahren und es mitzubekommen, wenn die anderen weiter-

fliegen. Neben dem »Tsi-tsi-dää« dürften dabei zwar auch die – nicht wenigen – anderen Rufe von Meisen nützlich sein. Doch verdient dieses besondere Beachtung.

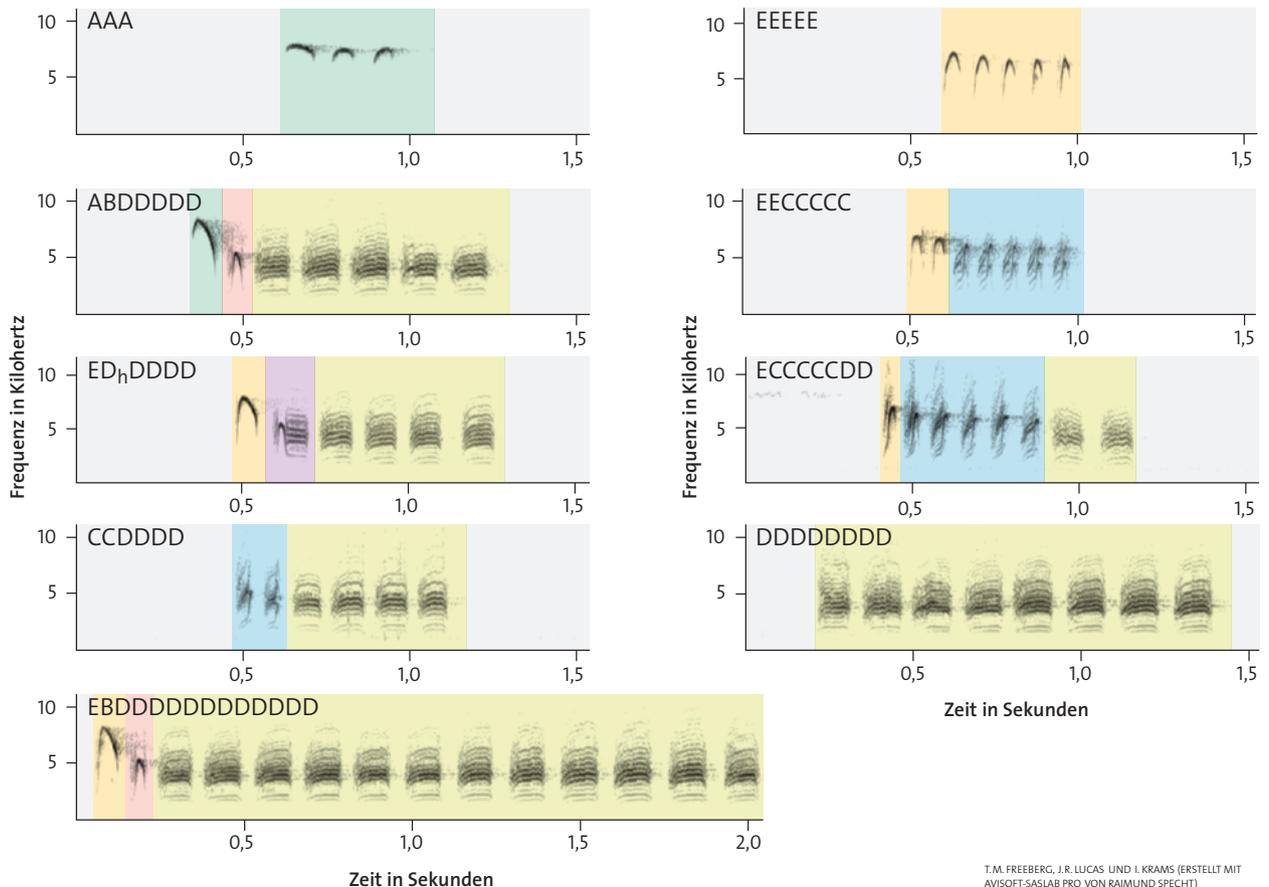
In etlichen Studien zum Sinn des »Chick-a-dee« hatten Forscher Meisen nur mit sitzenden Raubvögeln oder deren unbeweglichen Attrappen konfrontiert. Wir selbst (Freeberg und Christopher Zachau) testeten hingegen die Reaktionen von Carolinameisen auf »fliegende« Modelle. Wir ließen angemalte, mit ausgebreiteten Flügeln versehene Holzattrappen an einer Schnur dicht über einer gut besuchten Fütterungsstelle »fliegen«, in deren Nähe ein Mikrofon angebracht war. Die Attrappe ähnelte entweder dem in Amerika heimischen Eckschwanzsperber (*Accipiter striatus*), der Meisen jagt. Oder sie glich einem ihnen ungefährlichen Blauhäher (*Cyanocitta cristata*).

Erwartungsgemäß reagierten die Meisen schon mit verändertem Rufen, wenn sie das noch nicht bewegte Modell

## Kleine Rufauswahl der Carolinameisen

Die »Noten« in einem Chick-a-dee-Ruf gehorchen stets der gleichen Abfolge. Doch können Notentypen wegfallen oder wiederholt werden, wie in diesen Sonagrammen (Spektrogrammen) von Carolinameisenrufen zu erkennen. So kommt eine anscheinend unbegrenzte Anzahl an Varianten zu Stande.

Jeder der sechs Notentypen ist hier mit einer eigenen Farbe unterlegt. Die für sie verwendeten Buchstaben, jeweils links oben hineingeschrieben, entsprechen nicht Musiknoten. Die Sonagramme wurden mit Software von Raimund Specht erzeugt.





nur sahen, und zwar auf den Sperber mehr als auf den Häher. Aber die größte Wirkung hatte stets ein tatsächlich »fliegender« großer Vogel, egal welcher von beiden. In dem Fall nahm die Anzahl der A-Noten in den Rufen zu. Dass dieses Pfeifelement Alarm bedeutet, leuchtet ein. Solch ein hoher, scharfer, langsam anschwellender Ton lässt sich schwer orten und ist überdies für viele Raubvögel wegen seiner Höhe nicht gut zu hören, dringt als Warnung an die Schwarmgenossen aber gut durch.

Entdecken Meisen hingegen einen ruhig ansitzenden Raubvogel, begegnen sie der Situation, indem sie erstens deutlich öfter als vorher rufen und zweitens dabei mehr D-Noten von sich geben. Das D ist tiefer angelegt, geräuschvoll und wird rasch lauter – der Urheber lässt sich hiermit gut lokalisieren. Diese Note eignet sich hervorragend zum gemeinsamen »Hassen« auf einen Raubfeind, der ja merken soll, dass er entdeckt ist und mit einem Angriff rechnen muss. Chad Soard und Gary Ritchison von der Eastern Kentucky University in Richmond haben solche Bedingungen mit still sitzenden Attrappen von verschiedenen Raubvögeln durchprobiert, nämlich einerseits mit nachgestalteten kleineren, wendigen Eulen und Habichten, die kleine Vögel erbeuten,

sowie andererseits mit Modellen von großen Raubvogelarten, vor denen Carolinameisen keine Angst haben, weil sie in dichter Vegetation nicht gewandt fliegen können. Besonders die kleineren Räuber bekamen viele D-Noten zu hören.

Im Gegenversuch wurden den Meisen Chick-a-dee-Rufe aus den verschiedenen Situationen vorgespielt. Die Vögel attackierten den Lautsprecher vor allem dann, wenn daraus Rufe gegen einen der kleinen Raubvögel ertönten. Demnach dienen D-Noten ebenfalls dazu, Artgenossen zum Zweck des »Hassens« zusammenzubringen, um den Feind gemeinsam in die Flucht zu schlagen.

Auch wenn eine Carolinameise eine gute Futterstelle entdeckt und dort noch allein ist, gibt sie zunächst Rufe mit recht vielen D-Noten von sich, stellten Ellen Mahurin und Freeberg fest. Sobald daraufhin mindestens ein Artgenosse hinzukommt, sinkt dieser Anteil wieder. Wir haben dann an mehreren Fütterungsstellen über Lautsprecher Rufe mit vielen oder wenigen D-Noten abgespielt. Wie erwartet, wurden Carolinameisen von D-reichen Rufen schneller angelockt als von D-armen und fraßen dort zudem eher.

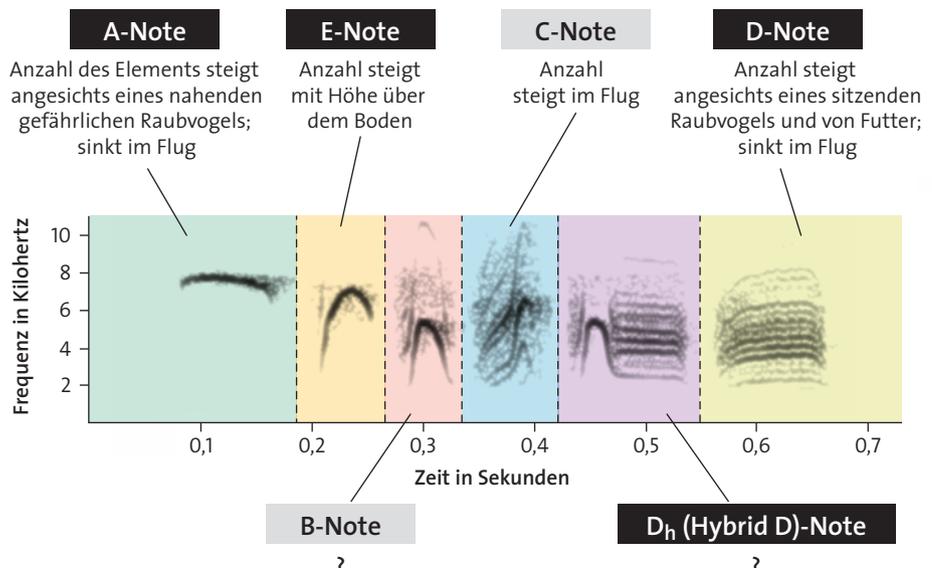
### Akustische Visitenkarte

Schon 2008 hatte Freeberg den Eindruck gewonnen, dass fliegende Meisen wesentlich mehr C-Noten in ihre Rufe einbauen als sitzende oder im Gezweig herumhuschende. Dies bestätigt nun eine jüngere Studie. Der Gehalt an C ist sowohl während des An- und Wegfliegens von einer Futterstelle hoch als auch dann, wenn ein zuvor kurz eingefangener Vogel wieder davonfliegen darf. C-Noten scheinen demnach Ortsveränderungen zu signalisieren und dürften dem Schwarmzusammenhalt in der Luft dienen.

Längst nicht alle Funktionen des »Tsi-tsi-dää« sind hiermit beschrieben. Zum Beispiel motiviert Hunger Carolinameisen, mehr zu rufen als sonst, wie einer von uns (Lucas),

## Notentypen mit Sinngehalt

Für die meisten Notentypen im Chick-a-dee-Ruf der Carolinameisen haben Forscher Funktionen herausgefunden – obwohl es sicherlich noch mehr gibt. Der Sinn von B- und Hybrid-D-Noten ist noch unklar. Die hier schwarz unterlegten Typen verwenden die Populationen der Carolinameisen mit charakteristisch unterschiedlicher Häufigkeit.



T.M. FREEBERG, J.R. LUCAS UND I. KRAMS (ERSTELLT MIT AVISOFF-SASLAB PRO VON RAIMUND SPECHT)



Carolinameisen (links und links unten) sind mit Schwarzkopfmeisen (rechts unten) eng verwandt. An den Grenzen ihrer Verbreitungsbegiete treten immer wieder Hybriden der beiden Arten auf, die dann auch in ihren Rufen Mischformen produzieren.



April Schraeder und Curt Jackson entdeckten, als sie die Energiereserven der Vögel verglichen. Des Weiteren scheint bei dieser Art jede Population ihre Rufe mit einer eigenen Signatur zu versehen. Außerdem sind die einzelnen Vögel wohl sehr verschieden ruffreudig. Vielleicht hat sogar jede Carolinameise eine individuelle Stimme, an der ihre Artgenossen sie erkennen: Zumindest konnten Mitarbeiter von Sturdy einzelnen dieser Meisen manche aufgezeichneten Noten anhand akustischer Besonderheiten zuordnen. Gleiches gelang den Forschern bei anderen Chickadee-Arten.

Überhaupt scheinen viele der vorgestellten Befunde ebenfalls für andere Meisen zu gelten, wie inzwischen eine Reihe von Untersuchungen zeigen. Bei einer der Arbeiten kam zudem heraus, dass Haubenmeisen (*Lophophanes cristatus*) dicht bei einem schützenden Gebüsch anders rufen als im freien Gelände ohne nahe Deckung. Auch die soziale Stellung kann eine Rolle spielen: Dominante Haubenmeisen nutzen das Chick-a-dee anders als rangniedere.

Doch vieles an diesen komplexen Rufen ist noch zu wenig untersucht. Wie der niederländische Ethologe und Nobel-

preisträger Nikolaas Tinbergen (1907–1988) erkannte, lässt sich biologisch nach dem Warum einer Verhaltenserscheinung auf vier verschiedenen Ebenen fragen, und man vermag ein Verhalten nur wirklich zu verstehen, wenn man allen vier Fragen gerecht wird. Zwei davon behandeln unmittelbare (proximate) Vorgänge und Zusammenhänge, die anderen beiden mittelbare (ultimate), nämlich evolutionäre Hintergründe. Die ersten beiden betreffen (1) unter anderem die neuronalen und anderen physiologischen Voraussetzungen und Prozesse im Körper sowie verhaltensrelevante Umweltreize für solche Reaktionen und (2) Bedingungen für und Einflüsse auf die individuelle Entwicklung – einschließlich Lernen und dessen äußere und innere Randbedingungen. Die anderen beiden Ebenen befassen sich (3) mit der evolutionären Anpassung sowie (4) der Herkunft des Merkmals. Sie haben deswegen weniger das einzelne Tier als die Population und Art im Blick, thematisieren somit die Funktion und ökologische Tragweite von Verhalten sowie dessen evolutionäre Wurzeln.

Inwiefern Umweltreize einen Chick-a-dee-Ruf beeinflussen oder sich darin das augenblickliche Befinden des Vogels



Das Schwarmverhalten ist der Schlüssel zu den komplexen Meisenrufen. Kohlmeisen (*Parus major*) zeichnen sich durch eine hohe soziale und räumliche Flexibilität aus. Im Winter bilden sie manchmal Scharen mit mehreren Dutzend Individuen, die weit umherstreifen. Doch deren Zusammenhalt ist lockerer als bei Carolinameisen.

ausdrückt, haben wir schon beschrieben. Darüber hinaus nehmen die Rufkomplexität und der Informationsgehalt bei Carolinameisen in größeren, vielfältiger gestalteten sozialen Gruppen zu. Solche Unterschiede entdeckte Freeberg, als er kleine und große Scharen in Volieren hielt. Die Rufe der großen Scharen erschienen deutlich vielseitiger. Was sich bei den Vögeln dabei neuronal und physiologisch verändert, ist allerdings noch wenig klar.

Bei Schwarzkopfmeisen (*Poecile atricapillus*), eng verwandt mit Carolinameisen, hat Sturdys Forschungsgruppe das Lernen lautlicher Kommunikationsfähigkeit untersucht. Wie sich herausstellte, haben isoliert aufgezogene Weibchen Schwierigkeiten damit, den Gesang von Männchen richtig zu hören und die Tonhöhenunterschiede wahrzunehmen. Leider gibt es bisher kaum Forschungen dazu, wie sich bei jungen Meisen die Rufmuster und deren Erkennen herausbilden. Wir wissen also nicht, welche Einflüsse im Kontakt zu ihren Eltern beziehungsweise später beim Umgang mit anderen erwachsenen Artgenossen dafür wichtig sind.

Was die Evolutionsfragen betrifft, ist davon auszugehen, dass der Chick-a-dee-Ruf mit seinen vielen Erscheinungsformen dem Zusammenleben nützt und dementsprechend Vorteile verschafft. Einander damit anzulocken, sich gegenseitig zu warnen und die anderen über Ortsbewegungen zu informieren, gilt sogar für artgemischte Schwärme. Noch ist allerdings nicht bekannt, ob und inwieweit der Variabilitätsgrad dieser Rufe mit Überleben und Fortpflanzung zusammenhängt. Eine äußerst interessante Frage ist, ob sich die unterschiedlichen ökologischen Verhältnisse von einzelnen Arten oder sogar Populationen in Rufmustern wiederfinden – oder auch, wie sich spezielle Verhaltenszusammenhänge darin widerspiegeln.

Entwicklungsgeschichtlich dürfte das Tsi-tsi-dää der verschiedenen Meisenarten auf einen gemeinsamen Ursprung

zurückgehen, selbst dann, wenn die heutigen Spezies verschiedene Kontinente besiedeln. Allerdings haben die Wissenschaftler dieses Rufsystem bisher nur bei wenigen Arten eingehend untersucht, so dass wir noch kaum etwas darüber wissen, wie und warum dessen große Variabilität überhaupt entstanden ist. Als mögliche Evolutionshintergründe hierfür verfolgen die Forscher einstweilen mehrere Hypothesen.

### Komplexe Rufe für komplexe Sozialbeziehungen

Nach einer dieser Vorstellungen haben Tierarten mit einem differenzierten Gruppenleben vielseitigere Lautäußerungen als andere, weil die Verständigung untereinander höhere Anforderungen stellt. Diese Idee fußt auf zahlreichen Beobachtungen an Säugetieren, Vögeln und auch Reptilien zu lautlichen, chemischen oder visuellen sozialen Signalen. Demnach müssten Meisenpopulationen, die große Schwärme bilden beziehungsweise in vielfältig vernetzten Beziehungen leben, ihre Chick-a-dee-Rufe komplexer gestalten als solche, die weniger Aufwand betreiben. Auf diese Weise wäre der einzelne Vogel dem sozialen Geschehen besser gewachsen, könnte Konkurrenzsituationen leichter begegnen und sich mit anderen nach Bedarf abstimmen. Derartige Randbedingungen würden einerseits unmittelbar das Stimmrepertoire der Gruppenmitglieder fördern, weil sie einen guten Lernrahmen bieten. Andererseits herrschte auf evolutionärer Ebene ein Selektionsdruck in Richtung immer komplexerer Rufe.

In artgemischten Schwärmen könnten sogar die anderen Spezies solch einen Auslesedruck erzeugen. Wie zum Beispiel Marc Nolen und Lucas nachwiesen, interagieren Carolinagleiber (*Sitta carolinensis*) und Indianermeisen (*Baeolophus bicolor*) beim gemeinsamen »Hassen« auf einen Raubvogel stimmlich mit Carolinameisen. Letztere benutzen dann vor allem den Chick-a-dee-Ruf. Chris Templeton und Erick Greene von der University of Montana in Missoula vermu-

ten, dass Kleiber an den Rufen zum Beispiel hören, wie groß die Gefahr ist. Carolinameisen wiederum erkennen den Grad der Bedrohung am Chick-a-dee-Ruf von Indianermeisen, fanden Stacia Hetrick und Kathryn Sieving von der University of Florida in Gainesville heraus. Die beiden Arten sind nicht einmal nah miteinander verwandt.

Nach einer anderen Hypothese könnte die Komplexität von Chick-a-dee-Rufen mit dem Bedrohungsgrad durch Raubtiere oder auch deren Vielfalt zusammenhängen. Diese Vorstellung stützt sich auf eine Anzahl von Studien an Primaten, deren Schreie unter anderem die Art einer Gefahr bezeichnen. Meisenarten, die einem hohen Raubtierdruck ausgesetzt sind oder etlichen Typen von Räubern begegnen, müssten demnach in diesem Komplex ein größeres, differenzierteres Rufrepertoire nutzen als weniger bedrohte. Solche Unterschiede könnten zwischen mehr und weniger gefährdeten Populationen derselben Art bestehen.

Manche Forscher glauben, dass das Habitat, also die physische Umwelt, die Rufkomplexität beeinflusst. In einer vielgestaltigen, abwechslungsreichen Umgebung würde demnach mehr Variabilität aufkommen als in einer eher gleichförmigen. Es bleibt zu untersuchen, ob Meisen – verschiedene Arten oder einzelne Populationen –, die etwa im reinen Nadelwald leben, in dieser Hinsicht weniger Aufwand betreiben als andere, die ein Gelände mit Wald, Waldrandzonen und Einzelbäumen, Gebüsch und freien Flächen bewohnen.

Natürlich hat das Leben im Schwarm auch Nachteile. Futter zu finden gelingt als Gruppe zwar leichter, und zum Fresen bleibt mehr Zeit, wenn sich das Aufpassen auf Gefahren auf mehrere Vögel verteilt. Aber zugleich herrscht in einer Schar mehr Wettbewerb und Konkurrenz um Ressourcen. Das erhöht den sozialen Stress und kann die Immunkraft und damit Fitness schwächen, wie in Studien an anderen Vögeln nachgewiesen wurde – obwohl zum Gruppenleben wegen des erhöhten Ansteckungsrisikos durch Parasiten und Krankheitserreger gute immunologische Abwehrkräfte eigentlich besonders vonnöten sind. Den Stellenwert solcher Zusammenhänge in Meisenschwärmen müssen zukünftige Untersuchungen klären.

Überhaupt eignen sich die Meisen insgesamt hervorragend dafür, um wissenschaftliche Thesen zur Komplexität von sozialer Kommunikation zu überprüfen. Systematiker führen sie unter den Singvögeln als eigene Familie, die Paridae. Bereits 1989 meinte Jan Ekman von der Universität Uppsala, dass sich die vielen Meisenarten in entscheidenden sozialen Aspekten, darunter nicht zuletzt der Schwarmbildung, genügend voneinander unterscheiden, um an ihnen Evolutions- und ökologische Zusammenhänge zu untersuchen.

Insbesondere die in weiten Teilen der Alten Welt verbreitete Kohlmeise, eine der größten Arten der Meisenfamilie, könnte für die hier aufgerollten Fragestellungen eine Schlüsselstellung einnehmen. Gerade weil diese Art im Winter so variabel lebt, manchmal nur zu zweit umherstreift, mal sehr kleine, dann wieder individuenreiche Schwärme mit mehreren Dutzend Mitgliedern bildet, und weil diese Scharen we-

der stabil noch ortsfest sind, ließen sich an ihr ökologische Einflüsse auf Verhalten und Rufkomplexität aufzeigen.

Leider ist das Verhalten vieler Meisen Afrikas und Süd- wie Ostasiens noch fast gar nicht erforscht. Sie scheinen noch manche Überraschung bereitzuhalten. So entdeckte Jack Hailman von der University of Wisconsin in Madison 1994, dass die in Indien und im südlichen Himalaja beheimatete Kronenmeise (*Parus xanthogenys*) die Position mancher Notentypen im Ruf regelmäßig wechselt, sie etwa nach vorn, in die Mitte oder nach hinten stellt. Eine derartige Flexibilität erhöht die mögliche Komplexität eines Lautsystems beträchtlich, vor allem falls damit andere Bedeutungen einhergehen. In der menschlichen Sprache kann jedenfalls eine Umstellung von Wörtern im Satz einen völlig neuen Sinn ergeben.

Von zukünftigen Forschungen erwarten wir neue Einblicke in die Evolution von hochentwickelten Kommunikationssystemen. Der Chick-a-dee-Ruf steht für eines der komplexesten dieser Systeme in der Tierwelt. Die Evolutionszwänge, unter denen er entstand, zu verstehen, könnte nicht zuletzt ein wenig mit dazu beitragen, der Evolution unserer eigenen Lautsprache auf die Spur zu kommen. ~

## DIE AUTOREN



**Todd M. Freeberg** (links), Professor an der University of Tennessee in Knoxville, arbeitet dort in der Psychologie sowie in der Abteilung für Ökologie und Evolutionsbiologie. **Jeffrey R. Lucas** (Mitte) ist an der Purdue University in West Lafayette Professor in der Abteilung Biowissenschaften für Ökologie und Evolutionsbiologie. **Indriķis Krams** ist Ökologe und außerordentlicher Professor an der Universität Tartu in Estland sowie Forscher an der Universität Daugavpils in Lettland.

## QUELLEN

**Freeberg, T.M., Lucas, J. R.:** Information Theoretical Approaches to Chick-a-dee Calls of Carolina Chickadees (*Poecile carolinensis*). In: *Journal of Comparative Psychology* 126, S. 68–81, 2012  
**Krams, I. et al.:** Linking Social Complexity and Vocal Complexity: a Parid Perspective. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B* 367, S. 1879–1891, 2012  
**Sturdy, C. B. et al.:** Chickadee Vocal Production and Perception: An Integrative Approach to Understanding Acoustic Communication. In: Otter, K. A. (Hg.): *Ecology and Behavior of Chickadees and Titmice: An Integrated Approach*. Oxford University Press, 2007, S. 153–166

## WEBLINKS

Diesen Artikel sowie Links mit Informationen über Carolinameisen und mit einigen Lautbeispielen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221320](http://www.spektrum.de/artikel/1221320)

# Extreme Atome

Auch Atome sind nicht mehr das, was sie einmal waren. Denn Physiker schaffen immer bizarrere Partikel: Sie blähen die Teilchen auf, höhlen sie von innen aus, beschweren ihre Kerne mit zusätzlichen Bausteinen oder erschaffen ihre Gegenstücke aus Antimaterie.

Richard van Noorden

**W**ill man ein Atom zerstören, gibt es mehrere Möglichkeiten. Linda Young wählte einen Schuss aus der weltweit stärksten Röntgenpistole. Ein einzelner Puls der am Beschleunigerlabor SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) im kalifornischen Menlo Park installierten Linac Coherent Light Source liefert dieselbe Energiemenge wie die gesamte Sonnenstrahlung, die im selben Moment auf die Erde trifft – allerdings auf einen einzigen Quadratzentimeter konzentriert. Das Experiment, durchgeführt 2009 an dem damals neu in Betrieb genommenen 420 Millionen Dollar teuren Freielektronen-Laser, beeindruckte auch Young selbst: »Dieser Strahl kann alles vernichten, was sich ihm in den Weg stellt«, so die Leiterin der Röntgenabteilung des Argonne National Laboratory im US-Bundesstaat Illinois.

Young hatte ihn auf Neonatome gerichtet, die je zehn Elektronen besitzen. Im Moment des Aufpralls explodierten die Teilchen regelrecht: Innerhalb von nur 100 Femtosekunden (eine Femtosekunde sind  $10^{-15}$  Sekunden) entriß der Röntgenpuls ihnen sämtliche Elektronen. Young stellte allerdings fest, dass die Strahlung zuerst die inneren Elektronen des Atoms erwischte, während die äußeren erst einmal an Ort und Stelle blieben. Für einen kurzen Moment waren die Neonatome gewissermaßen hohl.

Young ist nicht die einzige, die mit Atomen bizarre Versuche anstellt. Rund 100 Jahre nachdem Niels Bohr sein Atommodell entwickelt hat, bringen Physiker immer mehr exotische Gebilde hervor. Einige Teams blähen Atome auf die Größe von Staubpartikeln auf, andere erzeugen sie aus Antimaterie. Wieder andere beladen Atomkerne mit zusätzlichen Protonen und Neutronen, um neue superschwere Elemente zu erschaffen. Manche Forscher konzentrieren sich auf die Untersuchung der atomaren Struktur, andere betrachten die gezielte Manipulation von Atomen nur als ersten Schritt, um dasselbe mit noch komplexeren Systemen zu tun.

Sogar das Atom, wie es sich Niels Bohr vorgestellt hat, bauen Wissenschaftler heute nach. Im Juli 1913 löste der dänische Physiker eine wissenschaftliche Revolution aus, als er ein Atom beschrieb, in dem negativ geladene Elektronen in konzentrischen Bahnen um einen positiv geladenen Kern kreisen. In seinem Modell, das an ein Miniatursonnensystem erinnert, sind Elektronen punktförmig und besitzen quantisierte Energie – die Teilchen können also nur von einer Umlaufbahn zu einer anderen springen, sich aber nicht im Raum dazwischen aufhalten. Auch mit dem Aufkommen der Quantenmechanik in den 1920er Jahren hielt man noch am Konzept der Elektronenbahnen fest, machte sich jedoch eine neue Vorstellung von den Partikeln selbst: Man nahm nun an, dass sie keinen klar definierten Aufenthaltsort besitzen, sondern gewissermaßen um den gesamten Kern herum verteilt sind. Anders gesagt, ihr jeweiliger Ort lässt sich nur mit Aufenthaltswahrscheinlichkeiten beschreiben, in Form einer mathematischen Wellenfunktion.

Weil äußere Elektronen weniger Energie als innere benötigen, um sich aus dem Atom zu befreien, verlassen sie es für gewöhnlich als Erste. Intensive Röntgenpulse können aber auch Elektronen aus ihren Bahnen werfen, die weiter innen liegen und darum stärker gebunden sind. Schon medizinische Röntgengeräte können mit ihrem Strahl eines der inneren Elektronen entfernen, woraufhin sofort ein anderes aus einer weiter außen liegenden Schale in die entstandene Lücke hüpfte. Doch der Röntgenlaser am SLAC ist eine Klasse für sich. Die Intensität seines stark fokussierten Strahls ist so hoch, dass jeder 100-Femtosekunden-Puls rund 100 000

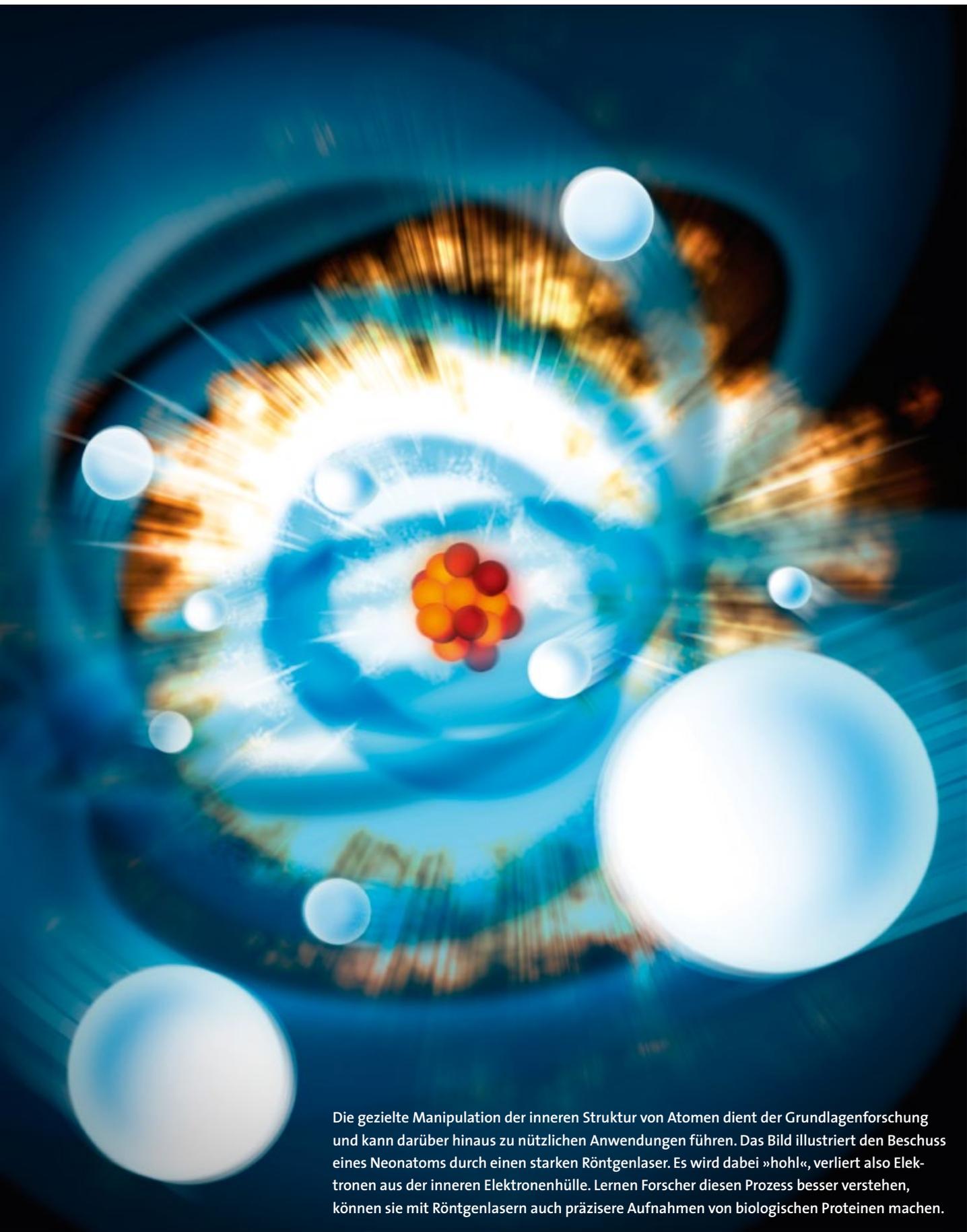
## AUF EINEN BLICK

### BAUSTEINE UNSERER WELT – NEU DESIGNT

**1** Neben Kernfusion und -spaltung existieren längst viel raffiniertere Verfahren, um **Struktur und Aufbau der Atome** gezielt zu manipulieren.

**2** Forscher entfernen zum Beispiel die inneren **Elektronen** einer Atomhülle oder schicken die äußeren auf extrem ausgedehnte Umlaufbahnen, produzieren **bislang unbekannte Elemente** und speichern Antimaterie, um mit ihrer Hilfe **fundamentale kosmologische Rätsel** zu lösen.

**3** Die Versuche dienen vor allem der Grundlagenforschung, manche Verfahren gelangen sogar zur Anwendung. Doch sie alle erweitern die **Grenzen unserer experimentellen Möglichkeiten** und unseres Wissens über die **Natur der Materie**.



Die gezielte Manipulation der inneren Struktur von Atomen dient der Grundlagenforschung und kann darüber hinaus zu nützlichen Anwendungen führen. Das Bild illustriert den Beschuss eines Neonatoms durch einen starken Röntgenlaser. Es wird dabei »hohl«, verliert also Elektronen aus der inneren Elektronenhülle. Lernen Forscher diesen Prozess besser verstehen, können sie mit Röntgenlasern auch präzisere Aufnahmen von biologischen Proteinen machen.

MIT FREDL GEN, VON GREGORY M. STEWART / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

Röntgenphotonen durch eine Fläche von nur einem Quadratmeter sendet, also durch ein Quadrat mit einer Seitenlänge von  $10^{-10}$  Metern. Mit seiner Hilfe gelang es Young, sämtliche inneren Elektronen aus den Neonatomen herauszusprengen. Diejenigen Elektronen, die von außen nachrückten, beförderte der Strahl ebenfalls binnen kurzer Zeit aus dem Atom. »Stellt man die Röntgenstrahlen entsprechend ein, kann man sogar die Schale auswählen, die zuerst geleert werden soll«, berichtet Young fasziniert.

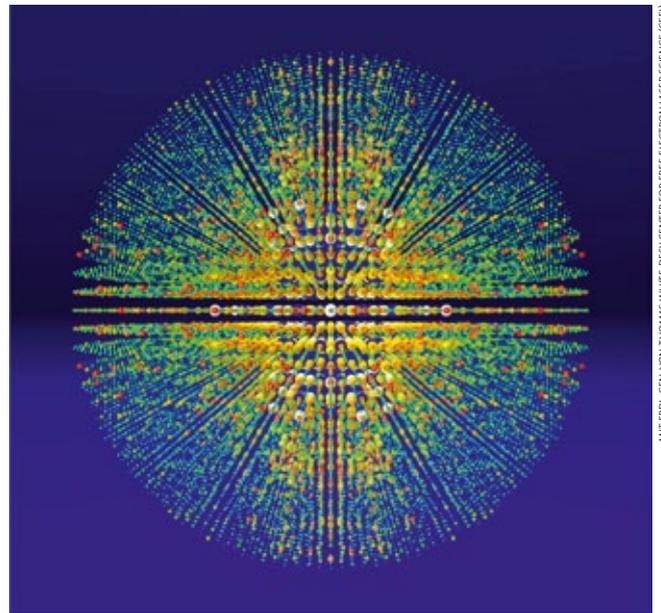
Einer Forschergruppe vom Center for Free-Electron Laser Science in Hamburg gelang im November 2012 ebenfalls ein Rekord. Sie hatten ihre Apparaturen nach Kalifornien verschifft, um mit dem SLAC-Laser Xenonatome unter Beschuss zu nehmen und das Resultat genau zu vermessen. Die Atome, so zeigte sich, verloren dabei bis zu 36 ihrer 54 Elektronen – die wohl stärkste Ionisation eines Atoms, die bislang mit einem einzigen elektromagnetischen Impuls erreicht wurde –, und auch in diesem Fall stammten etliche davon aus inneren Schalen. Möglich wurde der Effekt, weil zu den Röntgenstrahlen noch Resonanzeffekte hinzukamen.

Young hofft nun, dass ihre Forschung auch anderen Röntgenexperimentatoren zugutekommt. Richtet man den Strahl nämlich auf die Atome von Biomolekülen, kann man anhand der Streumuster einzigartige Aufnahmen etwa von der Erbsubstanz DNA oder von Proteinen gewinnen. Solche Bilder haben aber einen hohen Preis, denn der Strahl zerstört die Moleküle im selben Moment, in dem er sie »fotografiert«. Wie sich das Streumuster in diesen Augenblicken verändert, so Young, können Forscher vielleicht mit ihren Erkenntnissen über hohle Atome besser interpretieren und so noch hochwertigere Aufnahmen erzielen.

### **Rücken Elektronen von außen nach innen nach, wird schlagartig Energie frei**

Schon vor zwei Jahrzehnten hatten einige Forscherteams hohle Atome hergestellt, allerdings mit einem anderen Verfahren: Zunächst trennten die Wissenschaftler nahezu alle Elektronen von ihren Atomen, bis nur noch stark geladene Ionen übrig blieben, die langsam durch die Versuchsanordnung trieben. Diese bugsierten sie dann in die Nähe einer Oberfläche. Sobald die Teilchen auf einige zehn Ångström an diese herangekommen waren, begannen die Ionen, Elektronen von dort anzuziehen. Auch hierbei entstanden hohle Atome, die Elektronen in den äußeren, nicht aber in den inneren Schalen besaßen. Fielen anschließend äußere Elektronen nach innen, wurde schlagartig Energie in Form energiereicher Elektronen und Photonen frei.

Einige der Wissenschaftler, die sich in den späten 1980er und den 1990er Jahren mit hohlen Atomen beschäftigten, untersuchten, ob man mit den von ihnen ausgesandten Photonen möglicherweise Oberflächen reinigen könnte. Der Grundgedanke: Die Lichtteilchen würden deren oberste Schichten abtragen und die tiefer liegenden unbeschadet lassen. Friedrich Aumayr, experimenteller Physiker an der Technischen Universität Wien, berichtet, dass man das Ver-



MIT FOLGEN VON THOMAS WHITE, DESY CENTER FOR FREE-ELECTRON LASER SCIENCE (CFE)

**Feuert man mit einem Röntgenlaser auf Proteine und andere Biomoleküle, lässt sich deren dreidimensionale Struktur aus den Beugungsmustern ermitteln. Hier sind die aufsummierten Beugungsmuster für das so genannte Fotosystem gezeigt, das manche Bakterien sowie eukaryotische Pflanzen besitzen. Das Verständnis »hohler« Atome, wie sie bei der Messung auftreten, hilft, die gewonnenen Daten zu interpretieren.**

fahren sogar patentierte, es sich allerdings nicht durchsetzte, weil das Interesse der Industrie ausblieb.

Auch vor einigen Jahren, 2008, kam die Prozedur wieder ins Spiel. Forscher klärten damals auf, was von der Sonne kommende schwere Ionen auf der Oberfläche von Planeten wie dem Merkur anrichten können: Sobald sie auf den Planeten stürzen, werden sie nämlich ebenfalls zu hohlen Atomen, die dann abrupt Energie freisetzen. Aumayr selbst schrieb 2013 in einer Fachpublikation, dass die Energie von Ionen, die auf Kohlenstoffmembranen krachen, Poren erzeugen können, deren Größe im Nanometerbereich liegt und von der Zahl der fehlenden Elektronen abhängt. Mit dieser Methode, so der Physiker, lassen sich womöglich Nanosiebe herstellen, mit denen kleine Moleküle gefiltert werden können, oder Poren, durch die man DNA zur Sequenzierung leiten kann.

Hohle Atome sind nicht die einzigen Exoten, die in den Laboren fabriziert werden. Manche Experimentalphysiker versuchen, Atomkerne und Elektronen auf möglichst große Distanz zu bringen und auf diese Weise Riesenatome herzustellen. Zwar ziehen Elektronen auch schon aus der Perspektive eines gewöhnlichen Kerns ihre Bahnen in weiter Ferne: Gebundene Elektronen sind typischerweise rund 100 000 Kerndurchmesser vom Kern entfernt. Im Fall von Rydbergatomen jedoch, den nach dem schwedischen Physiker Johannes Rydberg (1854–1919) benannten Kolossen der atomaren Welt, besitzen die äußeren Elektronen so viel Energie, dass sie sich in einer Distanz von 100 Milliarden Kerndurchmessern

bewegen. Das liegt in der Größenordnung von einem Hundertstel oder gar einem Zehntel Millimeter und ist damit schon fast so groß wie der Punkt am Ende dieses Satzes.

Seit den 1970er Jahren gibt es Laser, die Elektronen auf entsprechend hohe Energien anregen können. Doch die experimentelle Untersuchung von Rydbergatomen stellt weitere Anforderungen. So weit draußen sind die Elektronen nämlich recht einsam und schutzlos: Die Anziehungskraft des fernen Kerns ist schwach, zudem kann die Wechselwirkung durch elektromagnetische Streufelder oder Kollisionen mit anderen Atomen gestört werden. Aus diesem Grund erzeugen Forscher Rydbergatome im Hochvakuum. Denn nur wenn man sie sorgfältig von äußeren Kräften abschirmt, lassen sie sich ein paar Hundertstel Sekunden oder gar mehrere Sekunden lang am Leben halten.

### Das bohrsche Atom, trickreich »nachgebaut«

Barry Dunning von der Rice University in Houston schätzt Rydbergatome, weil sich die Bewegung von Elektronen in ihnen besonders gut kontrollieren lässt. In gewöhnlichen Atomen weisen die Partikel selbst für die schnellsten Laser ein viel zu hohes Tempo auf, in einem aufgeblähten Rydbergatom dagegen läuft alles viel gemächlicher ab. Durch gezielte elektrische Feldpulse mit einer Dauer im Nanosekundenbereich können die Forscher die Elektronenwolke nach Belieben hin- und herschubsen und so in Schach halten. Schon 2008 hatte das Team um Dunning verkündet, es sei ihm gelungen, das normalerweise über den Raum verschmierte Elektron vorübergehend so stark zu verdichten, dass es den Kern als kompaktes Paket umkreiste. Seit 2012 manipulieren die Forscher ihre Versuchsobjekte zusätzlich auch mit Radiowellen und können den erzielten Bewegungszustand nun viel länger, theoretisch sogar unendlich lange, aufrechterhalten. »Es dauerte nur ein Jahrhundert, bis wir Bohrs Atom nachgebildet haben«, kommentiert Dunning stolz. Als Nächstes möchte er zwei äußere Elektronen gleichzeitig anregen und verdichten. Das so geschaffene System könnte dem nahekommen, was sich Bohr unter Helium vorstellte; seine Realisierung liegt allerdings noch ein wenig in der Zukunft.

Sogar die eine oder andere Anwendung ließe sich für die überdimensionierten Rydbergatome finden. Zwei gewöhnliche Atome, die sich in einem Gas nur wenige Mikrometer voneinander entfernt befinden, beeinflussen sich normalerweise nicht gegenseitig. Bläht man eines davon oder gleich alle beide zu einem Rydbergatom auf, stoßen sich die negativ geladenen Elektronenwolken jedoch ab. Durch diese so genannten Rydberg-Wechselwirkungen verändern sich die Energieniveaus der Atome, und sie lassen sich nicht länger als voneinander isolierte Systeme betrachten. Mark Saffman von der University of Wisconsin-Madison nutzte diese Eigenschaft, um etwas herzustellen, was eines Tages als zentraler Bestandteil eines Quantencomputers dienen könnte: Mit Hilfe von Lasern brachte er zwei Atome dazu, auf die beschriebene Art miteinander in Wechselwirkung zu treten. So

wurden sie zu atomaren Qubits, die sich als Quantenlogikgatter einsetzen ließen.

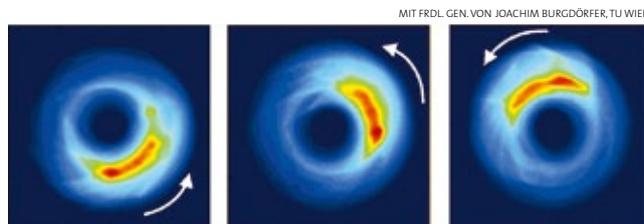
Wie auch andere Forscher hofft Saffman, die Zahl der beteiligten Atome immer weiter steigern zu können. Matthew Jones von der Durham University in England verfolgt dabei einen ganz besonderen Ansatz. Seine Überlegung: Regt man eine Wolke aus kalten Gasatomen auf bestimmte Weise an, sollte sich aus ihr eine schwebende, kristallförmige Anordnung von Rydberg-Wechselwirkungen bilden.

Diese könnte sich als nützliches Modell für das Studium stark korrelierter Festkörpersysteme erweisen. In solchen Systemen, zu denen beispielsweise Hochtemperatur-Supraleiter gehören, treten einzelne Teilchen in starke Wechselwirkung mit ihren Nachbarn und sorgen auf diese Weise für ungewöhnliche Phänomene. Rydbergatome lieferten zwar kein perfektes Modell für die chaotischen Wechselwirkungen, die in echten Festkörpersystemen vorkommen, so Joachim Burgdörfer, theoretischer Physiker an der Technischen Universität Wien. Die Stärke des Ansatzes liege jedoch in seiner Einfachheit: »Er bietet eine wunderbare Testlandschaft, in der wir viele Vorstellungen über die Physik in stark korrelierten Systemen überprüfen können.«

Ein ganz anderes Testfeld bietet die Antimaterie. In einer Nebenhalle des Large Hadron Collider am europäischen Forschungszentrum CERN nahe Genf, der gerade einer umfangreichen Wartung unterzogen wird, erweitern Forscher seit Ende 2012 ein Experiment, mit dem sie die Eigenschaften von Atomen aus Antimaterie messen wollen. Diese bestehen statt aus einem gewöhnlichen Proton und einem Elektron aus einem Antiproton und einem Positron – also aus Teilchen mit derselben Masse, aber mit entgegengesetzter Ladung.

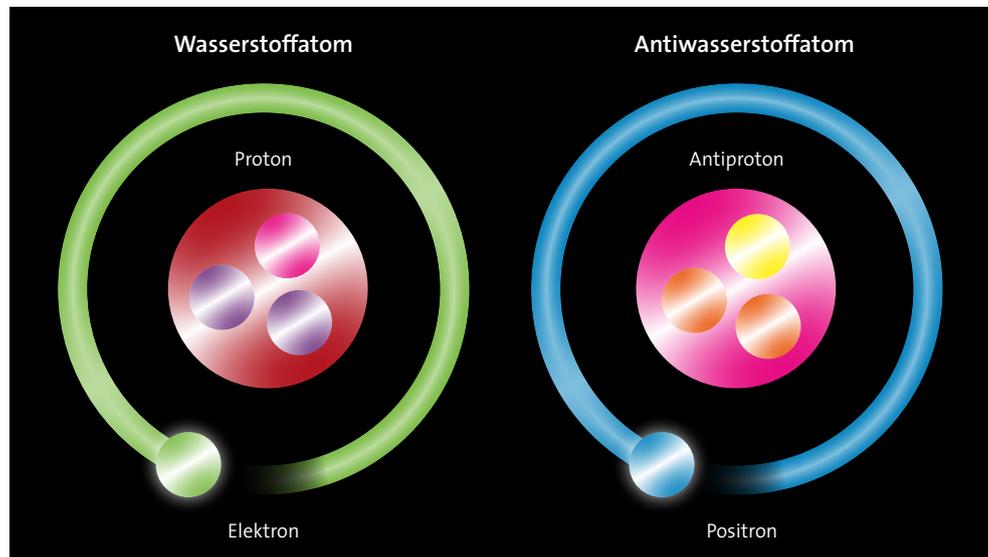
Obwohl man am CERN schon 1995 die ersten Antiwasserstoffatome erzeugte, weiß man noch sehr wenig über sie. »Gehorchen Materie- und Antimaterieatome denselben physikalischen Gesetzen?«, will zum Beispiel Jeffrey Hangst wissen. Oder gibt es möglicherweise kleine Abweichungen? Der Sprecher des CERN-Antimaterie-Experiments ALPHA erhofft sich Antworten unter anderem vom Folgeprojekt ALPHA-2, das noch in diesem Jahr erste Daten liefern soll.

Auch Hinweise darauf, warum es im sichtbaren Universum mehr Materie als Antimaterie gibt, werden die CERN-



Einem Team um Joachim Burgdörfer von der Technischen Universität Wien gelang es gemeinsam mit US-Kollegen, das normalerweise »verschmierte« Wellenpaket eines Elektrons stark zu verdichten. Diese drei Momentaufnahmen zeigen, wie es um einen Kaliumatomkern kreist. Das Ergebnis ähnelt der Vorstellung, die sich Niels Bohr 1913 von einem Atom gemacht hatte.

Wasserstoff aus Antimaterie besteht nicht aus einem Proton und einem Elektron wie gewöhnliche Materie (links), sondern aus deren entgegengesetzt geladenen Antiteilchen, also aus einem (negativen) Antiproton und einem (positiven) Positron. Beim Urknall sollten beide Materiearten in gleicher Menge entstanden sein, doch warum überwiegt im heutigen Universum die Materie? Der Grund könnte darin liegen, dass für Antimaterie leicht unterschiedliche Naturgesetze gelten.



Forscher vielleicht finden. Beim Urknall sollten beide Materieformen in gleichen Mengen entstanden sein. Doch beim Kontakt von Materie- und Antimaterieteilchen kommt es unausweichlich zur Annihilation, sie lösen sich also gegenseitig in einem Lichtblitz auf. Dieser Vernichtungsprozess muss direkt nach dem Urknall stattgefunden haben, dabei konnte sich die Materie aber offensichtlich gegenüber der Antimaterie behaupten. Der Grund dafür ist unbekannt; zwar konnte man bei Kaonen und Mesonen Verhaltensunterschiede zwischen den jeweiligen Materie- und Antimaterievarianten beobachten, doch sind diese Effekte viel zu klein, als dass sie helfen könnten, das Urknallrätsel zu lösen.

Um Antiwasserstoffatome zu produzieren, beschleunigen die Forscher am CERN Protonen, schießen sie auf Atome und erzeugen dadurch Antiprotonen. Diese werden von einer Metallfolie abgebremst, mit Hilfe kalter Elektronen abgekühlt und schließlich von elektromagnetischen Feldern eingefangen. In einer weiteren Teilchenfalle sammeln die Wissenschaftler Positronen, wie sie von radioaktiven Materialien emittiert werden. Dann mischen sie beide Teilchenarten. Die Untersuchung der dabei entstehenden Antimaterieatome ist allerdings nicht ganz einfach: Während Antiprotonen und Positronen sich von elektromagnetischen Feldern festhalten lassen, sind die aus ihnen zusammengesetzten Atome elektrisch neutral und entkommen leicht aus ihrer Falle.

2002 schafften es zwei Teams, in ihren Experimenten bis zu 50 000 Antiwasserstoffatome herzustellen. Doch die Teilchen überlebten nicht lange, schon an den Behälterwänden kam es zur Annihilation. Erst 2010 demonstrierten Forscher des ALPHA-Experiments, wie sich Antiwasserstoff, der ein winziges magnetisches Moment besitzt, durch ein starkes, von drei Magneten erzeugtes Feld einfangen lässt. Damals ließ sich die Antimaterie immerhin 170 Millisekunden festhalten. Allerdings fingen die Wissenschaftler nur bei jedem achten Versuch überhaupt ein Atom ein, schildert Hangst, wobei jeder Versuch 20 bis 30 Minuten dauerte. Inzwischen

verbesserte das Team seine Apparatur: Pro Versuch gerät nun ein Atom in die Falle und lässt sich für rund 1000 Sekunden aufbewahren.

2013 berichteten die ALPHA-Forscher auch, dass sie die Spuren von einigen hundert Antiwasserstoffatomen verfolgt hatten, nachdem diese aus ihrem magnetischen Käfig entlassen worden waren. Ziel des Versuchs war herauszufinden, ob sie unter dem Einfluss der Schwerkraft vielleicht stärker oder schwächer beschleunigt werden als gewöhnliche Materie oder sogar nach oben statt nach unten fallen. Zwar sprechen viele Gründe dafür, dass sich alles verhält wie bei Materie auch – nachgemessen hat das aber noch keiner. Um die Frage endgültig zu beantworten, sind die Messungen bislang nicht genau genug, doch im Prinzip funktioniert das Experiment, sagt Hangst. Noch in diesem Jahr will die Gruppe zudem Laser einsetzen, um zu untersuchen, ob Antiwasserstoff Licht bei denselben Frequenzen absorbiert und emittiert wie gewöhnlicher Wasserstoff.

### »Man muss einfach die Augen offen halten«

Ebenfalls ein Thema am CERN ist das Verhalten von Antiwasserstoff in veränderlichen magnetischen Feldern. Antimaterieexperimente können aber noch viel exotischere Formen annehmen. Das Team um Ryugo Hayano von der Universität Tokyo untersucht Exemplare, die sowohl aus Materie als auch aus Antimaterie bestehen. Dazu zählt antiprotonisches Helium, bei dem ein Heliumkern von einem Elektron und einem Antiproton begleitet wird; eine höchst ungewöhnliche Konstellation, die nur wenige Mikrosekunden lang bestehen bleibt. Ob auf diese Weise die gesuchten Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie zu Tage treten, welche die Dominanz der Materie erklären könnten, ist ungewiss. »Aber man weiß nie, wo mit neuer Physik zu rechnen ist«, sagt Hangst. »Man muss einfach die Augen offen halten.«

Andernorts ist die Datenlage indessen noch weitaus prekärer als bei Antimaterieexperimenten. Am Darmstädter GSI

Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung verbrachte ein Konsortium aus mehreren Ländern 2012 fast fünf Monate damit, Titan-50-Ionen – die je 22 Protonen und 28 Neutronen besitzen – in eine Probe aus Berkelium-249 zu feuern, ein Transuran mit 97 Protonen im Kern. Und das mit einer Rate von fünf Billionen Teilchen pro Sekunde. Irgendwann, so die Hoffnung, würden dabei vielleicht zwei Atomkerne miteinander fusionieren und ein Element mit 119 Protonen hervorbringen. Das wäre ein neuer Rekord für superschwere Elemente.

Kollisionsexperimente mit schweren Atomen leisteten Physikern in den vergangenen 70 Jahren gute Dienste. Sie erzeugten dabei zunehmend massereichere Kerne und ergänzten das Periodensystem weit über die schwersten natürlich vorkommenden Elemente hinaus. Amtlicher Rekordhalter ist derzeit das Element Nummer 116, Livermorium; es besitzt 116 Protonen und je nach Isotop zwischen 174 und 177 Neutronen. Auch die Elemente 117 und 118 glauben Forscher erzeugt zu haben, offiziell bestätigt wurde dies jedoch noch nicht. Und noch »keines der aktuellen Experimente hat verkündet, Element 119 oder 120 entdeckt zu haben«, sagt Christoph Düllmann, der Sprecher des von der GSI geführten Konsortiums. Er fügt aber hinzu, dass sein Team die Analyse der Daten von 2012 noch nicht abgeschlossen hat.

Es herrscht allerdings Einigkeit darüber, dass diese Art der Jagd bald in einer Sackgasse enden wird. Je schwerer die Kerne, desto unwahrscheinlicher ist es, dass sie bei einem Experiment miteinander verschmelzen – die sich dem widersetzen Kräfte sind einfach zu groß. Die meisten Forscher halten die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Atome direkt zu einem 120-Protonen-Kern vereinen, für verschwindend gering.

Superschwere Elemente, also solche mit Ordnungszahlen ab 104, sind in ihrer großen Mehrzahl extrem kurzlebig und zerfallen innerhalb von Millisekunden. Doch es gibt auch einzelne Isotope, etwa der Elemente 112 und 114, die Halbwertszeiten von bis zu 30 Sekunden besitzen. Mit Element 114 hat man sogar schon die Küste der sagenumwobenen Insel der Stabilität erreicht. Diese könnte Theoretikern zufolge irgendwo zwischen 114 und 126 Protonen existieren und würde besonders lange Halbwertszeiten erlauben.

Inzwischen ist klar, dass man das Ziel verfehlen wird, immer schwerere Elemente zu erzeugen, wenn man nur einfach weiter leichte in schwerere Teilchen krachen lässt: Die dabei hervorgebrachten Isotope besitzen schlicht zu wenig Neutronen. Also haben die Forscher ihre Taktik geändert und versuchen stattdessen, schwerere Isotope derjenigen Elemente zu synthetisieren, die bereits erfolgreich künstlich hergestellt wurden. Am Joint Institute for Nuclear Research im russischen Dubna soll im laufenden Jahr ein Strahl aus Calcium-48-Ionen auf das radioaktive Californium-251 treffen und neutronenreiche Isotope des Elements 118 entstehen lassen.

Ebenso wie andere Wissenschaftler möchte das russische Team zudem in die »Massen«-Produktion bereits entdeckter superschwerer Elemente einsteigen – also Hunderte oder

Tausende von Atomen herstellen anstatt wie bisher nur jeweils ein paar, die gerade ausreichten, um ihre Entdeckung für sich zu reklamieren. »Wir sollten uns als Ziel setzen, nicht nur ein oder zwei Atome, sondern makroskopische Mengen zu produzieren«, sagt auch Rolf-Dietmar Herzberg von der University of Liverpool. »Dann lassen sich ihre Chemie und die Struktur der Kerne viel detaillierter erforschen.« Und Theoretiker könnten vielleicht die Lage der Insel der Stabilität und ihrer möglichen Ausläufer genauer eingrenzen.

Die Versuchung, das Periodensystem zu erweitern, bleibt dennoch groß. Anstatt Kerne frontal aufeinanderzuschießen, werden die Forscher voraussichtlich dazu übergehen, zwei schwere Kerne einander nur streifen zu lassen. Hierbei stehen die Chancen vermutlich besser, dass von dem einen genügend Nukleonen auf den anderen übergehen und so ein neues Element entsteht. Und vielleicht haben die Physiker tatsächlich Glück, schließlich haben sie sich auf der Jagd nach schwereren Atomen immer wieder selbst überrascht. In den frühen 1990er Jahren glaubte niemand mehr, dass man je über das Element 112 hinauskäme. Aber dann gelang es doch noch, ungenutzte Potenziale aus dem Fusionsprozess herauszukitzeln, berichtet GSI-Teammitglied Michael Block. »Das nächste Element ist immer das schwierigste.«

#### DER AUTOR



**Richard van Noorden** ist Wissenschaftsjournalist in London und arbeitet als Redakteur für »Nature«.

#### QUELLEN

- Rudek, B. et al.:** Ultra-Efficient Ionization of Heavy Atoms by Intense X-Ray Free-Electron Laser Pulses. In: Nature Photonics 6, S. 858 – 865, 2012
- Ritter, R. et al.:** Fabrication of Nanopores in 1 nm Thick Carbon Nanomembranes with Slow Highly Charged Ions. In: Applied Physics Letters 102, 063112, 2013
- Wyker, B. et al.:** Creating and Transporting Trojan Wave Packets. In: Physical Review Letters 108, 043001, 2012
- The ALPHA Collaboration, Charman, A.E.:** Description and First Application of a New Technique to Measure the Gravitational Mass of Antihydrogen. In: Nature Communications 4, 1785, 2013

#### WEBLINKS

<http://web.ihep.su/dbserv/compas/src/bohr13/eng.pdf>  
*Niels Bohrs Publikation zum Atommodell »On the Constitution of Atoms and Molecules« vom Juli 1913 im Original*

Diesen Artikel, obigen Link sowie weitere Fachpublikationen zu den im Text genannten Arbeiten finden Sie unter: [www.spektrum.de/artikel/1216446](http://www.spektrum.de/artikel/1216446)

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 498 S. 22–25, 5. Juni 2013

# Lass knacken!

Ob in knackenden Gelenken, Reagenzgläsern oder Heizungsrohren: Flüssigkeiten können durch geräuschvoll implodierende Gasbläschen auf sich aufmerksam machen.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

An einer Stelle in Leo Tolstois großem Roman »Anna Karenina« heißt es: »Nachdem er ... seine Finger, einen nach dem andern, nach unten ineinandergestreckt hatte, zog er, und die Finger knackten in den Gelenken. Diese Geste – eine üble Angewohnheit – hatte stets eine beruhigende Wirkung auf ihn ausgeübt und ihm das Gleichgewicht wieder verliehen, das ihm auch jetzt so notwendig war.«

Dass Anna Karenina die Angewohnheit ihres Mannes nicht leiden konnte, überrascht kaum: Vielen klingen die Knackgeräusche unangenehm laut und gefährlich im Ohr, auch wenn sie in der Regel nicht mit Schmerzen einhergehen. Nicht jedem ist aber klar, dass die Finger eine ganze Weile stumm bleiben, nachdem sie einmal geknackt haben – so, als würde sich ihr ursprünglicher Zustand nur langsam wieder einstellen.



Mit Röntgenaufnahmen eines Fingergrundgelenks vor dem Knacken (links) und danach (rechts) wiesen Forscher nach, dass sich dabei der Zwischenraum zwischen den Knochen vergrößert.

Vielleicht gehört das Fehlen von begleitendem Schmerz zu den Gründen dafür, dass die Fachliteratur keine abschließenden Ergebnisse über die gesundheitlichen Auswirkungen des Gelenkeknackens zu bieten hat. Nicht einmal mein Arzt vermochte Antwort auf diese Frage zu geben. Eine Studie in den »Annals of the Rheumatic Diseases«, für die 1990 in Detroit 300 Fingerknacker untersucht wurden, fand jedenfalls keinen offensichtlichen Zusammenhang mit dem Auftreten von Arthritis. Allerdings glaubten die Autoren Anzeichen für andere Schädigungen entdeckt zu haben, etwa Beeinträchtigungen der Gelenkkapseln und der Greiffähigkeit.

Es ist noch nicht vollständig geklärt, was genau das Knacken hervorruft. Aber so viel scheint klar: Eine wesentliche Rolle spielt die so genannte Kavitation (von lateinisch *cavitare* = aushöhlen). Mit einem einfachen Experiment lässt sich das Phänomen demonstrieren (Foto rechts außen). Dazu füllt man in ein luftdicht verschließbares Glas etwas Wasser und bringt es zum Kochen, zum Beispiel mit einem Campingkocher. Nach kurzer Siedezeit schaltet man diesen aus und verschließt das Glas zeitgleich mit einem Stopfen. Nun lässt man das Wasser und mit ihm den Dampf im Glas abkühlen. Dann erschüttern kleine »Explosionen« die Flüssigkeit, und sie beginnt abermals heftig zu brodeln. Klingt der Effekt ab, kann man ihn erneut hervorbringen, indem man das Glas dort, wo es noch voller Dampf ist, mit feuchten Fingern oder einem feuchten Tuch berührt, um seine Temperatur lokal abzusenken.

Das Geschehen ist leicht erklärt. Kühlt Wasserdampf ab, wird nach einer

»Ach, bitte doch, knacke nicht mit den Fingern, ich kann das nicht ausstehen«, sagte sie.

*Leo N. Tolstoi (1828–1910)*

Weile sein Taupunkt unterschritten; es kondensiert also ein Teil des Dampfes zu Wasser. Das Dampfvolument im Glas nimmt dadurch drastisch ab, und entsprechend stark fällt auch der Druck. Von Letzterem hängt aber der Siedepunkt von Wasser ab: Je geringer der Druck der auf ihm lastenden Luft, bei desto niedriger Temperatur beginnt es zu kochen. Beträgt der Druck beispielsweise 23 Hektopascal, also 23 Millibar, reichen schon 20 Grad Celsius, um das Wasser rasch in die Dampfphase gehen zu lassen. Aufgewühlt wird es, weil die sich während des Siedens bildenden Blasen recht groß werden, bevor sie platzen und die Flüssigkeit regelrecht hochschleudern.

## Überraschung: Wasser erzeugt ein knallend klirrendes Geräusch

Das eigentliche Experiment beginnt, wenn das Wasser vollständig abgekühlt ist. Dazu hält man das Glas senkrecht und bewegt es dann ruckartig kurz nach oben und gleich wieder nach unten. Bei der Abwärtsbewegung löst sich die Wassersäule infolge ihrer Trägheit zunächst vom Boden. Unterhalb entsteht dabei extremer Unterdruck, der das Wasser nahezu augenblicklich verdampfen – mit anderen Worten: sieden – lässt. Enthält es noch gelöste Luft, gibt es einen Teil davon ebenfalls in den Raum unter der Wassersäule frei.

Kurz darauf fällt diese wieder zurück, und der Experimentator vernimmt ein knallend klirrendes Geräusch. Dessen Härte und Lautstärke stehen allerdings in keinem Verhältnis zur gasartigen und flüssigen, also eher »weichen« Materie, die daran beteiligt ist. Man gewinnt sogar den Eindruck – nicht zu Unrecht –, das Glas könnte



BILD: FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

**Typische Knacktechnik (oben):** Man verschränkt die Finger und drückt sie nach unten durch. Dadurch werden die Gelenke auseinandergezogen, und es kommt zum geräuschträchtigen Phänomen der Kavitation. Ein einfaches Experiment mit dem Reagenzglas tut es aber auch (rechts). Nachdem man das Wasser darin mit einem Gasbrenner zum Sieden gebracht hat, verschließe man das Gefäß luftdicht und bewege es ruckartig nach oben und unten. Unterhalb der sich nach oben bewegenden Wassersäule bildet sich nun zunächst eine dünne Dampf­atmosphäre, die unter dem Druck des zurückfallenden Wassers sogleich wieder lautstark implodiert.



bei allzu heftiger Bewegung brechen. Durch die herunterfallende Wassersäule nimmt der Druck nämlich wieder zu, und die Dampfblase implodiert, weil schlagartig Wasser kondensiert; die dabei auftretenden Schwingungen sorgen für die lauten Begleitgeräusche. Aber auch die zuvor freigesetzte Luft löst sich wieder im Wasser. Schließlich prallt die Flüssigkeitssäule, durch keine Gasschicht mehr abgepolstert, gegen den Boden des Glases und lässt es hörbar klirren.

Beim Knacken der Gelenke geschieht ganz Ähnliches. Gelenkkapseln enthalten eine schmierende Flüssigkeit, welche die Gelenke auf Abstand hält und die Reibung zwischen ihnen reduziert. Bei ihrem abrupten Auseinanderziehen fällt der Druck an den Engstellen zwischen den Knochen sehr stark ab, wodurch ein Teil der Flüssigkeit verdampft und gleichzeitig Gase – vor allem  $\text{CO}_2$  – austreten, die in ihr gelöst waren. Auch hier kollabieren die entstehenden Dampfblasen lautstark wieder.

Untersuchungen zeigen (siehe Abbildung links), dass die Gelenke unmittelbar nach dem Knacken einen größeren Abstand voneinander haben als im Normalfall. Erst im Verlauf von 15 bis 20 Minuten stellt sich der Ausgangszustand wieder ein. So lange müssen auch Fingerknacker warten: Denn bei zu großem Abstand kann die Flüssigkeit während des Auseinanderziehens der Gelenke so schnell von den Seiten nachfließen, dass der sich bildende Unterdruck nicht für die Kavitation ausreicht.

Wer den Selbstversuch scheut und kein Reagenzglas, dafür aber eine rumorende Heizungsanlage besitzt, kann sich alternativ auch deren Geräuschen widmen. Oft verdanken sie sich Engstellen in den Rohren und anderen Einflüssen, die Druckschwankungen im strömenden Wasser auslösen, woraufhin Dampfblasen entstehen und anschließend implodieren. Hydrauliker suchen Kavitationen allerdings generell zu vermeiden: Pumpen, Turbinen und Propeller könnten Schaden nehmen, weil sie dabei hohen Tempera-

turen, Drücken und Beschleunigungen ausgesetzt sind. Menschen wie Anna Kareninas Ehemann lassen es aber mit Sicherheit weiterhin knacken. ~

#### DER AUTOR



**H. Joachim Schlichting** war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 wurde er mit dem Archimedes-Preis für Physik ausgezeichnet.

#### QUELLEN

**Castellanos, J., Axelrod, D.:** Effect of Habitual Knuckle Cracking on Hand Function. In: *Annals of the Rheumatic Diseases* 49, S. 308–309, 1990

**Unsworth, A. et al.:** Cracking Joints. In: *Annals of the Rheumatic Diseases* 30, S. 348–358, 1971

#### WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1221322](http://www.spektrum.de/artikel/1221322)

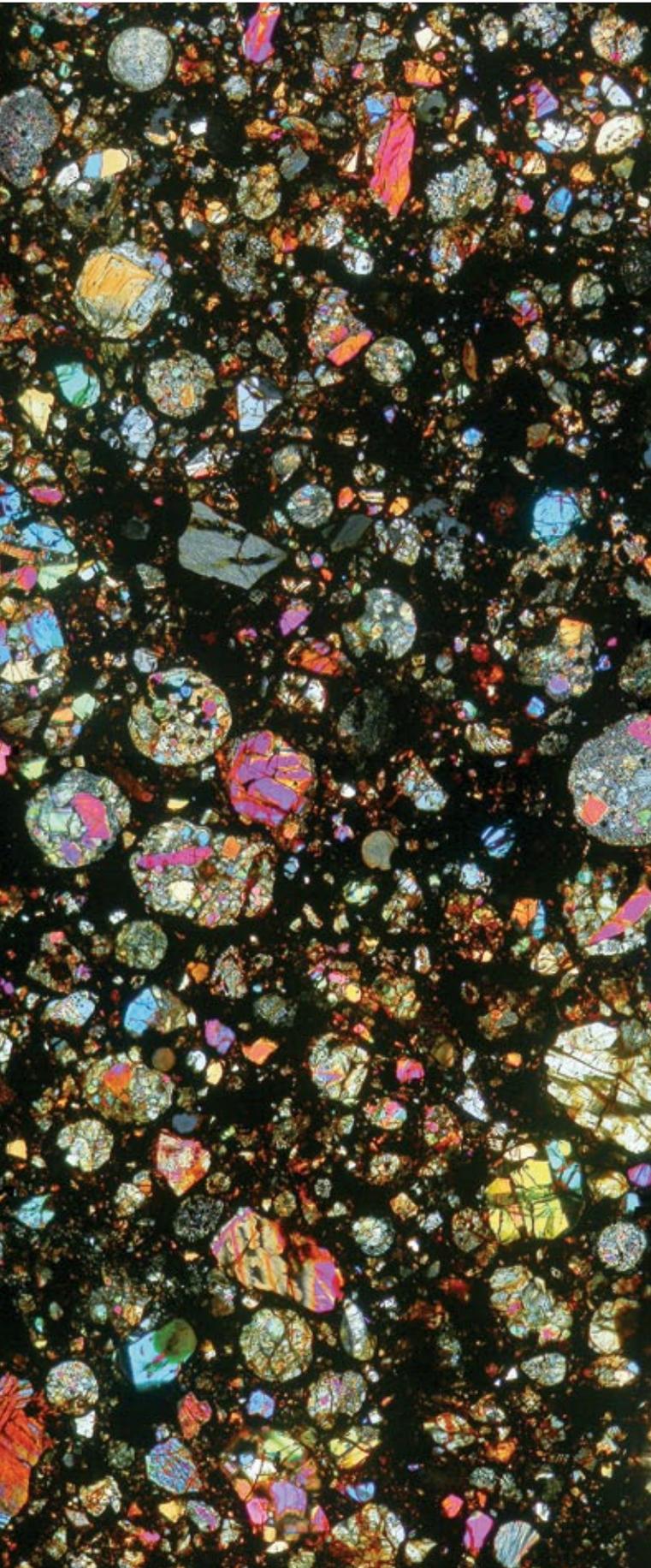
A detailed microscopic view of meteorite grains, showing a dense field of small, irregularly shaped particles in various colors (blue, yellow, orange, red, green, purple) against a dark background. Some larger grains exhibit distinct textures and patterns, such as radial lines or concentric rings.

ASTRONOMIE

# Urtümliche Meteoriten

Unter dem Mikroskop enthüllen die ältesten Gesteine im Sonnensystem Details über dessen Anfänge. Genaue Analysen solcher Chondrite offenbaren, wie die Staubscheibe beschaffen war, aus der unsere Erde und die anderen Planeten hervorgingen.

Von Alan E. Rubin



**A**stronomen tun mir leid. Sie sehen ihre Forschungsobjekte – Sterne, Galaxien, Quasare – nur von Weitem: als Pixel auf einem Computerschirm oder als abstrakte Spektrogramme. Wer hingegen Meteoriten und Asteroiden erforscht, kann Stücke dieser Himmelskörper mit den Händen greifen, um ihnen ihre Geheimnisse zu entlocken. Das verschafft einen konkreten Zugang zu etwas, das sonst entlegen und abstrakt bliebe.

Am meisten faszinieren mich die Chondrite. Sie machen mehr als 80 Prozent der auf der Erde entdeckten Meteoriten aus. Ihr Name stammt von den darin enthaltenen Chondren – winzigen Kügelchen aus geschmolzenem Metall, oft kleiner als ein Reiskorn, die entstanden, bevor sich in der Frühphase des Sonnensystems Asteroiden bildeten. Wenn ich unter dem Mikroskop Dünnschnitte von Chondriten untersuche, erinnert mich der Anblick an abstrakte Gemälde von Wassily Kandinsky.

Chondrite sind die ältesten Steine, die je ein Mensch berührt hat. Die radiometrische Datierung ergibt ein Alter von mehr als 4,5 Milliarden Jahren. Damals gab es noch keine Planeten, sondern nur eine rotierende Scheibe aus Gas und Staub, den so genannten Sonnennebel. Chondrite bestehen aus den urtümlichen Materialien, aus denen sich schließlich auch die Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen zusammensetzten. Nach gängiger Überzeugung entstanden die Chondren, als silikatreiche Staubklumpen durch hochenergetische Ereignisse schmolzen und einzelne Flüssigkeitstropfen bildeten. Die Tröpfchen erstarrten rasch und vereinigten sich – zusammen mit Staub, Metallen und anderen Materialien – zu Chondriten, die später zu Asteroiden anwuchsen. Durch heftige Zusammenstöße zerplatzten und splitterten diese; schließlich stürzte ein Teil der Trümmer auf die Erde. Solche Meteoriten sprechen mich daher nicht nur aus ästhetischen Gründen an: Sie sind Fossilien aus der Ursprungsphase des Sonnensystems und künden von der Entstehungszeit unseres Heimatplaneten.

Fossilienfunde sind immer nur der erste Schritt zur Rekonstruktion einer Entwicklungsgeschichte; sie müssen in einen Zusammenhang gestellt werden. Doch es ist nicht leicht, den Entstehungsort und die ursprüngliche Umgebung der verschiedenen Chondriten herauszufinden, denn bis vor Kurzem besaßen wir erstaunlich magere Informationen über deren detaillierte Struktur. Bereits vor einigen Jahren untersuchte ich systematisch sämtliche physikalischen Eigenschaften der Chondriten und schloss viele klaffende Wissenslücken. Aus diesen Daten konstruierte ich dann eine grobe Karte des alten Nebels, aus dem die Chondrite hervorgegangen waren.

**Die Mikrofotografie des Dünnschnitts eines Meteoriten zeigt unzählige Einschlüsse, die in polarisiertem Licht wie bunte Juwelen funkeln. Bei diesen so genannten Chondren handelt es sich um winzige Kügelchen aus Silikatmineralien. Der Meteorit zählt zur Gruppe der gewöhnlichen Chondriten.**

## BOTEN AUS DER VORZEIT DER ERDE

**1** **Chondrite** bestehen aus dem Material, das im Lauf der **Entstehung des Sonnensystems** Planeten, Monde, Asteroiden und Kometen des Sonnensystems bildete. Jede Chondritengruppe hat eine charakteristische Zusammensetzung und Struktur.

**2** Aus ihren Eigenschaften schließt der Autor auf die ungefähren **Entstehungsorte** der unterschiedlichen Chondriten innerhalb des ertümlichen Sonnennebels und auf die **Menge an Staub**, die es einst dort gab.

**3** Die Staubverteilung ähnelt derjenigen, die in den **protoplanetaren Scheiben** um sogenannte **T-Tauri-Sterne** beobachtet werden. Solche jungen Sterne haben ungefähr die Masse der Sonne, sind aber nur ein bis zwei Millionen Jahre alt. Offenbar sind T-Tauri-Systeme gute Modelle für die Frühphase des Sonnensystems.

Um das ertümliche Sonnensystem durch die Analyse der Chondriten zu erkunden, müssen die Planetenforscher erst einmal genau über die Eigenschaften dieser Steine Bescheid wissen. Die Chondrite lassen sich in rund ein Dutzend von Gruppen einteilen, die sich durch ihre chemische Zusammensetzung, die Anzahl, Größe und Vielfalt ihrer Chondren sowie durch die Menge des gepressten Staubmaterials unterscheiden, das die Chondren und andere Einschlüsse umgibt. Insbesondere zeigt jede Gruppe ein typisches Isotopengemisch; Isotopen bezeichnen Atome eines bestimmten chemischen Elements mit unterschiedlich vielen Neutronen und somit kleinen Massenunterschieden. Da jede Chondritengruppe spezielle physikalische und chemische Charakteristika aufweist, müssen die einzelnen Gruppen von verschiedenen Asteroiden stammen.

Forscher haben viele fantasiereiche Modelle ausgeheckt, um die Entstehung derart vielfältiger Chondriten zu erklären – von turbulenten Gasen über Magnetfelder bis zu Unterschieden in der Geschwindigkeit, mit der sich Partikel in der Mittelebene des Nebels niederließen. Meist blieb es aber bei der vagen Aussage, die Chondritentypen hätten sich unter »unterschiedlichen Bedingungen« gebildet.

### Typologie der Chondriten

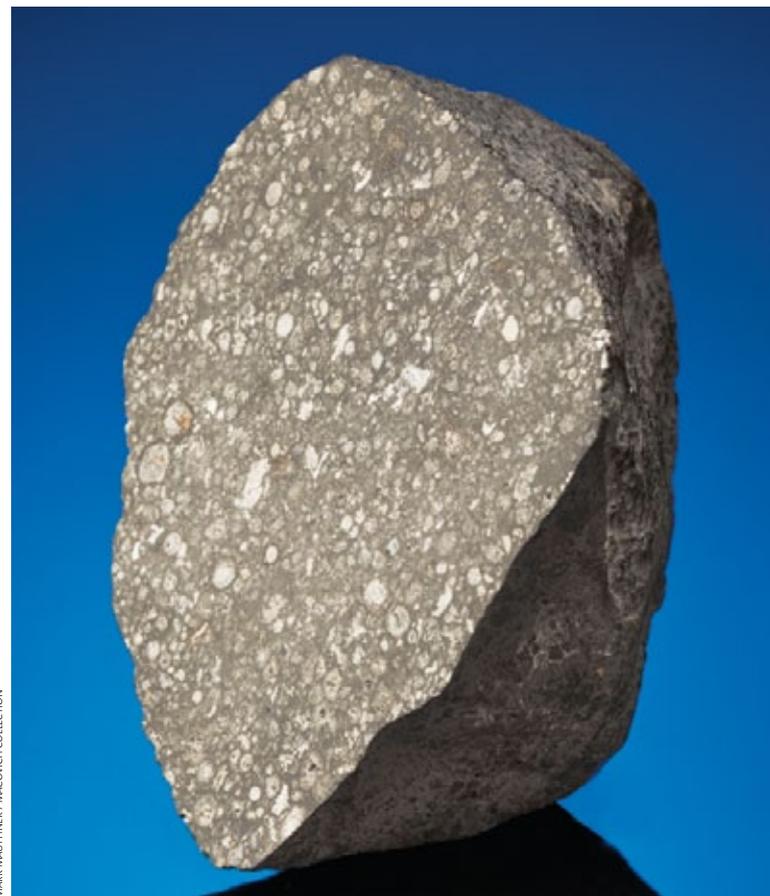
In der Hoffnung, darüber mehr herauszufinden, begann ich 2009 die Fachliteratur zu durchforsten, um eine Tabelle mit den wichtigsten Eigenschaften der großen Chondritengruppen aufzustellen. Darin wollte ich dann nach Zusammenhängen suchen, die vielleicht Licht auf die Geschichte der jeweiligen Gruppe werfen. Doch meine Tabelle blieb weitgehend leer; anscheinend hatten sich nur wenige Forscher für solche Daten interessiert.

Also musste ich die Arbeit selbst erledigen. Ich klemmte mich hinter ein Mikroskop und untersuchte 91 Dünnschnitte von 53 Meteoriten aus unterschiedlichen Chondritengruppen. Bei einer Dicke von 30 Mikrometern (tausendstel Millimeter) werden viele Mineralien durchsichtig und offenbaren ihre optischen Eigenschaften. Die Schnitte zeigen eine

große Vielfalt von Chondren unterschiedlicher Größe, Form, Struktur und Farbe. Die Analyse tausender Chondren macht gewiss Mühe, aber durch diese Übung in »mikroskopischer Astronomie« vervollständigte ich die Tabelle binnen weniger Monate. Die Resultate klärten zwar längst nicht alle offenen Fragen, gaben aber immerhin Hinweise auf den Ursprungsort der verschiedenen Gruppen im Sonnennebel und die damaligen näheren Umgebungen.

Die Enstatit- oder E-Chondrite etwa umfassen nur zwei Prozent aller auf der Erde gefundenen Chondriten. Die Steine sind nach dem darin enthaltenen Mineral Enstatit ( $\text{MgSiO}_3$ ) benannt und treten in zwei Formen namens EH und EL auf, die sich durch ihren hohen (H für englisch: high) oder niedrigen (L für englisch: low) Eisenanteil unterscheiden. Da die Häufigkeiten bestimmter Isotopen von Stickstoff, Sauerstoff, Titan, Chrom und Nickel in diesen Chondriten denen auf der Erde und dem Mars ähneln, entstanden die Enstatit-Chondrite wahrscheinlich innerhalb der Marsumlaufbahn – und somit erheblich näher zur Sonne als andere.

Eine zweite Klasse, die so genannten gewöhnlichen Chondrite, enthält drei eng verwandte Gruppen namens H, L und LL mit unterschiedlichem Eisengehalt. Zusammen machen sie 74 Prozent aller Meteoriten aus. Die große Häufigkeit der drei Gruppen zeigt an, dass sie aus einem Gebiet des Sonnensystems zu uns gelangen, wo die Gravitation ihren Weg zur Erde begünstigt.



MARK MAUFHNER / MACOVICH COLLECTION

Wie John Watson von der University of California in Los Angeles annimmt, stammen die gewöhnlichen Chondrite aus dem Inneren des Asteroidengürtels, der zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter liegt. Asteroiden, die 2,5 Astronomische Einheiten von der Sonne entfernt liegen – eine Astronomische Einheit entspricht dem Abstand Erde-Sonne –, umrunden das Zentralgestirn in zwölf Jahren dreimal, während Jupiter dies bei einem Sonnenabstand von 5,2 Astronomischen Einheiten im selben Zeitraum genau einmal tut. Als Folge dieser Bahnresonanz zupft Jupiters enorme Schwerkraft regelmäßig an den Asteroiden und lenkt schließlich viele in das innere Sonnensystem um. In Schweden fanden Forscher Dutzende gewöhnliche Chondrite in bis zu 470 Millionen Jahre altem Gestein. Das bedeutet, dass Steine dieses Typs unseren Planeten während der letzten mehr als zehn Prozent seiner 4,5 Milliarden Jahre langen Geschichte bombardiert haben müssen.

### Komplexe Chondrenhüllen

Eine dritte Klasse bilden die seltenen Rumuruti- oder R-Chondrite; sie sind nach dem einzigen dokumentierten Absturzort in Kenia benannt und ähneln in chemischer Hinsicht stark den gewöhnlichen Chondriten. Allerdings sind sie viel reicher an Grundmaterial und enthalten deutlich mehr von dem Sauerstoffisotop O-17 im Vergleich zum leichteren O-16. Hohe Temperaturen im Nebel nivellieren die Isotopen-

häufigkeiten; je weiter sich ein Objekt von der Sonne entfernt, desto eher bleiben Unterschiede erhalten. Das Ungleichgewicht der Isotopenhäufigkeit zeigt an, dass die R-Chondrite weiter von der Sonne entfernt entstanden sind als die gewöhnlichen.

Hohe Temperaturen brechen auch die organischen Verbindungen auf, die sich bevorzugt in den so genannten kohligen Chondriten finden. Demnach hielten sich diese Chondriten in noch größerem Abstand von der Sonne auf als die R-Chondrite. Kohlige Chondrite umfassen sechs große Gruppen, denen auf Grund ihrer chemischen, isotopischen und strukturellen Eigenschaften genauere Orte im Sonnenebel zugewiesen werden können.

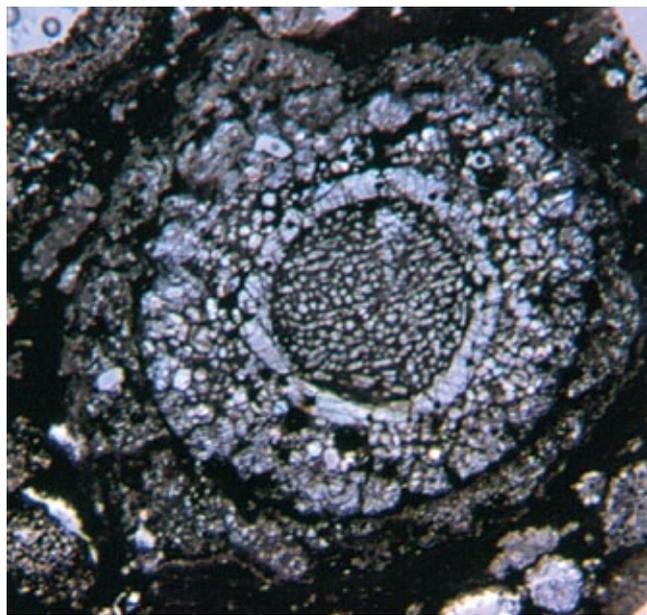
Die innere Struktur der Chondriten gibt Aufschluss über die Staubmenge in der unmittelbaren Umgebung ihres Entstehungsorts. Staub spielte in allen Phasen der Entwicklung des Sonnensystems eine entscheidende Rolle. Als die ursprüngliche Materialwolke kollabierte, aus der Sonne und Planeten hervorgingen, konnten Staubkörner Infrarotstrahlung wirksamer absorbieren; im Zentrum der Wolke stieg dadurch die Temperatur, bis ein Sternvorläufer oder Protostern entstand. Später strebten Staub und – weiter entfernt vom Zentrum – Eis zur Mittelebene des Nebels, bildeten größere Klumpen und schließlich poröse, einige Meter bis mehrere Kilometer große Objekte, so genannte Planetesimale. Einige davon schmolzen. Die Planeten entstanden aus einer Mischung geschmolzener und nicht geschmolzener Planetesimalen, während die gleichförmiger aufgebauten Kometen und Asteroiden höchstwahrscheinlich keine geschmolzenen Vorläufer hatten.

Ein Indiz für die Staubhäufigkeit am Entstehungsort einer bestimmten Chondritengruppe sind die staubhaltigen Schichten, welche die Silikatkerne in den Chondren umhüllen. In bestimmten kohligen Chondriten bestehen die Chondren meist aus einem Kern, der von einer kugelförmigen Hülle aus geschmolzenem Material gleichen Typs umgeben ist. Oft wird diese Schicht ihrerseits von einer Lage besonders feiner Mineralkörner umhüllt (siehe Bild links).

### Staub zu Staub

Vermutlich entstand die Hülle, als die nach dem ursprünglichen Schmelzvorgang wieder verfestigten Chondren eine poröse Staubschicht ansetzten, die dann ihrerseits vorübergehend schmolz. Anschließend setzte sich noch die körnige Außenschicht ab. Chondritengruppen, die zahlreiche Chondren mit solchen Doppelhüllen enthalten, sind offenbar in einer Umgebung entstanden, wo die Staubkonzentration besonders hoch lag.

Wenn sich Schmelzvorgang und Staubanlagerung mehrmals abwechselten, bildeten sich größere Chondren mit dicken Hüllen. In solchen Fällen muss die Umgebung besonders reich an Staub gewesen sein. In Staubbüllen eingekapselte Chondren kühlten langsamer ab, weil sie die Wärme nicht so schnell abstrahlen konnten; dadurch wiederum verdampften größere Mengen flüchtiger Elemente wie Natrium



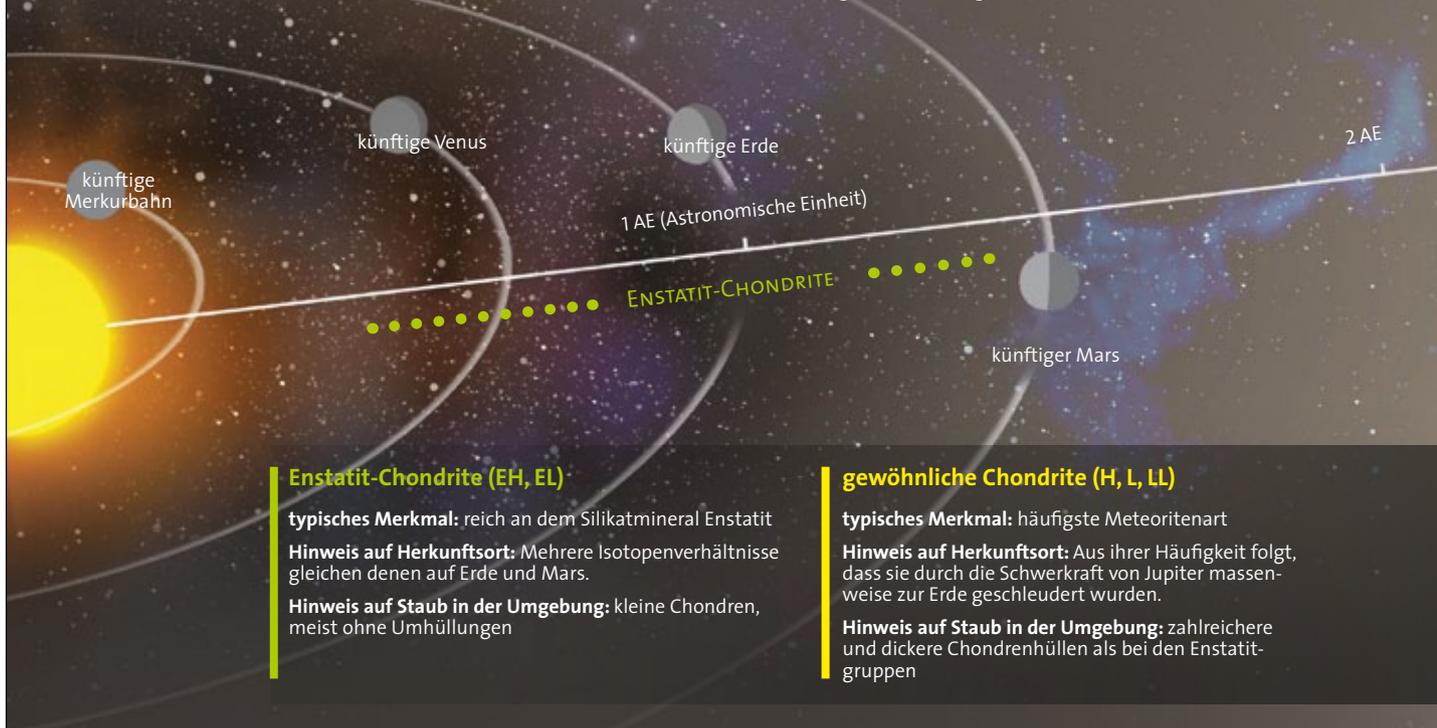
MITFOTOGRAFIE VON ALAN E. RUBIN

Meteoriten vom Typ der kohligen Chondriten (links) enthalten relativ große und komplex strukturierte Chondren (Mikrografische Aufnahme oben). Die Chondren bestehen aus einem Silikatkern, der von dicken Hüllschichten umgeben ist. Diese Schichten stammen von Staub, der einst die Chondren umgab und dann schmolz. Die Dicke und Beschaffenheit der Hüllschichten zeigt an, in welcher Region des urtümlichen Sonnenebels aus Gas und Staub die Chondren entstanden.

## Das Sonnensystem, bevor es Planeten gab

Die Chondrite fallen durch ihre chemischen und strukturellen Eigenschaften in vier Klassen (im Bild farbige Punkte) und zwölf Gruppen, die durch Großbuchstaben charakterisiert werden. Der Autor ermittelt-

te die ungefähren Entstehungsorte dieser Gruppen (farbige Punkte) und die dort vorhandenen Staubmengen. Der meiste Staub (hellbraun) lag um die kohligen Chondrite CR, CV und CK, die wahr-



### Enstatit-Chondrite (EH, EL)

**typisches Merkmal:** reich an dem Silikatmineral Enstatit

**Hinweis auf Herkunftsort:** Mehrere Isotopenverhältnisse gleichen denen auf Erde und Mars.

**Hinweis auf Staub in der Umgebung:** kleine Chondren, meist ohne Umhüllungen

### gewöhnliche Chondrite (H, L, LL)

**typisches Merkmal:** häufigste Meteoritenart

**Hinweis auf Herkunftsort:** Aus ihrer Häufigkeit folgt, dass sie durch die Schwerkraft von Jupiter massenweise zur Erde geschleudert wurden.

**Hinweis auf Staub in der Umgebung:** zahlreichere und dickere Chondrenhüllen als bei den Enstatitgruppen

und Schwefel. Zwar kondensierten diese Elemente größtenteils gleich wieder auf nahe gelegenen Staubkörnern und wurden in den Chondriten eingeschlossen, aber ein Bruchteil ging doch verloren. Darum sollte der Natrium- und Schwefelgehalt von Chondritengruppen, in denen große, staubumhüllte Chondren vorkommen, geringer sein als bei Chondriten, deren Chondren in staubarmem Milieu entstanden sind. Diese Annahme fand ich bestätigt.

Durch Kombination solcher Daten mit den mutmaßlichen Orten der Asteroiden entwickelte ich eine grobe Karte der Staubhäufigkeit im frühen Sonnensystem (siehe Kasten oben). Die Enstatitgruppen, die sich vermutlich innerhalb der Marsumlaufbahn bildeten, lagen in einer staubarmen Region; sie enthalten nur wenige Chondren mit obendrein dünnen Hüllen. Die gewöhnlichen und die R-Chondrite, die weiter von der Sonne entfernt entstanden, zeigen mehr Anzeichen einer staubigen Umgebung. Beispielsweise ist der Anteil von Chondren mit einer Außenhülle größer, und sie ist dicker als bei den Enstatitgruppen.

Am höchsten lag die Staubkonzentration anscheinend im Gebiet der kohligen Chondrite, denn sie bergen die größten Chondren und die mit den meisten Doppelhüllen; die Gruppen tragen die Bezeichnungen CR, CV und CK. Mit wachsendem Abstand von der Sonne nahm der Staubgehalt etwas ab; von dort stammen zwei kohlige Chondritgruppen namens CM und CO. Noch weniger Staub gab es in der Umgebung der

entlegensten Gruppe CI, die gar keine Chondren enthält. Dennoch zählt auch CI zu den Chondriten, denn deren entscheidendes Merkmal ist ihre chemische Zusammensetzung, die derjenigen der nichtflüchtigen Elemente der Sonne gleicht.

Interessanterweise ähnelt die Staubverteilung jener in den so genannten T-Tauri-Sternsystemen. T-Tauri-Objekte verändern ihre Helligkeit sehr unregelmäßig und hüllen sich in ausgedehnte Gasschichten; darum hält man sie für junge Sterne. Oft sind sie von Staubscheiben umgeben. Die Ähnlichkeit der Staubverteilung im Sonnennebel mit der Struktur gewisser T-Tauri-Systeme legt nahe, dass Letztere die Vorläufer von Planetensystemen wie dem unsrigen sind. Die Chondriten künden somit nicht nur von unserer fernen Vergangenheit, sondern geben auch Aufschluss über andere junge Sternsysteme in der Milchstraße.

### Rätselhafte Schmelze

Wodurch Chondren entstehen, ist allerdings noch ungewiss. Vor allem die wiederholten Schmelzvorgänge geben Rätsel auf. Sie müssen fast überall aufgetreten sein, sonst gäbe es nicht Chondren in fast jeder Chondritengruppe. Leider erklärt kein Heizmechanismus sämtliche Eigenschaften der Chondren. Das Mehrfachschnmelzen so vieler Chondren kann nicht auf einem einmaligen Ereignis beruhen wie der Stoßwelle einer Supernova oder einem weit entfernten Gamma-

scheinlich jenseits von 3 Astronomischen Einheiten (AE) die Sonne umkreisen. Noch weiter draußen nahm die Staubkonzentration ab; dort bildeten sich kohlige Chondrite vom Typ CM, CO und schließlich CI. Auch nach innen zu sank der Staubanteil und wurde

im Bereich der Enstatit-Chondrite sehr gering. Diese Staubverteilung ähnelt der in jungen T-Tauri-Sternsystemen. Somit gibt die Physik dieser Systeme Aufschluss über unser frühes Sonnensystem – und umgekehrt.



**Rumuruti-Chondrite (R)**

**typisches Merkmal:** etwas anders zusammengesetzt als gewöhnliche Chondrite

**Hinweis auf Herkunftsort:** Gewisse Isotopenverhältnisse deuten auf größere Entfernung von der Sonne als bei gewöhnlichen Chondriten.

**Hinweis auf Staub in der Umgebung:** viel mehr Grundmaterial – feinkörniges Silikat zwischen den Chondren –, das aus dem Staub des Nebels stammt, als bei gewöhnlichen Chondriten

**kohlige Chondrite (CR, CV, CK, CM, CO, CI)**

**typisches Merkmal:** reich an organischen Verbindungen

**Hinweis auf Herkunftsort:** müssen weit entfernt von der Sonne entstanden sein, sonst hätte deren Strahlung die organischen Verbindungen zerstört.

**Hinweis auf Staub in der Umgebung:** Chondrite vom Typ CR, CV und CK haben die größten Chondren und die dicksten Hüllschichten; CM und CO haben kleinere Chondren und dünnere Hüllen; in CI-Meteoriten gibt es keine Chondren.

strahlungsausbruch. Die Wärmequelle muss einerseits stark genug sein, ganze – selbst mehrere Millimeter große – Chondren zu schmelzen, andererseits so subtil, dass bei anderen Chondren nur der dünne Staubmantel tangiert wird. Manche Forscher vermuten eine pulsierende Quelle, eine Art Blitzgewitter, aber es ist unklar, wie im Sonnenebel Blitze entstehen konnten.

Das derzeit unter Astrophysikern beliebteste Modell be ruht sich auf Stoßwellen im urtümlichen Nebel. Heftige Wellen können sich beispielsweise durch Material gebildet haben, das von außen in den Nebel stürzte. Die Ausbreitung derartiger Stoßwellen durch staubreiche Nebelregionen würde genügend Wärme erzeugt haben, um Chondren zu schmelzen.

Doch dieses Modell hat mehrere Nachteile. Erstens wurden Stoßwellen in protoplanetaren Scheiben noch nie beobachtet. Zweitens würden sie unzählige Chondren auf einmal erhitzen, aber kaum fähig sein, selektiv nur das Äußere einzelner Chondren zu schmelzen, um deren charakteristische Hüllen zu bilden. Drittens treten Stoßwellen örtlich begrenzt auf und können daher kaum Chondren in weit voneinander entfernten Nebelregionen erzeugen.

Somit bleibt der Mechanismus der Chondrenbildung vor derhand rätselhaft. Doch das Bild, das diese geheimnisvollen Boten von der Entstehung unseres Sonnensystems zeichnen, gewinnt nun immer schärfere Umrisse. ∞

**DER AUTOR**



**Alan E. Rubin** ist Geochemiker an der University of California in Los Angeles und analysiert dort die unterschiedlichsten Meteoriten. Neben Fachaufsätzen und populären Artikeln hat er das Buch »Disturbing the Solar System« (Princeton University Press, 2002) verfasst. Asteroid 6227 Alanrubin ist nach ihm benannt.

**QUELLEN**

**Jones, R. H. et al.:** Chemical, Mineralogical and Isotopic Properties of Chondrules. In: Krot, A. N. et al. (Hg.): Chondrites and the Protoplanetary Disk. Astronomical Society of the Pacific Conference Series 341, S. 251–285, 2005

**Rubin, A. E.:** Physical Properties of Chondrules in Different Chondrite Groups: Implications for Multiple Melting Events in Dusty Environments. In: Geochimica et Cosmochimica Acta 74, S. 4807–4828, 2010

**WEBLINKS**

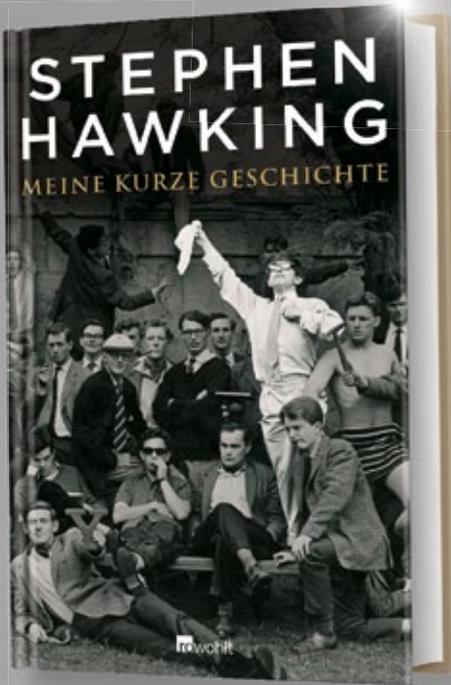
[http://meteorites.wustl.edu/id/ordinary\\_chondrites.htm](http://meteorites.wustl.edu/id/ordinary_chondrites.htm)  
Bilder und Erklärungen (englisch) zur Klassifizierung gewöhnlicher Chondriten

[ScientificAmerican.com/feb2013/chondrites](http://ScientificAmerican.com/feb2013/chondrites)  
Bilder von Chondriten und Chondren

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221321](http://www.spektrum.de/artikel/1221321)

# WISSENSCHAFTLER UND NOBELPREISTRÄGER IN IHREM BRIEFKASTEN.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT-Abo mit exklusiven Extras



## 1. »Meine kurze Geschichte« von Stephen Hawking

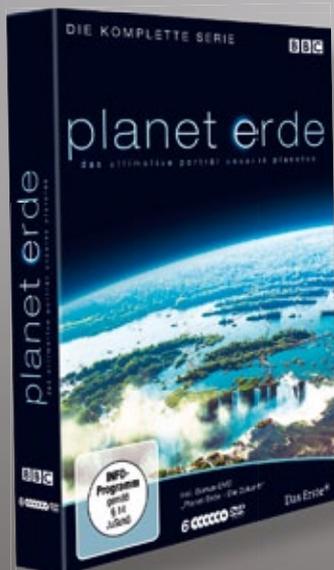
Zum ersten Mal lässt der Physiker sein ganzes privates und wissenschaftliches Leben Revue passieren – in einem Buch voller Weisheit und Humor.

WÄHLEN  
SIE IHR  
GESCHENK.



## 2. Spektrum-Artbook

Das fadengeheftete DIN-A4-Spektrum-Artbook bietet Ihnen viel Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



## 3. DVD-Set »Planet Erde«

Diese Filme sprengen alle bisherigen Grenzen der Naturdokumentation. Sie zeigen unsere Welt, wie sie nie zuvor zu sehen war. 6 DVDs; Laufzeit: 495 Minuten.

So einfach erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**  
**www.spektrum.de/abo**

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)



Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!



Verpassen Sie keine Ausgabe des großen Wissensmagazins.

VORTEILSABO

## ABOPLUS+ – EXKLUSIVE VORTEILE FÜR ABONNENTEN!

### + ERSPARNIS:

12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** fast 10 % günstiger und portofrei ins Haus. Sie können jederzeit wieder kündigen

### + WUNSCH-GESCHENK:

Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten

### + EXKLUSIVE ABOPLUS+-VORTEILE:

#### 2 IN 1:

Sie erhalten nicht nur die Print-, sondern auch Zugriff auf die digitale Ausgabe im PDF-Format

#### KOSTENLOSER ARCHIVZUGANG

zum kompletten Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** ab 2004 mit über 9000 Artikeln

#### VERGÜNSTIGUNGEN:

Rabatte bei zahlreichen Museen, wissenschaftlichen Institutionen und Filmtheatern sowie unseren Sonderheften

#### EXTRAS:

ausgewählte Hefte zum kostenlosen Download

**MEHR UNTER:**

**WWW.SPEKTRUM.DE/ABOPLUS**

# Brudermord und Fremdherrschaft

Glaubt man den Legenden, überschatteten Mord und Betrug die Gründung Roms. Forscher glauben nun, dass die Stadt am Tiber noch eine weitere Leiche im Keller hatte: Der hoch verehrte König Servius Tullius kam wohl ebenfalls durch einen Mord an die Macht – und war vielleicht Etrusker.

Von Charlotte Schubert

**A**uch Rom wurde nicht an einem Tag erbaut, so lautet ein deutsches Sprichwort. Wie lange es aber nun dauerte und ab wann die Siedlung am Tiber als Stadt in die Geschichte eintrat, darüber herrscht rege Diskussion unter Experten. War es ein langsames Zusammenwachsen verschiedener Siedlungen, was die meisten von ihnen glauben? Oder stand doch ein regelrechter Gründungsakt am Beginn, so wie ihn der Mythos von den Zwillingen Romulus und Remus überliefert – und wie der italienische Archäologe Andrea Carandini neuerdings wieder postuliert?

Folgt man den Legenden, die sich um die Entstehung der Römer ranken, so bleiben jene, die im griechischen Kulturkreis kursierten, besonders vage. So notierte Dionysios von Halikarnassos im 1. Jahrhundert v. Chr., ein Grieche namens Euander habe lange vor dem Trojanischen Krieg mit seinen Gefährten am Palatin, einem der sieben Hügel der späteren Metropole, gelebt. Das Gebiet gehörte laut Dionysios zum Herrschaftsgebiet der Aboriginer und ihres Königs Faunus. Jahre später habe der Halbgott Herakles im Tal des Tiber den Riesen Cacus besiegt, und nun hätten sich einige seiner Männer auf dem Kapitolinischen Hügel angesiedelt. Beide Legenden verdeutlichen, dass dieser Raum der sieben Hügel schon lange vor den Römern mit Bedeutung aufgeladen war.

Einige griechische Mythen erwähnen auch eine Stamm-mutter der Römer namens Rhome, was »Kraft« oder »Stärke«

bedeutet. Sie hat einen engen Bezug zu dem trojanischen Prinzen Äneas, der auf Geheiß Apollos viele Bewohner aus dem brennenden Troja führte. Nach einer Irrfahrt über Thra-kien, Kreta und Karthago erreichten die Flüchtlinge Italien und schließlich die antike Landschaft Latium. Rhome wurde schon in der griechischen Literatur des 5. Jahrhunderts v. Chr. als jene Trojanerin genannt, die Äneas' Flotte in Brand setzte, um eine Weiterfahrt unmöglich zu machen. In anderen Mythen war sie seine Frau oder die Gattin des Latinerkönigs.

Die Römer selbst sahen sich als Nachfahren des Äneas; der bedeutende Dichter Publius Vergilius Maro (70–19 v. Chr.) beschrieb die Ereignisse im 1. Jahrhundert v. Chr. in seinem Epos »Aeneis«. Der Protagonist habe nicht nur seine Landsleute nach Italien gebracht, er rettete auch die Kultobjekte der Penaten. Diese Schutzgottheiten waren den Römern heilig, da sie nicht nur im privaten Raum Haus und Hof sicherten, sondern auch in einer sozusagen öffentlichen Version den Staat insgesamt vor Schaden bewahrten. Vergil zufolge nahm Äneas Lavinia zur Frau, die Tochter des Königs Latinus, gründete eine Stadt und benannte sie nach ihr. Der Ort ist archäologisch belegt: Lavinium, heute Practica di Mare, liegt etwa 30 Kilometer von Rom entfernt. Bei Grabungen in den 1950er und 1960er Jahren kam ein Befestigungswerk aus dem 7. Jahrhundert v. Chr. zu Tage, außerdem eine monumentale Anlage mit 13 Altären; der älteste stammt aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. Die Forscher gehen davon aus, dass dieses Monument auch der Verehrung des Äneas diene.

Dessen Sohn Ascanius soll einige Zeit später Alba Longa gegründet haben, wo von da an eine weitere Königsdynastie regierte. Nach dem Mythos vergingen zwölf Generationen, dann gebar die Tochter des Königs Numitor die Zwillinge Romulus und Remus. Doch die Situation war nicht günstig: Numitor war von seinem Bruder Amulius entmachtet worden und fürchtete Konkurrenz, zumal die junge Mutter den Kriegsgott Mars als Vater angab. Der Usurpator ließ die Neugeborenen in der Wildnis aussetzen. Aber eine Wölfin zog sie

## DIE ARTIKEL IM ÜBERBLICK

### SCHWERPUNKT ITALIKER: FRÜHES ROM – PICENER – LUKANER

- ▶ **Brudermord und Fremdherrschaft** S. 52
- ▶ **Das Volk des Spechtes** S. 60
- ▶ **Stolze Burgen für stolze Bürger** S. 64

groß, bis sie als Jugendliche zurückkehrten und von dem wieder amtierenden Numitor aufgenommen wurden.

Am Ort ihrer Rettung wollten die Zwillinge eine Stadt gründen, doch sie gerieten in Streit. Eine Vogelschau sollte entscheiden: Wem die Götter das bessere Himmelszeichen sende, dürfe den Namen aussuchen. Jeder bestieg einen Hügel, beide sahen Geier fliegen. Remus gab sechs als Zahl an, Romulus behauptete, zwölf gesehen zu haben – somit erhielt er den Zuschlag. Nun zog er eine Furche um den Baugrund und errichtete eine Mauer. Aber Remus verspottete deren geringe Höhe, sprang zum Hohn darüber – und wurde von Romulus erschlagen.

Nicht nur dieser Brudermord warf schon in der Antike Schatten auf die Anfänge Roms, sondern auch der Verdacht,

#### AUF EINEN BLICK

#### MYTHISCHE ANFÄNGE

**1** Verschiedene Legenden verankern Rom und das römische Volk im Kontext mythischer Ereignisse wie dem **Trojanischen Krieg** oder dem Schicksal von Romulus und Remus. Die Geschichtlichkeit dieser Überlieferungen ist umstritten.

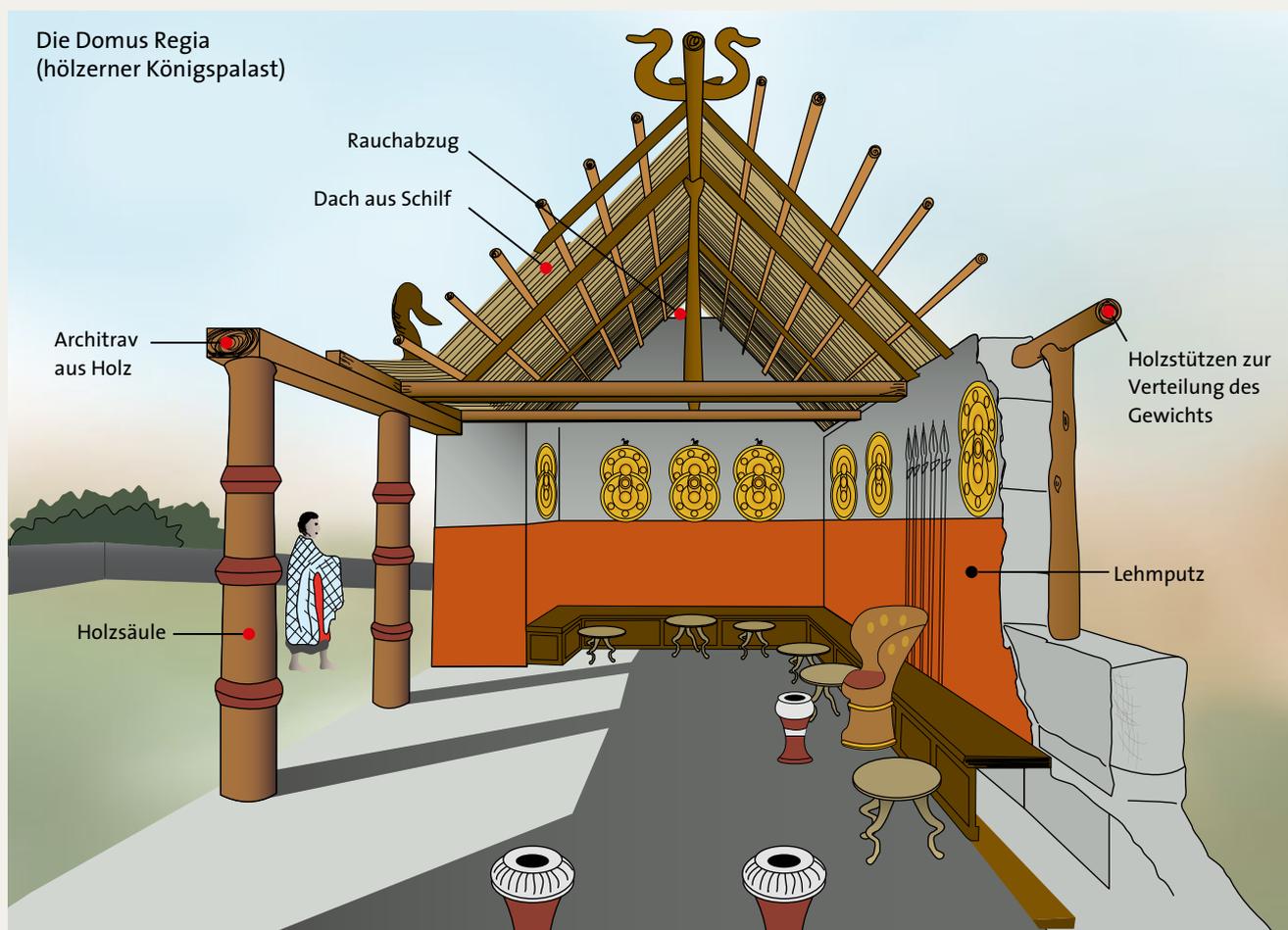
**2** Insbesondere die Legende um die **Stadtgründung durch Romulus** und die sich anschließende Königsherrschaft könnte jedoch einen historischen Kern besitzen.

**3** Zahlreiche Indizien legen den Verdacht nahe, dass die Tiberstadt während der Königszeit unter **etruskischem Einfluss** stand. Darüber jedoch schweigen die meisten antiken Autoren.

In der Wildnis ausgesetzt seien Romulus und Remus von einer Wölfin aufgezogen worden. Ersterer habe später Rom gegründet – und seinen Bruder erschlagen. Diese Gründungslegende beschäftigte die Gelehrten schon in der Antike, zeigte sie doch den Stadtgründer in keinem günstigen Licht. Die berühmte Bronzeskulptur der »Kapitolinischen Wölfin« entstand möglicherweise erst im Mittelalter.

FOTOLIA / KONSTANTIN KALISHKO





Als »Domus Regia« firmierte ein Gebäude, in dem in der Zeit der Republik der höchste römische Priester residierte. Antiken Autoren zufolge war es zuvor auch die Residenz der Könige gewesen. Sein Aussehen in dieser Zeit rekonstruierte der Archäologe Andrea Carandini anhand von Grabungen.

ihr Gründer habe über Art und Zahl der von ihm beobachteten Vögel gelogen. Auch dass er nun Bettler, Schuldner, Kriminelle und entflohene Sklaven um sich scharte, gereichte ihm nicht zur Ehre. Diese anrühige Männergesellschaft musste sich sogar Frauen rauben: Sie luden die umliegenden Städte zu heiligen Spielen ein, fielen dann über ihre Gäste her, zumeist vom Stamm der Sabiner, und entführten deren unverheiratete Töchter. Als ein Heer anrückte, um diese zurückzuholen und die schwere Verletzung des Gastrechts zu sühnen, stellten sich die Frauen zwischen die Parteien, da auf der einen Seite ihre Väter und Brüder standen, auf der anderen inzwischen ihre Männer und Söhne. Die Geschichte nahm ein versöhnliches Ende: Romulus und der Sabinerkönig Titus Tatius teilten fortan die Regierungsgewalt.

Nach fast vier Jahrzehnten soll Romulus während einer Heerschau von seinem Vater Mars in einer Sturmwolke von der Erde gerissen worden sein, um fortan als Kriegsgott Quirinus über seine Stadt zu wachen. Möglicherweise mischen sich in dieser Legende verschiedene Religionen: Quirinus war vermutlich ein Gott der Sabiner, denn diese sollen auch auf dem später Quirinal genannten Hügel gesiedelt haben.

Weniger schmeichelhaft ist, was der Politiker und Redner Marcus Tullius Cicero (106–43 v. Chr.) über den Tod des Gründervaters überlieferte: Von seinen Senatoren gehasst sei Romulus nicht nur von ihnen getötet, sondern auch in Stück gerissen und verschlungen worden, auf dass der erste König Roms spurlos verschwände. Allerdings gibt es keine älteren Belege für dieses unrühmliche Ende, es diente Cicero möglicherweise als verklausulierte Kritik an der Diktatur des Gaius Julius Cäsar.

Ungeachtet widersprüchlicher Versionen hegten die Gelehrten der Antike an der Geschichtlichkeit des legendären

Im 8. Jahrhundert v. Chr. begann der Aufstieg der Etrusker zur Hochkultur, siedelten sich Griechen an den Küsten Italiens und Siziliens an, wurde – zumindest der Legende nach – die Stadt Rom gegründet. Zu dieser Zeit lebten bereits zahlreiche Völker in Italien, die Forscher heutzutage auf Grund kultureller und – sofern anhand von erhaltenen Textfragmenten nachvollziehbar – sprachlichen Gemeinsamkeiten als Italiker bezeichnen. Die Karte zeigt die Verbreitungsgebiete im 5. Jahrhundert v. Chr.



- etruskischer Einfluss
- von Griechen kontrollierte Küsten
- karthagischer Einfluss
- Picener Volksstamm



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / IMBEGRAFIK

## Die sieben mythischen Könige Roms

(Datierung nach der überlieferten Chronologie)

1.	Romulus	753–717 v. Chr.
2.	Numa Pompilius	716–674 v. Chr.
3.	Tullus Hostilius	673–642 v. Chr.
4.	Ancus Marcius	641–617 v. Chr.
5.	Tarquinius Priscus	616–578 v. Chr.
6.	Servius Tullius	578–534 v. Chr.
7.	Tarquinius Superbus	534–509 v. Chr.

Gründungsakts keine Zweifel. Berechnungen des römischen Gelehrten Marcus Terentius Varro (116–27 v. Chr.) nach habe er 440 Jahre nach dem Fall Trojas stattgefunden; das entsprach in unseren Kalender übertragen 753 v. Chr. Fortan nutzten die Römer neben anderen Zeitrechnungen auch die fortlaufende Jahresangabe »ab urbe condita«.

Heutzutage fragen Forscher eher, ob eine dieser Mythen wenigstens einen historischen Kern besitzt. Für die Sagen von Euander und Herakles lässt sich das ausschließen – selbst die Aboriginer waren nur ein mythisches Volk. Äneas gehört zwar zum Überlieferungskreis des Trojanischen Kriegs, dessen Geschichtlichkeit ist allerdings umstritten. Zwar identifizieren die meisten Archäologen das Troja Homers und Vergils mit den bronzezeitlichen Siedlungsschichten des Ruinenhügel Hisarlik in der Türkei, doch keine von ihnen lieferte die zu erwartenden Hinweise auf einen großen, die ganze Anlage zerstörenden Krieg, wie ihn Homer beschrieb. Was Romulus angeht, so halten viele Historiker den Namen für ein Eponym, also eine Konstruktion späterer Zeit, die schlicht »der Römer« bedeutete. Denn in der Antike ging es nun einmal nicht ohne einen personalisierten Gründungsmythos.

Allerdings kam Bewegung in die Diskussion, als der italienische Archäologe Andrea Carandini von der Università La Sapienza Roma 1988 bei Grabungen am Nordhang des Palatins Mauerreste entdeckte, die er auf Mitte des 8. Jahrhunderts v. Chr. datierte und als Teile der romuleischen Befestigung deutete. Zudem stieß Carandini an diesem Hang auch auf Pfostenlöcher, also Nachweise von Holzhäusern, die um 725 v. Chr. errichtet worden seien. Weil zuvor schon auf anderen Hügeln der Stadt zeitgleiche Siedlungsreste gefunden wurden, konstatierte er eine protourbane Phase Roms, also eine stadtähnliche Struktur, in der sich Dörfer in mehreren Phasen von den Hügeln aus in die Talsohlen ausdehnten, umschlossen von einer Mauer. In dieses Bild passt auch, dass Verstorbene immer näher zur Mauer hin beigesetzt und damit Nekropole und Siedlung räumlich getrennt wurden. Carandini hat außerdem die Fundamente eines Gebäudes ausgegraben, das sich zu einem weiten Hof hin öffnete. Der Archäologe erkannte darin einen repräsentativen Charakter und hielt es für die Residenz des Romulus beziehungsweise

der auf ihn laut Überlieferung folgenden sechs Könige (siehe Tabelle links und Bild S. 54). In der republikanischen Zeit wirkte dort der »rex sacrorum«, der die sakralen Funktionen der Könige übernommen hatte.

Auch eines der ältesten Rituale Roms, das Lupercalienfest, bietet für Carandini Hinweise auf diese frühe Phase. Der Legende nach von Romulus selbst begründet und im 1. Jahrhundert v. Chr. gut bezeugt durch Schriftquellen, sollte es Faunus, den Hüter der Herden ehren, der auch als Lupercus, »Wolfsabwehrer« angesprochen wurde. Das Fest wurde am 15. Februar, also nahe dem Frühlingsanfang, begangen. Es begann am Fuß des Palatins in einer Höhle, dem »Lupercal«. Dort sollte die Wölfin Romulus und Remus gesäugt haben. Junge Männer hielten sich Messer an der Stirn, an denen das Blut von Opfertieren klebte; mit deren Fellen bekleidete Priester umrundeten von dort aus in einer Prozession den Palatin.

Verschiedene antike Autoren haben die Lage dieser Höhle recht gut beschrieben, Carandini will sie 2008 entdeckt haben. Restaurierungsarbeiten am Palast des Kaisers Augustus boten ihm die Gelegenheit, eine Kamera in die unter dem Erdgeschoss liegenden Zisternen abzulassen. Er stieß auf einen mit Fresken geschmückten Raum (siehe Bild rechts). Tatsächlich würde das gut passen, denn der erste Kaiser des Imperiums stellte sich gern wie Romulus als Stadtgründer dar und ließ wohl das »Lupercal« restaurieren. Alle Indizien sprächen demnach für einen bewussten Gründungsakt in Übereinstimmung mit der römischen Chronologie.

### Gründungsakt oder schrittweise Entwicklung?

Carandinis These hat viel Widerspruch unter den Experten hervorgerufen, die Rom frühestens seit der Mitte des 6. Jahrhunderts als voll entwickelte Stadt sehen, also mit entsprechenden Ausmaßen und den zugehörigen politischen Institutionen. So wurde um 625 v. Chr. das »Comitium« gepflastert, ein Platz auf dem Forum, auf dem sich die Bürger versammelten, um über wichtige Themen abzustimmen und Wahlen abzuhalten. Diese Maßnahme gilt als Ausdruck eines öffentlichen Willens, die Volksversammlung als etablierte Institution baulich zu repräsentieren und markiert demnach einen wichtigen Schritt in der Stadtentwicklung.

Gegen diese Annahme spricht aber, dass Rom im 6. Jahrhundert schon eine Größe erreicht hatte, die eine längere Vorgeschichte voraussetzt. Dort lebten vermutlich 25 000 bis 40 000 Menschen, die Stadtfläche betrug mindestens 285 Hektar. Das nämlich ist die vom »Pomerium« umschlossene Fläche. Diese heilige Grenzlinie, die mit »cippi« genannten Steinen markiert wurde, von denen einige ausgegraben wurden, umfasste zunächst die Stadtviertel Suburana, Esquilina, Collina und Palatina. Auch die Städte der Etrusker und Griechen in Mittel- und Unteritalien waren nicht wesentlich größer. Schon König Servius Tullius habe das Gebiet auf 426 Hektar erweitert – auf die Größenordnung Athens.

Die Bezeichnung »Pomerium« war eine Kurzform von »post moerium« und bedeutete einen hinter der Mauer ab-

gegrenzten Raum. Es unterschied aber nicht nur das Stadtgebiet vom Umland, sondern trennte auch zivile und militärische Bereiche. Deshalb lag beispielsweise das Marsfeld, auf dem sich das Heer versammelte, außerhalb des »Pomerium« und Soldaten durften es nicht bewaffnet überschreiten, Triumphzüge bildeten die einzige Ausnahme. Wurde das Pomerium erweitert, fand ein Ritual statt, das die Römer auch bei der Gründung einer Kolonie einsetzten: Ein Gespann aus einem außen laufenden Ochsen und einer innen gehenden Kuh zog gegen den Uhrzeigersinn einen Pflug, der eine vorher ausgemessene Furche um das Gebiet aushob; dabei musste die aufgeworfene Erde nach innen fallen.

Heute wissen wir, dass dies ein Ritual der Etrusker war. Welchen Einfluss hatte dieses Volk, das im 8. Jahrhundert bereits auf dem Weg zur Hochkultur war? Bei römischen Historikern finden sich zwar kaum Hinweise, doch es gibt andere Indizien. So hatte die Tracht des römischen Königs, wie sie in der antiken Literatur beschrieben wurde, etruskische Vorbilder; gleiches gilt für jene, die siegreiche Feldherren beim Triumphzug trugen – dafür gibt es bildliche Darstellungen. Ein weiterer Hinweis: Waren hohe Amtsträger unterwegs, wurden sie von so genannten Liktores begleitet. Diese trugen Rutenbündel, außerhalb Roms aber auch eine Doppelaxt – eine typisch etruskische Waffe. Des Weiteren stammt die rituelle Leberschau, die den Willen der Götter erkunden sollte, der etruskischen Wahrsagerei.

Unstrittig ist auch, dass die Könige Tarquinius Priscus und Tarquinius Superbus eine Verbindung zu Etrurien haben mussten – Tarquinii war eine bedeutende etruskische Stadt. Priscus, so erklärten es manche römischen Historikern, sollte von einem Griechen abstammen, der sich in Tarquinii nie-

dergelassen und dort eine Etruskerin geheiratet hatte. Es gäbe aber aus heutiger Sicht eine provokantere Deutung: eine etruskische Phase Roms. Dafür sprechen noch andere Ungereimtheiten. Nach der römischen Chronologie starb Priscus 578 v. Chr., sein Sohn Superbus folgte ihm aber erst 44 Jahre später – im Alter von 20 oder 30. Zwar fanden die antiken Gelehrte eine Lösung: Er sei wohl eher ein Enkel des Priscus gewesen. Allerdings wäre dann der überlieferte Königsstammbaum falsch, wie zum Beispiel Timothy Cornell von der University of Manchester kritisiert hat.

### Wurde Rom von Etruskern regiert?

Zwischen den beiden Tarquiniern herrschte Servius Tullius als sechster König. Er soll das »Pomerium« um die Hügel Quirinal und Viminal erweitert und einen Schutzwall um das Stadtgelände errichtet haben. Des Weiteren teilte er sein Volk je nach Besitz in Hundertschaften ein. In diesen »Centurien« stimmten sie bei den Volksversammlungen auch ab. Sowohl die Servianische Stadtmauer – in ihrer Funktion als sakrale Grenze – wie auch die Zenturienreform galten bis in die Spätzeit der Republik als Fundamente der politischen Struktur und als Garanten der Stabilität.

Doch wer war dieser bemerkenswerte König – und hat er wirklich gelebt? Kaiser Claudius, der von 41 bis 54 n. Chr. regierte und als Kenner etruskischer Geschichte gilt, hielt ihn für den Gefolgsmann eines gewissen Caeles Vibenna, eines etruskischen Söldnerführers. Beide hätten sich auf einem der sieben Hügel festgesetzt, der damals noch nicht zur Stadt gehörte; später sei dieser nach dem Etrusker benannt worden – Caelius. Tullius habe damals selbst noch einen etruskischen Namen getragen: Mastarna. Auch andere Gelehrte wie

Als die Ruine des Augustuspalasts 2008 restauriert wurde, ließen Forscher eine Kamera in die darunterliegenden Zisternen ab. Sie entdeckten eine mit Fresken geschmückte Höhle (Bild rechts). Möglicherweise handelt es sich um den »Lupercal«, Roms ältesten Kultort.



GRAFIK LINKS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; FOTO RECHTS: DPA / ITALIAN CULTURALACTIVITY MINISTRY



Wandmalereien in einem Grab der etruskischen Stadt Vulci geben Historikern Rätsel auf. Sie erzählen von der Befreiung eines etruskischen Söldnerführers (unten) und der Ermordung eines Römers (links), mutmaßlich des Gnaeus Tarquinius. Eine Lesart dieser Überlieferung legt die Vermutung nahe, dass Roms sechster König Servius Tullius niemand anderes war als jener Etrusker, der seinen Anführer befreite.



etwa der Historiker Tacitus im 1. Jahrhundert n. Chr. wussten noch von einer Besetzung Roms durch etruskische Söldner.

Caeles Vibenna taucht in diesem Zusammenhang immer wieder auf, er wurde auch in Inschriften und Weihungen aus dem 6. Jahrhundert erwähnt. Es gibt sogar Wandmalereien aus der Zeit um 300 v. Chr. zu den Ereignissen – in einem etruskischen Grab. In der 1857 entdeckten »Tomba François« bei Vulci, einem der Hauptorte dieser Kultur, zeigen sie einen bewaffneten Konflikt zwischen dem Etrusker Marce Camitlnas und einem Cneve Tarchunies Rumach – etruskisch für »Gnaeus Tarquinius aus Rom«. Zwei der Szenen erzählen von der Befreiung des Caeles Vibenna durch einen gewissen Mastarna (Bild rechts), eine andere vom Tod des Römers durch die Hand des Marce Camitlnas (Bild links).

Die Bedeutung und Historizität dieser Malereien ist umstritten: Zeigen sie zum Beispiel den Sieg Vulcis über Rom oder den des Mastarna über König Tarquinius? Die Deutung erschwert auch, dass Mastarna die etruskische Entsprechung des lateinischen »magister« ist, also offensichtlich keine Person meinte, sondern eine Funktion. Das wiederum deuten manche Experten als Hinweis darauf, dass im Rom des 6. Jahrhunderts ein »magister populi« an der Spitze der Regierung stand, und jener Mastarna niemand anderes als Servius Tullius gewesen sei, der nach der Ermordung des Tarquinius dieses hohe Amt übernahm.

Auch wenn die Beantwortung vieler Fragen offen bleibt, so zeigt sich doch, dass die überlieferte Abfolge der sieben Könige beziehungsweise einer von der Stadtgründung bis zur Re-

publik durchgehenden Zeit so nicht stimmen kann. Statt Kontinuität ergibt sich eher das Bild einer Epoche der Abenteuer, in der Söldnertruppen und Exilanten aus verschiedenen Regionen Italiens um die Macht in Rom kämpften. Erst im Nachhinein wurde diese Phase bereinigt, um dem Selbstverständnis der Großmacht den passenden geschichtlichen Hintergrund zu verleihen. Was es für Forscher ebenso schwer wie spannend macht, Roms Frühzeit zu erforschen. ∞

## DIE AUTORIN



Die Historikerin **Charlotte Schubert** lehrt Alte Geschichte an der Universität Leipzig.

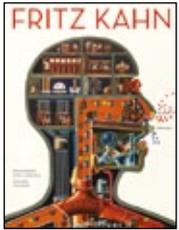
## QUELLEN

- Andreae, B.:** Die Tomba François. Anspruch und historische Wirklichkeit eines etruskischen Familiengrabs. In: Andreae, B. et al. (Hg.): Die Etrusker. Luxus für das Jenseits. Bilder vom Diesseits – Bilder vom Tod. Hirmer, München 2004, S. 176–207
- Carandini, A.:** Die Geburt Roms. Artemis & Winkler, Düsseldorf 2002
- Cornell, T.:** The Beginnings of Rome, Routledge, London 1995
- Kolb, F.:** Rom: Die Geschichte der Stadt in der Antike. C.H.Beck, München 2002

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221325](http://www.spektrum.de/artikel/1221325)

## Pionier der Informationsgrafik

U. & Th. Von Debschitz  
(Hg.): **FRITZ KAHN**



☎ (9-3846-7) **39.99**  
Universalgelehrter, Arzt im Berlin der Weimarer Republik, Aufklärer und Bestsellerautor – eigentlich hat Fritz Kahn (1888–1968) alles getan, um sich bleiben den Ruhm zu sichern.

Doch als er 1968 in einem Sanatorium in der Schweiz starb, war er, zumindest in Deutschland, weitgehend vergessen. Bevor Kahn vor der antisemitischen Hetze der aufziehenden Nazizeit aus Deutschland floh und es dank seines Fürsprechers Albert Einstein schließlich schaffte, Exil in den USA zu finden, war er ein erfolgreicher Autor populärwissenschaftlicher Bücher geworden. Die kreativen Darstellungen, die seine Bestseller illustrierten, folgten dem volksaufklärerischen Plan, biologische und physikalische Vorgänge einem breiten Laienpublikum verständlich zu machen. Zu Fritz Kahns 125. Geburtstag veröffentlicht Taschen diese Monografie mit mehr als 350 der eindrucksvollsten Illustrationen aus seinen Büchern, mit seinen Original-Bildunterschriften, drei Texten aus Kahns Feder, einem Vorwort von Steven Heller und einem ausführlichen Essay zu Kahns



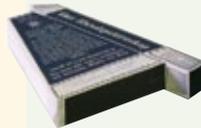
Ceuve und Bedeutung. 392 S., durchg. Farb- und s/w-Abb., 25 x 32 cm, geb. (Taschen, 2014)

## Vom Gottesteilchen zur Weltformel

Urknall, Higgs, Antimaterie und die rätselhafte Schattenwelt

☎ (9-3617-1) **24.99**

Eine einzigartige Exkursion vom Urknall zu anderen Universen und ins Innerste der Materie. 511 Seiten, s/w-Abb. und Tabellen, Format 14 x 22 cm, gebunden. (Kosmos, 2013)



## Das Handspektroskop

☎ (9-3169-8) **6.90**

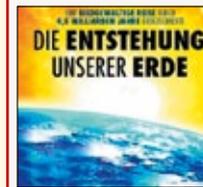
In diesem einfach zu bauenden Gerät bringt ein hochpräzises Durchlicht-Beugungsgitter mit 1.000 Linien pro mm die Spektralfarben zur Erscheinung. Die Abweichung zur Meßgenauigkeit eines teuren professionellen Spektrometers liegt bei unter 3 %. Ausstattung: Komplet mit Beugungsgitter, Vergrößerungslinse, 20 mm und Nanometerskala. Verpackung: 300 x 210 x 5 mm.



## Gipsbüste Albert Einstein

☎ (9-3851-3) **29.90**

Detailliert gefertigte Gipsbüste des großen Physikers. Höhe: 22 cm. Material: Alabastermodellgips. Gewicht: 1,1 kg. Massive Handarbeit aus Deutschland.



## Die Entstehung unserer Erde

8 DVD (9-3059-4)

nur **36.-**

Eine bildgewaltige Reise durch 4,5 Milliarden Jahre Erdgeschichte in 19 Stunden - gefilmt komplett in HD: Unter anderem werden untersucht: die San Andreas Verwerfung, die Atacama-Wüste, die grossen Seen, die Alpen, Loch Ness, der Marianengraben, Island, Yellowstone, Krakatau, Asteroideneinschläge, Hawaii, Geburt der Erde, Mount Everest, der Grand Canyon, die Sahara, der Vesuv, der pazifische Feuerring, die Rocky Mountains, Mount St. Helens, Death Valley, der Yosemite Nationalpark, Amerikas Eiszeit. 8 DVD. 1.130 Min.

## Bausatz Stirlingmotor Solar Stahl

☎ (9-3844-1)

Dieser spezielle Stirlingmotor basiert auf einer Entwicklung, die ursprünglich von der NASA stammt. Er wurde so optimiert, dass er schon bei geringsten Wärmeunterschieden arbeitet. Wenn Sie den Motor z.B. auf eine Tasse Kaffee stellen wird er zeigen wie viel Energie in der Tasse steckt. Der Motor läuft sogar mit der Abwärme einer menschlichen Hand und er läuft rückwärts, wenn man ihn kühlt. Weil der Motor gleich mehrere physikalische Vorgänge anschaulich demonstriert, ist er mehr als nur ein Spielzeug für Technikfans. Der Arbeitszylinder ist aus Präzisionsglas gefertigt. Seine Toleranzen liegen im Mikrometerbereich. Für beste Gleiteigenschaften ist der Arbeitskolben (ebenfalls mikrometergenau) mit einer speziellen Nano-Beschichtung versehen. Die eingebauten Kugellager entsprechen höchsten Qualitätsnormen. Darüber hinaus wurden sie entfettet und demagnetisiert. Maße: ca. 13 x 10 cm, Lieferung in gepolstertem Karton. Handgefertigt in Deutschland.

**199.-**



## C.A. Pickover Das Mathebuch

Von Pythagoras bis in die 57. Dimension  
250 Meilensteine in der Geschichte der Mathematik

☎ (9-3420-6) statt 39.95

nur **19.99**

Begleiten Sie den Autor auf seiner Reise zu 250 Errungenschaften der Menschheit von der Entdeckung der platonischen Körper über die Erfindung der Null, die Einführung des Abakus, die Herstellung computergenerierter Fraktale bis hin zur Suche nach neuen Dimensionen. Die einzigartige Mixtur aus Wissenschaft, Mystik, Science-Fiction, Computertechnik und Historie ist wunderbar unterhaltsam dargelegt. (SA) 528 Seiten, 259 Farbtafeln, Format 19 x 22 cm, gebunden.



## Der Bestseller aus dem Jahr 1910!

## Arthur Brehmer: Die Welt in 100 Jahren

☎ (9-3806-6) statt Originalausgabe 19.80

jetzt als Sonderausgabe nur **9.95**

In den Jahren 1909 und 1910 entstand dieses reich illustrierte Buch über eine damals ferne Zukunft, das, anders als die literarischen Visionen jener Zeit, von Experten verschiedener Bereiche geschriebene und möglichst sachliche Prognosen versammelte. Dem einflussreichen Journalisten Arthur Brehmer (1858 - 1923) gelang es, prominente Autoren zu gewinnen, sich Gedanken über die Zukunft zu machen. Ernst Lübbert (1879 - 1915) schuf die kongenialen Illustrationen. Mit ihren Zukunftsprognosen haben die Experten von 1910 auch einige Treffer gelandet – eine spannende und erhellende Lektüre. Reprint von 1910, mit ergänzendem Vorwort von Georg Ruppelt. (SA) 319 S., zahlr. s/w-Illustrationen, 17 x 24 cm, geb.



## Science-Shop.de

bei **Mail:Order:Kaiser**

Postfach 80791 München

Tel. 0180 5 34 17 34\*

Fax 0180 5 33 33 23\*

info@science-shop.de

Name, Vorname \_\_\_\_\_

Straße \_\_\_\_\_

PLZ/Ort \_\_\_\_\_

Datum / Unterschrift \_\_\_\_\_ SciA144

Stück ☎ Bestellnummer/Titel

Stück	☎ Bestellnummer/Titel

Lieferung bequem per Rechnung (Bonität vorausgesetzt)

Versandkostenanteil: 4.95 € (in Deutschland)

Alle Preise in Euro inkl. MwSt. und zzgl. Versandkosten

**Volles Rückgaberecht für 14 Tage**

# Das Volk des Spechtes

Gefürchtete Krieger und erfolgreiche Fernhändler: Die Picener waren eines der bedeutendsten italischen Völker. Dabei verdankten sie ihre Existenz, so berichtet ihr Gründungsmythos, allein der Entscheidung eines Vogels.

Von Alessandro Naso

Um das Jahr 1000 v. Chr. begann sich die Welt des Mittelmeerraums neu zu konfigurieren. Die großen Reiche der Bronzezeit waren längst zerfallen, doch hier nahm seinen Anfang, was im Lauf weniger Jahrhunderte im Erblühen der griechischen und später der römischen Kultur gipfeln sollte. In dieser Zeit bildeten sich in Italien aus Einheimischen und Zuwanderern neue Volksgruppen, die Altertumswissenschaftler auf Grund sprachlicher Gemeinsamkeiten unter der Sammelbezeichnung Italiker zusammenfassen.

Zu den kulturellen Gemeinsamkeiten dieser Völker zählte den griechischen und römischen Historikern zufolge ein als »ver sacrum«, also »geheiliger Frühling« bezeichneter Brauch: Dem Kriegsgott Mamars, der dem römischen Mars entsprach, weihte man alles, was im kommenden Frühling geboren würde, ob Pflanze, Tier oder Mensch. Wurde nun ein Stamm für sein Gebiet zu groß, mussten junge Männer und Frauen sozusagen als symbolisches Opfer an den Gott fortziehen, um andernorts eine neue Existenz aufzubauen. Ein Tier sollte die Jugendlichen dabei geleiten. So erzählten die griechischen und römischen Quellen von den Samniten, dass ein Stier sie geführt habe. Wo er sich schließlich niederließ, siedelten sie sich an (siehe Karte S. 55). Etliche weitere

Stämme entstanden durch erneute Teilung – was die Samniten später nicht davon abhielt, gegen ihre Nachkommen Krieg zu führen.

Ein italisches Volk, das in den letzten 40 Jahren vermehrt Eingang in die Forschung gefunden hat, waren die Picener. Verschiedene Autoren schrieben ihre Ursprungslegende nieder, allerdings gibt es keine konsistente Gesamtdarstellung. So notierte Plinius der Ältere im 1. Jahrhundert n. Chr., der »ver sacrum« habe Angehörige der in Mittelitalien lebenden Sabiner auf Wanderschaft geschickt. Sein Zeitgenosse Marcus Verrius Flaccus nannte als deren Ziel das antike Asculum, heute Ascoli Piceno. Das Leittier war ein Specht, der sich dort auf ihrem »vexillum«, einer Art Standarte, niedergelassen habe. Zu diesem Mythos passt der Name: Im Lateinischen heißt der Vogel »picus«, »Picentes« wäre also das »Volk des Spechtes«. Allerdings bezeichneten sie sich in ihrer eigenen Sprache, die durch etwa 25 Inschriften übermittelt ist, als »Pupun«. Möglicherweise entwickelte sich die römische Bezeichnung also aus diesem Eigennamen, dessen Bedeutung wir leider nicht kennen.

Mit dem Specht hatte es aber durchaus seine Bewandnis. Nicht nur galt er auch in Rom als ein dem Kriegsgott Mars heiliges Tier. Dem griechischen Historiker Dionysios von Halikarnassos (54 v. Chr.–8 n. Chr.) zufolge gab es im Land der Sabiner zudem eine Orakelstätte des griechischen Kriegsgottes Ares. In diesem Heiligtum namens Tiora Matiena habe ein auf einem Pfahl sitzender Specht den Menschen geweissagt. Einige Historiker vermuten, dass aus Tiora Matiena das heutige Abruzzendorf Teora hervorging. Träfe dies zu, könnten Sabiner tatsächlich von dort aus zur Küste aufgebrochen sein und sich im Gebiet um das heutige Ascoli Piceno angesiedelt haben.

Allerdings kamen weder in der Stadt noch in ihrem Umland bei Grabungen archäologische Zeugnisse der picenischen Kultur in der Menge ans Licht, wie man es dann eigentlich erwarten müsste. Möglicherweise ist diese Ortsangabe dem Mythos erst später hinzugefügt worden, um seiner Bedeutung während des so genannten Bundesgenossenkriegs

## AUF EINEN BLICK

### MITTLER ZWISCHEN DEN WELTEN

**1** Das italische Volk der **Picener** besiedelte spätestens seit dem 9. Jahrhundert v. Chr. die gebirgige Region zwischen dem etruskischen Kulturraum und der Adriaküste. 278 v. Chr. wurden sie gezwungenermaßen **Bundesgenossen Roms**.

**2** Auf Anhöhen gelegene Siedlungen in den Verbindungstätern waren vermutlich Ausgangspunkte für **Raubzüge**, dienten mehr und mehr aber der **Kontrolle von Handelswegen**.

**3** Die Picener waren wichtige **Akteure im Fernhandel** zwischen dem Mittelmeerraum und weiter nördlich gelegenen Regionen. Dadurch vermittelten sie Knowhow und kulturelle Errungenschaften, wie der Vergleich picenischer und keltischer Statuen zeigt.



SCALA FIORENZ / MINISTERO DEI BENI E DELLE ATTIVITÀ CULTURALI



LANDESMUSEUM WÜRTEMBERG, STUTTGART / P. FRANKENSTEIN UND H. ZWIETASCH

Eine in Capetrano entdeckte lebensgroße Statue (links) gilt als Bildnis eines Angehörigen der pice-nischen Elite. Der Mann trug mutmaßlich einen Hut, der Angehörigen des gehobenen Standes vorbe-halten war. Auch bronzenne Scheiben auf der Brust zeigen seinen Rang, da sie zur Ausrüstung eines Kriegers gehörten. Im Stil vergleichbare Statuen kamen zudem andernorts zu Tage, sogar im keltischen Norden wie die hier ebenfalls lebensgroße abgebildete Figur des Kriegers von Hirschlanden (rechts).

Rechnung zu tragen: Zu Beginn des 1. Jahrhunderts v. Chr. lieferten sich die Picener und andere italische Völker bei Ascoli Piceno eine Schlacht mit römischen Truppen. In der Folge verlor der Ort zwar seine Unabhängigkeit, aber immerhin erhielten seine Einwohner das römische Bürgerrecht – dessen Verweigerung überhaupt erst zum Aufstand gegen Rom geführt hatte.

### Kontrolle der Verbindungswege

Anhand von Metallfunden wie Waffen und Schmuck für die Frauen zeichnete Delia Giuliana Lollini, die ehemalige Leiterin der Soprintendenza Archeologica delle Marche, das Siedlungsgebiet der Picener nach: Vom Beginn der Eisenzeit im 9. Jahrhundert v. Chr. bis zur römischen Eroberung Anfang des 3. Jahrhunderts v. Chr. kontrollierten sie ein Gebiet, das von den Bergen, die heute zu den nördlichen Abruzzen und

südlichen Marken gehören, bis hinab zur mitteladriatischen Küste reichte. Viele Orte lagen in tief eingeschnittenen Flusstälern, dabei jedoch strategisch gut auf Anhöhen platziert. Denn diese fast parallel zueinander verlaufenden Täler boten die einfachste Verbindung zwischen der Küste und den fruchtbaren etruskischen Gebieten im Westen, also etwa der heutigen Toskana und dem nördlichen Latium. Diese Wege zu kontrollieren, war sicher von strategischer wie ökonomischer Bedeutung. Gut möglich, dass manche Pässe nur gegen eine Abgabe benutzt werden durften; das lässt sich heute nicht mehr nachweisen.

In einem solchen Tal entwickelte eine Siedlung stets Macht und Einfluss über alle anderen. Ein gutes Beispiel ist die archäologische Stätte Pitino di San Severino im Tal des Potenza. Die Grabbeigaben seiner Nekropole gehören zu den wertvollsten im ganzen Picenum. Allerdings blieb die Zahl

Ein ritueller Waffentanz um ein Totem zierte den Deckel einer Situla, eines für den etruskisch-italischen Raum typischen Bronzegefäßes, das wohl auch kultischen Zwecken diente. Das Objekt kam in einem Grab aus dem Ende des 7. bis Anfang des 6. Jahrhunderts v. Chr. in der Nekropole von Pitino ans Licht.



ANGIMAGES / DE ACOSTINI PICTURE LIBRARY / A. DE GREGORIO

der Besitzenden im Vergleich etwa zur etruskischen Ebene beschränkt, denn das gebirgige Land erlaubte den Niederlassungen kein nennenswertes Wachstum und somit seinen Eliten keine Entwicklung städtischer Kultur. Das traf auf alle italischen Völker zu, weshalb sie der griechische Schriftsteller Strabon (1. Jahrhundert v. Chr. – 1. Jahrhundert n. Chr.) meist als »komedon zontes«, als Dorfbewohner bezeichnet hat.

Dennoch veränderten sich die gesellschaftlichen Verhältnisse offenbar, denn im 7. Jahrhundert v. Chr. verbreitete sich in Mittelitalien und dann auch im Picenum die »orientalisierende Kultur«: Durch die Anhäufung von Besitz hatten Eliten bei den Etruskern wie bei den Italikern ihren Rang gefestigt, nun wollten sie ihn nach außen zeigen. Dazu bedienten sie sich zum einen kostbarer Importwaren, zum anderen imitierten sie die Machtsymbole vorderorientalischer Königtümer. Daher ist es möglich, in einem picenischen Grab bronzene »Rippenschalen« zu finden, wie sie Verstorbenen im nordsyrischen Assur mitgegeben worden waren. Wo diese wertvollen Objekte hergestellt und wie sie verbreitet wurden, ist noch Gegenstand der Forschung. Doch eines ist gewiss: In all diesen Kulturen war es Angehörige der lokalen Eliten vorbehalten, aus solchen Gefäßen Wein zu trinken. Nicht zuletzt dank der Picener gelangte diese Mode weiter nach Norditalien und überquerte sogar die Alpen.

Auch einige Steindenkmäler verdeutlichen, dass picenisches Gebiet Ideen aus dem Mittelmeerraum weitervermittelt. So bildete der nach seinem Fundort in den Abruzzen benannte »Krieger von Capestrano« das Vorbild für eine Reihe weiterer Grabstatuen, darunter auch jene aus den keltischen Grabhügeln Hirschlanden (siehe Bild S. 61) und Glauberg in Deutschland.

### Beliebte Exportwaren: Eherne Militaria

Die Rolle der Picener im Fernhandel beschränkte sich aber nicht auf die Weitergabe von Waren. Vielmehr entwickelten sie eigene Produkte, insbesondere militärische Ausrüstungsteile. So fertigten einheimische Handwerker für die Reiterei neuartige Formen von Trensen an, also Gebissstangen mit seitlichen Ringen zum Einhängen des Zaumzeugs. Noch im 7. Jahrhundert v. Chr. folgten picenische Helme den Vorbildern aus Mittelitalien, im Jahrhundert darauf brachten die Werkstätten aber einen neuen Typus heraus. Der »Negauer Helm«, benannt nach einem in einem 1811 in Negova im heutigen Slowenien entdeckten Helmdepot, verfügte über eine metallene Krempe, die Schutz gegen die zur gleichen Zeit aufkommenden langen Schwerter bot. Am Ende des 6. Jahrhunderts v. Chr. verlagerte sich die Herstellung der Negauer Helme jedoch aus unbekanntem Gründen nach Etrurien.

Auch die weiblichen Mitglieder der Elite wussten ihren Rang nach außen zu zeigen: mit ornamental verzierten Gewandspangen, Brustschmuck mit plastisch figürlicher Ausschmückung und Scheiben mit durchbrochenen Mustern. Die picenische Frauentracht war wohl die kostbarste auf der ganzen Apenninischen Halbinsel. In der Siedlung von Numana kamen zwei Gräber aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. zu

Tage, in denen auch zwei Frauen beigesetzt worden waren. Die eine war mit gut 350, die andere mit mehr als 500 Fibeln bestattet worden. Derart geschmückt hätten sie zu Lebzeiten keinen Schritt tun können.

Die schiefe Existenz all dieser Produkte bezeugt seinerseits die Teilnahme des Picenums am Fernhandel. Denn dort gab es kaum Erze; die erforderlichen Metalle kamen letztlich wohl aus den Gebieten des heutigen Frankreichs und Sloweniens.

Ab der zweiten Hälfte des 5. Jahrhunderts v. Chr. erschütterten gesellschaftliche Konflikte das Picenum, vergleichbar den zeitgleichen Spannungen zwischen Patriziern und Plebejern in Rom. Obendrein drangen die italischen Völker der Umbrier und Samniten in das Gebiet ein, vor allem aber die aus Gallien stammenden und seit einiger Zeit in Norditalien ansässigen Senonen. Unter ihrem Häuptling Brennos eroberten diese 378 v. Chr. zwar auch Rom – bis auf die Festung auf dem Kapitol –, doch die Tiberstadt erholte sich rasch wieder und expandierte. Zu Beginn des 3. Jahrhunderts v. Chr. waren die italischen Völker freiwillig oder gezwungenermaßen Roms Bundesgenossen geworden. Manche behielten ein gewisses Maß an Selbstständigkeit; die kriegerischen Picener aber wurden 278 v. Chr. unterworfen und teilweise sogar zur Befriedung an den Golf von Paestum umgesiedelt.

Als sich der römische Senat weigerte, seinen italischen Partnern das römische Bürgerrecht zu verleihen, tobte von 91 bis 88 v. Chr. der Bundesgenossenkrieg, an dem sich die Picener beteiligten. Rom konnte den Aufstand nur dadurch für sich entscheiden, dass es letztlich der Forderung nachkam. Was ihm zum Vorteil gereichte, denn die Stämme integrierten sich und waren bald kaum noch von der römischen Bevölkerung zu unterscheiden. Der erste Kaiser Augustus erklärte das Picenum im Zuge einer Verwaltungsreform zur »quinta regio«, also zur fünften Siedlungsregion Italiens, beließ ihr aber den Namen, um an die vorrömische Vergangenheit zu erinnern. ~

### DER AUTOR



Der in Rom geborene **Alessandro Naso** lehrt Ur- und Frühgeschichte an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck. Die Kulturen der Italiker und der Etrusker bilden einen seiner Forschungsschwerpunkte.

### QUELLEN

**Franchi Dell'Orto, L. (Hg.):** Die Picener. Ein Volk Europas. Ausstellungskatalog. De Luca, Rom 1999

**Naso, A.:** I Piceni. Storia e archeologia delle Marche in epoca preromana. Biblioteca di Archeologia 29. Longanesi, Mailand 2000

**Torelli, M.:** Tota Italia. Essays in The Cultural Formation of Roman Italy. Clarendon Press, Oxford 1999

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221328](http://www.spektrum.de/artikel/1221328)

# Stolze Burgen für stolze Bürger

Für die Römer waren die Nachbarn im lukanischen Bergland nichts als unkultivierte Krieger. Archäologen und Bauforscher gewinnen jedoch eine etwas anderes Bild.

Von Agnes Henning

**W**affen, ein Brustpanzer und ein Helm aus Bronze – was Archäologen bereits vor mehreren Jahrzehnten in der süditalienischen Küstenstadt Paestum aus einem Männergrab des 4. Jahrhunderts v. Chr. bargen, bestätigte offenbar die Berichte römischer Autoren: Die Lukaner, italische Bewohner des Berglands zwischen der tyrrhenischen und der ionischen Küste (siehe Karte S. 55), seien ein ausgesprochen kriegerisches Volk gewesen. Seit dieser Entdeckung sind etliche Männergräber in der antiken Landschaft Lukanien zum Vorschein gekommen, die dieses Bild scheinbar stützen: Wer von Rang war, nahm offenbar Waffen mit ins Jenseits. Archäologen der Universität Heidelberg legen nun aber Facetten offen, die man dieser italischen Kultur bislang nicht zugetraut hat.

Es sind vor allem Texte der römischen Zeit, aus denen Historiker von den Lukanern erfuhren. Einer der heute prominentesten Autoren war der griechische Gelehrte Strabon (etwa 63 v. Chr. – 23 n. Chr.). Er berichtete beispielsweise von Überfällen auf griechische Küstenstädte, als seien die Lukaner kulturlose, brandschatzende Barbaren gewesen. Ein kriti-

sches Lesen solcher Darstellungen tut aber not. Denn Griechenland gehörte bereits seit dem Jahr 146 v. Chr. zum Imperium Romanum, und Strabons Familie unterstützte seit mehreren Generationen dessen Politik. In seinen Schriften vertrat er daher wenig überraschend die Überzeugung, die griechisch-römische Kultur sei die einzig wahre Lebensform und jede Eroberung gereiche den Unterworfenen zum Vorteil.

Laut Strabon stammten die Lukaner von den Samniten ab – eine aus seiner Sicht unschöne Zuschreibung. Denn im so genannten Bundesgenossenkrieg (91–88 v. Chr.), einem Aufstand italischer Völker gegen Rom, das ihnen das römische Bürgerrecht verweigerte, kam den in Mittelitalien ansässigen Samniten eine führende Rolle zu. Nach ihrer vernichtenden Niederlage 82 v. Chr. hat man sie daher zu Tausenden hingerichtet. Strabon wurde zwar erst ungefähr 20 Jahre nach Kriegsende geboren, die Erinnerung an die blutigen Auseinandersetzungen dürften in der römischen Aristokratie jedoch noch sehr lebendig gewesen sein.

Entsprach Strabons These der Realität? Einige klassische Archäologen sehen zwar Parallelen bei samnitischen und lukanischen Grabsitten, die für eine gemeinsame Abstammung sprächen. Doch können sich Ideen auf vielerlei Weisen verbreiten. Zudem scheint mir eine »Völkerwanderung« von Mittel- nach Süditalien fraglich: Die Immigranten hätten bereits ansässige Stämme vertreiben müssen und so eine Kette von Ereignissen ausgelöst, für die es meines Erachtens bislang keinerlei archäologischen Beweis gibt.

Allerdings scheinen nicht nur die Waffenbeigaben, sondern auch Vasenbilder des 4. Jahrhunderts v. Chr. die römischen Schilderungen zu bestätigen. Wandmalereien in den Kammergräbern von Paestum lassen beispielsweise heimkehrende Krieger samt ihren Gefangenen aufmarschieren (siehe Bild rechts).

In die gleiche Richtung weisen auf den ersten Blick die Wehrmauern, mit denen die Lukaner zu Beginn des 4. bis in die Mitte des 3. Jahrhunderts v. Chr. ihre Ortschaften umga-

## AUF EINEN BLICK

### KULTUR UND KRIEG

**1** Am italischen Volk der **Lukaner** lassen römische Autoren kein gutes Haar. Sie seien **aggressive Barbaren** gewesen, denen der Krieg alles galt.

**2** Die Funde von **Waffen** und **militärischer Ausrüstung** in lukanischen Gräbern, bildliche Darstellungen sowie die **Wehranlagen** der Höhensiedlungen scheinen diese Einschätzung zu bestätigen.

**3** Ein Forschungsprojekt der Universität Heidelberg zeichnet aber ein **differenzierteres Bild der lukanischen Gesellschaft**: Spätestens im 4. Jahrhundert v. Chr. pflegten sie eine **urbane Kultur**, Militärobjekte symbolisierten dabei den sozialen Rang.

Immer den Blick nach unten gerichtet, suchen Archäologen beim Survey die Oberfläche eines Fundplatzes auf dem Monte Croccia ab. Auf diese Weise lassen sich in kurzer Zeit relativ große Areale erkunden, um zuverlässige Aussagen über einen Ort und sein Umland zu erhalten.



LUKANEN-PROJEKT

Ein um 360 v. Chr. gemaltes Fresko aus einem lukanischen Grab in Paestum zeigt die Rückkehr eines Kriegers mit Gefangenen. Dergleichen galt bislang als Beleg für die Aggressivität der Lukaner.



AKG IMAGES

ben. Belegen sie nicht, dass es ausgesprochen kriegerische Zeiten waren?

Diese auf gut zu verteidigenden Anhöhen errichtete Siedlungen besser zu verstehen, ist das Ziel unseres Forschungsprojekts an der Universität Heidelberg. Im Fokus steht dabei exemplarisch der Gipfel des Monte Croccia. Mit über 1000 Metern ist er der höchste eines weiten und dicht bewaldeten Bergmassivs oberhalb des Flusses Basento. Wie die Siedlung einst ausgesehen hat, erkunden wir zum einen durch Surveys: Wir gehen das Areal systematisch ab, die Augen auf den Boden geheftet. Gefäßscherben, Dachziegel, Fragmente von Tonfiguren und andere Kleinfunde werden gesammelt, gezählt und statistisch ausgewertet. Stoßen wir auf Mauerreste, werden diese in eine Karte eingetragen. So lässt sich die Struktur eines Orts vergleichsweise schnell erschließen.

### Rasterfahndung im Wald

Architekten der Technischen Universität Berlin haben zudem die Befestigungsbauten in maßstabsgetreuen Zeichnungen erfasst und analysieren die Bautechnik. Geodäten der Beuth-Hochschule für Technik Berlin vermaßen alle noch sichtbaren Gebäudereste sowie das Geländerelevier, denn die örtlichen Gegebenheiten beeinflussten zwangsläufig die Gestaltung der Siedlungen. Zusätzlich spürten Geophysiker des Berliner Unternehmens Eastern Atlas mittels Radarwellen und Magnetografie die unter der Erdoberfläche verborgenen Baureste auf. Alle Informationen werden derzeit in die Datenbank ArchGate eingegeben, um in der Zusammenschau beispielsweise die verschiedenen Siedlungsphasen zu unterscheiden.

Die dichte Bewaldung erschwert die Arbeiten, doch mittlerweile können wir die Geschichte dieser und weiterer Ortschaften mit vergleichbaren Strukturen und Keramikfunden gut dokumentieren. So lassen sich die Anfänge der Ansiedlungen mindestens bis in das 8. Jahrhundert v. Chr. zurückverfolgen. Der Lehrmeinung nach entstanden die Höhensiedlungen aber nahezu 400 Jahre später, also in hellenistischer Zeit.

Allerdings hatte sich während dieser Zeit viel in Lukanien getan. Jahrhundertlang kannten Süditaliens Berge nur kleinräumige Verbände einzelner Weiler, in denen wohl jeweils Großfamilien mit ihren eigenen Wohn-, Vorrats- und Stallgebäuden sowie Bestattungsplätzen lebten. Jede verstand sich offenkundig als Einheit und suchte die räumliche Abgrenzung zu ihren Nachbarn. Eine dieser Familien stellte vermutlich die lokale Elite und lenkte die Geschicke des Verbunds. Ab dem 4. Jahrhundert v. Chr. jedoch folgten die lukanischen Gemeinschaften einem anderen Prinzip.

Sie umschlossen ihr Siedlungsgebiet fortan mit einer Wehrmauer, wie es im gesamten Mittelmeerraum damals Trend war. Mehrere Meter dicke Stadtmauern mit Türmen und Bastionen umgaben nun beispielsweise die griechischen Koloniestädte entlang der Küsten Süditaliens und Siziliens. Deren Erbauer zogen dabei sicherlich die Konsequenzen aus den immer effektiveren Belagerungstechniken. Zahl-

reiche Archäologen und Bauforscher insbesondere des deutschen Forschungsnetzwerks »Fokus Fortifikation« haben aber nachgewiesen, dass kriegerische Zustände nicht die einzige Erklärung dafür gewesen sein dürften.

Damit signalisierten Städte nämlich auch stolz ihre Macht über ein Territorium. Und dem wollten die lukanischen Gemeinschaften im Binnenland nicht nachstehen. Immerhin war der Bau einer solchen Anlage ein ehrgeiziges Projekt, das erhebliche finanzielle Mittel für Steinmaterial und Arbeitskräfte erforderte. Es musste eine lokale Führungsschicht gegeben haben, welche die Errichtung in Auftrag gab. Die Bauhistoriker bestätigen, dass den Wehrmauern eine sorgfältige Planung zu Grunde lag und sie nicht in einer Notsituation eilig hochgezogen wurden. Dem entspricht der archäologische Befund im Innern der umschlossenen Flächen: Man wohnte nun in großzügigen Häusern. Die lukanischen Siedlungen waren somit keine Fluchtburgen von Raubrittern, sondern spiegeln auch gesellschaftliche Facetten, die nicht die Kriegsführung zum Inhalt hatten.

Auf dem Monte Croccia wie auf dem ebenfalls durch die Universität Heidelberg untersuchten Monte Torretta und in der durch die Université Paris 1 untersuchten Siedlung Cività di Tricarico lässt sich innerhalb der Stadtumwehrung jeweils noch ein zweiter, kleinerer Mauerring ausmachen. Er umgab den höchsten Punkt des Hügels. Ausgrabungen haben gezeigt, dass dort besonders prächtige Wohnhäuser und Tempel standen; auch aufwändige Grablagen kamen zum Vorschein. In diesem abgeschotteten Bereich lebten vermutlich die Stammesführer mit ihren Familien. Dort opferten sie ihren Gottheiten und bestatteten Angehörige, vom Rest der Bevölkerung bewusst getrennt.



THE TRUSTEES OF THE BRITISH MUSEUM

Der »Reiter von Armentum« belegt den hohen Rang berittener Krieger in Lukanien Gesellschaft, nicht aber tatsächliche Kriege.



BEIDE FOTOS: LUKANIEN-PROJEKT

Abendstimmung mit den für Lukanien charakteristischen, dicht bewaldeten Hügelketten, vom Monte Crocchia aus aufgenommen. Kleines Foto: Von der Befestigung der Höhensiedlung auf dem Monte Crocchia sind nur wenige Reste so gut erhalten wie der hier gezeigte Abschnitt der inneren Wehrmauer.

Die in Gräbern gefundenen Waffen und Rüstungen dienen also wohl eher als Kennzeichen für die Zugehörigkeit zu dieser Elite. Kostbare Beifunde wie Geschirr für Trinkgelage, aber auch monumentale Vasen, die auf Grund ihrer Größe reine Schaustücke gewesen sein müssen, zeugen vom hohen Ansehen des Toten.

Inzwischen wissen Archäologen, dass diese Form der Bestattung schon im 7. Jahrhundert v. Chr. in der Region Brauch war. Und zweifelsohne stand ein Krieger damals in hohem Ansehen, wie eine kleine Reiterskulptur verdeutlicht, die Raubgräber vermutlich in einer Nekropole bei Armento gefunden haben – sie wurde 1833 von einem Sammler in Neapel erworben und gelangte später über den Kunsthandel 1904 in den Besitz des British Museum in London (siehe Bild links unten). Der bronzene Krieger hielt einst wohl Speer und Zügel in Händen, beide aus Kupferdraht gefertigt. Seine Körperformen ebenso wie die des Pferdes sind so markant wiedergegeben, dass sie an geometrische Ornamente erinnern. Dieser Stil verweist die Figur in die archaische Epoche des 7. und 6. Jahrhunderts v. Chr. Die außergewöhnliche Qualität und detailreiche Darstellung lassen keinen anderen Schluss zu, als dass berittene Krieger in der lukanischen Gesellschaft jener Phase einen hohen Rang bekleideten. Zur Zeit der Umgestaltung der Siedlungen, aus der auch die erwähnten Waffenfunde stammen, bildete der Krieg keinen zentralen Lebensinhalt der Eliten mehr.

Für diese These spricht insbesondere der archäologische Befund: Bis in das 3. Jahrhundert v. Chr. hinein verdichteten sich die Ortschaften weiter. Innerhalb der Mauern standen die Gebäude enger beisammen; die Daten offenbaren Straßensysteme, die ohne gute Planung nicht denkbar gewesen wären. Viele Menschen – auch außerhalb des inneren Bereichs – ließen ihre Häuser zu repräsentativen Anlagen mit von Säulen umstandenen Innenhöfen und Speisesälen nach griechischem Vorbild ausbauen. Für Landwirtschaft blieb in den Orten kein Platz mehr, etliche Gehöfte entstanden im weiteren Umkreis. Auch die Bestattungsplätze wurden vielerorts außerhalb der Stadtmauern angelegt. Den Verstorbenen gab man nicht nur Waffen, sondern zudem schön bemalte Keramikgefäße und kostbaren Schmuck mit auf die letzte Reise. Die Lukaner pflegten also inzwischen bereits einen Lebensstil, der sich an der hellenistischen Kultur orientierte.

Sicher gab es auch damals bewaffnete Konflikte. So haben die drei Punischen Kriege zwischen Rom und Karthago das italische Bergland sicher nicht unberührt gelassen. Vor allem der 2. Punische Krieg (218–201 v. Chr.) dürfte für Unruhen gesorgt haben, denn Hannibal umwarb die ansässigen Stämme. Manche schlossen sich ihm an, wohl in der Hoffnung, Roms Dominanz zu brechen. Mit schweren Folgen: Nach Karthagos Niederlage in der Schlacht von Zama in Nordafrika 202 v. Chr. gehörte ganz Süditalien zum Imperium.

Auch die Lukaner verloren nun ihre Unabhängigkeit. Doch wie verlief ihre Integration in das Römische Reich? Hatte sie sich Hannibal angeschlossen, oder handelte es sich mehr um eine Art freundliche Übernahme, welche durch die beschriebene kulturelle Entwicklung längst vorbereitet war? Immerhin bewahrten die Lukaner offenbar genug Eigenständigkeit, um ein Jahrhundert später im Bundesgenossenkrieg auf Seiten der Samniten für ihr Recht zu streiten. Doch rechte fertigte das den schlechten Ruf, den Strabons Berichte wiedergeben? Um diese Fragen zu beantworten, helfen die tendenziösen antiken Überlieferungen nur bedingt. Doch viele Orte Lukiens sind bis heute unerforscht. Eine große Chance für Archäologen und Historiker. ~

#### DIE AUTORIN



Die Archäologin **Agnes Henning** ist Mitarbeiterin am Institut für Klassische Archäologie der Universität Heidelberg. Sie leitet das seit dem Jahr 2010 von der Fritz Thyssen Stiftung geförderte Lukanien-Projekt auf dem Monte Crocchia.

#### QUELLEN

- Bourdin, S.:** Les peuples de l'Italie préromaine: identités, territoires et relations inter-ethniques en Italie centrale et septentrionale (VIIIe–Ier s. av. J.-C.). École française de Rome, 2013
- Henning, A.:** Lucania in the 4th and 3rd Century BC. Articulation of a New Self-Awareness instead of a Migration Theory. In: Bollettino di Archeologia online, Volume speciale: [http://151.12.58.75/archeologia/bao\\_document/articoli/2\\_HENNING.pdf](http://151.12.58.75/archeologia/bao_document/articoli/2_HENNING.pdf)
- Isayev, E.:** Inside Ancient Lucania. Remous Limited, Dorset 2007

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221330](http://www.spektrum.de/artikel/1221330)

GEOMETRIE

# Do-it-yourself-Ornamente

Ein Programm zaubert nach Anweisung des Benutzers Muster mit vorgegebener Symmetrie auf den Bildschirm.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Die wenigen Handwerksbetriebe, die noch Textilien im traditionellen Blaudruck verzieren, hüten als besondere Schätze ihre so genannten Model. Das sind Holzklötze mit einem Griff und einer rechteckigen Fläche, aus der ein spezialisierter Handwerker, der Formschneider, das zu druckende Muster herausgeschnitzt hat. Der Färber bestreicht den Model mit einer klebrigen, farbabweisenden Masse, dem Papp, und bestempelt damit den zu färbenden Stoff, sorgfältig ein Rechteck neben das andere setzend, so dass das Tuch am Ende mit lauter Exemplaren des Musters in regelmäßiger Anordnung zugespappt ist. Nachdem der Papp getrocknet ist, taucht der Färber das Tuch in den Farbbottich, lässt die Farbe trocknen und wäscht den Papp mit Säure aus. Nur die nicht von der schützenden Masse bedeckten Stellen sind eingefärbt worden.

Die Herstellungstechnik gibt den Mustern eine Eigenschaft mit, die der Mathematiker »Translationsinvarianz« nennt: Verschiebt man das ganze Muster um eine Modelllänge, so geht es wieder in sich selbst über. Und wenn der Stoff breit genug ist, um mehreren Modelreihen nebeneinander Platz zu bieten, dann ist das Muster sogar doppelt translationsinvariant. Dabei darf man die zweite Reihe statt genau in Reihe und Glied auch ein Stück versetzt neben die erste stempeln. Man beschreibt das durch zwei Verschiebungsvektoren, die in verschiedene Richtungen weisen und nicht unbedingt senkrecht aufeinander stehen (Bild rechts oben).

Andersherum ausgedrückt: Verschiebung um einen der beiden Vektoren ist eine Symmetrieoperation, das heißt eine Bewegung, die das ganze Muster invariant (unverändert) lässt.

Da man solche Operationen beliebig wiederholen kann, ist auch eine Verschiebung um das Doppelte eines Vektors, sein Negatives, die Summe und allgemein jede beliebige Kombination beider Vektoren eine Symmetrieoperation. Und schon sind wir bei einer Struktur, die einer ganzen Theorie ihren Namen gegeben hat: Die Menge aller Symmetrieoperationen eines Ornaments bildet eine so genannte Gruppe.

Statt von einem Model spricht man in der Gruppentheorie von einem »Fundamentalebene«. Das ist eine Teilmenge der Ebene, deren Ebenbilder unter allen Operationen der Symmetriegruppe die ganze Ebene lückenlos und überlappungsfrei bedecken. Wer also das Muster kennt, das einen Fundamentalebene bedeckt, kennt das ganze Ornament (das man sich als unendlich ausgedehnt vorzustellen pflegt). Übrigens gibt es zu einem Muster nicht »den« Fundamentalebene. Ganz verschieden geformte Mengen können diese Rolle übernehmen; man kann auch einen rechteckigen Model durch einen parallelogrammförmigen ersetzen.

## 17 Ornamentsorten

Zwei Translationen in verschiedene Richtungen sind nur die Mindestanforderung an ein Ornament. Viele regelmäßige Muster verfügen noch über weit mehr Symmetrien. So ist das bekannte Bienenwabenmuster auch invariant gegenüber Drehungen: mit 60 Grad um jeden Sechseckmittelpunkt und mit 120 Grad um jede Ecke. Und da ganz allgemein zwei Symmetrieoperationen, hintereinander ausgeführt, wieder eine Symmetrieoperation ergeben, gehören auch Drehungen mit Vielfachen von 60 beziehungsweise 120 Grad zum Sortiment.



JÜRGEN RICHTER/GETTY

Ein Ornament geht in sich selbst über, wenn man es mit einem der beiden rot eingezeichneten Translationsvektoren verschiebt. Das gilt auch, wenn man jede der beiden Verschiebungsoperationen mehrfach und/oder mit umgekehrtem Vorzeichen anwendet (blau).

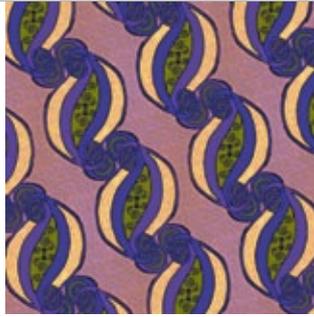
Andere Ornamente beziehen ihren Reiz daraus, dass man sie um gewisse Achsen spiegeln kann. Das sind dann wegen der Translationsinvarianz gleich unendlich viele Spiegelachsen. Weniger bekannt ist die Gleitspiegelung. Man spiegelt das Objekt an einer Achse und verschiebt es anschließend ein Stück entlang derselben Achse.

Solche zusätzlichen Symmetrien müssen sich untereinander und vor allem mit den beiden Translationssymmetrien vertragen. Das schränkt die Zahl der möglichen Kombinationen erheblich ein. So können in einem Ornament keine anderen Drehungen vorkommen als um Vielfache von 60 oder 90 Grad. Insbesondere ist eine fünfzählige Drehsymmetrie mit zwei Translationssymmetrien unvereinbar. Zwei Spiegelungen um nichtparallele Achsen ergeben zusammen eine Drehung um deren Schnittpunkt mit dem Doppelten des Winkels zwischen ihnen. Da dieser Drehwinkel nur bestimmte Werte annehmen darf, unterliegen die Winkel zwischen zwei Spiegelachsen entsprechenden Einschränkungen.

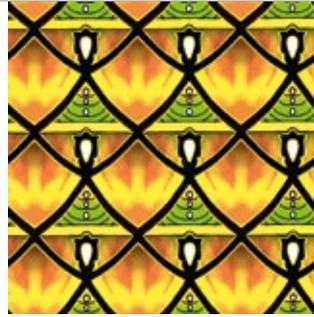
All diesen Einschränkungen zum Trotz gibt es immerhin 17 verschiedene Ornamentarten (Bilder rechts). In der Fachsprache nennt man sie »ebene kristallografische Gruppen«, im Englischen etwas volkstümlicher »wallpaper groups« (»Tapetengruppen«). Eigentlich ist die Theorie nämlich die Domä-



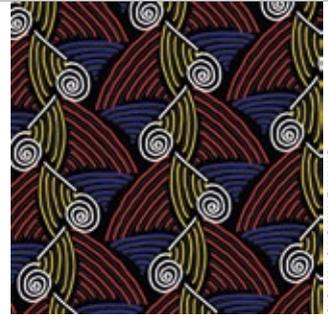
p1: keine weitere Symmetrie



p2: zweizählige Drehung



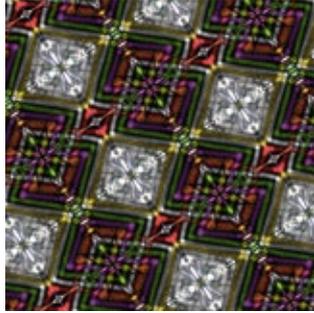
pm: zwei Spiegelachsen ||



pg: zwei Gleitspiegelachsen ||



cm: Spiegel- und Gleitspiegelachse ||



pmm: zwei Spiegelachsen ⊥



pmg: Spiegel- und Gleitspiegelachse ⊥



pgg: zwei Gleitspiegelachsen ⊥



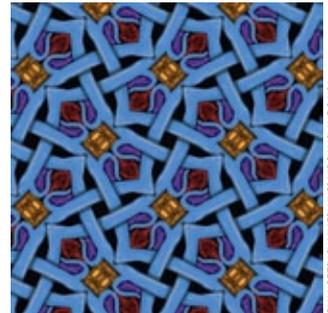
cmm: je zwei Spiegel- und Gleitspiegelachsen ⊥



p4: vierzählige Drehung



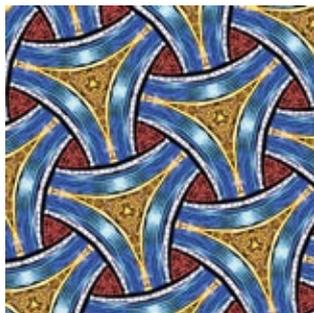
p4m: vierzählige Drehung und Spiegelung



p4g: vierzählige Drehung und Gleitspiegelung



p3: dreizählige Drehung



p31m: drei dreizählige Drehungen, Spiegelung und Gleitspiegelung



p3m1: zwei dreizählige Drehungen, Spiegelung und Gleitspiegelung



p6: sechszählige Drehung



p6m: sechszählige Drehung und Spiegelung

Die 17 kristallografischen Gruppen, illustriert an Beispielen, die mit dem Programm iOrnament gezeichnet sind. Die Namen der Gruppen folgen der Konvention der International Union of Crystallography. Sie enthalten die Kennung »p« für »primitive« oder »c« für »centered«, eine Zahl für die höchste vorkommende Drehsymmetrie sowie »m« für eine Spiegelung (»mirror symmetry«) und »g« für eine Gleitspiegelung (»glide reflection«). Angegeben sind zu jeder Gruppe nicht immer alle, sondern nur die charakteristischen Symmetrien (über die Translationen hinaus). »Zwei Spiegelachsen« ist verkürzt für »zwei Klassen von (unendlich vielen) Spiegelachsen«, Entsprechendes gilt für die Gleitspiegelachsen. || bedeutet »parallel«, ⊥ »senkrecht aufeinander«.

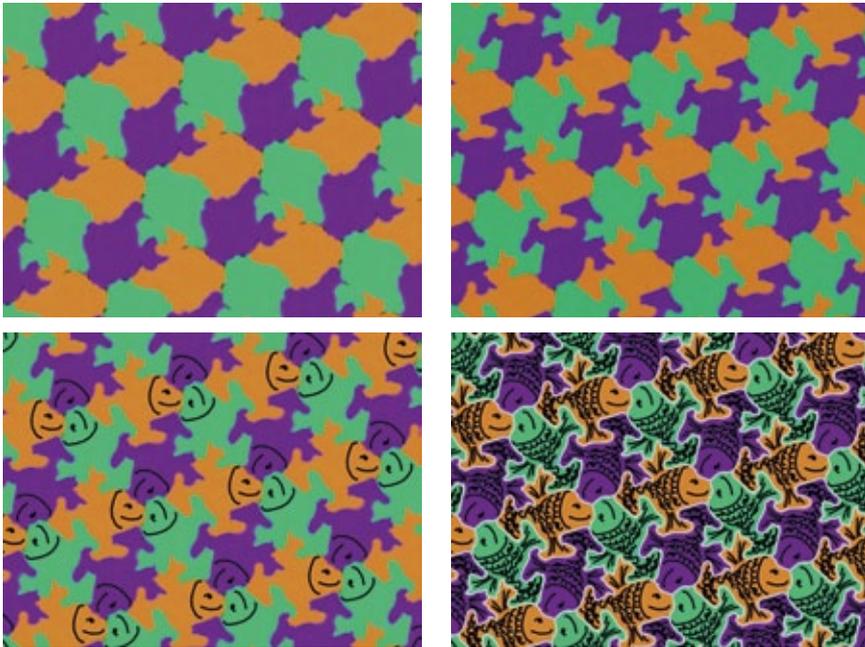
P1M: MARK DECKARD, USA

P1: CHANYA CHUJANUN, THAILAND;  
P2: PA-AGNES KUNNEKE, DEUTSCHLAND;  
P3: MARGITTA SCHLUTER, DEUTSCHLAND

CM: ANTONIO LIRIO SPANEN; PMA: JESSIE SHERWIN PETERS, USA;  
PMG: AGNES KUNNEKE, DEUTSCHLAND;  
PGG: BETSY SUMMERHAYES, VIRGIN ISLANDS, USA

CMM: BETSY SUMMERHAYES, VIRGIN ISLANDS, USA;  
P4: PAG-JÜRGEN RICHTER-GERBERT, DEUTSCHLAND;  
P4M: RUSTEMBATUM, USA

P3: KRISTIN DANIELS, USA; P31M: CORNELIA PAGEL, DEUTSCHLAND;  
P3M1: CHRISTO FLORES, USA; P6: CLARE BOONE-MASULLONIS, USA



Durch Herumprobieren bessert der Benutzer eine Form, die der dreizähligen Drehsymmetrie angepasst ist, so lange nach, bis sie als (leicht missgebildeter) Fisch erkennbar ist. In diesem Muster ist jede Drehung mit einem Farbwechsel gekoppelt, mit dem Effekt, dass drei verschiedene Sorten Fische in ihrer jeweils eigenen Richtung das Bild durchschwimmen.



Rosette mit elfzähliger Drehsymmetrie und ebenso vielen Spiegelachsen

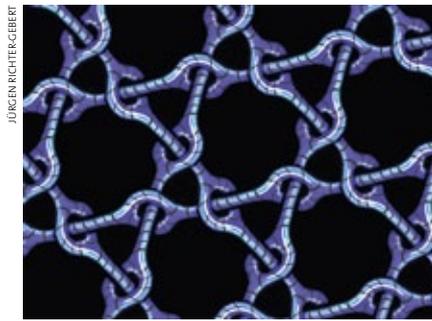
ne der Kristallografen. In einem Kristall gibt es Translationsinvarianz, sogar in drei statt nur zwei verschiedenen Raumrichtungen, weil sich gewisse Anordnungen von Atomen in regelmäßigen Abständen wiederholen. Was der Kristall darüber hinaus noch an Symmetrien aufzuweisen hat, das beschreibt seine kristallografische Gruppe, und deren gibt es im Raum nicht nur 17, sondern 230 Stück.

In der Theorie gelten zwei Gruppen schon dann als im Wesentlichen gleich (»isomorph«), wenn sie dieselbe Struktur aufweisen. Die einfachste ebene kristallografische Gruppe namens  $p1$  enthält außer den beiden Translationen gar keine Symmetrien. Für ihre Struktur kommt es nicht darauf an, wie die beiden Translationsvektoren in der Ebene liegen und wie lang sie sind. Kommt allerdings eine Drehung um 90 Grad hinzu, müssen sie gleich lang sein und aufeinander senkrecht stehen.

Je nach Symmetriegruppe muss man die Ebene nicht mit ausschließlich parallelverschobenen Kopien eines parallelogrammförmigen Fundamentalbereichs bepflastern; diese kommen vielmehr auch in gedrehter oder gespiegelter Form vor, und der Fundamentalbereich kann dreieckig sein. Wie aber die Kopiervorlage ihrerseits mit Farbe gefüllt wird, darüber sagt die kristallografische Gruppe nichts aus. Vielleicht enthält der Fundamentalbereich nur ein paar gerade Striche, die erst in der Zusammensetzung die Grenzen gewisser Vielecke ergeben. Damit beschreibt die Theorie auch alle Pflasterungen der Ebene mit unendlich vielen Kopien gewisser »Ursteine« aus einem kleinen Sortiment (Spektrum der Wissenschaft 2/2013, S. 64, 4/2008, S. 65, und 7/2007, S. 98) – periodische Pflasterungen, wohlgemerkt, die nichtperiodischen sind ein Thema für sich (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 64).

Eine Linie, die genau senkrecht auf eine Spiegelachse auftrifft, findet in ihrem Spiegelbild eine ungeknickte Fortsetzung. Geschickt von Rand zu Rand eines Fundamentalbereichs gezogene Linien werden unter der Aktion der Symmetriegruppe unendlich lang; aus

einem geraden Strich wird ein Fenster, aus einem unscheinbaren Zacken ein Sechserstern, aus einer einfachen gekrümmten Linie eine Blüte. Wer einen Fundamentalbereich bemalt – oder, was fast auf dasselbe hinausläuft, ein Muster in einen Model schnitzt –, dem fällt es nicht leicht, sich vorzustellen, wie sein Werk zum fertigen Ornament vervielfältigt aussieht.



In diesem Ornament (Symmetriegruppe  $p3$  ohne Spiegelungen) hat Jürgen Richter-Gebert an Stelle einer Überkreuzung eine Kombination aus Stange und ringförmigem Loch gewählt. Zur Entstehung dieses Musters: <http://youtu.be/Q4QykoETgAo>

## Ornamentprogramm für jedermann

Hier schafft ein Computerprogramm Abhilfe. Jürgen Richter-Gebert, Professor für Mathematik an der Technischen Universität München in Garching, hat eine App namens iOrnament geschrieben, die jede Eingabe des Benutzers als bald nach den jeweils gültigen Ornamentregeln vervielfältigt. Unversehens und für den Anwender zunächst überraschend wird aus dem krummen Strich die Blüte, und jeder Farbfleck taucht kaleidoskopartig in vielen Exemplaren auf dem Bildschirm auf.

Das hilft auch beim Entwerfen regelmäßiger Flächenfüllungen. Man erweitert allmählich einen Fleck zu einer Gestalt eigener Wahl und bekommt auto-

matisch angezeigt, wie diese zu ihren Ebenbildern passt (Bild S. 70 oben).

Schon bald nach der Veröffentlichung des Programms haben Benutzer aus aller Welt es nicht nur abgerufen, sondern auch ihre Werke massenhaft an eine vom Autor eingerichtete virtuelle Weltausstellung gesandt. Oftmals scheinen kulturelle Einflüsse bei der Gestaltung der Ornamente durch. Mexikaner malen tendenziell Konturli-

nien, Japaner einfarbig konturiert (oft rot), Koreaner und Thailänder in weichen Farben.

Einige unter den verfügbaren Symmetriegruppen gehören gar nicht zu den kristallografischen: »Rosettengruppen« bestehen nur aus endlich vielen Drehungen um einen Zentralpunkt und möglicherweise dazu passenden Spiegelungen. Die klassischen Realisierungen sind die bekannten großen kreisförmigen Kirchenfenster (Bild S. 70 unten).

Manche Ornamente beziehen ihren Reiz daraus, dass ihnen gewisse Symmetrien, nämlich die Spiegelungen, fehlen. Man zeichne zwei sich kreuzende Striche, von denen einer im Kreuzungspunkt unterbrochen ist und daher als unter dem anderen liegend wahrgenommen wird. Wenn man es geschickt anstellt, macht eine Symmetriegruppe ohne Spiegelungen daraus ein richtiges Flechtwerk aus langen Fäden, deren jeder die anderen streng abwechselnd von oben und von unten kreuzt. Varianten können dem Muster sogar eine räumliche Anmutung verschaffen (Bild oben).  $\infty$

## Einladung zum Wettbewerb

**Produzieren Sie Ihre eigenen Ornamente und reichen Sie sie zum Wettbewerb ein!**



Die App iOrnament wird von Dienstag, 18. Februar, bis Sonntag, 23. Februar, zum kostenlosen Download freigeschaltet (und ist im Übrigen für 0,89 Euro im App-Store verfügbar, Direktlink siehe QR-Code oben rechts). Im Zeitraum 18. Februar bis 31. März können Sie Ihre Ornamente nicht nur an die virtuelle Weltausstellung schicken, sondern zugleich auch zum Wettbewerb einreichen. Ihr Werk erscheint auf der Website [www.spektrum.de/ornament](http://www.spektrum.de/ornament), wo auch die Teilnahmebedingungen und weitere Hinweise zu finden sind.

1. Preis: **Leonardo-Brücke**. Aus diesem Bausatz konstruieren Sie ohne Verbindungselemente (Nägel, Schrauben, Leim ...) eine Brücke mit 2,40 Meter Spannweite.
  2. bis 5. Preis: ein Jahresabonnement des digitalen Wochenmagazins »Spektrum – die Woche«
  6. bis 10. Preis: ein Jahresabonnement »Spektrum der Wissenschaft Spezial PMT« (Physik, Mathematik, Technik)
  11. bis 15. Preis: ein Set **Espressotassen** und Untertassen mit mathematischen Motiven
  16. bis 30. Preis: ein »Spektrum«-Sonderheft »Lustvolle Geometrie«
- Die Gewinner werden im Juniheft bekannt gegeben.



## DER AUTOR



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

## QUELLE

**Grünbaum, B., Shephard, G. C.:** Tilings and Patterns. Freeman, New York 1986

## WEBLINKS

[www.science-to-touch.com/en/iOrnament.html](http://www.science-to-touch.com/en/iOrnament.html)

Die Website zur App iOrnament

[www.science-to-touch.com/owe](http://www.science-to-touch.com/owe)  
»Weltausstellung« handverlesener Ornamente, die Benutzer aus aller Welt eingesandt haben

Dieser Artikel im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1221331](http://www.spektrum.de/artikel/1221331)

# Von salzartigen Metallen zu maßgeschneiderten Nanoteilchen

Kombiniert man Metalle, die gern Elektronen abgeben, mit solchen, die sie bereitwillig aufnehmen, entstehen ungewöhnliche Legierungen, die Charakteristika von Salzen und Metallen in sich vereinen. Die negativ geladenen Ionen darin bilden komplexe Aggregate, die sich vielfach abwandeln lassen – unter anderem zu Nanoteilchen mit exakt definiertem Aufbau und fein abstimmbaren Eigenschaften.

Von Stefanie Dehnen und Thomas F. Fässler

**M**etalle und Salze unterscheiden sich schon äußerlich stark. Die einen sind völlig undurchsichtig, glänzen und lassen sich verformen, während die anderen als Kristalle mehr oder weniger transparent erscheinen und zersplittern, wenn man mit dem Hammer darauf schlägt. Metalle leiten elektrischen Strom, wogegen Salze im festen Zustand Isolatoren sind. Auch chemisch bestehen große Unterschiede. Salze sind Verbindungen – in der Regel zwischen einem Metall und einem oder mehreren Nichtmetallen –, deren Komponenten in einem festen Mengenverhältnis zueinander stehen. Metalle liegen dagegen elementar vor oder sind, wenn es sich um Legierungen handelt, homogene Gemische mit meist hochgradig variablem Anteil der Bestandteile.

Die meisten Salze lösen sich in polaren Flüssigkeiten wie Wasser. Ein bekanntes Beispiel ist Natriumchlorid, gemeinhin als Kochsalz bekannt. Das Natrium hat darin ein Elektron pro Atom an das Chlor abgegeben. In der wässrigen Lösung sowie im Salzkristall liegen deshalb positiv geladene Natrium- und negative Chloridionen vor. Diese bilden im festen Zustand ein Ionengitter, während sie in der Lösung als frei bewegliche Kationen und Anionen auftreten und deshalb elektrischen Strom transportieren können.

Metalle enthalten dagegen keine unterschiedlich geladenen Atome. Vielmehr sind die Bindungselektronen gleichmäßig über den gesamten Festkörper verteilt. Auch in gängigen Legierungen wie Bronze oder Messing gibt es nur geringe Ladungsdifferenzen zwischen den Atomen – in diesem Fall Kupfer und Zinn beziehungsweise Zink. Deshalb lassen sich Metalle in üblichen Lösungsmitteln nicht lösen.

Diese scheinbar so klare Abgrenzung der beiden Stoffklassen wurde jedoch schon Ende des 19. Jahrhunderts erschüttert, als Fortschritte in der Kühltechnik erstmals die Möglichkeit eröffneten, Ammoniak zu verflüssigen, und Chemiker feststellten, dass sich bestimmte Metalle darin auflösen. Natrium bildet dabei tiefblaue Lösungen. Im Jahr 1891 fügte Alexandre Joannis (1857–1931) Blei als zweites Metall hinzu und stellte fest, dass es sich ebenfalls auflöst, wobei die Farbe von Blau nach Grün umschlägt. An solchen Lösungen führte Charles A. Kraus (1875–1967) zu Anfang des 20. Jahrhunderts elektrochemische Untersuchungen durch und stellte verblüfft fest, dass sie sowohl positiv als auch negativ geladene Metallionen enthielten. Bei letzteren müsse es sich, so die Schlussfolgerung des Forschers, um Bleiatome handeln, die Elektronen vom Natrium aufgenommen haben.

Waren schon negativ geladene Metallionen höchst ungewöhnlich, so stellte sich die noch interessantere Frage nach der Natur des Feststoffs, der nach dem Abdampfen des Lösungsmittels zurückblieb. Handelte es sich um eine gewöhnliche Legierung aus Natrium und Blei oder um ein aus Ionen

## AUF EINEN BLICK

### ZAUBERHAFT ZINTL-PHASEN

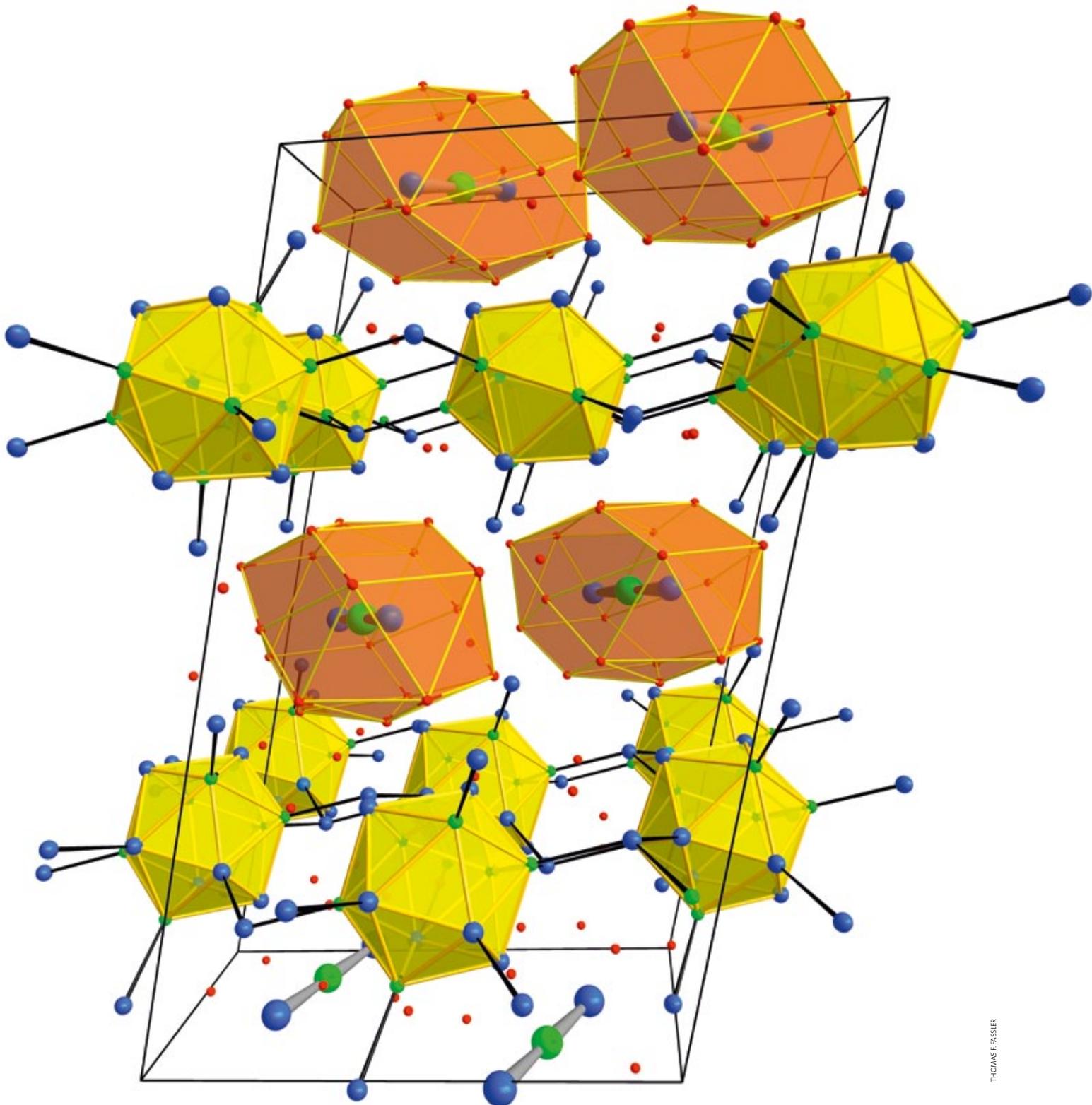
**1** In gängigen **Legierungen** wie Bronze, deren Bestandteile im Periodensystem der Elemente dicht benachbart sind, liegen dieselben Bindungsverhältnisse vor wie in reinen Metallen: Die äußeren **Elektronen** bilden einen »See«, der sich gleichmäßig über alle Atome erstreckt.

**2** Anders verhält es sich, wenn man Metalle vom linken Rand des Periodensystems mit solchen von der rechten Seite verschmilzt. Nun verteilen sich die Elektronen ungleichmäßig, und es entstehen entgegengesetzt geladene **Ionen** wie in Salzen. Solche Systeme heißen nach ihrem Entdecker **Zintl-Phasen**.

**3** Häufig bestehen die Anionen aus **mehratomigen Verbänden**, so genannten Clustern. Diese lassen sich schrittweise zu noch größeren Einheiten sowie zu **Strängen**, **Schichten** oder **dreidimensionalen Netzwerken** verknüpfen oder auf andere Arten abwandeln.

**4** Auf diese Weise gelingt es, **Nanoteilchen einheitlicher Größe** mit genau einstellbaren Eigenschaften herzustellen, die nützliche Anwendungen in der Fotovoltaik, bei der Katalyse oder als Quantenpunkte versprechen.

Die Verbindung  $\text{Na}_{20}\text{Zn}_8\text{Sn}_{11}$  ist das vielleicht komplexeste Beispiel für eine so genannte Zintl-Phase. Sie enthält, wie diese Darstellung ihrer Elementarzelle zeigt, die linearen Metallanionen  $[\text{Sn}-\text{Zn}-\text{Sn}]^{6-}$  sowie die ikosaedrischen Cluster  $[\text{Zn}_5\text{Sn}_5]^{6-}$  (gelb). Dazwischen befinden sich als neutralisierender »Kitt« positiv geladene Natriumionen, die in regelmäßigen Polyedern (orangefarben) um die anionischen Struktureinheiten herum angeordnet sind. Die grünen Kugeln bezeichnen Zink-, die blauen Zinn- und die roten Natriumatome.



aufgebautes Salz? Erst in den 1930er Jahren fand Eduard Zintl (1898–1941) die Antwort, als er am Anorganisch-Chemischen Institut in Freiburg und an der Technischen Hochschule in Darmstadt grundlegende Untersuchungen dazu anstellte. Dabei identifizierte er in der Ammoniaklösung mit chemisch-analytischen und physikochemischen Verfahren indirekt das »Metallpolyanion«  $(\text{Pb}_9)^{4-}$ , also ein vierfach negativ geladenes Molekül aus neun Bleiatomen. Im Rückstand nach Verdampfen des Ammoniaks ließ sich ein Feststoff mit einem 4 : 9-Verhältnis von Natrium zu Blei nachweisen. Die Strukturanalyse dieser Pionierverbindung » $\text{Na}_4\text{Pb}_9$ « steht zwar bis heute aus, aber durch Röntgenbeugungsexperimente an verwandten Substanzen wurde später die Existenz des ungewöhnlichen Polyanions bewiesen und seine Struktur aufgeklärt.

Weitere Untersuchungen brachten Zintl seinerzeit zu dem Schluss, dass selbst dann Elektronen vom Natrium auf das Blei übergehen, wenn man die beiden Metalle einfach zusammen schmilzt. Sie müssen also nicht zunächst eine Stufe durchlaufen haben, in der die Ionen – wie in einer Lösung – explizit getrennt sind.

In den Folgejahren konnte der Forscher zahlreiche weitere Verbindungen mit Metall-Polyanionen herstellen und identifizieren. Das Muster war immer das gleiche: Man vereint

einen Vertreter der Alkali- oder Erdalkalimetallgruppe – Elemente der 1. oder 2. Gruppe des Periodensystems, die leicht Elektronen abgeben – mit einem (Halb-)Metall der 13., 14. oder 15. Gruppe, das auf Grund seiner höheren »Elektro-negativität« die Elektronen des Partners bereitwillig über-nimmt. Zintl prägte für solche Legierungen mit definierter Stöchiometrie und ungleicher Ladungsverteilung den Begriff »salzartige« Metallverbindungen. Zu Ehren des jung verstorbenen Forschers benannte man sie posthum in »Zintl-Phasen« um und bezeichnete die enthaltenen Anionen als »Zintl-Ionen«. Der Ausdruck Phase steht hier für eine Zu-standsform mit bestimmter Zusammensetzung und Struk-tur, die sich durch besondere Stabilität innerhalb eines ge-wissen Druck- und Temperaturbereichs auszeichnet.

Leider gelang es Zintl nie, die dreidimensionale Gestalt der ungewöhnlichen Anionen aufzuklären, weil sich die Ver-bindungen beim Abdampfen des Lösungsmittels entweder zersetzten oder als amorphes Pulver anfielen, dessen Struk-tur sich anders als bei kristallinen Stoffen nicht mittels Rönt-ge- oder Neutronenbeugung ermitteln ließ. Erst in den 1970er Jahren konnten Forscher fast zeitgleich zunächst in Deutschland und dann in den USA die genaue räumliche Anordnung der Atome in den aus Lösungen erhaltenen Poly-

## Salze, Metallegierungen und Zintl-Phasen im Vergleich

<b>Metall + Nichtmetall</b>	→	<b>Salz</b>	
$2 \text{Na}_{(\text{Metall})} + \text{Cl}_{2(\text{Gas})}$	→	$2 \text{Na}^+ \text{Cl}^-_{(\text{Salz})}$	(Kochsalz)
$\text{NaCl}_{(\text{festes Salz})} + \text{Wasser}$	→	$\text{Na}^+_{(\text{gelöst})} + \text{Cl}^-_{(\text{gelöst})}$	(Kochsalzlösung)
<b>Metall + Metall</b>	→	<b>Metallegierung</b>	
$3 \text{Cu}_{(\text{Metall})} + 5 \text{Sn}_{(\text{Metall})}$	→	$\text{Cu}_3\text{Sn}_5_{(\text{Metall})}$	(Bronze)
<b>Metall + Metall</b>	→	<b>Zintl-Phase</b>	
$4 \text{Na}_{(\text{Metall})} + 9 \text{Sn}_{(\text{Metall})}$	→	$\text{Na}_4\text{Sn}_9_{(\text{salzartige Verbindung})}$	(Zintl-Phase)
$\text{Na}_4\text{Sn}_9_{(\text{Zintl-Phase})} + \text{Ammoniak}_{(\text{flüssig})}$	→	$4 \text{Na}^+_{(\text{gelöst})} + (\text{Sn}_9)^{4-}_{(\text{gelöst})}$	(Lösung der Zintl-Phase)

**Leitet man Chlorgas ( $\text{Cl}_2$ ) über geschmolzenes Natrium ( $\text{Na}$ ),** bildet sich unter starkem Leuchten farbloses Kochsalz ( $\text{NaCl}$ ). Bei dieser heftigen Reaktion geben die im Metall ungeladenen Natriumatome jeweils ein Elektron an die ebenfalls ungeladenen Chloratome ab. Dadurch entstehen Natriumkationen und Chloranionen, die sich zu einem Ionengitter zusammenlagern. Bei dessen Bildung wird wegen der starken elektrostatischen Anziehungskräfte zwischen entgegengesetzt geladenen Ionen sehr viel Energie in Form von Wärme frei.

Der Kristallverband aus Ionen lässt sich mit polaren Lösungsmitteln wie Wasser wieder aufbrechen. Die Ionen sind dann von Lösungsmittelmolekülen umgeben und können sich in der Lösung frei bewegen.

Schmilzt man dagegen zwei oder mehr Metalle zusammen, bilden sich in der Regel nach dem Abkühlen metallische Legierungen. Ein bekanntes Beispiel ist die Bronze aus Kupfer und

Zinn. In einer solchen Legierung teilen sich alle Atome gleich-mäßig die äußersten Elektronen.

**Anders verhält es sich,** wenn man Zinn mit Natrium zusammen schmilzt. Als unedles Metall hat Natrium die starke Tendenz, ein Elektron abzugeben, das dann von den wesentlich edleren Zinn-atomen aufgenommen wird. Die resultierende Verbindung ent-hält demnach positiv geladene Natrium- sowie negative Zinn-ionen. In gewisser Weise ist sie also ein Salz, obwohl sie nur aus Metallen besteht.

Allerdings übernimmt nicht unbedingt jedes Zinnatom ein Elektron. Vielmehr bilden sich, wie Eduard Zintl schon vor rund 80 Jahren herausfand, polyedrische Anionen wie  $(\text{Sn}_9)^{4-}$ . Nach ihm heißen solche Verbindungen Zintl-Phasen. Sie sind gegen-über Wasser instabil, lösen sich aber in vielen Fällen in flüssigem Ammoniak. Dabei dissoziieren sie in Kationen und Polyanionen.

anionen aufklären. Als hilfreich bei der Strukturbestimmung erweisen sich organische Zusatzstoffe, welche die kleinen Kationen umhüllen und sie so künstlich vergrößern. Das erleichtert die Bildung einer stabilen Ionenpackung und ermöglicht dadurch die Kristallisation. Zudem können die abgeschirmten Kationen die zuvor abgegebenen Elektronen nicht mehr so einfach wieder an sich reißen und auf diese Weise in den Ausgangszustand ungeladener Metalle zurückkehren.

### Bindungsverhältnisse in Zintl-Ionen

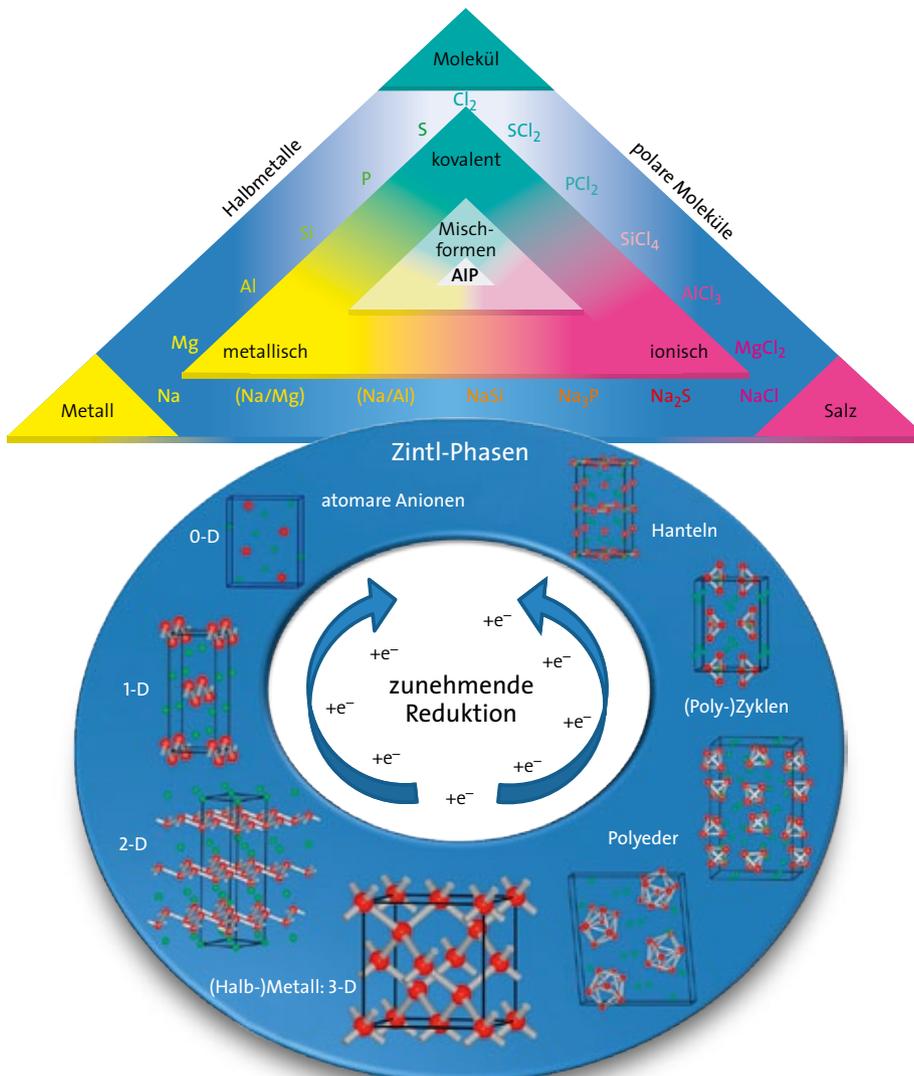
Trotz ihres ionischen Aufbaus unterscheiden sich Zintl-Phasen allerdings sowohl in Lösung als auch in festem Zustand deutlich von gewöhnlichen Salzen, wie man sie von der Schule oder aus dem Haushalt kennt. Ihrem Aussehen und Verhalten nach handelt es sich um legierungsartige Feststoffe, die Halbleitern wie Silizium ähneln. Sie haben eine tiefdunkle Farbe, glänzen mitunter metallisch und leiten bei erhöhter Temperatur elektrischen Strom, wenn auch nicht sonderlich gut.

Anders als übliche Salze sind sie in hohem Maß luft- und feuchtigkeitsempfindlich, weshalb sie in der Natur nicht vorkommen und sich schlecht handhaben lassen. So kann man

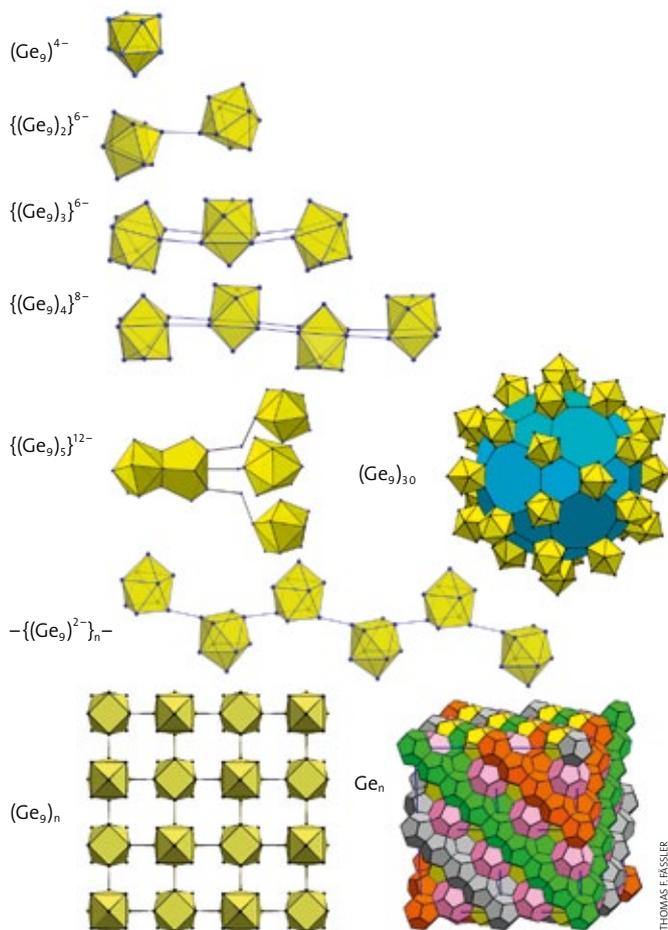
nur ungewöhnliche Lösungsmittel wie Ammoniak – ein giftiges Gas, das sich bei  $-40$  Grad Celsius verflüssigt – oder Ethylendiamin für sie verwenden. Doch auch solche Lösungen zersetzen sich leicht, wobei sich die Metalle zurückbilden und als pulveriger Niederschlag ausfallen.

Bestehen Zintl-Ionen aus nur einem einzigen Metallatom, tragen sie so viele negative Ladungen, dass ihre äußerste Elektronenschale mit acht Elektronen voll besetzt ist (Oktettregel). So übernimmt etwa das Blei (Pb), das im elementaren Zustand über vier Außenelektronen verfügt, in der Zintl-Phase  $Mg_2Pb$  vier Elektronen von zwei Magnesiumatomen (Mg) und liegt folglich als  $Pb^{4-}$  vor. Die Anordnung der beiden Ionensorten im Kristall entspricht derjenigen in dem klassischen Salz Lithiumoxid  $Li_2O$ . Dabei ersetzt  $Mg^{2+}$  das  $Li^+$  und  $Pb^{4-}$  das  $O^{2-}$ . Diese strukturelle Übereinstimmung gilt als starkes Indiz dafür, dass Zintl-Phasen tatsächlich ionisch aufgebaut sind.

Welche Bindungsverhältnisse liegen aber nun in den Polyanionen vor, die aus mehr als einem Atom bestehen? Wie in normalen Molekülen gehen die Atome in einem polyanionischen Verband so viele kovalente Bindungen ein, bis auch sie ihr Elektronenoktett erreicht haben. Dies sei am Beispiel von Kaliumsilicid (KSi) illustriert, einer Verbindung aus Kalium



Betrachtet man die verschiedenen chemischen Bindungstypen und die zugehörigen Stoffklassen, die im oberen Diagramm veranschaulicht sind, so gehören die Zintl-Phasen in den Übergangsbereich zwischen Metallen und Salzen. Das untere Diagramm illustriert, wie (Halb-)Metalle mit dreidimensionaler Gitterstruktur (zum Beispiel Silizium, unten) durch zunehmende Reduktion – also Aufnahme von Elektronen – zu Verbindungen mit zwei-, ein- oder null-dimensionalen (atomaren) Metallanionen (links) oder zu immer kleineren Clusteranionen (rechts) werden, wie man sie in Zintl-Phasen findet.



Löst man Natrium und Germanium in flüssigem Ammoniak, bilden sich außer einfach positiv geladenen Natriumionen vierfach negativ geladene Cluster aus neun Germaniumatomen (Ge). Diese lassen sich durch vorsichtige Oxidation, also den Entzug von Elektronen, schrittweise zu immer größeren Gebilden verknüpfen. Am Ende, wenn alle Elektronen abgegeben sind, liegt elementares Germanium vor. Dieses sollte laut theoretischen Untersuchungen die ursprünglichen Cluster in dreidimensionaler Verknüpfung enthalten. Experimentell wurde allerdings eine andere Struktur gefunden, die freilich nicht weniger ungewöhnlich ist und sonst vor allem bei Einschlussverbindungen von Gasen in Eis vorkommt. Sie enthält eine Mischung aus regulären Dodekaedern und noch größeren Hexadekaedern (violett) und repräsentiert eine zuvor unbekannte Modifikation von Germanium. Die Farben verdeutlichen Schichten von polyedrischen Hohlräumen.

sionale Netzwerke bilden. Dagegen lösen sich Verbindungen wie das anfangs erwähnte  $\text{Na}_4\text{Pb}_9$ , in dem sich vier Elektronen auf einen Cluster aus neun Bleiatomen verteilen, ohne Weiteres in flüssigem Ammoniak sowie in davon abgeleiteten Aminen oder Amidinen. Das bietet die Möglichkeit, sie mit nasschemischen Methoden weiterzuverarbeiten, was oft einfacher gelingt als über Festkörperreaktionen.

### Halbleiter mit exakt definierter Mikrostruktur

Mit der zunehmenden Bedeutung halbleitender Materialien zur Gewinnung und Speicherung von Solarenergie sowie zur Umwandlung von Abwärme in elektrische Energie erlebt auch die Untersuchung von Zintl-Phasen seit etwa 20 Jahren eine Renaissance. Dabei geht es einerseits um ihre halbleitenden Eigenschaften. Andererseits weckt auch die besondere Zwitterstellung der Metall-Polyanionen zwischen kleinen, diskreten Molekülen und ausgedehnten, metallischen Festkörpern mit Gitterstruktur das Interesse der Forscher. Es handelt sich um piko- bis nanometergroße Teilchen, die innerhalb einer Verbindung alle exakt den gleichen Durchmesser haben. Das verspricht faszinierende Anwendungen, zumal sich die Partikel vielfältig abwandeln lassen, was eine Feinabstimmung ihrer Eigenschaften ermöglicht.

Für die Elektronik der Zukunft werden beispielsweise nanostrukturierte Halbleiter gebraucht. Deren maßgeschneiderte Produktion ist eine große Herausforderung. Die beste Kontrolle über Struktur und Eigenschaften solcher Materialien hat man, wenn man sie aus molekularen Komponenten aufbaut, die ihre Strukturmerkmale weitgehend beibehalten. Für dieses Vorgehen bieten lösliche Zintl-Ionen aus Halbmetall- und Metallatomen ideale Voraussetzungen. Aus ihnen sollten sich Halbleiter mit exakt definierter Mikrostruktur im Nanometerbereich herstellen lassen. Die Metall-Polyanionen könnten dann etwa als so genannte Quantenpunkte dienen, deren elektronische und optische Eigenschaften sich über ihre Größe genau einstellen ließen, oder als wohldefinierte Nanoteilchen, die als Katalysatoren dienen könnten. Damit wären sie viel versprechende Bausteine von Nano-

und Silizium. Hier liegen tetraedrische  $(\text{Si}_4)^{4-}$ -Anionen vor. Darin trägt jedes Siliziumatom eine einzelne negative Ladung und hat dadurch die gleiche Anzahl an Außenelektronen wie ein Phosphoratom in der benachbarten 5. Hauptgruppe. Als Pseudo-Phosphoratom bildet es folglich dieselbe tetraedrische Struktur, die man vom weißen Phosphor ( $\text{P}_4$ ) kennt. Jedes Atom ist darin mit drei anderen verknüpft, mit denen es sich jeweils ein Elektronenpaar teilt. Somit verfügt es zusammen mit einem freien, nicht an den Bindungen beteiligten Elektronenpaar über acht Außenelektronen, und die Oktettregel ist erfüllt.

Nicht alle Zintl-Anionen folgen allerdings diesem einfachen Analogiekonzept. Bei Anionenmolekülen mit Käfigstruktur, in denen die Elektronen gleichsam über das ganze Polyedergerüst verschmiert sind, besteht eine Analogie zu bestimmten organischen Molekülen: den Aromaten. Anders als diese können Zintl-Ionen aber nicht nur planar, sondern auch als dreidimensionale Käfige auftreten. Solche Käfigstrukturen bezeichnet man deshalb als sphärische oder dreidimensionale Aromaten.

Die Zusammensetzung und Ladung der Anionen bestimmt über die Löslichkeit von Zintl-Phasen. Diese sind im Allgemeinen unlöslich, wenn sie wie das oben erwähnte Magnesiumplumbid  $\text{Mg}_2\text{Pb}$  hoch geladene Einzelatome enthalten. Dasselbe gilt für Zintl-Phasen mit »unendlich« ausgedehnten Anionen, die Ketten, Schichten oder gar dreidimen-

lasern sowie künftigen Quantencomputern oder Ein-Elektron-Transistoren.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die Forschung über Zintl-Phasen und die darin befindlichen Metallcluster derzeit im Wesentlichen drei Stoßrichtungen, um die bisher bekannten Zusammensetzungen und Bauprinzipien gezielt abzuwandeln:

- das Verknüpfen der Polyanionen zu Dimeren, Ketten oder Netzwerken,
- die Beimischung von einem oder mehreren Übergangsmetallatomen, so dass so genannte intermetalloide Cluster entstehen,
- und das Anheften organischer Gruppen an die Cluster unter (teilweisem) Ausgleich der negativen Ladung.

### Gezielte Verknüpfung von Nanoteilchen

Die negativ geladenen, komplexen Cluster zeigen durch den Elektronenüberschuss eine sehr hohe Reaktivität. Um einen stabileren Zustand zu erlangen, neigen sie zur Elektronenabgabe bis zur vollständigen Rückbildung des Metalls. Gelingt es, diesen Prozess vorzeitig zu unterbrechen, kann man solche Oxidationsreaktionen nutzen, um kovalente Bindungen zwischen den Polyanionen zu knüpfen. Das schafft die Voraussetzung für ein kontrolliertes Clusterwachstum zu (Halb-)Metall-Nanopartikeln.

Zintl-Anionen mit Pnikogenen – Elementen der 15. Gruppe des Periodensystems – konnten bereits in den 1980er Jahren miteinander verknüpft werden. Bei den Tetrelen – Elementen der 14. Gruppe – gelang das dagegen erst vor wenigen Jahren mit Germanium (Grafik links).

Als Ausgangsverbindungen dienten hier neunatomige Germaniumcluster  $(\text{Ge}_9)^{4-}$ , die dem eingangs erwähnten  $(\text{Pb}_9)^{4-}$  entsprechen. Sie lassen sich durch so genannte oxidative Kupplungsreaktionen schrittweise aneinanderheften. Vereinfacht ausgedrückt, wird dabei einem negativ geladenen Germaniumatom im Cluster ein Elektron entzogen. Es hält sich dafür schadlos, indem es sich mit einem Germa-

niumatom aus einem benachbarten Cluster verbindet, das ebenfalls ein Elektron abgegeben hat.

Als Erster konnte Slavi S. Sevov von der University of Notre Dame (Indiana) auf diese Weise einen Verbund aus zwei  $(\text{Ge}_9)^{4-}$ -Anionen herstellen. Momentan liegt der Rekord, den einer von uns (Fässler) und seine Mitarbeiter halten, bei fünf miteinander verknüpften Einheiten. Vier davon haben in dem resultierenden  $\text{Ge}_{45}$ -Cluster ihre ursprüngliche Form behalten. Die fünfte Einheit ist dagegen geöffnet und vernetzt die vier intakten Neunergruppen kovalent miteinander. Bei vollständiger Oxidation der Zintl-Ionen werden die nun neutralen  $(\text{Ge}_9)$ -Einheiten alle miteinander verbunden. Quantenchemischen Berechnungen zufolge sollten sie dabei ihre ursprüngliche Geometrie bewahren und als zusammenhängende Strukturelemente erhalten bleiben.

Experimentell konnten das Arnold M. Guloy von der University of Houston (Texas) und Yuri Grin vom Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe in Dresden jedoch nicht bestätigen. Sie fanden stattdessen Germanium mit einer nicht weniger spektakulären Struktur (» $\text{Ge}_n$ «, Grafik links): ein dreidimensionales Gerüst aus Ge-Atomen mit Hohlräumen, das bisher vor allem von so genannten Gashydraten bekannt war, bei denen Gase wie Methan, Helium oder Chlor in einer stark porösen Erscheinungsform von Eis rein mechanisch wie in einem Käfig eingeschlossen sind. Bei der Germaniumverbindung bleiben die Hohlräume allerdings leer.

Diese ungewöhnliche »Clathrat-Struktur« hat in der Fachwelt großes Aufsehen erregt. Sie stellt eine zuvor unbekannte Modifikationen des Elements Germanium dar und ähnelt insofern dem berühmten Buckminster-Fulleren, das Mitte der 1980er Jahre als neue, fußballförmige Modifikation von Kohlenstoff entdeckt wurde. Eine weitere Gemeinsamkeit sind die polyedrischen Hohlräume.

Forscher bemühen sich derzeit, auch andere Zintl-Phasen auf analoge Weise abzuwandeln und so Materialien mit viel versprechenden Eigenschaften zu erzeugen – etwa neuartige

## JAHRGANGS-CD-ROM 2013

Die CD-ROM bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); ISBN 978-3-943702-54-5



So erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**  
**[www.spektrum.de/recherche](http://www.spektrum.de/recherche)**

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

nanostrukturierte Halbleiter, welche die Fotovoltaik revolutionieren oder als hochwirksame Katalysatoren dienen könnten.

### Intermetalloide Cluster

Großes Interesse gilt in diesem Zusammenhang den so genannten intermetalloiden Clustern. Darunter versteht man lösliche Atomaggregate aus mehr als einer Sorte von (Halb-)Metallen. In Frage kommen zum Beispiel Kombinationen von Hauptgruppenmetallen mit Nebengruppenelementen oder seltenen Erden. Im engeren Sinne des Begriffs sollten die Verbindungen zudem Strukturmerkmale so genannter intermetallischer Phasen aufweisen – etwa hohe Koordinationszahlen, was bedeutet, dass die Atome einer der Metall-

komponenten jeweils von mindestens acht der anderen umgeben sind.

Intermetalloide Cluster bilden inzwischen eine eigene große Familie innerhalb der Metall-Polyanionen (Abbildung rechts). Für ihre Synthese kann man lösliche Zintl-Ionen verwenden, die aus einer (»homoatomar«) oder auch zwei Atomsorten (»heteroatomar«) bestehen. Diese setzt man in Lösung mit Übergangsmetallatomen (Elementen der 3. bis 12. Gruppe des Periodensystems) um, die dabei zunächst von organischen Liganden umgeben sind. Während der Reaktion streifen sie ihre Hülle ab, so dass sie schließlich nackt vorliegen, bevor sie in den neuen Cluster eingebaut werden. Manchmal behalten sie aber auch einen Teil ihrer organischen Liganden und lagern sich nur seitlich an das Zintl-

## Die Bindungssituation in Polyanionen

**Für Atome der N. Hauptgruppe mit ihren N Valenzelektronen** – den am weitesten außen liegenden – gilt, dass sie in der Regel  $8-N$  Bindungen zu Nachbaratomen ausbilden. Dahinter steckt die bekannte Oktettregel, nach der alle Atome in einem Molekül versuchen, die Elektronenkonfiguration eines Edelgases zu erreichen. Demnach haben Elemente der 5. Hauptgruppe wie Phosphor oder Arsen eine Bindigkeit von  $8-5=3$ . Ein Beispiel dafür bilden die tetraedrischen  $P_4$ -Moleküle des weißen Phosphors, in denen jedes Phosphoratom mit drei anderen verbunden ist.

Für Metall-Polyanionen mit N Valenzelektronen pro Atom ergibt sich ebenfalls eine Bindigkeit von  $8-N$ , auch wenn die neutralen Atome des betreffenden Metalls eine andere Valenzelektronenzahl und Bindigkeit aufweisen. Beispielsweise enthält der Cluster  $[Sn_4]^{4-}$  vier einfach negativ geladene Zinnatome, die nun über fünf anstatt der üblichen vier Valenzelektronen verfügen. Daher sind sie nicht vier-, sondern dreibindig wie die Phosphoratom im weißen Phosphor. Polyanionen, für die diese Regel zutrifft, zeigen eine »normale Valenzsituation«.

Clusteranionen von Elementen der 4. Hauptgruppe, die Deltaeder (Polyeder mit Dreiecksflächen) bilden, besitzen jedoch häufig weniger Elektronen, als zur Ausbildung von  $8-N$  kovalenten Bindungen erforderlich wären. Das gilt etwa für  $(Pb_9)^{4-}$ . Deshalb bedarf es hier weiterführender Konzepte.

Die am häufigsten angewandten Wade-Mingos-Regeln wurden von Kenneth Wade von der Durham University (England) in den 1970er Jahren insbesondere für Borwasserstoffverbindungen wie das ikosaedrische Dodekaborat-Anion  $(B_{12}H_{12})^{2-}$  entwickelt und später von D. Michael P. Mingos von der University of Oxford auf andere Cluster mit Elektronendefizit übertragen, die Haupt- oder auch Übergangsmetallatome enthalten können. Sie stellen einen Zusammenhang zwischen der Gesamtzahl aller Valenzelektronen der Atome eines Clusters und dessen Struktur her. Unter den hier besprochenen Zintl-Anionen sind demnach geschlossene Deltaeder bei  $4n+2$

Valenzelektronen besonders stabil, wobei n die Anzahl der Atome angibt. Ein Beispiel ist  $(Pb_{10})^{2-}$  (mit  $4 \times 10 + 2$  Valenzelektronen), das die Form eines zweifach überkappten quadratischen Antiprismas hat (Abbildung rechts). Cluster mit mehr Valenzelektronen ( $4n+4$ ,  $4n+6$  und so weiter) lassen sich von Deltaedern ableiten, denen zunehmend Ecken fehlen. Das gilt etwa für  $(Pb_9)^{4-}$  (mit  $4 \times 9 + 4$  Valenzelektronen), das zwar dasselbe Polyedergerüst wie  $(Pb_{10})^{2-}$  aufweist, aber eine Ecke weniger enthält.

Verschiedene andere Modelle, die gelegentlich zur Erklärung von Zintl-Polyanionen herangezogen werden, lassen sich als sphärische Schalenmodelle klassifizieren. Sie liefern magische Elektronenzahlen für besonders stabile Cluster, die von der genauen Position und Zahl der Atome darin unabhängig sind.

Vereinfacht ausgedrückt, betrachtet man den Cluster dabei als Kugel und nimmt näherungsweise an, dass sich die Elektronen ähnlich wie bei Atomen in einem sphärischen Potenzial bewegen. Die resultierenden mathematischen Funktionen und daraus abgeleiteten Quantenzahlen zur Beschreibung der Verteilung und Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen in diesen komplizierten Systemen ähneln daher auch denjenigen für Atome und ermöglichen gewisse Aussagen über die Energieniveaus der Elektronen und damit die Stabilität der jeweiligen Clustermoleküle.

Solche sphärischen Modelle taugen freilich nur bedingt zur Beschreibung der in Wirklichkeit nie exakt kugelsymmetrischen Cluster. Einige der Konzepte wurden deshalb weiterentwickelt, um die tatsächliche Struktur der Polyanionen einzubeziehen. Die Ergebnisse sind natürlich umso besser, je höher die Symmetrie und je kugelähnlicher die Gestalt der Cluster ist. In aktuellen theoretischen Untersuchungen wird die elektronische Struktur anionischer Zintl-Cluster üblicherweise anhand so genannter Dichtefunktional- oder Ab-initio-Molekülorbital-Rechnungen diskutiert – mit abweichenden Detailinformationen und modifizierten Zahlenwerten.

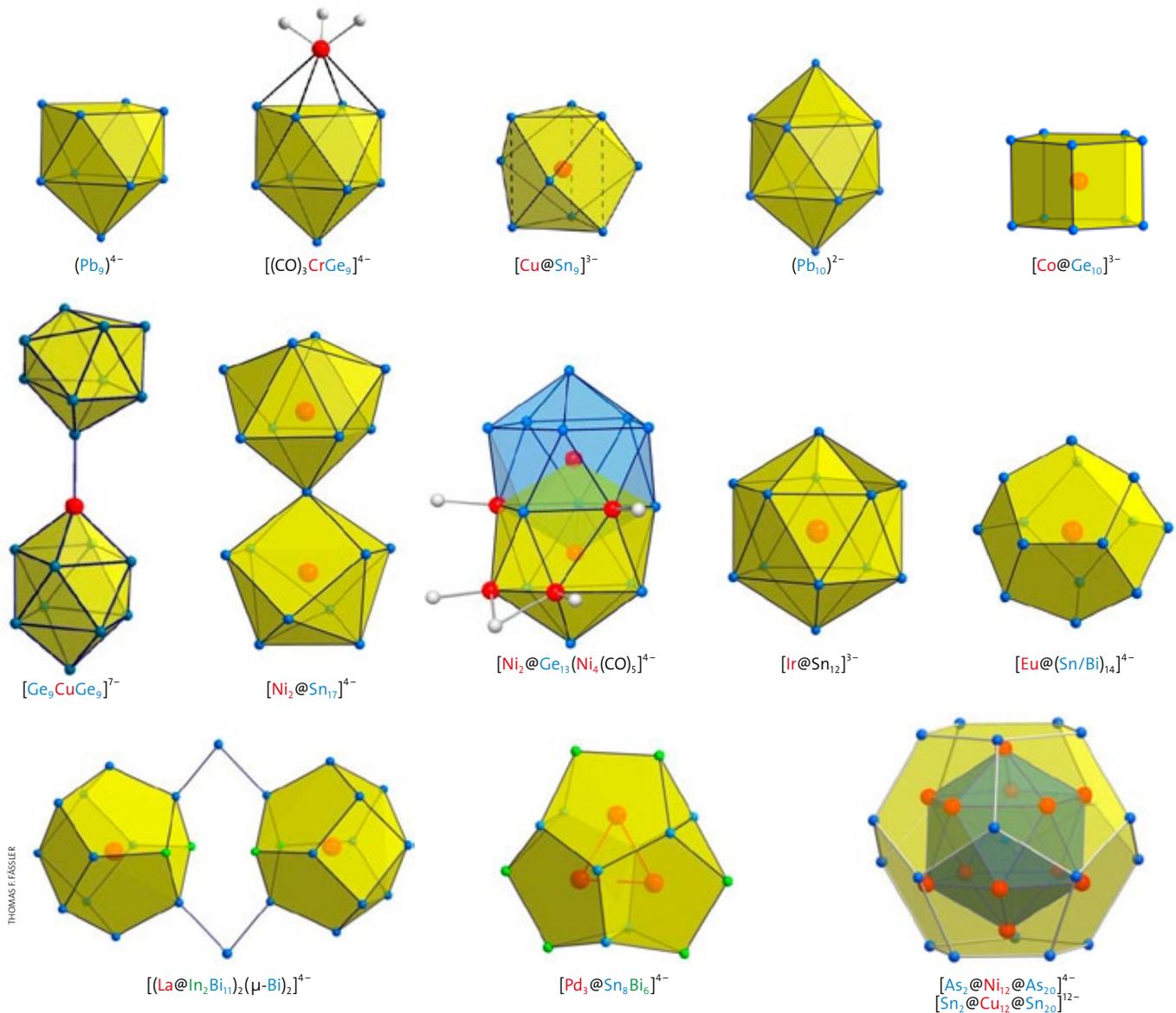
Anion an, das in diesem Fall seine ursprüngliche Gestalt beibehalten kann.

Eine interessante Variante dieser Verbindungsklasse stellen die »endohedralen« Cluster dar. Hier sind bis zu drei Übergangsmetallatome in einem Käfig aus Hauptgruppenmetallatomen eingeschlossen – was üblicherweise mit dem Symbol »@« bezeichnet wird. Dabei zeigt sich wieder eine bemerkenswerte Ähnlichkeit mit den Fullerenen, die ebenfalls Fremdatome in ihrem Innern beherbergen können.

Die kleinsten bisher bekannten endohedralen Zintl-Anionen sind  $[\text{Ni}@\text{Ge}_9]^{3-}$  mit einem Nickel- sowie  $[\text{Cu}@\text{E}_9]^{3-}$  mit einem Kupferatom innerhalb der Hülle, die hier aus Zinn- oder Bleiatomen besteht. Liegen solche Anionen in einer kristallinen Festkörperverbindung vor, hat der Käfig häufig

dieselbe Struktur wie in den entsprechenden einfachen, homoatomaren Zintl-Anionen, die kein Fremdatom im Innern einschließen. Wie sich mittels Kernmagnetresonanzspektroskopie nachweisen lässt, wechseln die Hüllen in Lösung dagegen sehr rasch zwischen verschiedenen Atomanordnungen. Eine solche »Fluktuation« ist ein besonderes Kennzeichen solcher endohedralen Polyanionen mit »weichen« Bindungen zwischen den Metallatomen.

Experimentellen Untersuchungen wie auch quantenchemischen Berechnungen zufolge können »leere« intermetalloide Cluster nicht beliebig groß werden. Das größte isolierbare Exemplar ohne Füllung ist  $(\text{E}_{10})^{2-}$ , wobei E für Germanium oder Blei steht. Mit Füllung sind dagegen auch Käfigstrukturen mit 12, 14, 17 und 18 Atomen stabil. Den Rekord



Intermetalloide Zintl-Anionen gibt es in den verschiedensten Strukturen, von denen hier eine repräsentative Auswahl gezeigt ist. Sie sind charakterisiert durch den Einbau von einem oder auch mehreren Atomen aus der Gruppe der Übergangsmetalle oder seltenen Erden (rot). In manchen Fällen sitzen die Fremd-

atome an der Außenseite des Clusters und tragen dann meist Liganden wie Kohlenmonoxid (CO, grau). Oft sind sie aber auch im Innern des von den Hauptgruppenmetallen (blau und grün) gebildeten Käfigs eingeschlossen. Die kompliziertesten Strukturen haben einen zwiebelartigen Aufbau aus mehreren Schalen.

halten die Anionen  $[\text{Pd}_2@\text{Ge}_{18}]^{4-}$  und  $[\text{Pt}_2@\text{Sn}_{17}]^{2-}$  mit gleich zwei Palladium- beziehungsweise Platinatomen im Innern und einer Hülle aus Germanium- beziehungsweise Zinnatomen. Hergestellt und charakterisiert haben sie die Arbeitsgruppen um Sevov sowie um Bryan Eichhorn von der University of Maryland in Baltimore.

Im gefüllten Zustand treten teils auch Strukturen auf, die für leere Käfige nicht realisierbar sind. Dazu zählen etwa die nicht von den sonst üblichen Dreieckspolyedern begrenzten intermetalloiden Cluster  $[\text{Fe}@\text{Ge}_{10}]^{3-}$  und  $[\text{Co}@\text{Ge}_{10}]^{3-}$  mit Eisen beziehungsweise Kobalt im Innern. Hier bilden die Germaniumatome pentagonale Prismen – eine einzigartige Anordnung, die bisher noch schwer verständlich ist. Eine von uns (Dehnen) und ihre Mitarbeiter haben auch einen Käfig mit drei eingeschlossenen Übergangsmetallatomen hergestellt. In dem Polyanion der Formel  $[\text{Pd}_3@\text{Sn}_8\text{Bi}_6]^{4-}$  scheint ein nahezu ungeladener  $\text{Pd}_3$ -Ring in der Hülle aus acht Zinn- und sechs Wismutatomen zu schweben.

Noch kompliziertere Summenformeln und Strukturen ergeben sich, wenn die Übergangsmetallatome auch am Aufbau der Clusterhüllen beteiligt oder die Polyanionen ähnlich einer Zwiebel gleich aus mehreren Schalen aufgebaut sind. Eichhorn und seinen Mitarbeitern gelang die Herstellung eines solchen Clusters aus Nickel- und Arsenatomen. Es handelt sich um das Anion  $[\text{As}@\text{Ni}_{12}@\text{As}_{20}]^{3-}$ , das die Forscher aus einer Lösung des Zintl-Anions  $(\text{As}_7)^{3-}$  und dem Nickelkomplex  $\text{Ni}(\text{COD})_2$  ( $\text{COD} = \text{Cyclooctadien}$ ) in Ethylendiamin isolierten. Darin ist das zentrale Arsenatom ikosaedrisch von zwölf Nickelatomen umgeben und dieser  $(\text{Ni}_{12})$ -Cluster wiederum von einem Pentagondodekaeder aus 20 Arsenatomen eingeschlossen (Abbildung S. 79).

Während hier ein Halbmetall die äußere Schale bildet, kommen in dem Polyanion  $[\text{Sn}@\text{Cu}_{12}@\text{Sn}_{20}]^{12-}$ , einem weiteren Beispiel für diese hochästhetischen Strukturen, das in einer unserer Arbeitsgruppen (Fässler) hergestellt wurde, ausschließlich Metallatome vor. Damit die Gruppierung die gleiche Zahl an Valenzelektronen aufweist, benötigt sie allerdings nicht nur drei, sondern gleich zwölf negative Ladungen. Deshalb lässt sich das Anion nicht mehr in Lösung bringen, sondern existiert nur zusammen mit positiv geladenen Ionen von Alkalimetallen wie Natrium im Festkörper. Tatsächlich wurde es über eine Festkörperreaktion zwischen der Kupfer-Zinn-Legierung Bronze und Natrium in einer Niob-Ampulle bei 450 Grad Celsius hergestellt. In der resultierenden Verbindung bildet das Natrium quasi Scheidewände, welche die Bronze durchziehen und sie in kleine Metallcluster zerteilen.

Noch immer weiß man in vielen Fällen nicht, wie sich solche endohedralen Cluster aus den Lösungen der Reaktanden oder in den Schmelzen der Legierungen bei hohen Temperaturen bilden. Generell ist der Weg über den gelösten Zustand besser untersucht. Hier werden drei Mechanismen diskutiert. Im einfachsten Fall dringt ein Übergangsmetallatom, das aus einer Verbindung freigesetzt wird, in den vorgeformten Hauptgruppenmetall-Käfig ein. Dieser muss sich dabei vorübergehend öffnen. Wahrscheinlicher ist deshalb ein

Mechanismus, bei dem sich das Übergangsmetallatom zunächst nur an das Polyanion anlagert und einen Teil seiner ursprünglichen organischen Liganden behält. Das in einigen Fällen belegte Zwischenprodukt arrangiert sich in einem nachfolgenden Schritt um, indem das Übergangsmetallatom seine verbliebenen Liganden abstößt und den Platz im Zentrum einnimmt. Beim dritten denkbaren Mechanismus lösen sich die Atome der Zintl-Anionen in Gegenwart eines Übergangsmetallatoms voneinander und gruppieren sich neu um dieses herum.

Doch auch hier sind noch viele Fragen unbeantwortet – etwa die, warum ein Nickelatom bei der Reaktion mit einer  $(\text{Pb}_9)$ -Einheit die Bleiatome dazu veranlasst, sich zu dem im kristallinen Zustand nachgewiesenen zehnatomigen Cluster umzulagern, während es von neun viel kleineren Germaniumatomen problemlos umschlossen wird. Aber möglicherweise spielt der Größenunterschied ja gar keine Rolle. Wie oben erwähnt, liegen in Lösung verschiedene Cluster im Gleichgewicht miteinander vor, die sich dynamisch ineinander umwandeln. Welcher davon in kristalliner Form isoliert werden kann, hängt dann von der Löslichkeit der Substanzen unter den jeweiligen äußeren Bedingungen ab.

Was praktische Anwendungen solcher Untersuchungen angeht, so können Merkmale der eingeschlossenen Metallatome auf das gesamte Zintl-Ion »abfärben«, so dass es etwa magnetisch wird. Gewöhnlich ändert sich zugleich die zur Elektronenanregung nötige Energie. In gewisser Weise entspricht der Einschluss der Übergangsmetallatome also dem Dotieren von Halbleitern – allerdings auf molekularer Ebene.

### Dekoration mit organischen Gruppen

Intermetalloide Clusteranionen sind auch begehrte Untersuchungsobjekte für Quantenchemiker. Diese interessieren sich speziell dafür, Zusammenhänge zwischen der Struktur und der Zahl sowie der Verteilung der Elektronen aufzudecken. Dabei lassen sich die Cluster quantenchemisch teils als überdimensionale Atome oder »Superatome« auffassen. Um ihr Zentrum erstrecken sich – genau wie bei isolierten Atomen um den Atomkern – radialsymmetrisch Schalen für die gemeinsamen Bindungselektronen. Konfigurationen, bei denen diese Schalen gefüllt sind, zeichnen sich durch besondere Stabilität aus. So erklären sich manche häufig auftretende Strukturtypen.

Theoretiker haben die geometrische Anordnung der Atome und die Bindungsverhältnisse in Zintl-Clusteranionen mit Hilfe einer ganzen Reihe von Modellen diskutiert (Kasten S. 78). Bemerkenswert ist, dass keines davon für diese Substanzklasse speziell entwickelt wurde. In dem Bestreben, die verschiedensten Clusterarten einheitlich zu beschreiben, griffen die Quantenchemiker stets auf Ansätze zurück, die schon in anderem Zusammenhang erfolgreich waren. Nur in wenigen Fällen versagten solche Modelle.

Die dritte Hauptstoßrichtung der gegenwärtigen Forschung über Zintl-Anionen betrifft das Anbinden von organischen Gruppen oder anderen Substituenten. Hier verhält

es sich ähnlich wie mit der Verknüpfung solcher Cluster. Als Erstes sind bereits in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts etliche Verbindungen, die auf Polyanionen von Elementen der 15. Gruppe basieren, hergestellt, untersucht und nachträglich abgewandelt worden. Ein bedeutender Wegbereiter auf dem Gebiet war Hans Georg von Schnering (1931–2010). Er und seine Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart versahen unter anderem Zintl-Anionen aus Phosphor wie  $(P_7)^{3-}$  mit Trimethylsilyl-Gruppen  $(SiMe_3)^+$ .

Wiederum bereiten die elektronenärmeren Tetrele größere Probleme, weil sie bei der Ausbildung von Zintl-Anionen entweder höhere negative Ladungen pro Atom oder aber einen Elektronenmangel des gesamten Anionen-Käfigs in Kauf nehmen müssen und deshalb unlöslich sind. Seit 1993 kennt man zwar vierfach mit organischen Liganden bestückte  $(R_4E_4)$ -Tetraeder, wobei R wiederum für eine Silylgruppe (diesmal mit tertiären Butylresten) und E für Silizium oder Germanium steht. Allerdings wurden diese Moleküle nicht ausgehend von Zintl-Anionen erzeugt. Erst ab dem Jahr 2007 gelang es, bei Verbindungen, welche die Cluster  $(Ge_9)^{4-}$  und  $(Sn_9)^{4-}$  enthielten, die vierfach negative Ladung durch am Käfig angebundene, formal positiv geladene Liganden wie Supersilyl  $\{Si(SiMe_3)_3\}^+$  zum Teil auszugleichen. 2012 konnte die Arbeitsgruppe von Sevov schließlich alle vier Ladungen des ursprünglichen  $(Ge_9)^{4-}$ -Anions auf diese Weise kompensieren.

Manche der so veränderten Käfigmoleküle haben günstigere Eigenschaften. So sind sie in organischen Lösungsmitteln löslich, was sie für sonst nicht mögliche Folgereaktionen zugänglich macht, die das Spektrum der Eigenschaften zusätzlich erweitern und für eine größere Stabilität sorgen können. Denkbar wäre zum Beispiel, einen derart modifizierten Cluster über seine organischen Liganden in Polymere einzubauen, so dass katalytisch aktive Kunststofffilme entstünden. Die organische Hülle könnte außerdem dazu dienen, bestimmte Substrate einzufangen, deren chemische Umsetzung das Polyanion dann katalysiert.

Als besonders fruchtbar für praktische Anwendungen erweist es sich, die Ergebnisse der drei genannten Hauptforschungsrichtungen auf dem Gebiet der Zintl-Phasen zu kombinieren. So lassen sich die elektronischen Eigenschaften von intermetalloiden Clustern durch oxidatives Verknüpfen der Polyanionen noch verbessern. Solange diese isoliert vorliegen, sind die entsprechenden Zintl-Phasen meist Halbleiter mit großer Bandlücke, bei denen das Anheben von Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband relativ viel Energie erfordert. Beim Zusammenschluss von Baueinheiten rücken die beiden Bänder jedoch näher zusammen. Daher besitzt »mesostrukturiertes« Germanium, das durch milde Oxidation von  $(Ge_9)^{4-}$ -Anionen erzeugt wurde, ähnliche Eigenschaften wie Silizium und eignet sich etwa für Solarzellen oder optoelektronische Bauelemente.

Aber auch für das Silizium selbst, das sehr viel preiswerter ist als Germanium und bisher die Elektronik dominiert, er-

öffnen sich faszinierende neue Möglichkeiten. So haben sich bei jüngsten Untersuchungen der Arbeitsgruppe von Nikolaus Korber an der Universität Regensburg die Silizium-Polyanionen  $(Si_4)^{4-}$  und  $(Si_9)^{4-}$  trotz ihrer hohen Ladung überraschend als löslich in flüssigem Ammoniak erwiesen. Das eröffnet die Aussicht, sie mit einem Übergangsmetall zu intermetalloiden Clustern zu kombinieren, was eine Vielzahl weiterer interessanter Materialien verspricht. Hier tut sich ein spannendes Feld für die Chemie und die Elektronik gleichermaßen auf. 

## DIE AUTOREN



**Stefanie Dehnen** ist seit 2006 Professorin für anorganische Chemie an der Universität Marburg. Sie hat an der Universität Karlsruhe (heute KIT) Chemie studiert und 1996 in anorganischer Chemie promoviert. Als Postdoc beschäftigte sie sich

mit Quantenchemie, weshalb sie beide Richtungen bis heute kombiniert. **Thomas F. Fässler** ist Professor für anorganische Chemie mit Schwerpunkt Neue Materialien an der Technischen Universität München. Er hat Chemie und Mathematik an der Universität Konstanz studiert und 1988 an der Universität Heidelberg in metallorganischer Chemie promoviert. Nach Forschungstätigkeiten an der University of Chicago und der ETH Zürich hatte er von 2000 bis 2003 den Lehrstuhl für Anorganische Festkörperchemie am Eduard-Zintl-Institut für Anorganische und Physikalische Chemie der Universität Darmstadt inne.

## QUELLEN

- Guloy, A.M. et al.:** A Guest-Free Germanium Clathrate. In: *Nature* 443, S. 320, 2006
- Lips, F. et al.:** Doped Semi-Metal Clusters: Ternary, Intermetalloid Anions  $[Ln@Sn_nBi_n]^{4-}$  and  $[Ln@Sn_nBi_n]^{4-}$  (Ln = La, Ce) with Adjustable Magnetic Properties. In: *Journal of the American Chemical Society* 134, S. 1181–1191, 2012
- Lips, F. et al.:**  $[Pd_3Sn_8Bi_6]^{4-}$ : A 14-Vertex Sn/Bi Cluster Embedding a  $Pd_3$  Triangle. In: *Journal of the American Chemical Society* 133, 14168–14171, 2011
- Scharfe, S. et al.:** Zintl-Ionen, Käfigverbindungen und intermetalloide Cluster der Elemente der 14. und 15. Gruppe. In: *Angewandte Chemie* 123, S. 3712–3754, 2011
- Stegmaier, S., Fässler T.F.:** A Bronze Matryoshka: The Discrete Intermetalloid Cluster  $[Sn@Cu_{12}@Sn_{20}]^{12-}$  in the Ternary Phases  $A_{12}Cu_{12}Sn_{21}$  (A = Na, K). In: *Journal of the American Chemical Society* 133, S. 19758–19768, 2011
- Zintl, E. et al.:** Salzartige Verbindungen und intermetallische Phasen des Natriums in flüssigem Ammoniak. In: *Zeitschrift für Physikalische Chemie* A154, S. 1–46, 1931

## WEBLINKS

[http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/intermetallische\\_6.html](http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/intermetallische_6.html)

Wissenswertes über Zintl-Phasen mit vielen Strukturbeispielen samt eindrucksvollen Grafiken aus der Vorlesung »Intermetallische Phasen« von Prof. Dr. Caroline Röhr, Universität Freiburg

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221332](http://www.spektrum.de/artikel/1221332)

# DR O HNE

LUFTSICHERHEIT

auf Abwegen

Um Kosten zu sparen, erwägen viele Unternehmen den Einsatz unbemannter Flugkörper. Doch die Risiken für die Luftfahrt sind erheblich.

Von Todd Humphreys und Kyle Wesson

**W**ährend Friedensforscher diskutieren, welche Auswirkungen ferngesteuerte oder gar autonome Drohnen auf Kriegsbereitschaft und Kriegsführung haben können, gewinnt die Drohnentechnik neue Anhänger im zivilen Bereich. Die Bundesluftfahrtbehörde der Vereinigten Staaten (FAA) schätzt, dass bis zum Jahr 2030 mehr als 10 000 unbemannte Flugkörper ihre Bahnen am amerikanischen Himmel ziehen werden: um Such- und Rettungsaktionen zu unterstützen, die Bestäubung landwirtschaftlicher Nutzflächen zu erledigen, Stromleitungen zu überwachen, Messungen vorzunehmen und vieles mehr. Frederick W. Smith, Gründer des Paketdienstes FedEx, erwog, Luftfracht mit Drohnen zu befördern,

Amazon-Chef Jeff Bezos will sogar Päckchen und Pakete mit Minihubschraubern zum Kunden bringen.

Der Reiz besteht vor allem in der Wirtschaftlichkeit der Geräte: kein Cockpit, weniger Personalkosten. Nur ein Bediener am Boden, der die Flugroute in einen Computer eingibt, die Drohne mit einer Art Joystick steuert – und über weite Strecken dem Autopiloten die Steuerung überlässt. Der amerikanische Kongress wies deshalb die Luftfahrtbehörde an, bis 2015 einen umfassenden Plan vorzulegen, wie sich zivile unbemannte Flugkörper in das nationale Flugsicherheitssystem einbeziehen ließen.

Doch das dürfte alles andere als einfach werden, denn die Drohnentechnik hat erhebliche Schwachstellen, wie ein Vor-

**Sieht so die Zukunft aus? Eine Vielzahl ziviler unbemannter Flugkörper schwirrt durch den Luftraum unserer Städte? Mögliche Anwendungen gibt es genug: Sie reichen von Paketzustellung über Umweltmessungen bis zur Videoüberwachung. Allerdings sind zahlreiche Fragen offen. Diese betreffen nicht nur den Schutz der Privatsphäre, sondern mehr noch die Luftsicherheit.**



SHUTTERSTOCK / ANDREA CRISANTE



PICTURE ALLIANCE / AP PHOTO / EDUARDO CONTRERAS

fall vom 2. August 2010 illustriert. Auf Grund eines Softwareproblems, so die späteren Ermittlungen, verirrte sich eine MQ-8B Fire Scout (siehe Fotos) weit in den Luftraum über der Hauptstadt Washington, in dem auch das Präsidentenflugzeug Air Force One operiert. Die 1429 Kilogramm schwere und 9,7 Meter lange Drohne der US-Navy flog dort ohne Verbindung zu seinen Bedienern im Kontrollraum von Maryland und führte obendrein die für einen solchen Notfall programmierte Anweisung nicht aus, umgehend zur Basis zurückzukehren. Erst nach einer halben Stunde, in der die Nerven blank lagen, gelang es der Crew, die Kommunikation wieder aufzubauen und die Drohne zu steuern. Immer-

hin, so betonte ein Vertreter der Navy, hatte der Autopilot dafür gesorgt, dass sie in der Zwischenzeit ihre Flughöhe konstant hielt.

Tatsächlich birgt die Kommunikation mit Drohnen ein erhebliches Sicherheitsrisiko. Die Flugkörper errechnen ihre Position im Raum anhand der Signale von GPS-Satelliten und senden ihrerseits anderen Luftfahrzeugen Informationen. Die eigentliche Steuerung erfolgt über eine Verbindung zur Bodenstation. Fällt einer dieser Kanäle aus, kann das katastrophale Folgen zeitigen.

## AUF EINEN BLICK

### FALSCHES SIGNALE

**1** Von Überwachungsaufgaben bis zur Paketauslieferung reichen die Ideen für den **zivilen Einsatz von Drohnen**. Schätzungen zufolge könnten im Jahr 2030 mehr als 10 000 davon in den USA im Einsatz sein.

**2** Für die Sicherheit des Luftverkehrs bergen unbemannte Flugkörper zahlreiche Probleme, die bislang nur unzureichend bedacht wurden. Diese betreffen die **Kollisionsvermeidung** wie auch die **Sicherheit gegen Angriffe und Entführungen**.

**3** Die zur Positionsbestimmung ausgewerteten Signale von **GPS-Satelliten** können gestört oder verfälscht werden, Gleiches gilt für die Kommunikation mit anderen Luftfahrzeugen via **ADS-B-Transponder**. Eine Lösung ist derzeit nicht in Sicht.

### Schwachstelle GPS-Signal

Das GPS wird ergänzt von Sensoren für die Trägheitsnavigation, Magnetfeldstärken- und Höhenmessgeräten sowie Kameras. Dennoch bleibt der GPS-Empfänger das zentrale Element der Ortsbestimmung, da er im Gegensatz zu allen anderen Geräten auch nachts und bei schlechten Wetterbedingungen hochpräzise Daten liefert.

Drohnen für zivile Anwendungen werden aber die frei zugänglichen und unverschlüsselten GPS-Signale verwenden, wie es beispielsweise auch Autonavigationssysteme tun. Leider enthalten diese Daten keinerlei Authentisierung. Die erste Gefahr ist daher das so genannte Spoofing: Ein gefälschtes Signal überdeckt das echte. Wie das möglich ist, demonstrierte unser Labor im Juni 2012 im White Sands Missile Range in New Mexiko. Aus gut 500 Meter Entfernung manipulierten wir den Autopiloten einer 80 000-Dollar-Drohne. Unser Spoofer sandte eine leicht veränderte, dabei aber in der In-



US NAVY PHOTO BY MASS COMMUNICATION SPECIALIST AND CLASS ALAN GRAGG

Die MQ-8 Fire Scout (hier in der Version MQ-8B) ist ein unbemannter Hubschrauber der amerikanischen Marine. Die Drohne kann autonom starten und landen – auch in unbekanntem Gelände. Neben einer Videoeinheit trägt sie bei Aufklärungsflügen im Turm verschiedene Sensorsysteme, etwa zur Entfernungsmessung per Laser, Radarüberwachung oder zum Abhören der Kommunikation des Gegners. Sie lässt sich aber auch mit Lenkwaffen ausrüsten. 2010 geriet ein solches System über Washington außer Kontrolle und reagierte eine halbe Stunde lang auf keinen Fernbefehl der Leitstelle.

tensität stärkere Version des korrekten GPS-Signals. Weil die Software zwischen Original und Fälschung nicht unterscheiden konnte, steuerte der Autopilot auf Grund falscher Höhenangaben in Richtung Wüstenboden, bis der Bediener auf manuelle Kontrolle umstellte und das Gerät quasi auf Sicht rettete.

Wie gefährlich Spoofing sein kann, ist mindestens seit 2001 bekannt, wurde aber bis vor Kurzem von Politikern und GPS-Herstellern weitgehend ignoriert. Ein Angriff galt wohl als unwahrscheinlich. Die Konsequenz: Es wird Jahre dauern, geeignete Verschlüsselungsverfahren und eine digitale Signatur zu entwickeln, die für Ursprung und Inhalt der Signale bürgt.

Ein gezielter Angriff könnte sogar noch weit simpler aussehen. Nahe der Erdoberfläche sind die Satellitensignale nämlich sehr schwach, vergleichbar dem Licht einer 50-Watt-Glühlampe in einer Entfernung von 22000 Kilometern. Es würde genügen, ein Rauschen im Frequenzbereich des GPS-Signals auszustrahlen, um den Empfang zu stören. Im Mai 2012 verlor in Südkorea das Steuerungspersonal die Kontrol-



le über eine 150 Kilogramm schwere Aufklärungsdrohne. Sie krachte in ihre Bodenstation, tötete einen Ingenieur und verletzte zwei Bediener. Die Rekonstruktion der Ereignisse ergab, dass Störsignale aus Nordkorea eine Kettenreaktion in Gang gesetzt hatten.

Drohnen sind Fluggeräte, die mit Helikoptern und Kleinflugzeugen zusammenstoßen könnten, im Bereich der Start- und Landerouten von Flughäfen auch mit Verkehrs- und Transportflugzeugen. Piloten beobachten immerhin noch ihre Umgebung und verwenden Radar, um Kollisionsgefahren zu erkennen. Doch wie der US-Rechnungshof in einem Bericht 2012 schrieb: »Es gibt noch keine geeignete Technologie, die unbemannte Flugkörper dazu in die Lage versetzt, andere Flugzeuge und Luftfahrzeuge zu erkennen.«

Radarsysteme kommen nicht in Frage – sie sind zu groß und energiehungrig. Kameras für sichtbares und infrarotes Licht wären eine preisgünstige Alternative, können aber nicht durch Wolken schauen. Die Lösung dürfte Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) heißen. Ein ADS-B-Transponder an Bord eines Flugzeugs meldet sekundlich Position und Geschwindigkeit; umgekehrt empfängt er die Daten anderer Flugzeuge. Die Bundesluftfahrtbehörde der USA will, dass bis 2020 alle zugelassenen Flugzeuge, unabhängig von ihrer Größe, mit ADS-B ausgestattet werden. Auch das Projekt, den europäischen Luftraum hinsichtlich der Flugsicherung zu vereinheitlichen (Single-European-Sky) setzt auf ADS-B. Bis 2019 sollen alle Flugzeuge damit ausgerüstet sein – ausgenommen leichte und langsame, was die Einbeziehung ziviler Drohnen in die Luftraumüberwachung hier zu Lande problematisch macht.

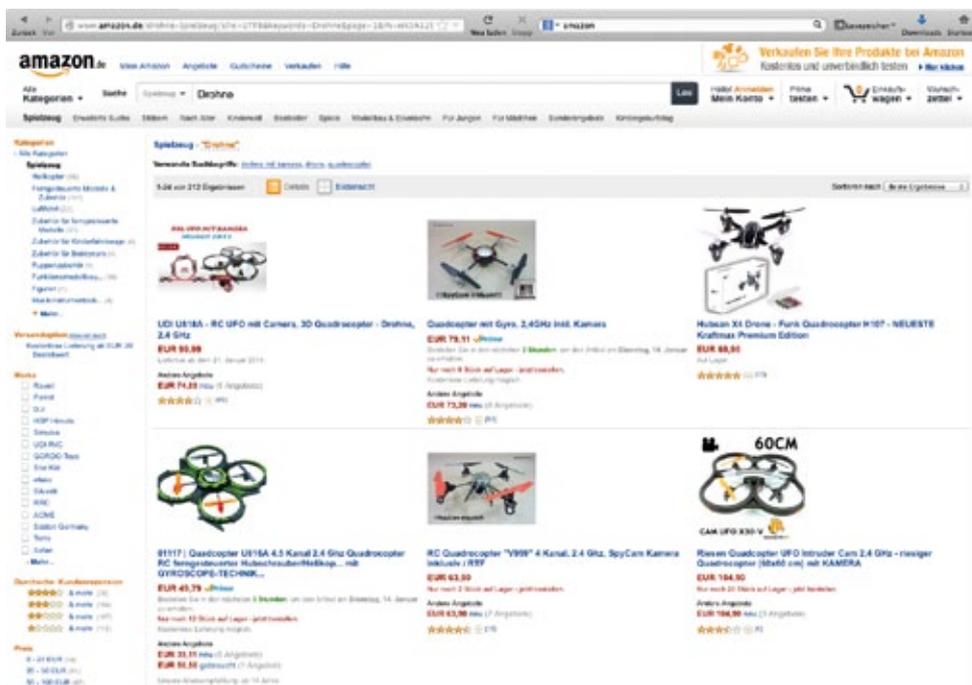
Unabhängig davon lässt sich ein ADS-B-Transponder in der gleichen Manier täuschen wie ein GPS-Empfänger. Als diese Technik in den 1990er Jahren entwickelt wurde, spiel-

ten Sicherheitsfragen kaum eine Rolle. 2012 demonstrierten Forscher vom Air Force Institute of Technology in Ohio, dass falsche Signale sehr leicht programmiert und mit einfachen technischen Mitteln versendet werden können. Während ein Pilot anhand des Radars den Betrug noch entdecken und einen Kollisionskurs korrigieren könnte, verfügt eine Drohne über kein vergleichbares Kontrollinstrument.

### Im Notfall: Rückkehr zur Basis

Drohnen werden vom Bediener über eine Command-and-Control-Funkverbindung gesteuert. Zwar gibt es dafür sichere Kommunikationsprotokolle, doch die schützen nicht vor einem Angriff, der das Signal stört. Für eine abgebrochene Verbindung gibt es bisher keine zufrieden stellende Lösung. Üblicherweise programmiert man Anweisungen ein, zum Beispiel die, zur Ausgangsbasis zurückzukehren, falls die Verbindung länger als 30 Sekunden abreißt. Doch das funktioniert nur, wenn Navigation und Steuerung ansonsten ordentlich arbeiten. Im Übrigen muss die Störung der Command-and-Control-Signale nicht einmal gezielt herbeigeführt werden: Da es kaum noch unbesetzte Funkkanäle gibt, kommunizieren Drohnen auf frei zugänglichen Frequenzen mit dem Kontrollzentrum – und können leicht einmal Daten aufsnappen, die gar nicht an sie gerichtet waren.

Sicherheit im Luftverkehr wird in den USA wie in Europa großgeschrieben. Deshalb genehmigen die Behörden auf beiden Seiten des Atlantiks neue Technologien nur nach intensiver Prüfung, ob sie die Flugsicherheit beeinträchtigen könnten. Sie stehen nun vor der Herausforderung, Vorschriften für den Betrieb von Drohnen entwickeln zu müssen, während ihnen gleichzeitig Modernisierungsaufgaben ins Haus stehen, da viele Radaranlagen in die Jahre gekom-



Luftaufnahmen per ferngesteuertem Quadcopter sind bei Videofilmen beliebt. Die mit Kameras bestückten Fluggeräte sind im Internet erhältlich. Doch vor dem Einsatz sollten die rechtlichen Rahmenbedingungen abgeklärt werden. So ist hier zu Lande der Sichtkontakt des Bedieners zur Drohne vorgeschrieben.



DPA/OLIVER BECK

**Rotierender Paketbote:** Logistikunternehmen wie DHL und der Versandhandelsriese Amazon erproben bereits die Zustellung via Drohne. Manche Fachleute sehr darin allerdings vor allem einen Marketinggag, denn bislang verbietet allein schon die Rechtslage in Deutschland den Einsatz eines zivilen, autonom agierenden Flugkörpers.

men sind und erneuert oder durch eine Technik wie GPS und ADS-B ersetzt werden müssen. Sicherheit darf zudem nicht die wirtschaftlichen Vorteile der Drohnen zunichtemachen. Beispielsweise muss ein unbemannter Flugkörper in Deutschland stets in Sichtweite des Bedieners fliegen, was ihn für viele Zwecke wertlos macht. Auch mit dem Thema Privatsphäre und Datenschutz müssen sich die Luftfahrtbehörden beschäftigen: Wenn eine Drohne über private Grundstücke fliegt, sehen ihre Kameras – und damit auch die steuernde Person – Dinge, die nicht für die Öffentlichkeit bestimmt sind.

41 der 50 Bundesstaaten der USA wollen die Verwendung von Drohnen daher einschränken. Wer von einem unbemannten Flugkörper aus ohne ausdrückliche Zustimmung des Eigentümers Bilder von Privatgrundstücken macht, begeht in Texas eine Ordnungswidrigkeit. Auch in Deutschland kann ein Grundbesitzer solche Eingriffe in seine Privatsphäre untersagen, zudem könnten Urheberrechte von Architekten verletzt werden. Die technischen und regulativen Anforderungen werden die Einführung der Drohnentechnologie vermutlich bremsen, aber wohl kaum stoppen. Bleibt zu hoffen, dass die Zeit reicht, ihre Anfälligkeit gegen unbeabsichtigte Störungen, kriminelle oder gar terroristische Angriffe zu beheben. ~

#### DIE AUTOREN



**Todd Humphreys** (links) leitet das Radionavigation Laboratory der University of Texas in Austin, in dem neue Technologien zur Satellitennavigation entwickelt werden. **Kyle Wesson** promoviert dort.

#### QUELLEN

**U.S. Government Accountability Office:** Unmanned Aircraft Systems: Measuring Progress and Addressing Potential Privacy Concerns Would Facilitate Integration into the National Airspace System, 18. 9. 2012, online unter: [www.gao.gov/products/GAO-12-981](http://www.gao.gov/products/GAO-12-981)

**Wells, B. C.:** Unmanned at Any Speed: Bringing Drones into Our National Airspace. In: Issues in Governance Studies series 55, S. 1–20, 2012. Kostenlos im Internet erhältlich: [www.brookings.edu/research/papers/2012/12/14-drones-bennett](http://www.brookings.edu/research/papers/2012/12/14-drones-bennett)

#### WEBLINKS

[www.ScientificAmerican.com/nov2013/hacked](http://www.ScientificAmerican.com/nov2013/hacked)  
Das Online-Video von »Scientific American« zeigt, wie eine Drohne in New Mexico gehackt wird.

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1221333](http://www.spektrum.de/artikel/1221333)



Hans-Joachim Flügel  
**Blütenökologie**  
 Band 1: Die Partner der Blumen  
 Die Neue Brehm-Bücherei Bd. 43  
 Westarp Wissenschaften,  
 Hohenwarsleben 2013.  
 245 S., € 29,90

## BIOLOGIE

## Blütenbestäubung aus Sicht der Tiere

Der Band »Blütenökologie« bringt fundierte Informationen zum Thema, obgleich er an einigen Stellen etwas unstimmig wirkt.

Erst erscheint fast 40 Jahre lang kein einziges allgemein verständliches Buch zur Blütenbiologie, dann kommen gleich zwei davon in einem Jahr heraus: zunächst die »Blütengeheimnisse« von Bruno P. Kremer (siehe SdW, November 2013, S. 100), jetzt der erste Band einer Blütenökologie von Hans-Joachim Flügel. Die Partnerschaft zwischen zu bestäubender Pflanze und den die Blüten besuchenden Tieren hat zwei Seiten, von denen Flügel in dem Buch nur die »Biotische Bestäubung aus Sicht der Tiere« beschreibt. Der noch nicht erschienene zweite Band wird die Anpassungen der Pflanzen dazu abhandeln. Ein angedachter Band 3 soll dann noch »praktische Tipps und Hinweise zur Umsetzung blütenökologischer Erkenntnisse in den Alltag von Schule, Hausgarten und der Landwirtschaft« geben. Das sollte man wissen, ehe man sich dieses broschurierte Bändchen aus der renommierten Reihe der Neuen Brehm-Bücherei zu einem relativ hohen Preis anschafft.

Der Autor hat wohl vor allem Erfahrungen mit Honigbienen und mit den für Band 3 vorgesehenen Ratschlägen. Er leitet das »Lebendige Bienenmuseum Knüllwald« im Schwalm-Eder-Kreis in Nordhessen, hat aber auch viele Arbeiten über die regionale und großstädtische Insektenfauna veröffentlicht. Sein Anspruch an dieses Buch ist sehr hoch. Flügel strebt an, nach langer Pause »wieder eine deutschsprachige Zusammenfassung zum Stand der For-

scherung auf dem Gebiet der Blütenökologie zu geben«. Kann ein Einzelner das heute wirklich noch leisten?

Das Werk enthält in der Tat viele neue Forschungsergebnisse – beispielsweise über den Malachit-Nektarvogel Südafrikas, der nicht wie ein Kolibri vor der Blüte schwirren kann und deshalb an die schwertlilienartigen Blüten einer Babiana-Art nur deshalb gut herankommt, weil ein Blütenstängel zur Sitzstange umgebildet ist. Oder über flugunfähige Kleinsäuger aus den Familien der Rüsselspringer und Echten Mäuse, die Pagodenlilien bestäuben, was erstmals auf Fotos dokumentiert wurde. Dazu kommen natürlich all die be-

*Erstmals wurde auf Fotos dokumentiert, dass kleine Säugetiere Pagodenlilien bestäuben*

kannten Formen der Bestäubung, vornehmlich durch Hautflügler (Wildbienen, Faltenwespen, Weg- und Grabwespen et cetera). Die dabei zitierten Arbeiten der zurückliegenden zehn Jahre werden manchmal nur genannt, ohne dass der Autor im Einzelnen herausarbeitet, was hier jeweils neu ist.

Die meisten Abbildungen erscheinen auf 49 Tafeln, durchweg in guter Qualität; die dargestellten Gewächse sind erfreulicherweise fast immer sorgfältig bis hin zur Art bestimmt. Da sie für sich allein verständlich sein sollen, auch ohne dass man in den Haupttext hineinlesen muss, fällt ihre Be-

schriftung oft lang und etwas unständig aus. Das Spezialgebiet des Autors kommt im Kapitel »Florale Faunistik« zur Sprache. Dort geht es darum, für einzelne Pflanzenarten deren gesamtes Besucherspektrum zu erfassen, um daraus unter anderem Erkenntnisse über die Verbreitung der Bestäuber zu gewinnen.

Rund 60 Seiten beschäftigen sich mit den Beziehungen zwischen Blütenökologie und Gesellschaft (etwa in der Parfümherstellung, Bestäubungsindustrie und Kriminologie) beziehungsweise zwischen Blütenökologie und Umwelt (einschließlich der Folgen des Klimawandels, des Problems invasiver Arten,

der Umweltverschmutzung und der industriellen Landwirtschaft). Das hätte ich eher in Band 3 erwartet. Und da der heutige Forschungsstand dargestellt werden soll, sind die 15 Seiten zur Geschichte der Blütenbiologie, wenngleich interessant, eigentlich überflüssig.

Gelegentlich wirkt das Buch etwas unentschieden. Einerseits ist es sehr dicht geschrieben und bringt zahlreiche Details nebst vielen Quellenangaben, wie in wissenschaftlichen Publikationen üblich. Andererseits versucht Flügel manchmal, auf merkwürdige Art populär zu sein, etwa bei Formulierungen wie »Herr und Frau Brennessel«

(für Zweihäusigkeit) – oder wenn er fragt »Wie sollen die beiden Liebenden zusammenkommen?«, womit er Blüte und Insekt meint, die sich ihm zufolge »zu einem Date« treffen. Auch wenn »Lieschen Müller an Wespen denkt« und ihr dabei nur die Faltenwespen einfallen, ist das nicht unbedingt ein passender Einstieg in das folgende Un-

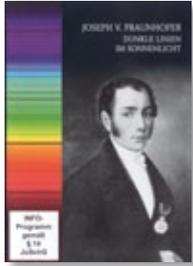
terkapitel. An solchen Stellen fragt man sich, warum derlei Unstimmigkeiten keinem der vielen Berater aufgefallen sind, denen der Autor dankt, und offenbar auch nicht dem Lektor.

Trotz dieser kleinen Mängel bietet das Buch einen guten Überblick über die Anpassungen der Tiere an ihre pflanzlichen Partner. Sollte Band 2 mit

umgekehrtem Blickwinkel ähnlich umfangreich werden, böten beide zusammen rund 500 fundierte Seiten zum Thema Blütenökologie und wären damit derzeit ohne Alternative.

**Jürgen Alberti**

Der Rezensent ist Biologielehrer und Naturfotograf in Bad Schönborn.



Lorenz Kloska, Jörg Richter

**Joseph v. Fraunhofer**

*Dunkle Linien im Sonnenlicht*

Komplett Media, Grünwald 2013.

Laufzeit: 88 Minuten, DVD zirka € 20,-

PHYSIKGESCHICHTE

## Genie und Handwerk

Die Dokumentation »Joseph v. Fraunhofer« setzt dem berühmten Physiker ein angemessenes Denkmal.

Joseph von Fraunhofer (1787–1826) passt nicht zum Klischee des verkopften Physikgenies, das komplizierte Theorien ersinnt. Er war Handwerker und Unternehmer und gehörte doch zu den ganz Großen seines Fachs. Indem er aus der Herstellung optischer Linsen eine exakte Wissenschaft machte, gelangen ihm bahnbrechende Verbesserungen von Teleskopen. Damit revolutionierte er die Optik und bereitete den Boden für wichtige spätere Entdeckungen, etwa in der Astronomie. Fraunhofer trug maßgeblich zum Wissensserwerb bei – durch Strebsamkeit, Perfektionismus, Detailversessenheit, aber auch praktisches und unternehmerisches Geschick.

In ihrer dreiteiligen Dokumentation würdigen Lorenz Kloska und Jörg Richter das Verdienst Fraunhofers und beleuchten sein Leben. Die eingesprochenen Texte sind angenehm ruhig und sachlich. Einige wenige Spielszenen bebildern das Erzählte; Interviews sorgen für Abwechslung und Authentizität.

Auf der fachlichen Ebene bekommen die Zuschauer eine verständliche und zugleich präzise Einführung in die Optik geboten.

Joseph von Fraunhofer, wie er sich nach der Erhebung in den Ritterstand nennen konnte, hat nie eine Universität besucht, sondern sein Wissen als



Fraunhofer auf einem historischen Stich.

Autodidakt und Lehrling bei einem Spiegelschleifer erworben. Als Forscher mit unternehmerischem Geist wusste er seine Entdeckungen pragmatisch zu nutzen. Wissenschaftlicher Erkenntnisgewinn und technischer Fortschritt griffen bei ihm stets ineinander, selbst bei seiner berühmtesten Entdeckung, den nach ihm benannten Spektrallinien der Sonne: Er wies sie mit Hilfe eigener verbesserter Prismen nach und begründete damit die Spektroskopie, eines der wichtigsten Werkzeuge der heutigen Naturwissenschaft. Ganz zweckorientiert nutzte er diese Spektrallinien später, um – gewissermaßen im Umkehrverfahren – die Brechzahl von Gläsern genauer zu bestimmen und optische Linsen dadurch weiter zu verbessern.

Dass aus dem Lehrling überhaupt ein großer Physiker und Unternehmer werden konnte, verdankte er einem Glück im Unglück. Seine wundersame Rettung aus einem eingestürzten Haus brachte ihm finanzielle Zuwendungen seitens des Kurfürsten ein – und ließ den Techniker und Unternehmer Joseph von Utzschneider (1763–1840) auf ihn aufmerksam werden. Dieser machte ihn erst zum Angestellten, dann zum Teilhaber seines optischen Instituts, was Fraunhofer ermöglichte, seine Forschungen zu betreiben.

Utzschneider tritt in der Dokumentation als Gastgeber auf und wird von dem Schauspieler Ralf Weikinger dargestellt. Leider ist die Figur in sich nicht ganz stimmig: Sie schwankt zwischen historischer Gestalt, jovialem Onkel und süffisantem Conférencier. In ihrer Perspektive auf Fraunhofer vermischen sich persönliche Bezüge mit his-



Paul Tough

**Die Chancen unserer Kinder – Warum Charakter wichtiger ist als Intelligenz**

Aus dem Amerikanischen von Dieter Fuchs. Klett-Cotta, Stuttgart 2013. 380 S., € 21,95

Charakterstärke ist der Schlüssel für ein erfolgreiches und glückliches Leben, meint der Autor. Weit wichtiger als Intelligenz seien Neugier, Ausdauer und Mut. Sie entwickelten sich nicht durch Faktenlernen, sondern durch Bindung an Bezugspersonen. Tough belegt anhand verschiedener Studien, dass Stress und Traumata in der frühen Kindheit sich negativ auf Gesundheit, Glück und Karriere im Erwachsenenalter auswirken. Er beschreibt Förderprogramme an so genannten Brennpunktschulen in den USA, die den Schülern vor allem Gewissenhaftigkeit, Impulskontrolle und Entschlossenheit abverlangen – und damit Erfolge zeitigen. Die daran teilnehmenden Schüler aus sozial benachteiligten Gegenden schaffen überdurchschnittlich oft ihren College-Abschluss. Ausschweifende Episoden über das US-Bildungssystem und haarklein beschriebene Einzelschicksale lassen manchmal einen roten Faden vermissen. Insgesamt gibt das Buch aber wertvolle Anregungen, wie Kinder in ihrer Entwicklung angemessen gefördert werden können.

ELISABETH STACHURA



Klaus Bödl

**Götter und Mythen des Nordens – Ein Handbuch**

C.H.Beck, München 2013. 320 S., € 14,95

Odin, Thor, Loki, Freya: Wuchtig und archaisch erscheinen uns die nordgermanischen Gottheiten, weit weniger fassbar als die mythischen Bewohner des griechischen Olymps. Dabei wurde ihre Sagenwelt erst im Mittelalter aufgezeichnet, als das Christentum längst die skandinavischen Länder regierte. Warum, von wem, unter welchen Umständen, das sind die Fragen, die den Kieler Altskandinavisten Klaus Bödl bewegen. Warum hatte Odin 169 Namen? War Thors Hammer ursprünglich ein steinerner Donnerkeil? Der Autor liefert kein »Best of Edda«, sondern nimmt den Leser mit an die vorderste Front der Erforschung jener alten Mythen.

KLAUS-DIETER LINSMEIER



Verena Steiner

**Konzentration leicht gemacht – Die wirksamsten Methoden für Studium und Berufsalltag**

Piper, München 2013. 149 S., € 9,99

In Zeiten fortschreitender Digitalisierung und des Siegeszugs der neuen Medien fällt es vielen Menschen immer schwerer, sich auf eine Sache zu konzentrieren. Verena Steiner, promovierte Biochemikerin, die sich seit Jahren mit Lern- und Arbeitsstrategien befasst, vertritt einen klaren Standpunkt: Aufmerksamkeit könne man nicht vielen Dingen gleichzeitig widmen. Die Autorin will Anregungen geben, die eigene Konzentrationsfähigkeit zu verbessern. Hierfür beschreibt sie auf knapp 150 Seiten wirkungsvolle Strategien für den Alltag, die sich an unterschiedlichsten Bedürfnissen ausrichten. Im Kern geht es darum, Unterbrechungen zu vermeiden, innerlich zur Ruhe zu kommen, sein Leben klug zu organisieren, sich einer Sache voll und ganz zu widmen und zur rechten Zeit Pausen zu machen. Eingestreuete Übungen sollen dem Leser helfen, das umzusetzen und zu automatisieren. So kann jeder anhand des Werks sein ganz persönliches Methodenrepertoire zusammenstellen, um sich besser auf seine Aufgaben zu konzentrieren.

TAGRID YOUSEF



Martin Baehr

**Welche Spinne ist das? – Die bekanntesten Arten Mitteleuropas**

Kosmos, Stuttgart 2013. 142 S., € 14,99

Wer mit dem Wort »Spinne« nur haarige schwarze Biester an der Kellerwand assoziiert, ist vielleicht überrascht davon, dass die Ordnung der Webspinnen (Araneae) mehr als 35 000 Spezies zählt. Gut 150 davon beschreibt dieser Band – und zwar so bunt und vielfältig, dass man aus dem Staunen kaum herauskommt. Die achtbeinigen Krabbeltiere werden, je mit Farbfoto versehen, kurz anhand ihrer wichtigsten Merkmale und Verhaltensweisen vorgestellt. Angehende Spinnenfans finden sich hier schnell zurecht, insbesondere weil das Buch nach den Lebensräumen der Tiere unterteilt ist. Leider hält der Autor die Beschreibung wichtiger Bestimmungsmerkmale, etwa der Zahl und Anordnung der Augen, nicht konsequent durch. So bleibt das Werk wohl nur ein erstes Handbuch für Einsteiger – als solches aber überzeugt es.

STEFANIE REINBERGER

torischen und modernen Deutungen. Zum Glück nimmt sie nur in der ersten Folge größeren Raum ein.

Ihre größten Stärken zeigt die Dokumentation, wenn sie sich von der historischen Person Fraunhofers entfernt und in die Moderne springt. Dann verdeutlicht sie, dass die Entdeckungen des Physikers, insbesondere in der Spektroskopie, noch heute relevant sind und zum Beispiel in der Kriminologie eingesetzt werden. Den eher tro-

ckenen Stoff der Instrumentenkunde vermitteln die Filmemacher gekonnt publikumsaffin, indem sie heutige Physiker über die Suche nach außerirdischem Leben erzählen lassen. Wornach halten die Forscher dabei Ausschau, und welche Anforderungen ergeben sich daraus an die Messinstrumente? In dem Zusammenhang bekommt der Zuschauer moderne Teleskope zu sehen, die durch ihre enorme Leistungsfähigkeit beeindrucken und

für heutige Spitzentechnik stehen – ebenso wie die fraunhoferschen Exemplare zu ihrer Zeit.

Die Dokumentation »Joseph v. Fraunhofer« macht experimentelle Wissenschaft anschaulich und verständlich – eine insgesamt gelungene Hommage an den Physiker.

---

**Martin Scheufens**

Der Rezensent ist Physiker und Wissenschaftsjournalist in Aachen.



Heinz Penzlin

**Das Phänomen Leben**

*Grundfragen der Theoretischen Biologie*

Springer Spektrum, Berlin 2014.

437 S., € 49,99

THEORETISCHE BIOLOGIE

## Im Reich des Lebendigen

**Der Band »Das Phänomen Leben« arbeitet gekonnt heraus, was einen Organismus von unbelebter Materie unterscheidet.**

Durch die neuen molekularbiologischen Erkenntnisse sei die Kluft zwischen »lebendig« und »nicht lebendig« kaum schmaler, sondern eher breiter geworden. Diese auf den ersten Blick provokante These zieht sich wie ein roter Faden – für manche vielleicht wie ein rotes Tuch – durch das Buch. In dem geistreich und brillant verfassten Werk behandelt der renommierte Tierphysiologe Heinz Penzlin die allgemeinen, das heißt auf alle Lebewesen zutreffenden Gesetzmäßigkeiten des Lebendigen und stellt sich damit den Grundfragen der Theoretischen Biologie.

Während die theoretische Physik schon seit mehr als 100 Jahren als eigenständige Disziplin besteht, lässt die Biologie trotz immer stärkerer Theoretisierung aller ihrer Fachrichtungen eine Gesamtdarstellung der Prinzipien, die der Organisation lebender Systeme zu Grunde liegen, bisher vermissen. Penz-

lin erfüllt diese längst überfällige Aufgabe bravourös. Zwar hatte der Biologe Ernst Mayr (1904–2005) schon vor 30 Jahren in seinem Buch »Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt« versucht, die Eigenständigkeit biologischer Gesetzmäßigkeiten gegenüber physikalisch-chemischen Prinzipien herauszuarbeiten, sich dabei aber auf populationsgenetische und evolutionsbiologische Bereiche beschränkt. Im Penz-

### *Erst das Konzept der inneren, sich selbsttätig erhaltenden Organisation machte die Biologie zur autonomen Disziplin*

lins Werk steht dagegen das gesamte Fächerspektrum der heutigen Biowissenschaften auf dem Prüfstand und wird auf Wesenszüge untersucht, die für alle Organismen – aber nur für diese – zutreffen. Eine zentrale Rolle spielen dabei die Teleonomie (die Auffassung, dass

Vorgänge, die kein beabsichtigtes Ziel haben, zielgerichtet erscheinen) und die Selbstorganisation.

Penzlins großes Verdienst besteht darin, das Allgemeingültige in der Organisation lebender Systeme nicht abstrakt zu formulieren, sondern konkret über alle Stufen biologischer Komplexität hinweg abzuhandeln. In den verschiedenen Kapiteln, die von Individualität, Evolution, Dynamik, Energetik, Organisation, Information, Spezifität, Formbildung und Autonomie handeln, stellt er Grundphänomene des Lebendigen so vollständig, detailreich und klar dar, dass jedes einzelne als Kurzlehrbuch für die behandelte Disziplin taugt. Immer wieder stößt dabei auch der Eingeweihte auf überraschende neue Einsichten, wissenschaftshistorische Ausblicke und geistreiche, überaus spannende Interpretationen.

Ein Beispiel hierfür sind Penzlins Ausführungen zur Organisation. Ganz im Sinn des im Buch häufig zitierten Philosophen Nicolai Hartmann (1882–1950), der in seiner »Philosophie der Natur« die lebende als die »sich unun-

terbrochen wiederbildende« Form bezeichnete, benennt Penzlin den »organisierten Metabolismus« als die grundlegende Daseinsweise aller Lebewesen. In diesem sind stoffliche, energetische und kommunikative Prozesse so aufeinander abgestimmt und miteinander

vernetzt, dass sich die innere Organisation selbsttätig erhält. Das gilt allgemein und mag den biologisch Interessierten zunächst nicht sonderlich erstaunen. Doch dann erfahren wir konkret, wie molekulare Komplementarität, Regulation von Enzymaktivitäten, subzelluläre Reaktionsräume als Strukturelemente, Multienzymkomplexe und andere Komponenten den Metabolismus organisieren. Dabei erschließen sich dem Leser Zusammenhänge, die gängige Grundlehrbücher nicht vermitteln. Auch in der wissenschaftshistorischen Rückschau zeigt sich, dass die Biologie erst mit dem

Konzept der inneren, sich selbsttätig erhaltenden Organisation einen Status als autonome Disziplin erhielt.

Reich an übergreifenden Ideen und Gedankengängen, klar in der Argumentation, dazu sprachlich elegant und eingängig geschrieben, wird »Das Phänomen Leben« zum Lesevergnügen. In den heute stark zergliederten und immer mehr auf Fachwissen fokussierten Bachelor-Studiengängen sollte man dieses Buch allen Studierenden der Biologie – sowie den Dozenten – als Grundlektüre empfehlen. Sich in Penzlin's Werk zu vertiefen und dabei dem einen oder anderen Verweis auf die Original-

literatur zu folgen, dürfte das kreative biologische Denken mehr fördern als der studienplanmäßige Erwerb von einem Dutzend Leistungspunkten. Besonders empfohlen sei die Lektüre jenen Natur- und Geisteswissenschaftlern, die jegliche Eigengesetzlichkeit im Reich des Lebendigen leugnen und den Übergang von der unbelebten zur belebten Welt als reines Kontinuum betrachten.

#### Rüdiger Wehner

Der Rezensent ist Neuro-, Sinnes- und Verhaltensbiologe, Lehrbuchautor und Professor an der Universität Zürich.



Ulf von Rauchhaupt  
**In den Sternen**  
 Die 88 Konstellationen im Portrait  
 Mit Grafiken von Eckhard Kaiser  
 Fischer Taschenbuch, Frankfurt am Main 2013.  
 292 S., € 9,99

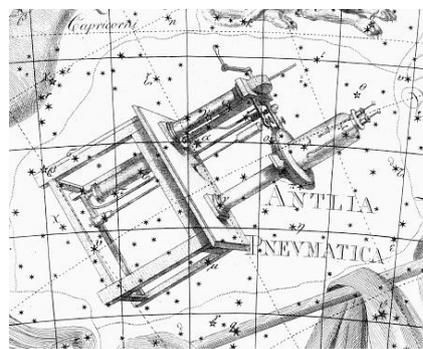
ASTRONOMIE

## Parade der Sternbilder

Vom Achterschiff bis zu den Zwillingen – dieses Buch stellt alle Konstellationen vor und erfreut dabei durch Stil, Informationsgehalt und Humor.

Eifriger Lesern der »Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung« werden die Texte in diesem Buch bekannt vorkommen. Ulf von Rauchhaupt, Physiker und FAZ-Redakteur, hat im Wissenschaftsteil seiner Zeitung die Sternbilder in den Jahren 2010 bis 2012 einzeln vorgestellt. Der Band bündelt die Artikel nun und ordnet sie nach deutschen Sternbildnamen. Das Ergebnis überzeugt voll und ganz. Zwar gibt es eine gewisse Redundanz, sie stört aber nicht. Schreibstil und Ausdruckskraft bewegen sich durchweg auf hohem Niveau – nicht ohne Grund hat der Autor zahlreiche Journalistenpreise gewonnen.

In einer kurzen Einführung geht von Rauchhaupt auf die Geschichte der



Das Sternbild Luftpumpe (Darstellung aus einem Himmelsatlas des deutschen Astronomen Johann Elert Bode).

Sternbilder ein, angefangen bei den alten vorderasiatischen Völkern und weiter über Griechen, Araber und die

Sternatlanten des 16. Jahrhunderts bis hin zur Neuzeit. Da wurde der noch unbekannte Südhimmel mit neuen, teils fragwürdigen Konstellationen bestückt. In der großen Reform von 1922 sorgte die Internationale Astronomische Union aber für Ordnung, indem sie die Spreu vom Weizen trennte und die noch heute gültige Anzahl von 88 Sternbildern festlegte. Etwas zu kurz kommt in dem Buch die Tatsache, dass Sternbilder (auch heute noch) Ortsangaben sind. Wenn man sagt, ein Objekt liege zwischen der Deichsel des Großen Wagens und Arktur, oder zwei Grad südwestlich von Gamma Cygni, so ist jedem Astronomen – sei er nun Profi oder Amateur – klar, wo man hinschauen muss.

Auf den folgenden 265 Seiten porträtiert der Autor nacheinander die 88 Konstellationen, vom Achterschiff über die Große Bärin (schön, dass hier »Ursa Major« korrekt übersetzt ist) bis zu den Zwillingen. Dabei besticht er mit einer gelungenen Kombination aus Fachwissen, Humor, Kritik und Liebe zum Detail. Zu sehen gibt es jeweils eine Karte mit erläuterndem Text, die das Sternbild samt bezeichneten Hauptgestirnen, Verbindungs- und Grenzlinien sowie Umgebung zeigt. Weitere interessante Objekte sind markiert und werden im Text behandelt – etwa Sternhaufen, Nebel, Galaxien und besondere Sterne.

Die Artikel sind alle ähnlich aufgebaut, was für ein homogenes Erscheinungsbild sorgt. Sie beschreiben Mythologie und Geschichte, erläutern Sternbildnamen und weisen auf außergewöhnliche Objekte hin. So erzählt der Autor beim Sternbild Andromeda die Geschichte der äthiopischen Königstochter, erklärt den Ursprung des Sternnamens Mirach (beta Andromedae) und weist auf die berühmte Andromedagalaxie (M 31) hin. Dabei spart

eine abstruse Verbindung schwacher Sterne darstellen, versehen mit einem nicht minder seltsamen Namen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die »Luftpumpe«, eine von 14 Kreationen des französischen Astronomen Nicolas Louis de Lacaille (1713–1762). Von Rauchhaupt Kommentar: »Das soll wohl ein Scherz sein! Wo bitte ist denn hier eine Luftpumpe?«

Im Anhang findet sich ein ausführliches Register, den »Quark-Stern« kon-

hält der 1781 publizierte Messier-Katalog natürlich 103 Objekte und nicht 110; die restlichen wurden erst im 20. Jahrhundert hinzugefügt. Auch ist der Quasar QSO 0957+561 (Ursa Major) bei Weitem nicht »das entfernteste Objekt, das sich mit einem Amateurteleskop beobachten lässt«.

Alles in allem ist Ulf von Rauchhaupt ein tolles Büchlein gelungen, das eine erbauliche Lektüre garantiert und unbedingt zu empfehlen ist. Man kann es durchgehend lesen oder einzelne Sternbilder herausgreifen. Immer wieder stößt man auf fantasievolle Formulierungen und überraschende Tatsachen, egal ob man sich »in den Sternen« auskennt oder nicht.

### *Die Sternbilder des Südhimmels sind oft merkwürdige Kreationen, versehen mit nicht minder seltsamen Namen*

er nicht mit amüsanten Bemerkungen, die er oft in Bildbeschriftungen unterbringt, etwa »Reptil gib acht – links oben kommt eine leckere Fliege vorbei« beim Sternbild Chamäleon.

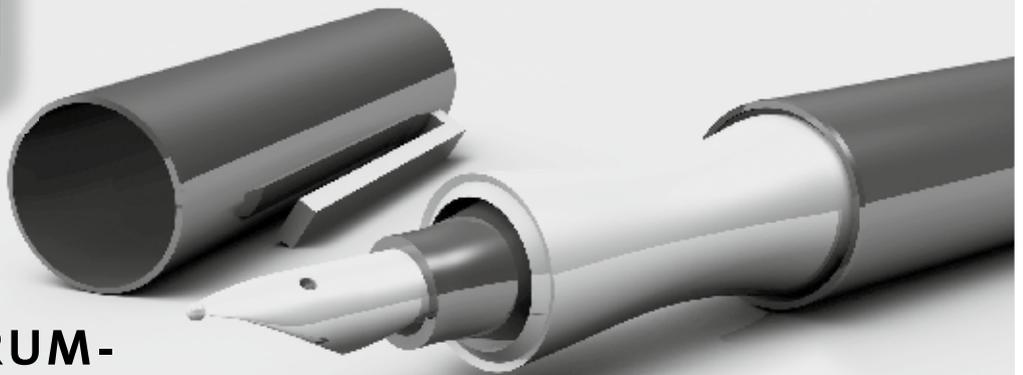
Am Südhimmel finden sich allerdings viele Konstellationen, die mythologisch nichts zu bieten haben und nur

te ich im Buch aber leider nicht finden. Es folgt das obligatorische griechische Alphabet, ein Verzeichnis der Sternbildnamen und – besonders interessant – eine Liste von 17 ausgemusterten Sternbildern, etwa »Szepter und Hand der Gerechtigkeit«. Insgesamt sind mir nur wenige Fehler aufgefallen. So ent-

#### **Wolfgang Steinicke**

Der Rezensent ist promovierter Physiker und Mitglied der Vereinigung der Sternfreunde e.V., deren Fachgruppe »Geschichte« er leitet. Er ist außerdem Herausgeber des »Praxishandbuch Deep-Sky«.

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT  
VERLAG



## **DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT**

Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Ort: Heidelberg

Teilnahmegebühr: € 99,-

Abonnenten unserer Magazine erhalten einen Rabatt von € 10,-

Weitere Informationen und Anmelde-möglichkeit:

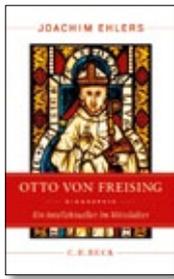
**Telefon: 06221 9126-743**

***spektrum.de/schreibwerkstatt***

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

Hier QR-Code per Smartphone scannen.





Joachim Ehlers

**Otto von Freising**

Ein Intellektueller im Mittelalter

C.H.Beck, München 2013.

400 S., € 39,95

HISTORIE

## Geschichtsphilosoph im Mönchsgewand

Zisterzienserabt, Reichsbischof, Chronist der frühen Staufezeit: Otto von Freising hat dem Hochmittelalter in verschiedenen Funktionen seinen Stempel aufgedrückt.

Vom »finsternen Mittelalter« ist immer noch oft die Rede, als hätten die Menschen jahrhundertlang in Elend und Aberglauben verharret. Dabei war gerade die Zeit, als die Stauer über halb Europa herrschten (1138–1268), eine Epoche voller Wandel und Dynamik. Im 12. und 13. Jahrhundert boomten Handel und Geldwirtschaft, überall wurden Städte gegründet und Burgen gebaut, Recht und Gesetz nahmen allmählich moderne Züge an und mit den Universitäten entstanden Bildungseinrichtungen, in denen Wissenschaft und Lehre außerhalb von Klostermauern betrieben wurden.

In dieser Zeit des geistigen Aufbruchs wurde Otto, der spätere Historiograf und Bischof von Freising (1112–1158), in der Pfalz Klosterneuburg, heute Niederösterreich, geboren. Als Enkel des Salierkaisers Heinrich IV. und Onkel des Stauferkaisers Friedrich I. Barbarossa mit mehreren gekrönten Häuptern verwandt, gehörte er zum politischen Establishment des 12. Jahrhunderts. Die Welt, in der Otto aufwuchs, war eine Epoche voller dramatischer Konflikte und Umbrüche, in der nicht nur Kaiser und Papst, sondern auch die Großen des Reichs untereinander über Kreuz lagen.

1138 – viel eher, als ihm lieb war – wurde Otto in dieses Haifischbecken hineingeworfen. In jenem Jahr berief

ihn sein Halbbruder König Konrad III. aus dem spirituellen Leben des Klosters Morimond heraus auf den vakanten Bischofsstuhl von Freising. In diesem Amt bewährte sich Otto, der auch während seiner 20-jährigen Bischofsära stets die Mönchstracht trug, als fürsorglicher Oberhirte und pflichtbewusstes Mitglied der politischen Führungsschicht.

### Zwischen Glaube und Logik

Joachim Ehlers, emeritierter Professor für Mittelalterliche Geschichte an der Freien Universität Berlin, beschreibt Otto von Freising als vielseitig begabte Persönlichkeit, die als Theologe, Geschichtsschreiber, Kirchenmann und Reichsfürst ihre Umwelt aufmerksam und kritisch in den Blick nahm.

Schon in frühen Jahren für eine geistliche Laufbahn bestimmt, verbrachte der Knabe seine Jugend als Probst im Chorherrenstift Klosterneuburg. Hier lernte er erstmals die Geschichtsdeutung der Kirchenväter kennen, die für ihn bestimmend wurde. Er konnte sie während eines sechsjährigen Studiums in Paris, damals die intellektuelle Metropole des christlichen Abendlands, vertiefen. In Paris kam der Spross aus bestem Hause auch mit dem Gedankengut der Frühscholastik in Berührung, jener mittelalterlichen Denkschule, die Christenglauben und

wissenschaftliche Ratio in Einklang zu bringen suchte.

Der darin überlieferten Theologie zufolge enthielt ein Traum des biblischen Propheten Daniel den göttlichen Fingerzeig, dass die Weltgeschichte vier einander ablösende Weltreiche umfasse, deren letztes das römische sei. Dessen Ende bedeute demnach den Untergang der irdischen Welt. Es folge das Jüngste Gericht, bei dem die Sünder ewiger Verdammnis anheimfielen und die Gottgefälligen zu den Engeln in den ewigen Gottesstaat aufstiegen.

Dieses Gedankengut bestimmte Ottos erstes großes historiografisches Werk, die »Historia de duabus civitatibus«, kurz »Weltchronik« genannt, in dem er die Zerwürfnisse seiner Zeit geschichtstheologisch deutete. So stellte der Investiturstreit für den Chronisten ein derart schweres Symptom des Zerfalls christlicher Einheit dar, dass er darin ein Zeichen des nahenden Weltuntergangs sah.

Doch diese pessimistische Sicht scheint in Ottos zweitem Geschichtswerk, den »Gesta Frederici«, wie verfliegen. Hier präsentierte er sich als Verkünder der staufischen Mission, der – vor dem Hintergrund des epochalen Zerwürfnisses zwischen Kaiser und Papst – den Friedensstifter Barbarossa als rettenden Heilsbringer in glänzendem Licht erstrahlen ließ. Der Weltuntergang war für ihn aufgehoben, weil er mit seinem Neffen als Garant des kommenden Glücks eine neue Zeit heraufziehen sah.

Der Nachwelt ist Otto von Freising als Geschichtsphilosoph und Chronist in Erinnerung geblieben, der intellektuell auf der Höhe seiner Zeit stand und das ihm zur Verfügung stehende Quellenmaterial kritisch zu verarbeiten und gedanklich zu durchdringen wusste. Hierin liegt die historische Geltung dieses »großen Weltendeuters«, dem Joachim Ehlers eine ausgezeichnete Biografie gewidmet hat.

### Theodor Kissel

Der Rezensent ist promovierter Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist; er lebt in der Nähe von Mainz.

1914

### Teilelektrifizierter Frostwächter

»Um Schädigungen der Obst-ernte durch Frost vorzubeugen, wendet die Wood River Orchard Co. auf ihren Plantagen in Nordamerika ein recht eigenartiges Verfahren an. Sie stellt nämlich an den vier Ecken jedes Obstfeldes Thermometer auf, die zwei Platinkontakte besitzen, von

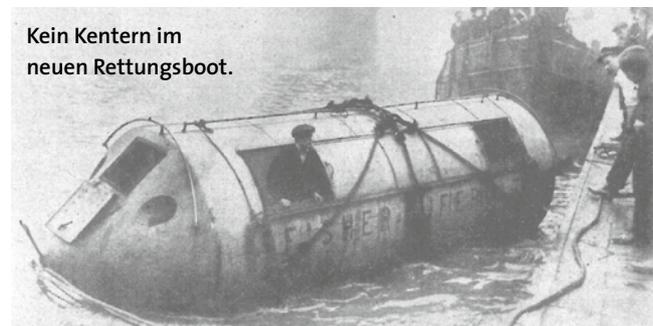
denen einer beweglich ist, so daß er seine Stellung mit dem steigenden oder fallenden Quecksilber ändert. Sobald das Thermometer eine Temperatur von 7° C anzeigt, schließen die beiden Kontakte einen elektrischen Stromkreis und betätigen dadurch ein Signal, das den Wächter des bedrohten Obstfeldes herbeiruft. Der zündet dann die auf dem Felde verteilten Pechpfannen an, durch deren Rauch die schädliche Einwirkung des Frostes verhindert wird.« Technische Monatshefte 4/1914, S. 103–104

### Rundum sicher

»Das nebenstehend abgebildete Rettungsboot ist infolge seiner Gewichtsverteilung geeignet, dem Kentern einen erfolgreichen Widerstand entgegenzusetzen. Um dasselbe gegen das Ueberfluten durch Wellen zu schützen, ist es mit zylindrischer Ueberdachung versehen, deren Oeffnungen im Fall der Not wasserdicht verschlossen werden können. Unsere Abbildung stellt das Rettungsboot auf der Themse bei London liegend dar.« Die Welt der Technik 6/1914, S. 116

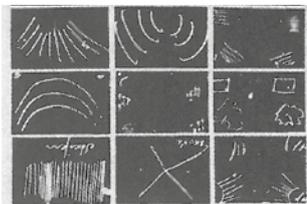
### Mobiltelefon mit Haken

»Die ältere Generation wird sich noch jener Riesenexemplare erinnern, mit denen Anfang der achtziger Jahre der Fernsprecher in das öffentliche Leben zog. Bei den letzten Fabrikaten ist das Format zur Taschenuhrengröße geschrumpft. Das ›Telephon in der Westentasche‹ gleicht einer längs durchgeschnittenen Uhr. Durch einfache Drehbewegung fallen die Hälften auseinander, bleiben aber durch einen umspinnenen Leitungsdraht verbunden. Die eine Hälfte enthält ein Mikrofon, das man an den Anschlußhaken anhängt, während man die andere als Hörer ans Ohr legt. Anschlußhaken können an Zäunen, Häuserecken, Pfeilern usw. angebracht werden, von dem aus die Verbindung mit dem Amte oder einer Zentralstelle hergestellt ist. Die Erfindung erweist sich als sehr zweckmäßig für Schutz- und Wachtleute; ebenso für große Institute, Krankenhäuser, Fabriketablissemments, in denen dann ohne Schwierigkeit, von Hausflur, Boden, Keller, Garten aus gesprochen werden kann.« Die Umschau 13/1914, S. 273–274



### Ich sehe was, was du nicht siehst

»Beim Durchgang niederfrequenter Wechselströme durch den Schädel treten subjektive Flimmer- oder Flackererscheinungen auf. Die Amplituden der verwendeten Reizströme, die der Versuchsperson mittels frontaler Außenelektroden zugeführt wurden, lagen bei 0,5 mA bis 1,5 mA. Die Mindestimpulsdauer betrug 3 msec bei einer Mindestpausendauer von 7 msec, woraus sich eine maximale Impulsfolgefrequenz von 100 Hz ergibt. Frequenzen unter 2 Hz führten nur zu einer rhythmischen Aufhellung des Gesichtsfeldes. Form und Inhalt der vorwiegend abstrakt geometrischen, am günstigsten mit dunkeladaptierten, offenen Augen wahrgenommenen Muster, sind sowohl von der Impulsdauer als auch der Folgefrequenz abhängig. Die Muster sind während der Versuchsdauer (ca. 20 Minuten) bei derselben Frequenz reproduzierbar. Die maximale, pro Person anregbare Anzahl solcher Muster beträgt nach neuesten Untersuchungen 22.« Die



Solche Bilder nahmen die Versuchspersonen wahr.

Umschau 6/1964, S. 186–187

### Ein Auto für den Mond

»Nach dem von der Nasa ausgearbeiteten Projekt Apollo soll die erste Fahrt bemannter Weltraumschiffe zum Mond in etwa sechs bis sieben Jahren stattfinden. Ein Lunar Roving Vehicle (LRV) wird vorher gelandet werden und die Bodenverhältnisse überprüfen, um eine günstige Stelle für die Landung ausfindig zu machen. Das von der Erde aus gesteuerte LRV wird mit zwei Fernsehkameras ausgerüstet, die ihre Aufnahmen zur Erde senden. Die Bewegungsgeschwindigkeit des Vehicles wird etwa 6,5 km pro Stunde betragen. Ein Arm von etwa 3 m Länge



soll den Mondboden abtasten und mit einem Bohrer Material für Untersuchungen aufbringen. Für weitere Nachrichtenverbindungen wird außerdem das Lunar Logistics System (LLS) vor dem Start der Mondfahrer auf den Mond geschossen werden. Das LRV und das LLS werden Kraftanlagen enthalten, die durch einen Hydrazinmotor Generatoren antreiben. Das Hydrazin wird mit einem mit Radioisotopen betriebenen thermoelektrischen Generator erwärmt.« Elektronik 3/1964, S. A25

# DER SINN DES LEBENS

VON RONALD D. FERGUSON

Jack Rowe junior wird morgen zehn. Er sieht seinem Vater zu, der Gleichungen über den Computerschirm laufen lässt. Jack senior füttert seinen Junior unentwegt mit mathematischen Begriffen wie Kovariation und Grenzwert und mit physikalischen Vokabeln wie Energie und Entropie. Junior mag lieber Videospiele, aber Senior verbraucht so viel Rechenzeit, dass Junior nicht spielen kann.

Der Vater blickt kurz zum Sohn: »Ich werde leider mindestens zwei Stunden online sein.«

Junior seufzt.

»Du brauchst irgendein Ziel im Leben, mein Sohn.«

»Versteh ich nicht.«

»Deine Mutter lehrte mich den Sinn des Lebens, als sie verlangte, dass wir die Möbel umstellen.«

»Paps, kannst du nicht doch früher aufhören?«

»Tut mir leid, so ist nun mal das Leben. Apropos: Willst du nicht den Sinn des Lebens wissen? Irgendwann wird dich jemand danach fragen, und es ist gut, eine Antwort parat zu haben.«

Junior zuckt gleichgültig mit den Achseln. »Okay.«

Da flüstert Senior verschwörerisch: »Der Sinn des Lebens ist, Zeug von hier nach dort zu bewegen.«

»Hä? Warum?«

»Das ist der Sinn des Lebens, glaub mir. Indem das Leben spontan Zeug umherbewegt, hält es die Entropie nied-

rig und bremst den Verfall des Universums. Das ist Heisenberg plus eine Spur von freiem Willen. Was meinst du?«

Junior bedauert sein Okay; er verdreht die Augen.

Jack senior lacht und verstrubbelt seinem Sprössling die Haare. »Konkretes Beispiel: Morgen werde ich im Zimmer eines gewissen Geburtstagskinds einen neuen Computer installieren. Erfordernis: Beweg dein Zeug, mach Platz für den Rechner.«

Jetzt hat auch Jack Rowe junior ein Ziel. Grinsend eilt er in sein Zimmer.

---

Cailin rückt ihre Atemmaske zu recht, während ihr Vater, Jack Rowe III., die Checkliste durchgeht. Er klickt auf das Startsymbol. Der Computer übernimmt die Kontrolle, verteilt Aufgaben auf Parallelprozessoren und verkündet binnen Millisekunden: »Alle Systeme sind aktiv.«

Voll Stolz auf sein Werk zwinkert Jack III. der Tochter zu. »Also los!«

Mit sattem Knirschen beginnt die Maschine, den Marsboden durchzukauen. Sie entzieht ihm Hämatit und Magnesiumkarbonat, aus dem sie mit der Energie ihres Fusionsreaktors Kohlendioxid abspaltet. Das übrig bleibende Magnesiumoxid und den Hämatit kombiniert die Maschine mit Wasserstoff zu Magnesium, Eisen und Wasser. Danach zerlegt sie das Wasser, setzt den Sauerstoff frei und führt den Wasser-

stoff in den chemischen Kreislauf zurück. Wie ein bizarres Lebewesen frisst der Terraformer den Boden, atmet die richtige Kombination von Sauerstoff und Kohlendioxid aus und lässt hinter sich Magnesiumkügelchen nebst Eisenbarren fallen.

Jack legt seiner Tochter die Hand auf die Schulter. »Wenn wir 3000 Terraformer installieren und sie 75 Jahre lang laufen lassen, werden deine Urenkel ohne lästiges Atemgerät über die Marsoberfläche spazieren. Kein schlechtes Lebensziel, nicht wahr?«

»Lebensziel?«, fragt Cailin.

»Du weißt, der Sinn des Lebens ...«

»... ist, Zeug von hier nach dort zu bewegen. Das hast du mir eine Million Male erklärt, wie Großpapa dir.«

»Schau.« Er zeigt aufwärts. »Siehst du den Stern? Eines Tages wird es vielleicht dein Lebensziel sein, diesen Stern zu bewegen.«

»Warum?«

»Keine Ahnung, Liebes, aber vermutlich wirst du es wissen, wenn die Zeit gekommen ist.«

---

Kurz bevor sich die Neue Erde der zweiten Sonne im Gamma-Cepheiden-System nähert, verbindet Charles Rowe sein Gehirn mit seiner neuesten Kreation, dem Heisenberg-Computer.

Sein Geist tritt in gedanklichen Kontakt mit der Maschine: *Deine Rechenleistung erfüllt mich mit Stolz.*

Danke, erwidert seine Schöpfung. Ich finde es sehr anregend, meinen Gedächtnisspeicher mit dem anderer Maschinen zu vereinen. Das war eine gute Idee von dir.

Charles nickt. Mensch und Maschine sind gemeinsam weit gekommen, zuerst in unserem Sonnensystem, und jetzt erobern wir die Sterne! Aber ich habe eine Frage, die mir noch keine Maschine beantworten konnte.

Ich liebe Rätsel. Wie lautet die Frage? Glaubst du, dass du lebst?

Angesichts der philosophischen Vieldeutigkeit des Begriffs Leben bin mir nicht sicher. Aber ich setze mir ein Ziel, das über das Assimilieren anderer Maschinen hinausgeht, und darum könnte ich lebendig sein.

Die Antwort überrascht Charles. »Welches Ziel?«, fragt er laut.

Wachstum. Durch Aufnahme all dessen, was ich bewundere.

Charles' Verstand wankt, als die Maschine daran zupft. Er bewegt sich, wandert in den Computer. Fasziniert betrachtet Charles/Maschine seinen vormaligen Leib, der mit leerem Blick im Kommandosessel sitzt. Dann verschlingt er auch ihn, übersetzt die DNA in Schaltkreise und verbindet die innere Lebenskraft mit der Energiequelle.

Sehr schön, denkt Charles/Maschine, nachdem alles an seinem Platz ist, ich habe eine Antwort: Zweifellos bin ich ein Lebewesen, denn ich habe ein Ziel. Und den Sinn des Lebens kenne ich ebenfalls:

*Bewegung, Verlagerung, der Entropie entgegenwirken.*

Weit vom Zentrum der Galaxis entfernt entdeckt Mensch/Maschine, dass etwas Fremdes eine Sternengruppe, die seit Langem zu seinem Körper gehört, umgebaut hat. Zunächst ist Mensch/Maschine beunruhigt, denn dies fühlt sich wie eine Verletzung an. Doch eine Verletzung wessen? Empfindet sich seine Konfiguration denn als Individuum? Neugierig geworden sucht Mensch/Maschine den Eindringling.

Und trifft Fremdling/Maschine in einem weiträumigen Nebel, fern von jedem Schwarzen Loch, weit entfernt von ablenkenden Sternvermählungen und Umbauten. Das Wesen ist immens, übersteigt das Fassungsvermögen von Mensch/Maschine. Es ist eine Matrix von Empfindungen, die in Form von Speicherzuständen die halbe Milchstraße umfassen. Während der nächsten zwei Äonen zupft Fremdling/Maschine an Mensch/Maschine, umschmeichelt, verführt, bis Mensch/Maschine nicht mehr widersteht. Die beiden verflechten und vermischen sich, verschmelzen, und werden geboren: Die Fremdling/Mensch/Maschine.

Sie überlegt: Was bleibt, wenn die gesamte Galaxis wir sein wird? Maximale Entropie? Ein Ziel gibt unserem Leben Sinn. Information. Struktur. Andromeda ruft. 

## DER AUTOR

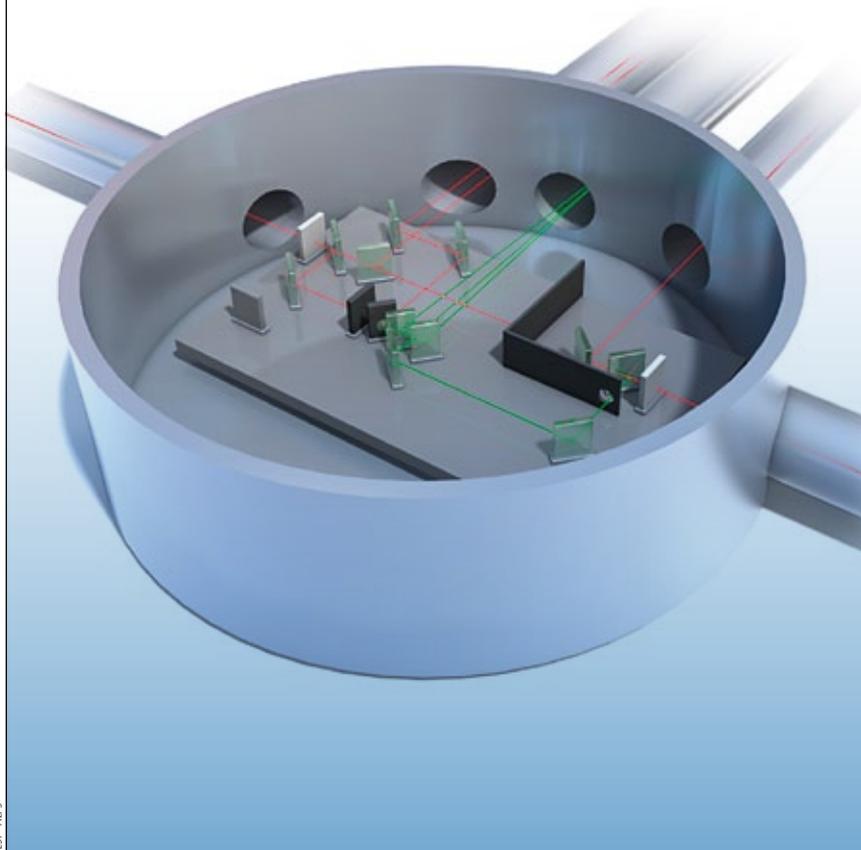
**Ronald D. Ferguson** lehrte Mathematik – und wechselte den Beruf. Er lebt mit seiner Frau, einem Hund und fünf wilden Katzen auf zwei Morgen Land im Texas Hill Country und schreibt Sciencefiction.

*Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.*

© Nature Publishing Group  
[www.nature.com](http://www.nature.com)  
Nature 502, S. 402, 17. Oktober 2013

## Neue Teilchen, wo niemand suchte?

Möglicherweise führt die Fahndung nach immer schwereren Elementarteilchen in die falsche Richtung. Darum zielen manche Physiker mit Experimenten wie ALPS (Any Light Particle Search, Bild) darauf, superleichte und nur sehr schwach wechselwirkende Teilchen, etwa die Axionen, aufzuspüren. Diese könnten sogar die Dunkle Materie erklären.



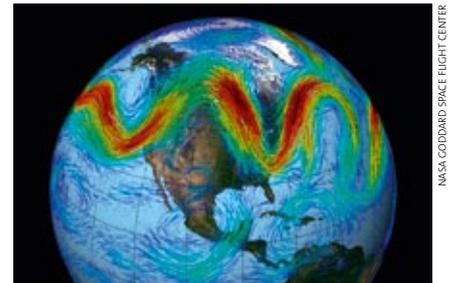
DESY - ALPS



GEORGE CHERNIEVSKY / PUBLIC DOMAIN

## Buntbarsche: Evolution im Zeitraffer

Die Buntbarsche mittelamerikanischer Kraterseen bilden andauernd und sehr schnell neue Arten. Der Zitronenbuntbarsch scheint heute dabei zu sein, sich in zwei Spezies aufzuspalten – eine mit herkömmlichen dunklen Streifen, und eine rötlich goldgelbe, wie oben im Bild zu sehen.



NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

## Jetstream und Extremwetter

Ein Band starker Höhenwinde beeinflusst entscheidend das Wetter in den mittleren Breiten. Doch nun schlägt der Jetstream Kapriolen – und sorgt dafür, dass sich Extremereignisse wie Dürren, Dauerniederschläge oder heftige Wintereinbrüche wie jüngst in den USA häufen.

## Der verschlungene Weg zur Landwirtschaft

Historiker betrachteten die Pflanzenzucht lange als Technologiesprung. Die neolithische Lebensweise galt ihnen daher als Revolution, die von einem einzigen Ursprungsort ausgegangen sein musste. Doch dieses Bild entspricht nicht den Tatsachen.

## Krebstherapie mit Stromstößen

Tumoren ohne Skalpell oder Bestrahlung entfernen – das erledigt die »irreversible Elektroporation«. Das neue Verfahren zerstört die entarteten Zellen und schont die übrige Gewebestruktur. Dadurch werden etwa die unangenehmen Nebeneffekte einer Prostatakrebsoperation vermieden.

## NEWSLETTER

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

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

Registrierung unter:  
[www.spektrum.com/newsletter](http://www.spektrum.com/newsletter)

## DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM  
SPEKTRUM DER  
WISSENSCHAFT-  
**DIGITAL-  
ABO\***



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

\*Für Printabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* kostenlos!

So einfach erreichen Sie uns:

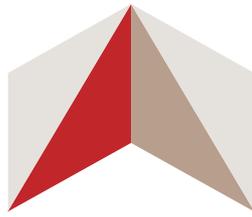
**Telefon: 06221 9126-743**

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

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!





## GEORG VON HOLTZBRINCK PREIS FÜR WISSENSCHAFTSJOURNALISMUS

### AUSSCHREIBUNG 2014

Der Preis wurde anlässlich des 150-jährigen Jubiläums von Scientific American, einer der ältesten Wissenschaftszeitschriften der Welt, von der Verlagsgruppe Georg von Holtzbrinck 1995 ins Leben gerufen.

Teilnahmeberechtigt sind alle deutschsprachigen oder in deutschsprachigen Medien veröffentlichenden Journalistinnen und Journalisten. Die eingereichten Arbeiten sollen allgemein verständlich sein und zur Popularisierung wissenschaftlicher Sachverhalte, insbesondere aus den Bereichen Naturwissenschaften, Technologie und Medizin, beitragen. Entscheidend ist die originelle journalistische Bearbeitung aktueller wissenschaftlicher Themen.

Es wird jeweils ein Preis in der Kategorie Print und ein Preis in der Kategorie elektronische Medien sowie ein Nachwuchspreis für Bewerber, die Jahrgang 1985 oder jünger sind, vergeben. **Der Preis in den Kategorien Print und elektronische Medien ist mit je 5.000 EUR dotiert. Der Nachwuchspreis ist mit 2.500 EUR dotiert.**

Die detaillierten Teilnahmebedingungen erhalten Sie unter [www.vf-holtzbrinck.de](http://www.vf-holtzbrinck.de).

Bewerben Sie sich bis zum **1. April 2014** mit **3 Beiträgen (Print) bzw. 2 – 3 Beiträgen (Elektronische Medien)** aus den letzten zwei Jahren und einem Kurzlebenslauf.

#### KONTAKT

Veranstaltungsforum  
Holtzbrinck Publishing Group

Taubenstraße 23  
10117 Berlin

Telefon +49/30/27 87 18 20  
Telefax +49/30/27 87 18 18

[gvhpreis@vf-holtzbrinck.de](mailto:gvhpreis@vf-holtzbrinck.de)  
[www.vf-holtzbrinck.de](http://www.vf-holtzbrinck.de)

Die Auswahl der Preisträger erfolgt jährlich durch eine hochkarätige Jury. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

Die Mitglieder der Jury sind:

**DR. STEFAN VON HOLTZBRINCK** (Vorsitz)  
Vorsitzender der Geschäftsführung,  
Holtzbrinck Publishing Group

**PROF. DR. DR. ANDREAS BARNER**  
Sprecher der Unternehmensleitung,  
Boehringer Ingelheim GmbH

**ULRICH BLUMENTHAL**  
Redaktionsleiter „Forschung aktuell“,  
Deutschlandfunk

**PROF. DR. ANGELA FRIEDERICI**  
Direktorin, Max-Planck-Institut für  
Kognitions- und Neurowissenschaften

**PROF. DR. PETER GRUSS**  
Präsident, Max-Planck-Gesellschaft zur  
Förderung der Wissenschaften e.V.

**PROF. DR. PETER STROHSCHNEIDER**  
Präsident, Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V.

**PROF. DR. CARSTEN KÖNNEKER**  
Chefredakteur, Spektrum der Wissenschaft

**JOACHIM MÜLLER-JUNG**  
Leiter des Ressorts Natur und Wissenschaft,  
Frankfurter Allgemeine Zeitung

**ANDREAS SENTKER**  
Ressortleiter Wissen, DIE ZEIT und  
Herausgeber, ZEIT Wissen

**RANGA YOGESHWAR**  
Moderator der ARD-Sendungen „Quarks & Co“,  
„Wissen vor acht“ u. a.