


Spektrum

DER WISSENSCHAFT



Serie Allergie
Überreaktionen des
Immunsystems
in Haut und Darm

JANUAR 2013

NEUROPROTHESEN

So sollen Gelähmte Fußball
spielen können

PSYCHIATRIE


Gewalttaten beim
Schlafwandeln

PHYSIK

Rätselhafte Gammablitz
in der Atmosphäre

Chaos und Turbulenz

Den Geheimnissen
nichtlinearer
Vorgänge auf
der Spur



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



Unsere Neuerscheinungen



Spektrum NEO Nr. 3

EXPEDITION IN DIE NANO-WELT

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es **Spektrum neo**. In jeder Ausgabe wird ein großes Thema behandelt. Aus dem Inhalt:

- > Titankreme und Silbersocken: Nanotechnologie in unserem Alltag
- > Das **neo**-Experiment: Wenn alle Tropfen kullern – Der Lotuseffekt im Praxistest
- > U-Boote für die Medizin: Wie Nanoteilchen helfen sollen, Medikamente zu kranken Körperzellen zu transportieren

Spektrum NEO Nr. 3 »Expedition in die Nano-Welt« kostet € 6,50 als Einzelheft (zzgl. Porto). Die Reihe ist auch im Abonnement (4 Ausgaben pro Jahr) für € 22,- inkl. Inlandsporto zu beziehen: www.spektrum-neo.de/abo



Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 4/2012

HEISSE ZEITEN FÜR DIE ERDE

Mittlerweile ist die Erderwärmung keine vage Vorhersage von Wissenschaftlern mehr, sondern fühlbare Realität. Zwar hält sie sich in unseren Breiten noch in Grenzen, so dass sie bisher nicht allzu unangenehm auffällt, doch das dürfte sich ändern, wie jüngste Klimaprognosen zeigen. Anderswo wirkt sich der Klimawandel schon jetzt drastisch aus, etwa in der Arktis. Dieses Spezial stellt die neuesten Erkenntnisse dazu zusammen:

- > Land unter: Wie die Meerwassererwärmung und schmelzendes Poleis den Meeresspiegel in die Höhe treiben
- > Vegetation: Hitzestress für die arktische Flora
- > Treibhausgas Methan: Zeitbombe Permafrost

Das Spezial »Heiße Zeiten für die Erde« kostet € 8,90 (zzgl. Versand).

Die Spezial-Reihen können auch unter www.spektrum.de/spezialabo bezogen werden.



epoc 4/2012

EIN GOTT FÜR ÄGYPTEN!

Vor 100 Jahren entdeckten deutsche Forscher im ägyptischen Tell el-Amarna die berühmte Büste der Nofretete. Für uns ist das 100-jährige Fundjubiläum der Anlass, dieses Heft der ägyptischen Königin, ihrem Ehegatten Echnaton und den ganz besonderen Umständen der Amarnazeit zu widmen. Aus dem Inhalt:

- > Gebaut für den einzigen Gott: Echnatons neue Hauptstadt – eine Kultbühne für seinen Sonnengott
- > Das Erbe des Vaters: Wie Echnatons radikale Reformen die Ideen seines Vaters fortsetzten
- > Luxus für Aton: Glaswerkstätten als Zeichen des Wohlstands
- > Getilgte Revolution: Das Ende der neuen Glaubenslehre und der Amarnazeit

epoc 4/2012 »Ein Gott für Ägypten!« kostet € 7,90 (zzgl. Versand).



Serie Kindesentwicklung – Nachdruck

WAS KLEINKINDER BRAUCHEN

Spätestens seit »Pisa« befürchten viele Eltern, dass eine Kindheit ohne gezielte Förderung ihre Kinder nicht mehr gut genug auf die Anforderungen unserer Leistungsgesellschaft vorbereitet. Und angeblich lernt ein Kind ja nie wieder so leicht wie in den ersten Lebensjahren. »Frühkindliche Bildung« lautet daher das Zauberwort, das Politiker der Bildungsmisere entgegenhalten und bei Eltern und Kinder oft zu einem vollen Terminkalender führt. Ist diese »Förderwut« tatsächlich das Richtige für unsere Kinder? Die hier zusammengestellten Beiträge aus **Gehirn und Geist** helfen Eltern, Pädagogen und Erzieherinnen, sich ihre eigene Meinung zu bilden.

Die **Gehirn und Geist** Serie Kindesentwicklung Nr. 2 »Was Kleinkinder brauchen« (unveränderter Nachdruck) kostet € 8,90 zzgl. Versand. Weitere Hefte der Reihe finden Sie unter: www.gehirn-und-geist.de/serie

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:



Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Die Ordnung des Chaos

»Panta rhei« – alles fließt – lautet ein beliebter Aphorismus, der dem Philosophen Heraklit zugesprochen wird. Laut Platon, der rund 100 Jahre später lebte, soll der Vorsokratiker das Sein mit einem Fluss verglichen haben. Alles wandle sich ständig, nichts bleibe, wie es ist. Heraklits Flusslehre steht dabei in einem engen Zusammenhang mit seiner Überzeugung von der Einheit der Dinge. Frei interpretiert: Auch wenn nichts statisch ist, liegen der Dynamik allen Naturgeschehens doch Gesetze zu Grunde. Forscher gehen heute davon aus, dass dies sogar für die extremen Fälle gilt – turbulente und chaotische Prozesse. Nur wie lauten deren Regeln? Dies ist das letzte verbliebene Rätsel der klassischen Physik.

2500 Jahre nach Heraklit kommen Wissenschaftler den Gesetzen des Chaos immer mehr auf die Schliche. Im 19. Jahrhundert lieferten die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung turbulenter Systeme. Aber die Formeln sind so vertrackt, dass Physikstudenten bis heute lernen, exakte Lösungen seien unmöglich. Folglich sind Forscher auf numerische Näherungsverfahren angewiesen, wenn sie etwa die Entstehung von Galaxien, die Bildung von Wolken oder das Phänomen des Herzflimmerns fassen wollen. Auch bei Prognosen, wie sich Radioaktivität nach einem Reaktorunfall ausbreitet oder Asche nach einer Vulkaneruption, helfen nur Computersimulationen.

Doch aktuell tut sich manches in der Grundlagenforschung. Wissenschaftler fahnden nach Wegen, um von den Navier-Stokes-Gleichungen auf andere mathematische Beschreibungen umzusatteln; neue Versuchsanlagen helfen, chaotische Systeme detaillierter als je zuvor zu beschreiben. Göttinger Forscher vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation leisten bedeutende Beiträge auf diesem Gebiet, berichtet Gerhard Samulat. Warum sie sich künftig auch von einem »roten Elefanten« wichtige Impulse versprechen, verrät er Ihnen ab S. 50.

Spektrum der Wissenschaft startet eine neue Rubrik! Nachdem Norbert Treitz Sie über Jahre bestens physikalisch unterhalten hat, verlegen wir unser Augenmerk nun auf die Chemie: In losem Wechsel mit den »Mathematischen Unterhaltungen« präsentieren wir Ihnen Neues und Kurioses aus der Welt der Stoffe. Unser Autor, der Chemienobelpreisträger Roald Hoffmann, kennt sich nicht nur darin hervorragend aus. Er hat auch eine literarische Ader. So schrieb er gemeinsam mit Carl Djerassi, dem Entwickler der Antibabypille, das Theaterstück »Oxygen«. Zum Auftakt seiner Rubrik erzählt Hoffmann von der überraschenden Instabilität eines altbekannten Moleküls (S. 84).

Eine spannende Lektüre wünscht
Ihr

Carl Hübel

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die Historiker **David Kaiser** vom Massachusetts Institute of Technology und **Angela Creager** von der Princeton University beleuchten die Bedeutung von Irrtümern für die Wissenschaft (S. 76).



Mit speziellen Peptiden lassen sich Makromoleküle zu therapeutischen Zwecken in Zellen einschleusen. **Roland Brock** (links) und **Wouter Verdurmen** beschreiben die neuesten Fortschritte der Technik (S. 42).



Chemienobelpreisträger **Roald Hoffmann** stutzt immer wieder über neu hergestellte Moleküle. Doch weshalb eigentlich, fragt er sich ab S. 84.

3 Editorial

8 Leserbrief/Impressum

10 Spektrogramm

Aufstieg und Untergang der Maya • Super-symmetrie in Bedrängnis • Hilferufende Korallen • Planet ohne Stern • Innenohr als Stromquelle • Tödliche Hitze in der Trias

13 Bild des Monats

Feinstaub im Blick

14 Forschung aktuell

Fernheizung Europas bleibt aktiv

Der Golfstrom erlahmt vorerst nicht.

Austausch von Genen zwischen Wirbeltierarten

Neunaugen und Schuppenfische haben gemeinsames Erbmateriale – dank springender Gene.

Der zweite Frühling des Masers

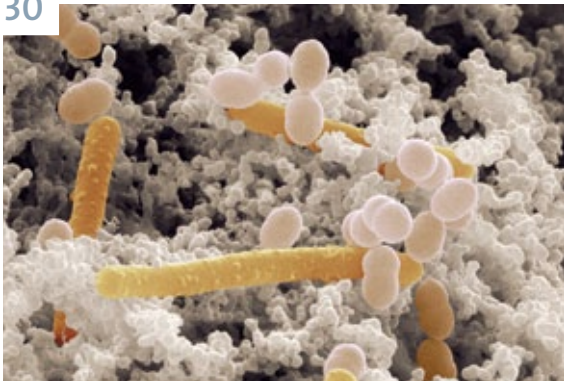
Ein neu entwickelter Mikrowellenstrahler ohne die üblichen Nachteile.

SPRINGER'S EINWÜRFE

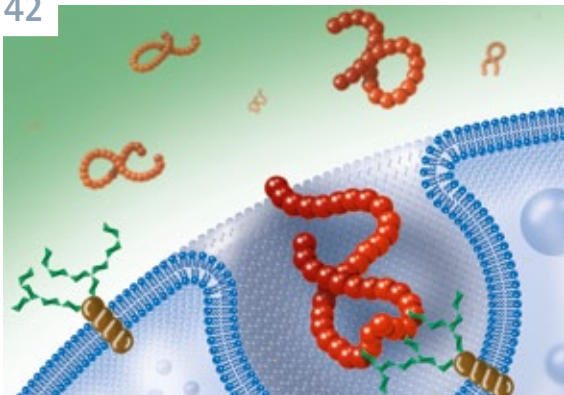
Der steinige Weg zur Anerkennung

Zurückweisung kann Vorteile bringen.

30



42



60



..... BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ **24 Schlafwandler als Mörder**

James Vlahos

Wenn nur Teile des Gehirns ruhen, können Schlafende unsinnige Taten vollbringen – sogar Totschlag.

▶ SERIE ALLERGIE TEIL 2

30 Aus dem Bauch heraus

Cassandra Willyard

Die Bedeutung der Darmflora für Allergien.

35 Blick ins Erbgut

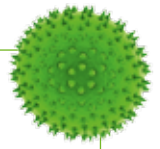
Erica Westly

Welche Rolle spielt die genetische Ausstattung?

38 Risse in der Mauer

Claire Ainsworth

Schäden in der Haut erhöhen das Allergierisiko.



42 Molekulare Türöffner

Roland Brock und Wouter Verdurmen

Spezielle Peptide ermöglichen auch großen Molekülen den Eintritt in Zellen – wichtig etwa für die Krebstherapie. Jetzt beginnen Forscher den Importmechanismus zu verstehen.

..... PHYSIK & ASTRONOMIE

▶ **60 Gammablitz aus den Wolken**

Joseph R. Dwyer und David M. Smith

Gewitter senden Gammastrahlung aus. Warum, das finden Physiker erst allmählich heraus.

SCHLICHTING!

68 Grenzen des Wachstums

H. Joachim Schlichting

Die Tröpfchenverteilung auf beschlagenen Glasscheiben ist immer noch für eine Überraschung gut.



50

► TITELTHEMA

Großer Wirbel um die Turbulenz

Gerhard Samulat

Göttinger Forscher erkunden das Verhalten turbulenter Strömungen, einer speziellen Form dynamischer und selbst organisierter Systeme. Mit neuen Experimenten und Simulationen hoffen sie jetzt, dieses letzte Rätsel der klassischen Physik zu lösen.

70



..... MENSCH & KULTUR

70 Muslimische Wurzeln der Renaissance?

Felix Arnold

Archäologen entdecken in einer Gartenanlage des muslimischen Reichs al-Andalus Besonderheiten, wie sie aus den Gärten der italienischen Renaissance bekannt sind.

76 Fruchtbare Irrtümer

David Kaiser und Angela N. H. Creager

Einige Forschungsfehler lieferten wichtige Denkanstöße – und veränderten sogar das wissenschaftliche Weltbild.

..... ERDE & UMWELT

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

84 Überraschungen aus der Molekülwelt

Roald Hoffmann

Manche verblüffende chemische Entdeckung erweist sich bei genauerem Hinsehen als gar nicht so erstaunlich.

..... TECHNIK & COMPUTER

90



► 90 Bewegender Geist

Miguel A. L. Nicolelis

Eine Ganzkörperprothese soll Gelähmte wieder laufen lassen.

98 Rezensionen

Martin Rietze, Marc Szeglat: Vulkane • Michael Haller, Martin Niggeschmidt (Hg.): Der Mythos vom Niedergang der Intelligenz • Rolf Knippers: Eine kurze Geschichte der Genetik / Ernst Peter Fischer: GENial! • Emily Hunter: Öko-Krieger u. a.

23 Wissenschaft im Rückblick

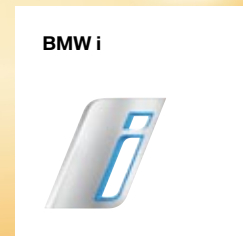
Vom Unterwasserschlitten zur Mondgeologie

106 Vorschau

Titelmotiv: dreamstime / Vitaliy Stavinov
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



ELEKTRISCH ANGETRIEBEN.
INTELLIGENT VERNETZT.



Wie lässt sich der Status eines Autos von morgen ablesen? Zum Beispiel auf dem Smartphone. Denn das vollelektrische BMW i3 Concept Coupé ist intelligent mit seiner Umwelt vernetzt. So können Sie zum Beispiel per App noch vor der Fahrt den Ladestatus ablesen, die effizienteste und umweltfreundlichste Route planen und sich stets Ihre maximale Reichweite sowie verfügbare Ladestationen anzeigen lassen. BMW i - erhältlich ab 2013. Mehr unter:

www.bmw-i.de/i3coupe oder rufen Sie uns an unter 089 1250 160 00.

BMW i. BORN ELECTRIC.

bmw-i.de

Ungeeignetes Gedankenmodell

Markus Aspelmeyer und Markus Arndt diskutierten, ob quantenmechanische Phänomene auch bei großen Massen auftreten. (»Schrödingers Katze auf dem Prüfstand«, Oktober 2012, S. 44)

Hubert Otte, Mainz: Schrödingers Katze wird gern verwendet, um ein Phäno-

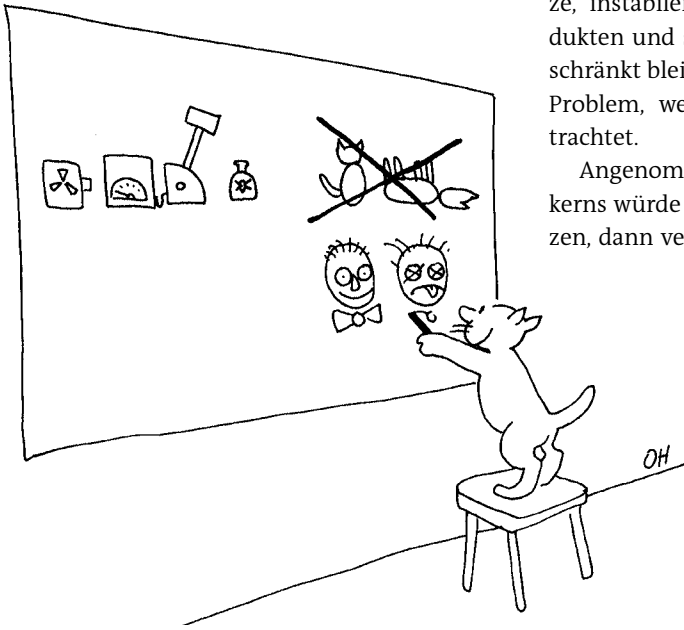
men aus der Quantenmechanik anschaulich darzustellen: die Überlagerung von Zuständen. Dieses Gedankenmodell trägt aber sicher eher zum Unverständnis der Quantenmechanik bei als zum Verständnis und sollte nicht mehr verwendet werden. Bei ihm wird zudem vorausgesetzt, dass keine Wechselwirkung mit der Umgebung stattfindet und die Wellenfunktion des Systems aus lebender Katze, toter Katze, instabilem Atomkern, Zerfallsprodukten und so fort auf den Kasten beschränkt bleibt. Hierbei gibt es aber ein Problem, wenn man den Zerfall betrachtet.

Angenommen, der Zerfall des Atomkerns würde auch ein Neutrino freisetzen, dann verlässt dieses fast ungehindert den Kasten wegen seiner geringen Wechselwirkung mit anderer Materie. Man muss also berücksichtigen, dass der räumliche Bereich der Wellenfunktion von der Schließung des Kastens an zeitlich kontinuierlich anwächst

und nicht auf den Kasten beschränkt bleibt. Eine Dekohärenz der Wellenfunktion kann dadurch immer wahrscheinlicher mit der Welt auch außerhalb des Kastens stattfinden. Denn irgendwann findet eine Wechselwirkung statt, sei es durch eine Messvorrichtung für Neutrinos außerhalb des Kastens, sei es mit Materie, wie zum Beispiel eine Sonne in einigen Lichtjahren Entfernung, sei es durch Streuung an Materie oder aus anderen Gründen.

Bei den übrigen Formen von Zerfällen kann zumindest angenommen werden, dass eine winzige Erwärmung im Inneren resultieren muss und irgendwann auch die Außenwände erreicht. Nur wenn keinerlei Kontakt zur Umgebung existiert, kann keine Dekohärenz stattfinden. Da der Kasten aber sicher die leichte Erwärmung als Wärmestrahlung emittiert, ergibt sich wie bei dem Neutrino, dass der räumliche Bereich der Wellenfunktion zeitlich kontinuierlich anwächst.

Martin Lehl, München: Auf S. 46 heißt es: »Dabei ist i die imaginäre Zahl $\sqrt{-1}$.« Diese Formulierung ist unglücklich. Die Wurzelfunktion bildet von den nicht-



Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: 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
Editor-at-Large: Dr. rer. nat. habil. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistentin: 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 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Arne Baudach, Maren Emmerich, Dr. Werner Gans, Doris Gerstner, Dr. Michael Springer.
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 des Nationalen Instituts 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 Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachfrage. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SDW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

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. 33 vom 01.01.2012.
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: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



negativen reellen Zahlen in die nicht-negativen reellen Zahlen ab, das heißt, für die reelle Zahl a mit a größer oder gleich null liefert \sqrt{a} die nicht-negative reelle Lösung der Gleichung $x^2 = a$. Zunächst ist $\sqrt{-1}$ also nicht definiert. Die Gleichung $x^2 = -1$ besitzt die beiden komplexen Lösungen i und $-i$. Auf dem Körper der komplexen Zahlen lässt sich keine Ordnungsrelation wie »größer« oder »kleiner« definieren. Somit kann man nicht einfach die Lösung wählen, die größer oder gleich null ist.

Die Interpretation $\sqrt{-1} = i$ lässt eine einfache mathematische Spielerei zu: $-1 = i^2 = i \cdot i = \sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1} = \sqrt{(-1) \cdot (-1)} = \sqrt{(-1)^2} = \sqrt{1} = 1$, was offensichtlich falsch ist, denn sonst hätten wir gerade gezeigt, dass $-1 = 1$ gilt. Der Fehler dieser »Rechnung« besteht darin, dass die Rechenregel $\sqrt{a} \cdot \sqrt{b} = \sqrt{a \cdot b}$ nur für nicht-negative reelle Zahlen a und b gilt. Es müsste also geklärt werden, in welchem Sinn der Autor die Wurzelfunktion auf negative Zahlen erweitert. Man sollte den Satz »Dabei ist i die imaginäre Zahl $\sqrt{-1}$ « einfach durch »Dabei ist i die imaginäre Einheit« ersetzen.

Der Wert reinen Erkenntnisgewinns

David J. Wineland und Serge Haroche erhielten den Nobelpreis für Physik für ihre Experimente mit isolierten Quantenteilchen. (»Auszeichnung für Quantendompteure«, Forschung aktuell, Dezember 2012, S. 22)

Harald Kirsch, Düsseldorf: So gerne ich »Spektrum der Wissenschaft« auch lese, den nahezu zwanghaften und teilweise an den Haaren herbeigezogenen Hinweis auf die möglichen praktischen Anwendungen einer Forschung finde ich unnötig und störend. Ein aktuelles Beispiel ist der Artikel über den Physiknobelpreis. Wenn sogar der Nobelpreisträger Serge Haroche damit zitiert wird, dass er seine Forschung primär als Grundlagenforschung versteht, dann könnte man es doch dabei belassen. Der Hinweis auf Quantencomputer scheint mir fast reflexartig in jeden

Artikel über Quantenphysik eingefügt zu werden. Ich würde mich vermissen, wenn Grundlagenforschung in »Spektrum der Wissenschaft« als solche dargestellt wird. Die Rechtfertigung durch praktische Anwendung ist im Unterschied zur Rechtfertigung durch reinen Erkenntnisgewinn eher schwach.

Fragwürdige Früherkennung

Der Onkologe Marc B. Garnick riet dazu, die Krebsbehandlung nach einem positiven PSA-Test sorgfältig abzuwägen. (»Streit um die Prostatakrebs-Früherkennung«, Oktober 2012, S. 28)

Hans-Hermann Dubben, Hamburg: Vielen Dank für den sehr klaren und umfassenden Artikel von Marc B. Garnick zur Früherkennung von Prostatakrebs. Zu den dort erwähnten unnötigen Eingriffen möchte ich etwas hinzuzufügen.

Auf 1400 Männer in der Screening-Gruppe kommt in der von Garnick zitierten Studie aus dem Jahr 2009 ein verhinderter Krebstodesfall. Es müssen jedoch nicht 48 Männer behandelt werden, sondern 116; in der Kontrollgruppe sind es nur 68. Die Differenz, 48 Männer, sind so genannte Überbehandlungen. Diese Männer hätten, wenn sie in der Kontrollgruppe gewesen wären, zeitlebens keine Prostatakrebsymptome verspürt, und schon gar nicht wären sie an Prostatakrebs gestorben. Durch das Screening werden jedoch Tumoren gefunden, die keiner Behandlung bedürfen, sich aber von bösartigen nicht unterscheiden lassen. 40 dieser 48 Männer werden unnötig operiert oder bestrahlt. Ihnen wird mit Sicherheit Schaden zugefügt; einen Nutzen im Sinn von geringerer Prostatakrebsmortalität haben sie nicht.

Da wesentlich mehr Männer geschädigt als »gerettet« werden, ist der Schaden durch Screening statistisch sehr gut belegt, der Nutzen ist nach wie vor strittig. Zu beachten ist auch, dass der verhinderte Todesfall erst nach zehn oder mehr Jahren aufgetreten wäre (an Prostatakrebs Verstorbene sind im Mit-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

tel etwa 80 Jahre alt); die Überbehandlungen finden aber fast unmittelbar während der Screening-Phase statt.

Nochmals mit anderen Worten: Auf einen verhinderten Krebstodesfall kommen mindestens 40 Männer, die geschädigt wurden, aber die Illusion haben, die Früherkennung hätte ihr Leben verlängert. Auch die außerhalb von Studien gewonnene ärztliche Erfahrung wird durch diese irrtümlich dankbaren Patienten geprägt.

Erratum

»Urananreicherung mit Lasertechnik – billig und politisch hochbrisant«, November 2012, S. 62

Wolfgang Sandner ist nicht mehr Präsident der DPG; dies war er bis April 2012. Seitdem ist er Vizepräsident.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe / Sigrid Spies
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

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

ARCHÄOLOGIE

Klima stützte und stürzte die Mayakultur

Aufstieg und Untergang der Maya waren stark vom Klima geprägt, meinen Wissenschaftler um Douglas Kennett von der Pennsylvania State University (USA). Die Forscher untersuchten einen Stalagmiten aus der Yok-Balum-Höhle, die im Südosten der Halbinsel Yukatan liegt, nahe an bedeutenden Zentren der Mayakultur.

Laut Uran-Thorium-Datierungen sind die oberen rund 40 Zentimeter

des Stalagmiten in den vergangenen 2000 Jahren kontinuierlich gewachsen. Entlang dieses Bereichs nahmen die Forscher zahlreiche Proben und bestimmten darin das Verhältnis der Sauerstoffisotope ^{18}O und ^{16}O . Da dieses von der Menge des Regenwassers abhängt, das in die Höhle sickert, liefern die Ergebnisse einen Überblick über die Niederschläge der zurückliegenden zwei Jahrtausende. Demnach

regnete es zwischen 440 und 660 n. Chr. in der Region sehr viel. Anschließend wurde das Klima deutlich trockener, gefolgt von einer lang anhaltenden Dürre zwischen 1020 und 1120.

Der Vergleich mit datierten Texten, in denen die Maya wichtige gesellschaftliche Ereignisse festgehalten haben, zeigt: Während der Regenzeit nahm die Bevölkerungszahl stark zu, wuchs der Wohlstand und entstanden wichtige Städte wie Tikal. In den Trockenperioden dagegen häuften sich politische Unruhen und Kriege, und die Machtzentren verlagerten sich ins nördliche Yukatan, wo die Kultur um 1100 zerfiel. Als Grund für den Klimawandel um 660 herum vermuten die Forscher eine Verschiebung der »inner-tropischen Konvergenzzone«, eines äquatornahen Regengürtels, und Veränderungen in der El-Niño-Häufigkeit.

Science 338, S. 788–791, 2012



DOUGLAS KENNETT, PENNSYLVANIA STATE UNIVERSITY

An dieser Stelle der Yok-Balum-Höhle sammelten Forscher den emporwachsenden Tropfstein ein, der das frühere Klima auf Yukatan rekonstruieren half.

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Studien und Analysen lesen Sie jeden Donnerstag in

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

- **Biotechnologie:**
Organe aus dem Labor
- **Kryosphäre:**
Vorstoß in die Isolation
- **Klimapolitik:**
»Kyoto hat versagt«

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

PHYSIK

Für die Supersymmetrie wird es eng

Erstmals haben Physiker am europäischen Kernforschungszentrum CERN mit sehr hoher Messsicherheit die Rate bestimmt, mit der B_s^0 -Mesonen in Myonen zerfallen. Ihre Ergebnisse bestätigen das Standardmodell der Elementarteilchenphysik, widersprechen aber vielen Modellen von supersymmetrischen Theorien.

B_s^0 -Mesonen – das »s« steht für »strangeness«, Seltsamkeit – bestehen aus einem schweren Bottom-Antiquark und einem Strange-Quark. Ihr Zerfall in zwei Myonen ereignet sich laut Standardmodell extrem selten: Auf eine Milliarde Zerfälle kommen nur drei dieses Typs, wie theoretische Berechnungen ergeben haben. Die jetzt gewonnenen experimentellen Daten stimmen damit gut überein.

Allerdings geraten dadurch Theorien in Bedrängnis, die eine supersym-

metrische Erweiterung des Standardmodells vorsehen. Denn sie sagen für diesen Zerfallstyp eine wesentlich größere Häufigkeit vorher. Von der Supersymmetrie hatten sich die Physiker unter anderem erhofft, dass sie das Wesen der Dunklen Materie erklären könne. Laut Pierluigi Campana, dem Sprecher des LHCb-Experiments am europäischen Teilchenbeschleuniger LHC, werden supersymmetrische Modelle von den neuen Messungen zwar nicht ausgeschlossen, aber stark eingeschränkt. Noch sind die Ergebnisse jedoch nicht endgültig. Um abschließende Aussagen zu treffen, müssen die Physiker weitere LHC-Daten analysieren.

Tagungsbeitrag auf dem »Hadron Collider Physics Symposium 2012« in Kyoto, Japan: <https://cdsweb.cern.ch/record/1493303?ln=de>

Korallen rufen Fische zu Hilfe



DANIELLE DICKSON, GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Eine Blaupunkt-Korallengrundel steuert Meeresalgen (rechts, grün) an, die gerade dabei sind, Steinkorallen zu überwuchern.

Wenn Steinkorallen Gefahr laufen, von Meeresalgen überwuchert zu werden, locken sie bestimmte Fische an, welche die Algen fressen. Das nützt nicht nur den Korallen, sondern auch den Fischen, berichten Forscher um Mark Hay vom Georgia Institute of Technology (USA).

Steinkorallen der artenreichen Gattung *Acropora* leisten einen wichtigen Beitrag zum Aufbau von Riffen. Wie die Forscher herausfanden, gibt die Steinkoralle *Acropora nautica* chemische Duftstoffe ins Meerwasser ab, wenn sie in Kontakt mit der giftigen Meeresalge *Chlorodesmis fastigiata* kommt. Die Substanzen locken verschiedene Fische herbei, unter anderem Blaupunkt-Korallengrundeln (*Gobiodon histrio*). Diese weiden die Algen dann von den befallenen Korallen ab. Anschließend sind die Fische besser vor Fressfeinden geschützt, denn der giftige Schleim, den sie zum Selbstschutz absondern, wirkt dann stärker. Die dafür verantwortlichen Toxine sind aber noch unbekannt.

Offenbar reagieren die Grundeln nur auf Hilferufe von Korallenarten, in deren Kolonien sie sich natürlicherweise häufig aufhalten. Gefahrensignale von anderen Korallen, selbst von eng verwandten, scheinen sie zu ignorieren.

Science 338, S. 804, 2012

Planet ohne Stern – quasi um die Ecke

Philippe Delorme vom Institut für Planetologie und Astrophysik in Grenoble und seine Mitarbeiter haben einen Himmelskörper beobachtet, bei dem es sich wahrscheinlich um einen Planeten ohne Mutterstern handelt. Er ist zwar nicht der erste Kandidat für diese Art von Objekten, doch liegt

CFBDSIR2149 uns von allen bisher entdeckten am nächsten und lässt sich daher vergleichsweise gut untersuchen.

Die Astronomen erspähten den etwa 100 Lichtjahre entfernten Himmelskörper mit der Infrarotkamera des Canada-France-Hawaii Telescope auf Hawaii. Weitere Beobachtungen ergaben, dass sich CFBDSIR2149 etwa genauso schnell und in dieselbe Richtung bewegt wie einige Sterne im benachbarten AB-Doradus-Bewegungshaufen. Dieser umfasst zirka 30 Sonnen, die mit 50 bis 120 Millionen Jahren noch relativ jung sind. Wahrscheinlich gehört der einsame Planet dem Haufen an und dürfte

somit ebenfalls jung sein. Aus seinem Infrarotspektrum leiteten die Forscher ab, dass er eine Oberflächentemperatur von etwa 430 Grad Celsius und eine Masse von vier bis sieben Jupitermassen besitzt.

Allerdings sind diese Abschätzungen nur korrekt, wenn CFBDSIR2149 tatsächlich zum AB-Doradus-Bewegungshaufen gehört und damit ein entsprechend eingrenzbare Alter hat. Alternativ könnte es sich bei ihm auch um einen Braunen Zwerg handeln, der es auf mehr als 13 Jupitermassen bringt. Braune Zwerge sind zwar massereicher als Gasplaneten, aber dennoch zu klein, um ein Fusionsfeuer in ihrem Innern zu unterhalten.

Astronomy & Astrophysics 548, A26, 2012



Infrarotaufnahme des einsamen Planeten CFBDSIR2149 (dunkelblau, siehe Pfeil).

TECHNIK

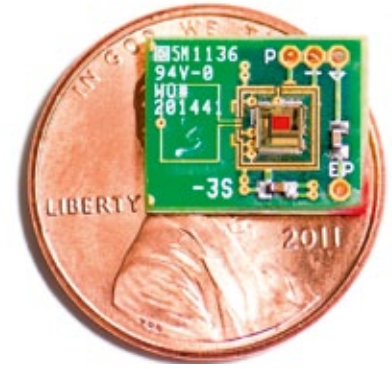
Das Innenohr als Stromquelle

Forscher um Konstantina Stankovic vom Massachusetts Institute of Technology (USA) ist es gelungen, eine elektrische Spannung im Innenohr anzuzapfen und damit ein Gerät zu betreiben. Möglicherweise lässt sich das Verfahren nutzen, um medizinische Implantate zu entwickeln, die weder auf Batterien noch auf drahtlose Energieversorgung angewiesen sind.

Die Cochlea (Hörschnecke) im Innenohr von Säugetieren enthält mehrere flüssigkeitsgefüllte Hohlräume. Ionenpumpen erzeugen ein Natrium-Kalium-Konzentrationsgefälle zwischen diesen Räumen – und damit eine elektrische Potentialdifferenz von etwa 100 Millivolt. Mit Hilfe dieser Spannung wandelt das Innenohr die

Vibrationen des Trommelfells in elektrochemische Signale um.

Über zwei Mikroelektroden griff das Forscherteam die Innenohrpotentialdifferenz von Meerschweinchen (*Cavia porcellus*) ab und betrieb damit einen Elektronikchip, der regelmäßig Radiosignale aussendete. Deren Frequenz ließ auf die Größe der Potentialdifferenz schließen – der Chip diente also als medizinischer Sensor. Er ließ sich mit einer elektrischen Leistung im Nanowattbereich bis zu fünf Stunden lang betreiben. Den Hörsinn der Tiere beeinträchtigte das Verfahren zwar nur geringfügig, aber messbar. Offenbar ließen sich Verletzungen des Gewebes mit den verwendeten Elektroden, die zwei Mikrometer Durchmesser hatten,



Der Chip, den die Forscher mit der Potentialdifferenz des Innenohrs betrieben, ist deutlich kleiner als eine Dollarcent-Münze.

nicht völlig vermeiden, folgern die Forscher. Künftig sei eine weitere Verkleinerung der Elektroden nötig.

Nature Biotechnology
10.1038/nbt.2394, 2012

KLIMAFORSCHUNG

Tödliche Hitze in der Trias

Vor 250 Millionen Jahren wurde die Erde vom größten Massensterben ihrer Geschichte heimgesucht: 90 Prozent der Meereslebewesen und 70 Prozent der Landbewohner gingen zu Grunde. Verantwortlich dafür war eine sehr starke und rasche Zunahme der Temperaturen. Das hat ein Team um Yadong Sun von der China University of Geosciences anhand von Fossilien in Meeresbodensedimenten belegt.

Die Forscher bestimmten das Verhältnis der Sauerstoffisotope ^{16}O

und ^{18}O in versteinerten Überresten von Conodonten, heute ausgestorbenen wasserlebenden Chordatieren. Dieses Verhältnis sagt etwas über die damaligen Umweltbedingungen aus, da die Tiere je nach vorherrschender Wassertemperatur unterschiedliche Mengen der Isotope einlagerten. Laut den Analysen kam es am Übergang zwischen Perm und Trias vor etwa 250 Millionen Jahren zu einer verheerenden Hitzewelle. In nur 800 000 Jahren stiegen die Wassertemperaturen am

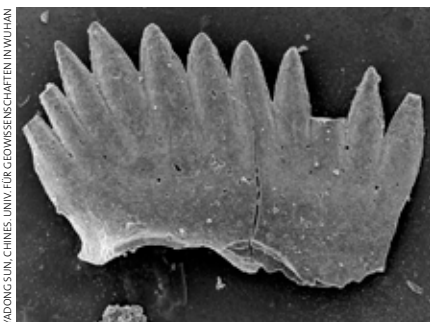
Äquator von 21 Grad Celsius zunächst auf 36 und dann, nach kurzer Abkühlung, sogar auf 38 bis 40 Grad.

Auslöser waren vermutlich gewaltige Vulkanausbrüche in Nordsibirien. Deren Magmaflüsse überfluteten eine Fläche von rund sieben Millionen Quadratkilometern – die Hälfte des heutigen Sibiriens – bis zu drei Kilometer hoch. Dabei setzten sie enorme Mengen an Kohlendioxid frei, was einen galoppierenden Treibhauseffekt nach sich zog.

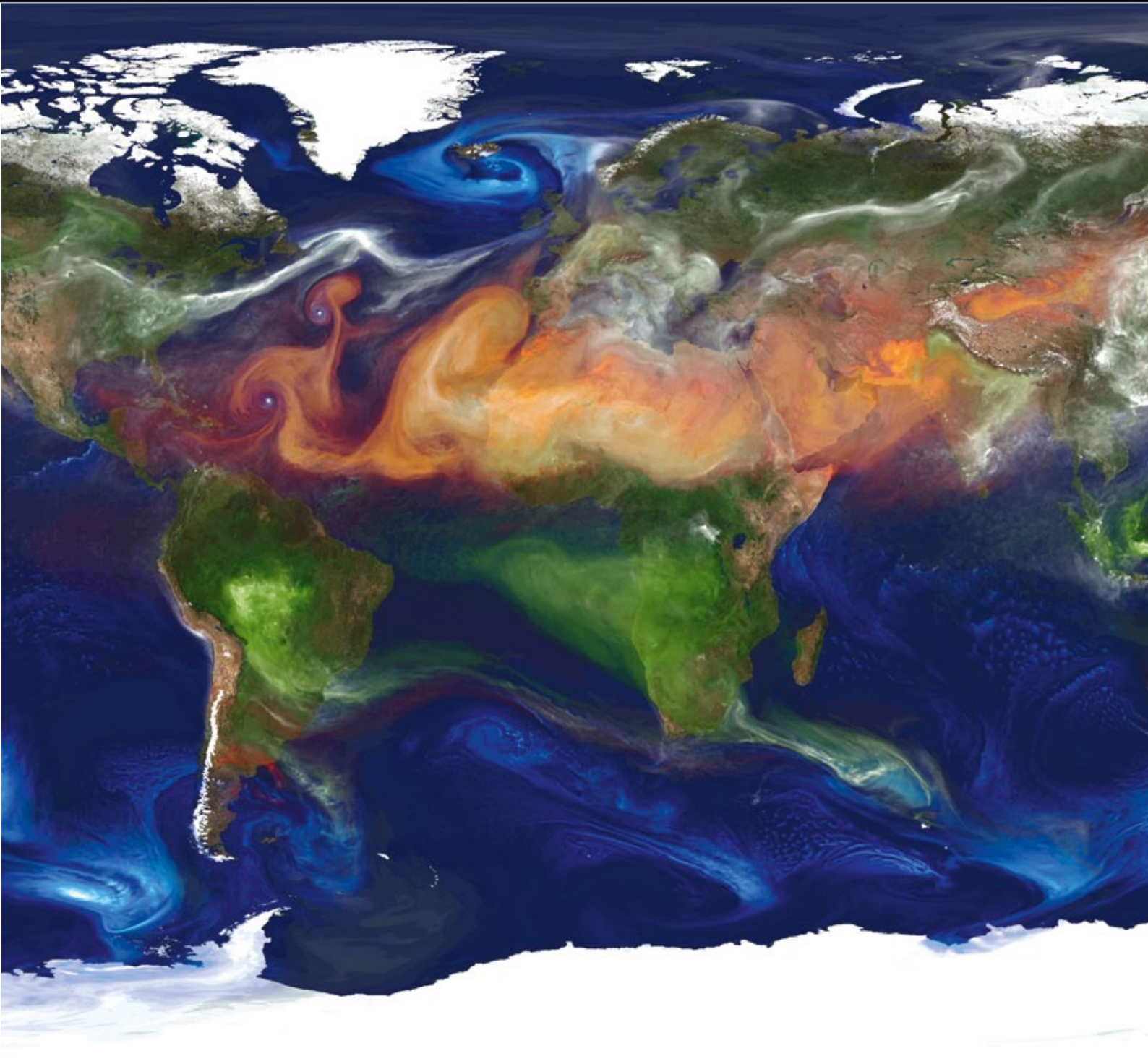
Die Erwärmung brachte viele Organismen in Bedrängnis, insbesondere Meeresbewohner. Arten, denen es nicht gelang, in kühlere Regionen auszuweichen, starben aus, wie die Forscher schreiben. Das spiegelt sich im Fossilienbefund aus jener Zeit, dem zufolge in den äquatornahen Regionen damals die meisten Tier- und Pflanzenspezies verschwanden.

Science 338, S. 366–370, 2012

Überrest eines Conodonten aus der frühen Trias (Elektronenmikroskopaufnahme). Die Fossilien dieser Tiere ähneln äußerlich den Zähnen von Kiefermäulern, haben aber einen anderen evolutionären Ursprung. Conodonten gehörten zu den Tiergruppen, die das Massensterben vor 250 Millionen Jahren überlebten. Daher gibt es von ihnen Fossilien aus allen Phasen der Krise.



YADONG SUN, CHINES. UNIV. FÜR GEOWISSENSCHAFTEN IN WUHAN



WILLIAM PUTMAN, NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

FEINSTAUB IM BLICK

Diese Simulation der NASA zeigt die Aerosolverteilung in der Atmosphäre auf zehn Kilometer genau (Ausschnitt). Orange dargestellt ist Wüstenstaub, der von den Passatwinden verweht wird und wichtigen Mineraldünger liefert, beispielsweise für die Regenwälder Südamerikas. Grün markiert sind Rußpartikel, die vor allem aus den Rodungsfeuern Amazoniens, der indonesischen Inseln und der afrikanischen Savanne stammen. Sulfate aus Vulkanausbrüchen oder aus

der Verfeuerung fossiler Brennstoffe sind weiß gekennzeichnet. Sie zeigen etwa die Luftverschmutzung über Ostasien (rechter Bildrand). In Blau erscheinen Salzpartikel aus den Ozeanen, die mit der Gischt in die Luft gerissen und dann über die atmosphärische Zirkulation weiterverteilt werden. Sie finden sich vor allem in der Westwindzone auf der Nordhalbkugel sowie den entsprechenden Breiten im Südpolarmeer.

PNAS 109, S. 17490–17494, 2012

Fernheizung Europas bleibt aktiv

Entwarnung: Der Golfstrom erlahmt vorerst nicht. Das wohltemperierte Wasser, das er aus der Karibik heranhält, hält Nordwesteuropa also weiterhin warm. Für längerfristige Vorhersagen müssen Forscher aber die Wechselwirkung zwischen Meeresströmungen und Klima besser verstehen.

VON MICHAEL GROSS

Ende 2005 machte eine Schreckensmeldung die Runde durch sämtliche Medien. Der Golfstrom, ein für das Klima in Europa äußerst wichtiger Teil der atlantischen Umwälzzirkulation, sei im Vergleich zu 1957 wesentlich schwächer geworden. Das glaubten Forscher aus Großbritannien anhand von Strömungsmessungen am 25. Breitengrad ermittelt zu haben (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2006, S. 94). Offenbar bogen die Wassermassen aus

der Karibik zum großen Teil vor der Straße von Gibraltar nach rechts ab und flossen an der westafrikanischen Küste entlang nach Süden. Dabei vereinigten sie sich mit dem Subtropenwirbel, anstatt Wärme nach Norden zu transportieren, am Polarkreis abzutauchen und als Tiefenströmung nach Süden zurückzukehren.

Aufgeschreckt durch diesen Befund, machten sich gleich zwei große Forschungsk Kooperationen daran, der Sa-

che auf den Grund zu gehen: das EU-finanzierte THOR-Projekt (Thermo Haline Overturning circulation – at Risk?) sowie das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) getragene Nordatlantik-Projekt. Beide endeten vor drei Monaten mit dem beruhigenden Resümee, dass die befürchtete Eiszeit in Europa vorerst noch nicht auf dem Terminplan steht.

Bei ihren Untersuchungen setzten die Wissenschaftler ein wesentlich breiteres Sortiment an Messgeräten ein als seinerzeit ihre Kollegen aus Großbritannien. Dazu gehörten zum Beispiel fest verankerte Bojen, die an strategisch gewählten Punkten mit Hilfe des Dopplereffekts Strömungsgeschwindigkeiten maßen.

Eine wichtige Rolle spielten auch frei umhertreibende Schwimmkapseln, welche die meiste Zeit rund 1000 Meter unter dem Meeresspiegel zubringen. Nur einmal alle zehn Tage steigen solche so genannten Argo Floats für einige Stunden zur Oberfläche empor und nehmen unterwegs Profile von der Temperatur und dem Salzgehalt des Meerwassers auf. Bevor sie wieder abtauchen, übermitteln sie die Daten samt ihrer Position an einen Satelliten. Nicht ganz so futuristisch, aber auch nützlich waren Messgeräte an Schiffen, die immer dieselbe Route fuhren, beispielsweise Fähren.

Diese Analysen brachten schließlich ans Licht, dass die Strömungen im Nordatlantik überraschend starken jahreszeitlichen sowie mehrjährigen Schwankungen unterliegen. Natürliche saisonale Zyklen waren für einen Großteil der Veränderungen verantwortlich, welche die britischen Forscher 2005 vorzeitig in die Zukunft extrapoliert hatten.



Der Golfstrom führt als Teil der atlantischen Zirkulationsströmung Wärme aus den Tropen in den Nordwesten Europas. Ende 2005 publizierte Forschungsergebnisse weckten die Befürchtung, dass er sich abschwächt, weil die Wassermassen aus der Karibik größtenteils in den Subtropenwirbel abzweigen. Genauere Untersuchungen ergaben nun, dass das nicht der Fall ist.

Mit Blick auf die sehr viel umfangreicheren und besser abgesicherten Daten, die inzwischen vorliegen, sind die Projektkoordinatoren Detlef Quadfasel (THOR) und Detlef Stammer (Nordatlantik) von der Universität Hamburg sicher, dass ein Ausfall des Golfstroms innerhalb der nächsten Jahre nicht zu befürchten ist. Sollte die Fernheizung für Nordwesteuropa wirklich versagen, dann erst in einigen Jahrzehnten, meint Quadfasel.

Solche Prognosen erfordern natürlich auch Modellrechnungen, aus denen hervorgeht, wie sich die Meeresströmungen sowie das atmosphärische Wetter und das Klima voraussichtlich entwickeln werden. Von der Güte solcher Simulationen hängt die Genauigkeit der Vorhersagen ab. Im Rahmen der Projekte THOR und Nordatlantik haben sich Forscher am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg sowie weitere Teams in Großbritannien und den Niederlanden deshalb auch bemüht, die Computermodelle zu verbessern, welche die Wechselwirkung von Klima und Ozeanströmungen nachbilden und in die Zukunft projizieren.

Neun Jahre vorausberechnen

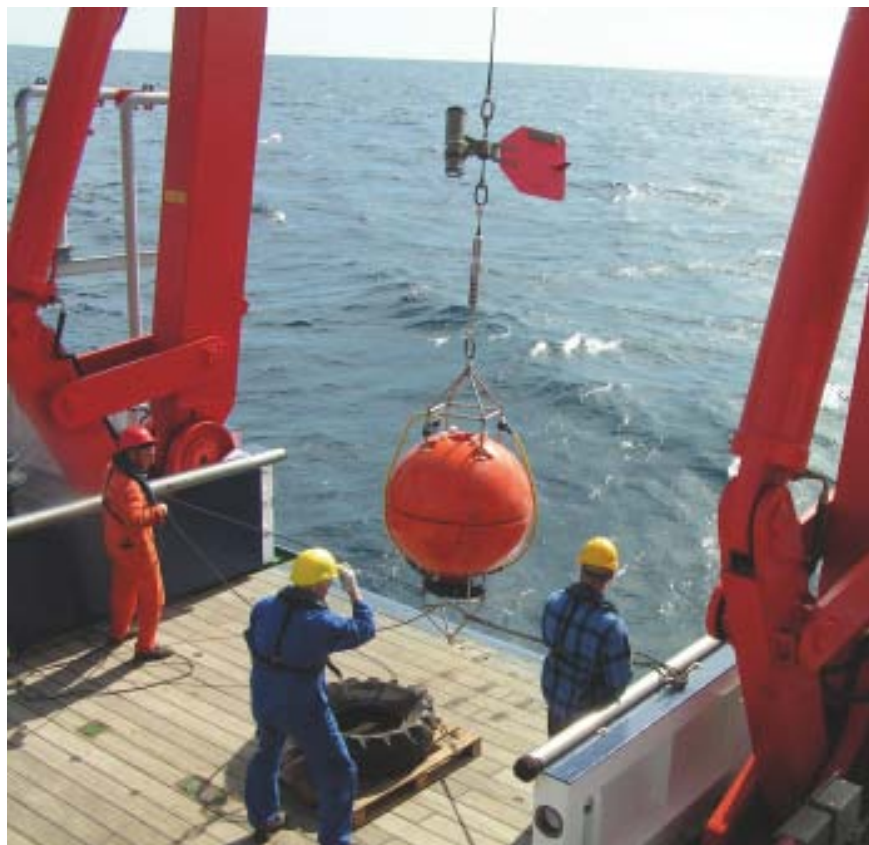
Wie schon beim Wetter für die nächste Woche ist es zwar weiterhin unmöglich, genau zu sagen, was wann wo geschehen wird. Doch lassen sich immerhin Wahrscheinlichkeiten angeben. In diesem Sinn können die Forscher inzwischen die Witterung über mehrere Jahreszeiten hinweg und wichtige Eigenschaften von Meeresströmungen bis zu neun Jahre vorausberechnen. Das zeigen Kontrollexperimente, in denen die Modelle mit historischen Messdaten gefüttert und ihre Prognosen mit dem verglichen wurden, was tatsächlich eingetreten ist. Dank der höheren Genauigkeit ihrer Vorhersagen ist die Klimaforschung nun besser gerüstet, der Wirtschaft und Politik nützliche Informationen für längerfristige Planungen zu liefern, etwa über die Veränderung des Meeresspiegels, die Wahrscheinlichkeit von Sturmfluten, die Entwicklung der Fischbestände oder die künftigen Niederschlagsmengen.

In den beiden jetzt gestarteten Nachfolgeprojekten zu THOR und Nordatlantik werden solche Anwendungen erstmals im Detail mit berücksichtigt. Die Koordination dieser Vorhaben namens NACLIM (North Atlantic Climate) und RACE (Regional Atlantic Circulation and Global Change) liegt wiederum in den Händen von Quadfasel und Stammer, und auch die Finanzierung übernimmt wie zuvor die EU beziehungsweise das BMBF.

Mark Payne von der Technischen Universität von Dänemark in Charlottenlund wird im Rahmen von NACLIM die Zusammenhänge zwischen Meeresströmungen und Fischbeständen untersuchen. Der Ökologe hat schon seit vielen Jahren das Schicksal des Blauen Wittlings (*Micromesistius poutassou*) verfolgt und dramatische Schwankungen in dessen Population im Nordatlantik beobachtet. Mitte der 1990er Jahre

vermehrte sich die Dorschart geradezu explosionsartig: Es gab vier- bis sechsmal so viele Jungtiere wie zuvor. Zum Ende des Jahrzehnts fielen die Zahlen dann wieder auf den langjährigen Mittelwert zurück.

Wie aus den Aufzeichnungen der Ozeanografen hervorgeht, trat fast gleichzeitig mit der wundersamen Dorschvermehrung eine Anomalie in der Strömung des Nordatlantiks auf: Der kalte Subpolarwirbel nördlich des Golfstroms schwächte sich vorübergehend ab und verlagerte sich etwas nach Westen. Zwar kann die zeitliche Nähe der beiden Phänomene ein Zufall sein. Doch deckten genauere Untersuchungen auch bei vielen anderen Fischarten ungewöhnliche Veränderungen innerhalb derselben Zeitspanne auf. Das verstärkt den Verdacht, dass die Strömungsänderung damals das gesamte Ökosystem durcheinanderbrachte.



Zu den Instrumenten, mit denen Wissenschaftler überprüfen, ob der Golfstrom erlahmt, gehören Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser (ADCP, nach englisch: acoustic Doppler current profiler). Hier wird vom Forschungsschiff »Meteor« eine Messstation zu Wasser gelassen, die in der orangefarbenen Kugel vier solche Geräte enthält. Darüber ist ein zusätzlicher Strömungsmesser am Kabel angebracht.

THOMAS WASHLEWSKI, IFM HAMBURG



Der Vermessung des Golfstroms dienen auch so genannte CTD-Rosetten (von englisch: Conductivity, Temperature, Depth). Sie sind mit Sensoren für Temperatur, Leitfähigkeit und Wasserdruck bestückt. Aus diesen Messwerten lassen sich außerdem Salzgehalt und Wassertiefe ableiten. Hier wird eine solche Rosette von der »Meteor« ausgesetzt. Zusätzlich enthält sie in den gelben Röhren je ein ADCP-Gerät, das ein Tiefenprofil der Strömungen liefert (siehe Bild S. 15).

Payne behält den Blauen Wittling im Rahmen des NAACLIM-Projekts jetzt besonders scharf im Auge, um mögliche Auswirkungen veränderter Strömungs-

verhältnisse auf das Ökosystem im Nordatlantik auch in Echtzeit analysieren zu können. Besonders aufregend wäre es natürlich, wenn sich aus diesen

Beobachtungen Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung von Fischbeständen ableiten ließen, was bisher noch nicht möglich ist.

Koen de Ridder vom Flämischen Institut für technologische Forschung (VITO) in Mol befasst sich im Rahmen des NAACLIM-Projekts damit, wie sich Veränderungen in Klima und Meeresströmungen auf die Lebensbedingungen in einzelnen Städten auswirken werden. Seine Ergebnisse könnten den jeweiligen Behörden dann als Grundlage für die Gesundheitsvorsorge und den Katastrophenschutz dienen. Bisher sind Prognosen von Meeresbewegungen und Klimaschwankungen zu grob gerastert, um konkrete Aussagen über die Folgen für bestimmte Städte zu erlauben. De Ridder will die Analysen so weit verfeinern, dass das möglich wird.

Klar ist: Auch wenn sich ein plötzlicher Umschlag mit apokalyptischen Folgen wie in dem Film »The Day After Tomorrow« nach heutigem Kenntnisstand praktisch ausschließen lässt, müssen wir die Launen der Meeresströmungen und Winde noch viel besser verstehen lernen, um uns gegen kommende Veränderungen zu wappnen.

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

EVOLUTION

Austausch von Genen zwischen verschiedenen Wirbeltierarten

Die urtümlichen Neunaugen haben einiges Erbmateriale mit manchen viel »modernerer« Knochenfischen gemeinsam – allerdings nicht von alters her. Offenbar sind hier Gene von einer Art zur anderen gesprungen.

VON AXEL MEYER

Kinder sehen ihren Eltern typischerweise ähnlicher als ihren Altersgenossen aus anderen Familien. Denn wie schon Charles Darwin wusste, vererben sich Merkmale von einer Generation zur nächsten über die Eltern auf ihre Kinder. Auch Veränderungen im Erb-

material werden auf diese Weise nur an direkte Nachkommen weitergegeben: »vertikal«, wie Biologen sagen. Bildhafte Darstellungen wie Stammbäume und Abstammungslinien wie bei Familien- genealogien verdeutlichen das Prinzip. Klar ist auch: Erst durch natürliche Se-

lektion können sich vorteilhafte Mutationen mit der Zeit in einer Population durchsetzen und damit Arten verändern. So funktioniert unseres Wissens die Evolution – zumindest fast immer.

Manchmal nämlich stimmt die Evolutionsgeschichte eines Gens oder

Erbgutabschnitts, die Forscher anhand molekularer Unterschiede rekonstruieren, nicht mit der Geschichte der Arten überein, die dieses Gen besitzen. Es kommt vor, dass nicht näher miteinander verwandte Organismen einige verblüffend ähnliche Gene oder sogar identische Erbschnitte aufweisen, während derselbe Erbfaktor ihren nahe verwandten Arten fehlt. In solchen Fällen können die DNA-Sequenzen nicht auf den letzten gemeinsamen Vorfahren zurückgehen, sondern müssen später dazugekommen sein. Von Bakterien ist das Phänomen inzwischen gut bekannt: Mikroben nehmen oft fremdes Erbmaterial auf und gewinnen dadurch unter Umständen neue Eigenschaften, etwa Antibiotikaresistenzen. Offenbar erfolgt dort ein Austausch von genetischem Material über Artgrenzen hinweg – fachsprachlich »horizontal« oder »lateral«, also innerhalb einer Generation.

In der frühen Evolution des Lebens scheint ein Gentransfer zwischen verschiedenen Organismen allgemein sehr bedeutsam gewesen zu sein, denn Rekonstruktionsstudien der entfernt verwandten Bakteriengruppen seit der Anfangszeit des Lebens zeigen Indizien dafür, dass sich mitunter klare, deutlich getrennte evolutionäre Linien von Bakterien nicht eindeutig genetisch

unterscheiden und in Stammbäumen sortieren lassen, sondern vielmehr verwirrende Netzwerke genetischer Beziehungen aufzuweisen scheinen. Solche Ergebnisse lassen sich am einfachsten durch horizontalen Genfluss erklären, und vielleicht machte ein Genaustausch zwischen ganz verschiedenen Bakterien in der Urzeit sogar erst die Entstehung komplexerer Organismen möglich. Denn wir wissen heute: Die Mitochondrien (quasi die Zellkraftwerke) in unseren Zellen und die für die Fotosynthese zuständigen Chloroplasten in Pflanzenzellen gehen auf dergleichen zurück. Das bedeutet, unsere Zellen sind genau genommen symbiontisch aus mehr als einer evolutionären Linie zusammengesetzt.

Anzeichen dafür, dass auch zwischen komplexer gebauten Arten – also bei mehrzelligen Organismen oder gar Wirbeltieren – horizontaler Gentransfer stattgefunden hat, finden sich heute nur selten. Speziell für Wirbeltiere kennen Forscher derzeit nur ganz wenige, vereinzelte Fälle, und fast immer waren es Viren, die zwischen den Genomen ausgetauscht wurden. Allerdings ist schon länger bekannt, dass die Genome von Pflanzen und Tieren eine Vielzahl »springender Gene« beherbergen. Es handelt sich um so genannte Transposonen: Erbsequenzen, die sich im ge-



Mit ihren scharfen, hornigen Zähnen im Rundmaul beißen sich Neunaugen an ihren Opfern fest, um sie auszusaugen.



**Natur
Energie
Plus**

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 30.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!





Meerneunaugen saugen Blut und andere Körpersäfte aus Fischen. Eine Attacke wie die auf diese Forelle kann tödlich sein.

samten Genom des Wirts verbreiten und vermehren können und dies teilweise auch heftig tun. Wahrscheinlich gehen diese beweglichen Abschnitte im Erbgut ursprünglich immer auf irgendwann übergesprungene Fremd-DNA zurück.

Rätselhaft ist jedoch bisher, wie sich springende Gene überhaupt zwischen verschiedenen Wirbeltieren verbreiten konnten. Welcher Mechanismus kam da ist Spiel? Mein Labor an der Universität Konstanz arbeitet an einem internationalen Projekt mit, bei dem das komplette Genom des Meerneunauges (*Petromyzon marinus*) sequenziert wird. Neunaugen zählen nicht zu den Fischen – obwohl sie »Fisch des Jahres 2012« waren. Es sind urtümliche, aalähnlich aussehende Wirbeltiere, die sich mit ihrem kieferlosen, zahnbewehrten runden Maul an ihrem Opfer, insbesondere an Fischen festbeißen, sich dann durch deren Schuppen und Haut raspeln und Blut sowie andere Körpersäfte saugen. Neunaugen könnten geradezu Vorbild für außerirdische Sciencefiction-Monster gewesen sein.

Die Larven – Querder – der Meerneunaugen leben einige Jahre im Sediment von Flüssen, später besiedeln die Tiere Küsten des nördlichen Atlantik sowie der Nord- und Ostsee, das westliche Mittelmeer und mittlerweile eini-

ge der Großen Seen Nordamerikas, wo sie sich zu einer Plage für die Fischerei entwickelten.

Springende Gene, die erst später ins Genom gelangten

Bei dieser Art fanden wir im Verlauf der Genomanalyse ein bestimmtes Transposon – aus der Klasse Tc1 – in vieltausendfacher Kopie. Zusammen macht das immerhin 0,7 Prozent ihres Gesamtgenoms aus. Hätten schon die letzten gemeinsamen Vorfahren von Neunaugen und anderen Wirbeltieren vor über 500 Millionen Jahren dieses springende Gen besessen, dann müssten auch viele andere Wirbeltiere es haben. Doch wir konnten das Transposon weder bei Fröschen noch bei Mäusen nachweisen und auch bei den allermeisten Fischen nicht. Stattdessen entdeckten wir es aber im Genom einiger weniger Fischarten der Nordhalbkugel – die alleamt Meerneunaugen regelmäßig zum Opfer fallen, darunter Lachse, Forellen und ein Wels. Außerdem kam der DNA-Abschnitt bei einer weiteren nördlichen Neunaugenart vor. Bisher konnten wir das Transposon jedoch bei keiner Fisch- oder Neunaugenart der Südhalbkugel aufspüren (*Genome Biology and Evolution* 4, S. 929, 2012).

Unseres Erachtens sprechen die Befunde dafür, dass auch Neunaugen das

Transposon zu Beginn ihrer Evolution noch nicht besaßen. Die Linien der nördlichen Arten haben sich vor höchstens 200, vielleicht erst 100 Millionen Jahren von den südlichen getrennt. Somit dürften die nördlichen Arten das Element erst danach aufgenommen haben. Zu den Fischen fällt auf, dass nur einige wenige Arten ganz verschiedener systematischer Gruppen betroffen zu sein scheinen, die alle dem Meerneunauge als Beute dienen.

Genauere Analysen des Alters und der Evolution dieses Transposons lassen vermuten, dass es mehrere unabhängige Ereignisse gab, bei denen das untersuchte Tc1-Element zwischen Neunaugen und Fischen ausgetauscht wurde. Nach diesen Daten war der erste Besitzer am wahrscheinlichsten sogar ein Schuppenfisch und nicht das Meerneunauge selbst. Vielleicht erhielten es Neunaugen anfänglich von dieser Linie und übertrugen es später mehrmals auf weitere Fischarten, auf die es Neunaugen abgesehen haben. Sollte dieses Szenario zutreffen, wären Neunaugen eher Vektor und Opfer und nicht Ursache der Verbreitung jener DNA-Elemente gewesen.

Die große Frage ist nun, wie die DNA-Stücke überhaupt Artgrenzen »überspringen« konnten und wie sie schließlich bis ins Genom der Keimbahn der neuen Wirtsfische gelangten, so dass diese sie nun »normal« – vertikal – an Nachkommen weitervererben. Interessanterweise ließ sich das Transposon auch bei einigen Parasiten der betroffenen Fischarten nachweisen, die zu den Wirbellosen beziehungsweise Einzellern zählen – sonst kommt dieses bestimmte Tc1-Element außerhalb der Wirbeltiere nicht vor. Waren jene Plagegeister selbst Opfer geworden und womöglich auch an den horizontalen Transfers von Tc1 beteiligt? Viele Kopien des Elements sind durch Mutationen verändert worden und dürften auch ihre frühere Mobilität verloren haben. Das schließen wir aus den genetischen Unterschieden zwischen den zahlreichen Kopien innerhalb eines Genoms. Allerdings sind die Übertragungsergebnisse anscheinend noch

nicht allzu lange her: Möglicherweise erhielten einige der betreffenden Fischarten das Tc1-Element sogar erst nach dem Ende der letzten Eiszeit von Neunaugen, die sie anfielen. Genaueres können erst weitere Studien zeigen.

Übrigens muss die Aufnahme neuen Genmaterials betroffenen Organismen nicht unbedingt geschadet haben – im Gegenteil. Manche Transposonen haben die Funktion eines ihnen benachbarten Gens sogar vorteilhaft verändert. Und bei Säugetieren übernehmen

beispielsweise einstige springende Gene im Immunsystem inzwischen wichtige Aufgaben im Zusammenhang mit der Vielfalt der Antikörper. Fast 45 Prozent des menschlichen Genoms gehen tatsächlich auf ehemals fremde, übergesprungene DNA zurück.

Für die Evolutionsforscher ist der Übertragungsweg von Erbmaterial zwischen Räuber und Beutetier etwas Neues. Was dies für die Vorstellungen zur organismischen Evolution bedeutet, bleibt abzuwarten. Wie häufig solche Er-

eignisse überhaupt vorkamen, lässt sich auch noch nicht abschätzen. Dass uns dank der neuen Methoden der Genomik, die es erlauben, relativ billig und sehr, sehr schnell Gigabasen von DNA-Sequenzen zu bestimmen, weitere Überraschungen erwarten, ist allerdings sicher – sowohl für die Genomik als auch für unser Evolutionsverständnis.

Axel Meyer hat an der Fakultät für Biologie der Universität Konstanz den Lehrstuhl für Zoologie und Evolutionsbiologie inne.

KOHÄRENTE MIKROWELLEN

Der zweite Frühling des Masers

Der Vorgänger des Lasers ist fast vergessen: Sein Betrieb war viel zu aufwändig. Britische Forscher hauchten dem Mikrowellenstrahler nun neues Leben ein, indem sie mit ein paar Tricks seine wesentlichen Nachteile behoben.

VON STEFAN A. MAIER

Was ist das? Das Innenleben dieses technischen Wunderwerks beruht auf einer gelungenen Kombination von klassischer Optik, Quantenphysik und ein bisschen Einstein. Seinen Dienst verrichtet es überall in unserem Alltag. Mehr noch, sein Erfolg ist so durchschlagend, dass wir sein Wirken gar nicht mehr bewusst wahrnehmen. Der Vorgänger des Hightech-

werkzeugs sieht hingegen nur noch in einigen wissenschaftlichen Nischen dahin – und das, obwohl er zum Beispiel Kontakt zu außerirdischen Zivilisationen ermöglichen könnte.

Das Rätsel ist schnell gelöst: Gemeint ist der Maser, die allgegenwärtige Quelle kohärenten, »einfarbigem« Lichts. Doch wer hat ihm den Weg bereitet und ist dabei selbst auf der Strecke geblieben?

Es handelt sich um den Maser, ein vom US-Physiker Charles Townes Ende der 1950er Jahre entwickelter technischer Aufbau zur Erzeugung kohärenter Mikrowellenstrahlen. Als Townes dafür 1964 den Nobelpreis erhielt, war die Weiterentwicklung des Masers zum Laser schon in vollem Gang.

Der Maser selbst geriet allmählich in Vergessenheit – auf Grund der Komple-

ANZEIGE

www.leibniz-gemeinschaft.de

lare Pharmakologie, Berlin (FMP) · Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin (IGB) · Leibniz-Institut für Kristallzüchtung, Berlin (IKZ) · Leibniz-Institut für Zoo- und Wildtierforschung, Berlin (IZW) · Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Berlin (MBI) · Museum für Naturkunde – Leibniz-Institut für Evolutions- und Biodiversitätsforschung (MfN) · Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Berlin (PDI) · Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB) · Deutsches Rheuma-Forschungszentrum Berlin (DRFZ) · Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik Leibniz-Institut im Forschungsverbund Berlin (WIAS) · Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam (AIP) · Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim (ATB) · Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau, Großbeeren & Erfurt (IGZ) · Innovations for High Performance Microelectronics/Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik, Frankfurt (Oder) (IHP) · Leibniz-Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung, Erkner (IRS) · Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) · Zentrum für Zeithistorische Forschung Potsdam (ZZF) · Deutsches Institut für Ernährungsforschung, Potsdam-Rehbrücke (DIFE) · Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, Müncheberg (ZALF) · Deutsches Schifffahrtsmuseum, Bremerhaven (DSM) · Leibniz-Zentrum für Marine Tropenökologie, Bremen (ZMT) · BIPS – Institut für Epidemiologie und Präventionsforschung (BIPS) · Bernhard-Nocht-Institut für Tropenmedizin, Hamburg (BNI) · Heinrich-Pette-Institut – Leibniz-Institut für Experimentelle Virologie, Hamburg (HPH) · GIGA German Institute of Global and Area Studies / Leibniz-Institut für Globale und Regionale Studien, Hamburg (GIGA) · Herder-Institut für historische Ostmitteleuropaforschung – Institut der Leibniz-Gemeinschaft, Marburg (HI) · Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Frankfurt am Main (SGN) · Deutsches Institut für Internationale Pädagogische Forschung, Frankfurt am Main, Berlin (DIPF) · Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung, Frankfurt am Main (HSFK) · Leibniz-Institut für Nutztierbiologie, Dummerstorf (FBN) · Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik an der Universität Rostock, Kühlungsborn (IAP) · Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie, Greifswald (INP) · Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde an der Universität Rostock (IOW) · Leibniz-Institut für Katalyse an der Universität Rostock (LIKAT) · Akademie für Raumforschung und Landesplanung – Leibniz-Forum für Raumwissenschaften, Hannover (ARL) · Deutsches Primatenzentrum – Leibniz-Institut für Primatenforschung, Göttingen (DPZ) · Georg-Eckert-Institut für internationale Schulbuchforschung, Braunschweig (GEI) · Technische Informationsbibliothek, Hannover (TIB) · Leibniz-Institut DSMZ – Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen, Braunschweig (DSMZ) · Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover (LIAG) · Deutsches Diabetes-Zentrum – Leibniz-Zentrum für Diabetes-Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (DDZ) · Deutsches Institut für Erwachsenenbildung – Leibniz-Zentrum für Lebenslanges Lernen, Bonn (DIE) · Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung, Dortmund (ILS) · Leibniz-Institut für umweltmedizinische Forschung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf (IUF) · Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Essen (RWI) · Leibniz-Institut für Analytische Wissenschaften, Dortmund und Berlin (ISAS) · Zoologisches Forschungsmuseum Alexander Koenig – Leibniz-Institut für Biodiversität der Tiere, Bonn (ZFMK) · Leibniz-Institut für Arbeitsforschung an der TU Dortmund (IfAdo) · Deutsche Zentralbibliothek für Medizin, Köln, Bonn (ZB MED) · Deutsches Forschungsinstitut für öffentliche Verwaltung Speyer (FÖV) · Leibniz-Institut für Europäische Geschichte, Mainz (IEG) · Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Forschungsinstitut für Archäologie, Mainz (RGZM) · Leibniz-Zentrum für Psychologische Information und Dokumentation, Trier (ZPID) · Leibniz-Institut für Neue Materialien, Saarbrücken (INM) · Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik (LZI) · Leibniz-Institut für Länderkunde, Leipzig (IFL) · Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Leipzig (IFT) · Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung, Leipzig (IOM) · Leibniz-Institut für Polymerforschung, Dresden (IPF) · Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Dresden (IÖR) · Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung, Dresden (IFW) · Leibniz-Institut für Pflanzenbiochemie, Halle (IPB) · Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung, Gatersleben (IPK) · Institut für Wirtschaftsforschung, Halle (IWH) · Leibniz-Institut für Neurobiologie, Magdeburg (LIN) · Leibniz-Institut für Agrarentwicklung in Mittel- und Osteuropa, Halle (IAMO) · Forschungszentrum Borstel – Leibniz-Zentrum für Medizin und Biowissenschaften, Borstel (FZB) · Institut für Weltwirtschaft an der Universität Kiel (IFW) · Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Kiel (IPN) · Deutsche Zentralbibliothek für Wirtschaftswissenschaften – Leibniz Informationszentrum Wirtschaft, Kiel (ZBW) · Leibniz-Institut für Altersforschung – Fritz-Lipmann-Institut, Jena (FLI) · Leibniz-Institut für Naturstoff-Forschung und Infektionsbiologie – Hans-Knöll-Institut, Jena (HKI)



Der steinige Weg zur Anerkennung

Zurückweisung kann Vorteile bringen.

Wer nach mühsamer Forschungsarbeit seinen Artikel bei einer Fachzeitschrift zur Veröffentlichung einreicht, ist noch längst nicht am Ziel. Jetzt beginnt der nervenaufreibende Peer-Review-Prozess, die Begutachtung durch ausgewiesene Meister des Fachs.

Ein Neuling wird sich dem Urteil der Koryphäen bereitwillig unterziehen, ein gestandener Forscher dagegen nur äußerst unwillig. Einer meiner Freunde ist selbst ein international angesehener Biochemiker. Er schimpft wie ein Rohrspatz über das langwierige Redigieren und Revidieren; dass seine neueste Arbeit nicht dankend bei »Nature« oder »Cell« angenommen und schleunigst gedruckt wird, kann er sich allein durch Borniertheit oder Intrigen der Gutachter erklären. Tatsächlich soll es schon vorgekommen sein, erzählt mein Freund, dass jemand, dessen Werk abgelehnt wurde, seine Grundidee bald darauf in einem Vortrag seines Gutachters wiedererkannte.

Vielleicht tröstet ihn, was Vincent Calcagno vom Institut national de la recherche agronomique in Sophia-Antipolis (Frankreich) nun herausgefunden hat. Mit einem international zusammengesetzten Team betrieb der Ökologe gewissermaßen eine ökologische Studie über Wissenschaftspublizistik: Er befragte die Autoren von fast 90 000 zwischen 2006 und 2008 in knapp 1000 Fachjournalen erschienenen bio-wissenschaftlichen Artikeln und analysierte die Publikationsgeschichten (*Science* 338, S. 1065, 2012).

Wie sich zeigte, streben Forscher zunächst überwiegend die Veröffentlichung bei einem besonders prominenten, interdisziplinären Organ wie »Science« oder »Nature« an – und ernten dort naturgemäß schon allein aus Platzgründen mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Ablehnung. Danach wenden sie sich an eine weniger einflussreiche, vielleicht auch weniger angesehene, jedenfalls fachspezifischer ausgerichtete Zeitschrift und durchlaufen dort erneut einen Peer-Review-Prozess. Da nun die Auslese möglicherweise weniger streng und das Heer der Konkurrenten kleiner ist, bestehen größere Chancen, dass die Arbeit angenommen wird.

So weit, so gut. Der eigentliche Clou der Studie ist aber, dass sich der Einfluss der schlussendlich publizierten Artikel – gemessen an der Häufigkeit, mit der sie in der Fachwelt zitiert werden – als umso größer erweist, je öfter sie zuvor abgelehnt wurden! Offenbar gewinnt also nach der Devise »Gelobt sei, was hart macht« eine wissenschaftliche Veröffentlichung mit jeder Zurückweisung an Bedeutung.

Was mag der Grund sein? Möglicherweise lernt der Autor aus den Einwänden der externen Gutachter, noch offenen Fragen nachzugehen oder seine Aussagen besser auf den Punkt zu bringen. Man muss freilich nicht so weit gehen wie der Physiker Michael Schreiber von der Technischen Universität Chemnitz, der gegenüber »Nature« (online am 11.10. 2012) folgert: »Lehnt mehr ab, denn mehr Ablehnungen steigern die Qualität.«

Genau den entgegengesetzten Schluss zieht der Biologe E. Keith Bowers von der Illinois State University in Normal: Man möge den Autoren, statt sie abzuweisen, lieber mehr Gelegenheit bieten, nach eingehender Beratung ihren Artikel in der jeweiligen Zeitschrift unterzubringen, welcher dadurch der gesteigerte Wert der Arbeit zugutekomme (*Science* 338, S. 1029, 2012).

Was mein biochemischer Freund wohl dazu meint? Vermutlich wird er es unwirsch abtun mit der Bemerkung: »Das ist ja vielleicht alles gut und schön für junges Gemüse, aber doch nichts für einen alten Hasen wie mich.«



Michael Springer

xität seines Aufbaus und Betriebs wohl auch zu Recht. Doch nun hat ihm Mark Oxborrow vom National Physical Laboratory bei London zusammen mit Kollegen des Imperial College London (dem auch der Autor angehört, *Anm. d. Red.*) neues Leben eingehaucht. In einer Studie stellte das Team kürzlich einen neuartigen Masertyp vor, der die meisten Nachteile des ursprünglichen Aufbaus umgeht (*Nature* 488, S. 353, 2012).

Einfaches Prinzip, trickreiche Details

Wie bei einem Laser (englisch: light amplification by stimulated emission of radiation, Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) beruht die Funktionsweise eines Masers (das »M« steht entsprechend für Mikrowellen) auf der Intensivierung elektromagnetischer Strahlung; Laser verstärken sichtbares Licht oder Infrarot, Maser hingegen Mikrowellen mit Frequenzen zwischen 1 und 300 Gigahertz (Milliarden Hertz). Das Prinzip ist einfach erklärt: Schwache elektromagnetische Strahlung wird in einem so genannten Resonator mit verspiegelten Enden viele tausend Mal hin- und herreflektiert, bevor sie daraus als Laser- oder Maser-»Licht« entkommt. Nur die Frequenz, die mit der Resonanzfrequenz des Resonators übereinstimmt, bleibt dabei erhalten; alle anderen gehen verloren.

Gefüllt ist der Resonator mit einem »aktiven Medium«, das sich energetisch anregen lässt; dabei werden Elektronen in den Atomhüllen etwa durch einen anderen Laser, eine chemische Reaktion oder einen elektrischen Strom auf höhere Energieniveaus angehoben. Von dort fallen sie schnell in einen energetisch etwas niedrigeren, aber langlebigen Zustand, in dem sie sich ansammeln. Schon nach Sekundenbruchteilen der Anregung befinden sich hier mehr Elektronen als im energetischen Grundzustand; Fachleute sprechen von Inversion. Fallen die Ladungsträger endgültig in den Grundzustand zurück, wird die frei werdende Energie als zunächst schwache Laserstrahlung ausgesandt.

Nun kommt ein weiterer Mechanismus ins Spiel: Ein Photon des erzeugten Strahls trifft auf ein angeregtes Atom,



Im neuartigen Maser britischer Forscher umschließt ein ringförmiger Resonator aus Saphir das aktive Medium, einen Pentacen-Kristall. Das gelbe Hintergrundlicht macht Fehler im Kristallgitter sichtbar.

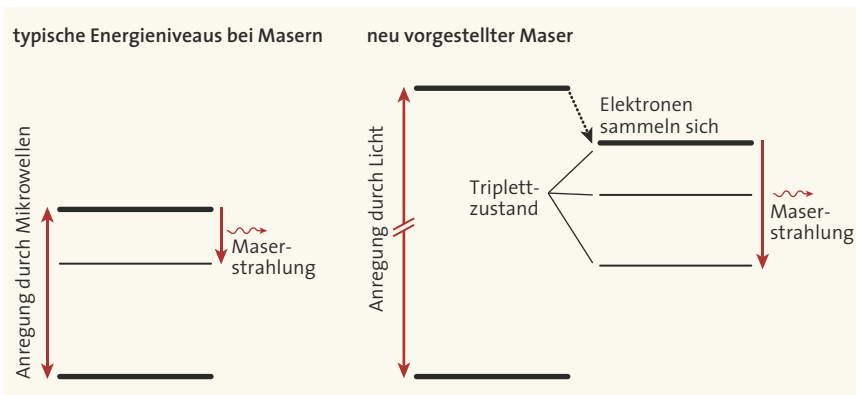
in dem daraufhin ein Elektron in den Grundzustand übergeht. Durch diese »stimulierte Emission« wird also ein weiteres Photon emittiert – aus eins mach zwei, aus zwei mach vier und so fort, alle mit derselben Frequenz. Der Trick besteht darin, dass die Differenz zwischen den bei der stimulierten Emission beteiligten Energieniveaus mit der Resonanzfrequenz des Resonators übereinstimmt. Dann arbeitet das Instrument wie ein Verstärker, der die Strahlintensität immer weiter aufschaukelt.

Die vielfachen Einsatzzwecke für Lichtverstärker sind bekannt. Doch auch die Nachfrage nach Mikrowellenverstärkern sollte groß sein, schließlich arbeiten etwa Mobilfunknetze und Radaranlagen mit Frequenzen im Gigahertzbereich. Aber selbst moderne Maser beruhen noch auf mehr oder weniger demselben Aufbau wie in den 1960er Jahren. Man muss sie also mit flüssigem Helium auf eine Temperatur knapp oberhalb des absoluten Nullpunkts kühlen; nur dann lässt sich die Inversion aufrechterhalten. Außerdem müssen die Kristalle des Mediums, in denen die

Atome mit den benötigten Energieübergängen eingeschlossen sind, mit Hilfe eines starken Magnetfelds auf die gewünschte Frequenz eingestellt werden.

Trotz des hohen Aufwands lässt die Verstärkungsleistung eines Masers gegenüber der seiner optischen Kollegen sehr zu wünschen übrig. Schon vor Jahrzehnten haben ihn darum elektronische Signalverstärker verdrängt, die billig bei Raumtemperatur arbeiten. Einen Vorteil besitzen Maser gegenüber ihrer Konkurrenz allerdings doch: Sie sind extrem rauscharm, produzieren also kaum störende Frequenzen. Trotzdem können sie diese Stärke nur selten ausspielen. Denn schon beim Erzeugen und Modulieren der bei Mobilfunk und Radar verwendeten Strahlung entsteht so viel Rauschen, dass ein bisschen mehr nicht weiter schadet.

Der Einsatz von Masern beschränkt sich daher auf das Verstärken von Signalen, die von vornherein einen extrem niedrigen Rauschpegel aufweisen. Ein berühmtes Beispiel ist die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung im Jahr 1965, deren Mikro-



BLANK, A. MASERS MADE EASY. IN NATURE 488, 5, 285-286, 2012, FIG. 1

Das aktive Medium in Masern wird oft durch Mikrowellenstrahlung angeregt (links). Die Energieniveaus (fett dargestellte Niveaus sind mit besonders vielen Elektronen bevölkert) sind dabei Folge unterschiedlicher Spinkombinationen zweier Elektronen. Der im Artikel vorgestellte Maser wird hingegen mit optischem Laserlicht angeregt (rechts). Die Elektronen fallen nach einem Zwischenschritt erst in einen so genannten Tripletzustand, bevor sie unter Aussendung von kohärenter Mikrowellenstrahlung erneut tiefer fallen.



Placing scientists worldwide

Kelly Scientific Resources® ist ein Fachbereich von Kelly Services, einem seit über 65 Jahren global agierenden Dienstleister für Personallösungskonzepte.

Wir haben uns auf die Vermittlung von naturwissenschaftlichem und medizinischem Personal aller Hierarchieebenen spezialisiert. Alle unsere Mitarbeiter sind selbst Naturwissenschaftler und haben einen industriellen Hintergrund. So können wir Ihre Bedürfnisse verstehen und Ihnen eine optimale Betreuung bei der Karriereentwicklung bieten. Wir sind für unsere namhaften Kunden ständig auf der Suche nach den Talenten der Branche und bieten Ihnen eine Vielzahl von Karrieremöglichkeiten in den Bereichen:

- Klinische Forschung
- Arzneimittelsicherheit
- Medical Information
- Zulassung
- Qualitätskontrolle und -sicherheit
- Forschung und Entwicklung
- Marketing und Vertrieb
- Produktion

Melden Sie sich gerne bei uns. Wir freuen uns darauf, Sie kennen zu lernen.

karriere.science.muenchen@kellyservices.de
karriere.science.koeln@kellyservices.de

KELLY | scientific resources

wellenfrequenzen ohne einen Maser nicht hätten aufgespürt werden können. Auch Radioastronomen setzen die Geräte ein, und für die Kommunikation im Weltraum – ob mit irdischen Astronauten oder außerirdischen Intelligenzen – wären sie ideal.

Nun aber gelang ein Durchbruch: Der von den Briten entwickelte Maser ist mit Abmessungen von ein paar Zentimetern recht kompakt, benötigt kein starkes Magnetfeld und arbeitet bei Raumtemperatur. Der Trick: Die Forscher tauschten die Maserkristalle gegen ein Material aus, das sich wie gewünscht viel leichter anregen lässt. Aus dem aromatischen Kohlenwasserstoff Pentacen, in dem fünf Benzolringe linear miteinander verknüpft sind, stellten sie einen organischen Kristall her und setzten diesen anschließend in einen ringförmigen Mikrowellenresonator aus Saphir (siehe Foto S. 21). Mit einem gelben Laserstrahl konnten sie die Pentacen-Moleküle dann gezielt anregen.

Überdies kam die Quantenphysik mit ins Spiel. Die Wechselwirkung zwischen Spin und Bahndrehimpuls der Elektronen sorgt nämlich dafür, dass die angeregten Elektronen in so genannte Triplettzustände übergehen. Zwei davon weisen den gewünschten Frequenzabstand auf (siehe Grafik S. 21), ohne dass dafür ein starkes Magnetfeld nötig wäre.

Die beim Übergang zwischen den Niveaus ausgesandte Strahlung tritt schließlich in den Ringresonator ein, trifft dort in flachem Winkel auf dessen äußere Wände und wird in das Innere des Resonators zurückreflektiert. Durch wiederholte Umläufe verstärkt sich die Strahlintensität immer mehr.

Das Ergebnis: Die Forscher können mit ihrem Maser kohärente elektromagnetische Wellen der Frequenz 1,45 Gigahertz erzeugen. Dank der hohen Güte des von den Materialwissenschaftlern Jonathan Breeze und Neil Alford am Imperial College entwickelten Resona-

tors ist die Verstärkungsleistung sogar recht hoch. Sie beträgt etwa das Hundertmillionenfache dessen, was der in den 1960er Jahren konstruierte – und seither kaum weiterentwickelte – Wasserstoffmaser bei einer Frequenz von 1,42 Gigahertz leistete.

Noch löst der neue Prototyp die alte Instrumentengarde nicht ab, denn bislang gibt er nur kurze Pulse von sich. Die Forscher haben aber bereits Gelder eingeworben, um ihn zum kontinuierlichen Betrieb umzurüsten. Gelingt ihnen das, lässt sich die neue Masergeneration wohl recht einfach zu kompakten Verstärkern für die Radioastronomie und Mikrowellenspektroskopie weiterentwickeln. Mehr als 50 Jahre nach seiner Erfindung könnte dem Maser ein zweiter Frühling vergönnt sein.

Stefan A. Maier ist Professor für Nanophotonik am Imperial College in London und Direktor am dortigen Centre for Plasmonics and Metamaterials.

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



Jahresabonnenten von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen ermäßigten Eintritt erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, kostenlose Downloads und das Produkt des Monats zum Spezialpreis
- Ein Preisnachlass beim Bezug von **Spektrum – Die Woche**, Deutschlands erstem wöchentlichem, digitalem Wissenschaftsmagazin



Produkt des Monats

1913

Gesund dank Rauchen

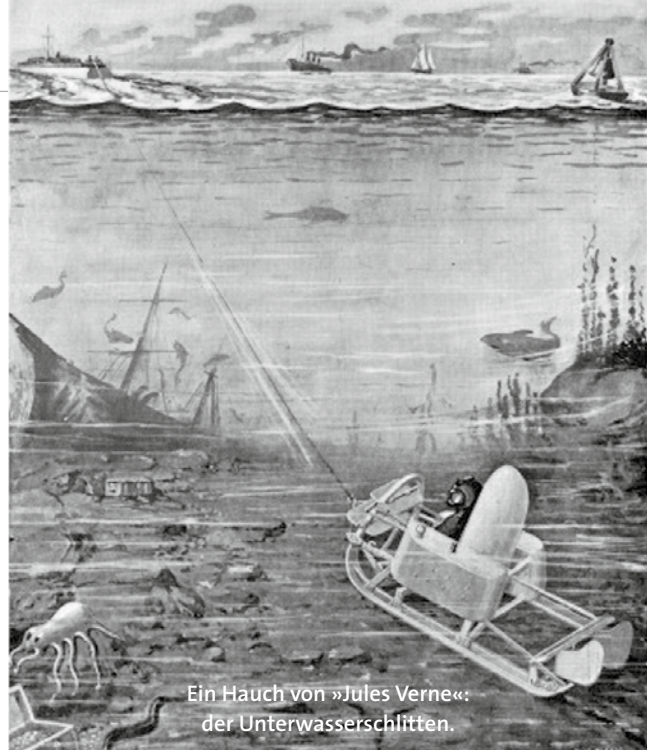
»Nach neuesten Veröffentlichungen von Professor Dr. Wenck vom Kaiserlichen Gesundheitsamte dürfte der Tabak als sehr gut wirkendes Schutzmittel gegen Cholera-keime in Betracht kommen.

Es zeigte sich nämlich, daß in und auf Zigarren, die mit Kommabazillen behandelt waren, alle Keime innerhalb von 24 Stunden abgetötet wurden, daß ferner in keiner der untersuchten, während der letzten Choleraepidemie in Hamburg hergestellten Zigarren ein Keim gefunden werden konnte, und daß schließlich während der erwähnten Epidemie kein einziger Zigarrenarbeiter an der Cholera erkrankte.« Prometheus 1210, S. 224, 1913

Submarine Mobilität

»Die Oberfläche des Wassers beherrscht der Mensch schon lange. Für die Tiefe kamen als Mittel bis jetzt in Frage: der Schlauchtaucher und das Unterseeboot. Der Schlauchtaucher kommt nur dort in Frage, wo es sich um Arbeiten auf einer kleinen Fläche handelt. Das Unterseeboot kann sich auf dem Wasser und in demselben mit großer Schnelligkeit nach jeder beliebigen Richtung bewegen. Für die Werke des Friedens kommt es aber nicht in Betracht, da ja die Mannschaft in einem allseitig geschlossenen Raum untergebracht ist. Einen Apparat, der beide Möglichkeiten bietet, gab es noch nicht.

Der Ruhm einer derartigen Konstruktion gebührt einer deutschen Firma, dem Drägerwerk in Lübeck. Der Grundgedanke ist, daß Sauerstoff zugeführt und die Kohlensäure der ausgeatmeten Luft durch eine Kalipatrone gebunden wird.



Ein Hauch von »Jules Verne«:
der Unterwasserschlitten.

Bekommt ein Taucher eine derartige Kalipatrone mit, so kann er etwa 3 Stunden unter Wasser bleiben. Die Fortbewegung geschieht durch den dargestellten Schlitten, der durch ein Stahlkabel mit einem Schleppboote verbunden ist.

Auf zwei langgestreckten Gleitkufen ruhen der Tauchersitz mit Schutzmuschel, an den Seiten je ein Behälter für Preßluft. Die Steuer werden vom Führersitz aus durch Hebel betätigt. Solange die Tanks mit Preßluft gefüllt sind, wird der mit dem Taucher beschwerte Schlitten im Oberwasser schwimmen; er kann in dieser Lage unbeschränkt fortbewegt werden. Für das Niedertauchen auf Grund ist entweder das Ablassen von Preßluft oder, wenn der Schlitten in Fahrt ist, Niederdrücken der Tiefensteuer erforderlich.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 4, S. 70, 1913

Der Mond, oberflächlich betrachtet

»Wie man schon seit einiger Zeit weiß, besteht die thermische Radiostrahlung des Mondes im Zentimeterwellengebiet aus einem konstanten Anteil und einer mit der Mondphase veränderlichen Komponente, die gegenüber der optischen Strahlung in charakteristischer Weise »nachhinkt«. Hieraus folgt, daß die Radiowellen einer unterschiedlichen Tiefe zuzuordnen sind, deren Frequenzabhängigkeit interessante Aufschlüsse über die Natur des Oberflächenmaterials verspricht. Mit Hilfe neuer Absolutmessungen hat W. S. Troitzkij von der Universität Gorkij die Überzeugung gewonnen, daß die Oberflächenschichten unseres Trabanten bis mindestens 1 m Tiefe recht homogen sind. Es bestehen keinerlei Anzeichen für metallische Beimischungen im Oberflächenmaterial, auch nicht für Eisenstaub von Meteoriten. Damit verliert die Hypothese, daß die Oberflächenstruktur des Mondes wesentlich durch Einsturz interplanetarer Körper geformt sei, an Zugkraft.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 1, S. 25, 1963

Strahlende Kartoffeln

»Die Britische Atom-Energie-Behörde in Harwell hat nun eine Forschungsgruppe mit der Untersuchung der Frage beauftragt, wieweit der radioaktive Atomabfall praktisch nutzbar gemacht werden kann. Dr. H. Seligmann, der Leiter der Isotopen-Abteilung in Harwell, erklärte, dass die bisher durch die Kältetechnik bewirkte Frischerhaltung von Lebensmitteln durch Sterilisation mit Hilfe radioaktiver Bestrahlung ersetzt werden könne. So wird die britische Flotte

1963

bereits mit Kartoffeln beliebt, die durch Bestrahlung mit atomaren Abfallprodukten konserviert und am Auskeimen verhindert werden. Dabei konzentriert sich die Forschung auf das Ziel einer zuverlässigen Verlängerung der normalen Konservierung, weil dabei bestimmt keine Gefahren für den Verbraucher auftreten können.« Neuheiten und Erfindungen 326, S. 8, 1963

Schlafwandler als Mörder

Lange haben Forscher strikt zwischen Schlafen und Wachen unterschieden. Diese Trennlinie verwischt nun zunehmend. Das hat praktische Auswirkungen, etwa in der Rechtsprechung, wenn sich die Frage stellt, ob ein Verbrechen beim Schlafwandeln begangen wurde – oder wissentlich.

Von James Vlahos

Benjamin Adoyo wirkte ganz normal, als er am 27. Juni 2005 das Zentrum für Schlafstörungen von Minnesota aufsuchte. Er stammte aus Kenia, war 26 Jahre alt, Student und seit Februar verheiratet. Sein Problem: Er war Schlafwandler. Schon als Kind pflegte er nachts herumzueistern. In letzter Zeit hatte sich das allerdings verschärft. Oft wurde seine Frau davon wach, dass er sich über sie beugte und sie schüttelte, während er unsinniges Zeug brabbelte. Gelang es ihr, ihn zu wecken, wusste er von all dem nichts. Verständlicherweise belastete das die Ehe. Laut Hausarzt erschreckte sich die Frau zwar manchmal heftig, aber verletzt hatte ihr Mann sie noch nie.

Nach einer ersten Anamnese im Schlafzentrum wurde Adoyo zum 10. August für eine Übernachtung einbestellt. Die Ärzte wollten sein Schlafverhalten beobachten und dazu in einem EEG (Elektroenzephalogramm) die Erregungsmuster des Gehirns aufzeichnen. Und tatsächlich: Mitten in der Nacht, im tiefsten Schlaf, begann der Mann um sich zu schlagen und an den an seinem Kopf befestigten Drähten zu zerren. Dabei riss er schließlich Elektroden samt ganzen Haarbüscheln heraus, ohne aufzuwachen. Am nächsten Morgen

erzählte ihm der Klinikleiter Michel Cramer Bornemann, er leide an einer Art von Aufwachstörung – oder Parasomnie –, die mit dem so genannten Nicht-REM-Schlaf assoziiert sei, also mit eher tiefen Schlafphasen ohne die raschen Augenbewegungen (englisch: rapid eye movements), die gewöhnlich mit Träumen in Verbindung gebracht werden. Zu der Diagnose passte, dass Adoyo ohne Zögern verneinte, als man ihn fragte, ob er beim Ausreißen der Haare ein Ziehen oder Schmerz gespürt habe. Schlafwandeln erfolgt in der Regel aus den anscheinend traumlosen Phasen heraus, und davon bleibt keine Erinnerung zurück. Jedoch werden anders als sonst im Schlaf Bewegungen nicht unterdrückt.

Bornemann verordnete seinem Patienten ein angstlösendes Medikament, eine oft bewährte Maßnahme. Doch schon am 17. Oktober erschien Adoyo nochmals, weil ihm das Medikament, wie er berichtete, nicht wirklich helfe. Bornemann verordnete nun die doppelte Dosis, zwei Milligramm statt einem. Er beschrieb den Mann später als ausgesprochen nett, zuvorkommend und freundlich. Von der bösen Saat, die in ihm schlummerte, habe er keinerlei Anzeichen bemerkt.

Erst Monate später hörte die Klinik wieder von dem Studenten – durch das Büro seines Pflichtverteidigers. Denn am 19. Oktober war Adoyo festgenommen worden, weil er die Nacht zuvor seine Frau umgebracht hatte. Die Verteidigung suchte nun einen Experten für Schlafstörungen der beschriebenen Art, um zu klären, ob der Gewaltakt tatsächlich mit der diagnostizierten Parasomnie zusammenhängen konnte.

Landläufig halten wir Schlafen und Wachsein für zwei verschiedene Zustände des Gehirns. Seit über 100 Jahren glauben auch Physiologen, dass beides normalerweise klar gegeneinander abgegrenzt ist. Den Schlaf unterteilen sie in REM- («Traum-») und Nicht-REM-Phasen, wobei letztere sich in Abschnitte verschiedener Schlaftiefe gliedern. Vor diesem Hintergrund fällt es Juristen verständlicherweise schwer, zu akzeptieren, dass eine Störung wie Schlafwandeln für ein Verbrechen verantwortlich sein soll. Die Ausrede »Das muss ich im Schlaf gemacht haben« klingt geradezu albern.

In den letzten 20 Jahren kam in der Schlafforschung jedoch eine revolutionäre neue Theorie auf. Nicht nur das

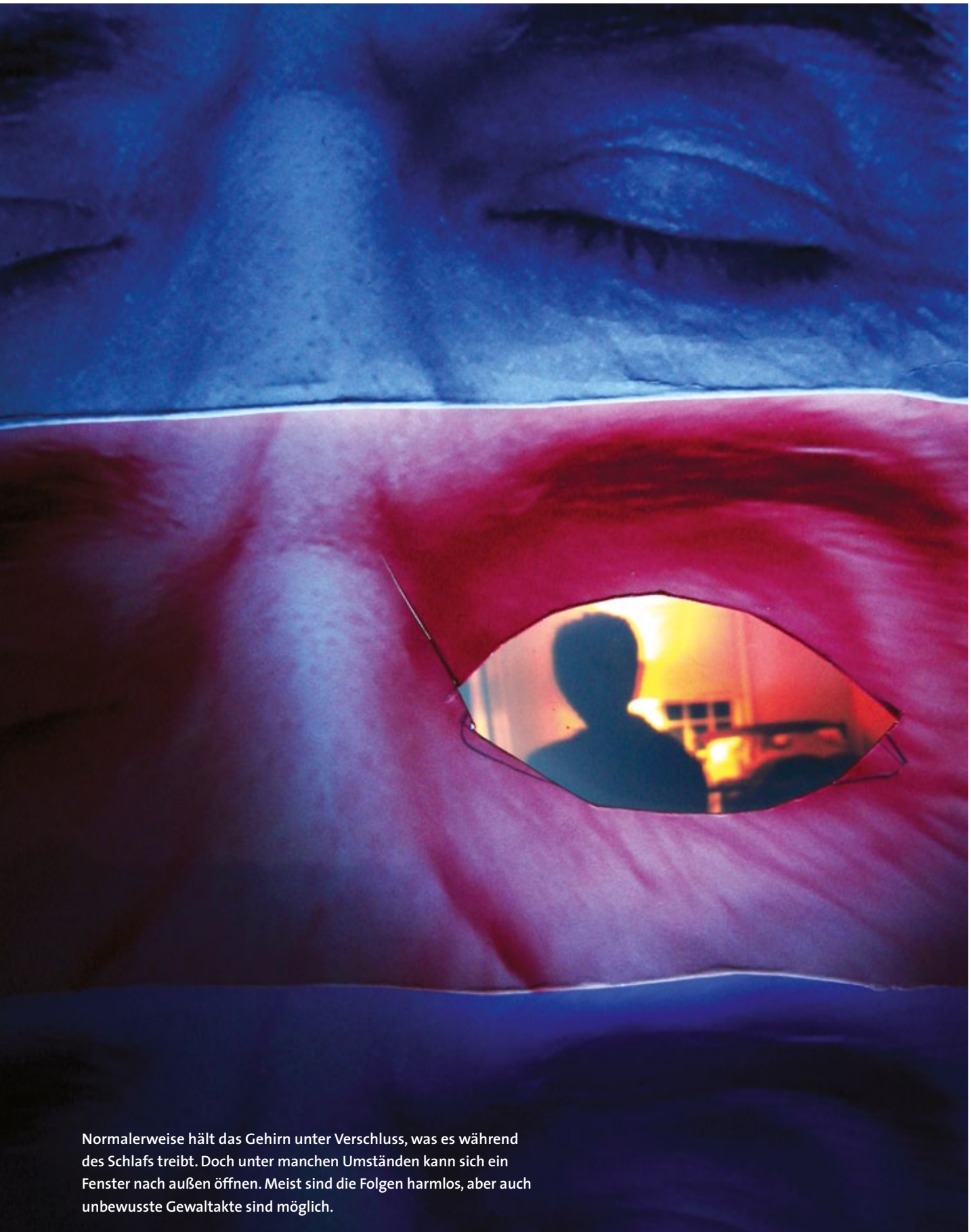
AUF EINEN BLICK

KRIMINALFÄLLE FÜR SCHLAFFORSCHER

1 Laut neuen Erkenntnissen ist Schlafen nicht eine Eigenschaft des Gehirns als Gesamtheit. Vielmehr können sich – nach der Theorie des **lokalen Schlafs** – auch nur **einzelne erschöpfte Hirnpartien** abmelden. Der ganze Organismus schläft erst, wenn viele Hirngebiete zugleich wachgetreten sind.

2 Deswegen können manche Hirnregionen wach sein, während jemand offensichtlich schläft. Es gibt so genannte **Aufwachstörungen**, bei denen sich Teile des Hirns im Tiefschlaf befinden oder träumen, während andere Bereiche Verhalten wie **Schlafwandeln** auslösen.

3 Wenn sich **verdächtige Gewalttäter** auf eine Aufwachstörung berufen, sind Schlafexperten gefragt. Neuere Erkenntnisse der Hirnforschung liefern ihnen Anhaltspunkte über die Möglichkeiten und Grenzen von **gewaltsamem Verhalten im Schlaf**.



Normalerweise hält das Gehirn unter Verschluss, was es während des Schlafs treibt. Doch unter manchen Umständen kann sich ein Fenster nach außen öffnen. Meist sind die Folgen harmlos, aber auch unbewusste Gewaltakte sind möglich.

GERALD SCOTA

Stichwort: Parasomnie

Der Begriff fasst Schlafstörungen zusammen, die abnormes Verhalten oder Erleben verursachen, etwa Schlafwandeln (Somnambulismus), Alpträume, Umsichschlagen, Reden im Schlaf, Zähneknirschen, schreiend Aufwachen. Sie treten in bestimmten Schlafphasen auf oder beim Übergang zwischen Schlafen und Wachen beziehungsweise zwischen verschiedenen Schlafstadien.

Phänomen Schlaf selbst lässt sich damit anders als bisher betrachten, auch kriminalistische Fragen erscheinen in einer neuen Sichtweise. Bornemann bringt die Theorie auf den Punkt: »Schlafen und wach sein bedeutet nicht länger entweder – oder, schwarz oder weiß; vielmehr haben wir es mit abgestuften Zuständen zu tun, mit einem Spektrum von Situationen.«

Nicht nur in der Dichtung treten Menschen auf, die zwar wach wirken und agieren, aber geistig abwesend sind – wie Lady Macbeth bei Shakespeare. Tatsächlich haben Gerichtssäle schon so manchen Fall dieser Art verhandelt. Zum ersten Mal in der amerikanischen Rechtsgeschichte wurde 1846 ein Schlafwandler vom Mord freigesprochen: Albert Jackson Tirrell hatte eine Prostituierte mit einer Rasierklinge fast enthauptet. In jüngerer Zeit machte eine Geschichte Schlagzeilen, die sich bei Toronto abgespielt hatte. Der 23-jährige Kenneth Parks war »im Schlaf« 14 Meilen mit dem Auto zu den Schwiegereltern gefahren und hatte dann seine Schwiegermutter getötet. Auch er wurde freigesprochen.

Ein ganz besonderes Detektivbüro

Allerdings ereignen sich solche unbewussten Angriffe mit Todesfolge wirklich sehr selten. In einem wissenschaftlichen Übersichtsartikel von 2010 listeten die Autoren 21 gerichtlich verhandelte Fälle auf, und von den Angeklagten kam nur etwa ein Drittel davon, hatte die Tat nach Ansicht des Gerichts also tatsächlich im Schlaf begangen. Doch im Ganzen geschehen gewaltsame Übergriffe im Schlaf gar nicht so selten. Tätliche Angriffe, Vergewaltigungen und andere Delikte gibt es öfter, als viele ahnen. Nach einer Telefonumfrage in den USA Ende der 1990er Jahre haben schätzungsweise zwei Prozent der Menschen schon einmal sich selbst oder andere im Schlaf verletzt.

Neben Bornemann gehören auch Mark Mahowald und Carlos Schenck, die gleichfalls am Schlafzentrum in Minnesota arbeiten, zu den führenden Experten für Parasomnien. Juristische Anfragen sind sie gewöhnt. Um diese Aufgaben von ihrer ärztlichen Arbeit getrennt zu halten, haben die drei 2006 eine Einrichtung für forensische Schlafanalyse ins Leben gerufen, genannt Sleep Forensics Associates – gewissermaßen ein schlafwissenschaftliches Detektivbüro. Bornemann hat die Leitung inne, seine Kollegen fungieren als Berater. Das Büro hat bisher über 250 Fälle von Gewalttaten

wissenschaftlich betreut, wobei die Anfragen jeweils etwa zur Hälfte von der Anklage und von der Verteidigung kamen. Die Ärzte sehen ihre Aufgabe aber nicht nur in den medizinischen Gutachten. Ihnen liegt auch an der Wahrheitsfindung. Bornemann nennt sich »Ermittlungschef« und meint das in dem Sinn, dass er sich bemüht, von einem Täter ein neurologisches Profil zu erstellen.

Falls die Experten Parasomnie als Tathintergrund ausschließen, kann das der Anklage Argumente liefern. Im umgekehrten Fall könnte der Beschuldigte unter Umständen sogar freigesprochen werden. Denn bei Parasomnie, so Bornemann, verhalten sich Menschen unbewusst, unmotiviert und absichtslos. Auf solche Erklärungen hin erlebt er allerdings, dass es Juristen widerstrebt, Schlafen und Wachen als graduell ineinander übergehende Phänomene zu betrachten.

Letztlich wird dann im Gerichtssaal über eine Definition von Bewusstsein verhandelt. Genauer gesagt kommt die Theorie des lokalen Schlafs zur Sprache. Der Name sagt es schon: Nach dieser Vorstellung schalten sich manchmal nur Teile des Gehirns ab, andere bleiben wach. Hiermit würde erklärbar, wieso ein müder Autofahrer eher Fehler macht oder wieso es sein kann, dass ein Nachtwandler literweise Eiskreme verschlingt oder verpackte Lebensmittel in sich hineinzustopfen versucht. Sogar sexuelle Übergriffe im Schlaf – was übrigens gar nicht so selten vorkommt – auf den Partner oder die Kinder würden erklärlich. Zu den Forschern, die diese Theorie 1993 erstmals formulierten, gehörte der Neurowissenschaftler James Krueger, der jetzt an der Washington State University in Spokane arbeitet. Die Koryphäen des Fachs reagierten damals entsetzt. Noch heute würden viele Experten die Idee für geradezu ketzerisch halten, meint Krueger. Allerdings freunden sich inzwischen immer mehr Schlafforscher damit an.

Bisher galt Schlaf als ein Zustand, der gleichzeitig so ziemlich das ganze Gehirn umfasst, zumindest was die »höheren« geistigen Funktionen betrifft. Man glaubte, er würde von übergeordneten physiologischen Regelkreisen kontrolliert. Das fand Krueger seit jeher nicht plausibel. Schließlich sei längst bekannt, dass manche Säugetiere ihr Gehirn nur zu Teilen schlafen legen. Beispielsweise schalten Delfine jeweils nur eine Hirnhälfte ab. Sie schwimmen weiter, und stets bleibt ein Auge offen. Außerdem fand der Forscher bei Durchsicht der medizinischen Fachliteratur über Hirnläsionen, dass die Patienten nie ihr Schlafvermögen verloren, ganz gleich, wie ausgeprägt der Schaden war oder welche Stelle er betraf. All dies spricht gegen eine übergeordnete Schlafinstanz.

Krueger beschrieb seine Schlussfolgerungen zusammen mit einem Kollegen 2011. Hiernach ruhen einzelne Gehirnbereiche abhängig von ihrer vorausgegangenen Inanspruchnahme. Er vermutet eine kleinteilige Regelung durch viele einzelne Steuerinstanzen, also quasi von unten her. Nach diesem Modell, das mittlerweile auch andere Experten vertreten, würden neuronale Netze oder vielleicht sogar einzelne Neurone im Prinzip zu jeder Tageszeit kurzerhand abschalten, wenn sie erschöpft sind – egal, was andere Netze gerade

tun. Schlaf als Gesamtphänomen des ganzen Körpers komme erst in dem Augenblick zu Stande, wenn die Mehrzahl der Hirneurone schlummere, wenn also viele der verantwortlichen Funktionseinheiten zugleich tätig würden. Nach diesem Konzept können kleine Hirnpartien lange vor dem Einschlafpunkt des Gesamtorganismus ein Nickerchen nehmen.

Die Stimmigkeit der Theorie untermauerte unter anderem das Team von David Rector an der Washington State University in Pullman. Die Forscher untersuchten an Ratten, wie – und wo – die Hirnrinde Reize von den einzelnen Schnurrhaaren aufnimmt. Zu jedem Haar gehören dort einige hundert eng verknüpfte Nervenzellen, die jeweils wie in Säulen angeordnet sind. In diese »kortikalen« Säulen führen die Forscher feine Sonden ein und messen dann die Reaktion, wenn sie einzelne Haare auf bestimmte Weise auslenken.

Als sie die Sinnesantworten bei wachen und schlafenden Tieren verglichen, stellten sie fest, dass die Reaktionsmuster

nicht so eindeutig waren wie erwartet. Manchmal »schief« eine Hirnsäule, obwohl das Tier völlig wach wirkte. Auch das Umgekehrte kam vor: Die Ratte schien tief zu schlafen, aber die Hirnzellen mancher Säulen ließen sich über das Schnurrhaar erregen. In einer gemeinsamen Veröffentlichung folgerten Rector und Krueger 2008, Schlaf sei im Grunde eine Eigenschaft von einzelnen kortikalen Säulen.

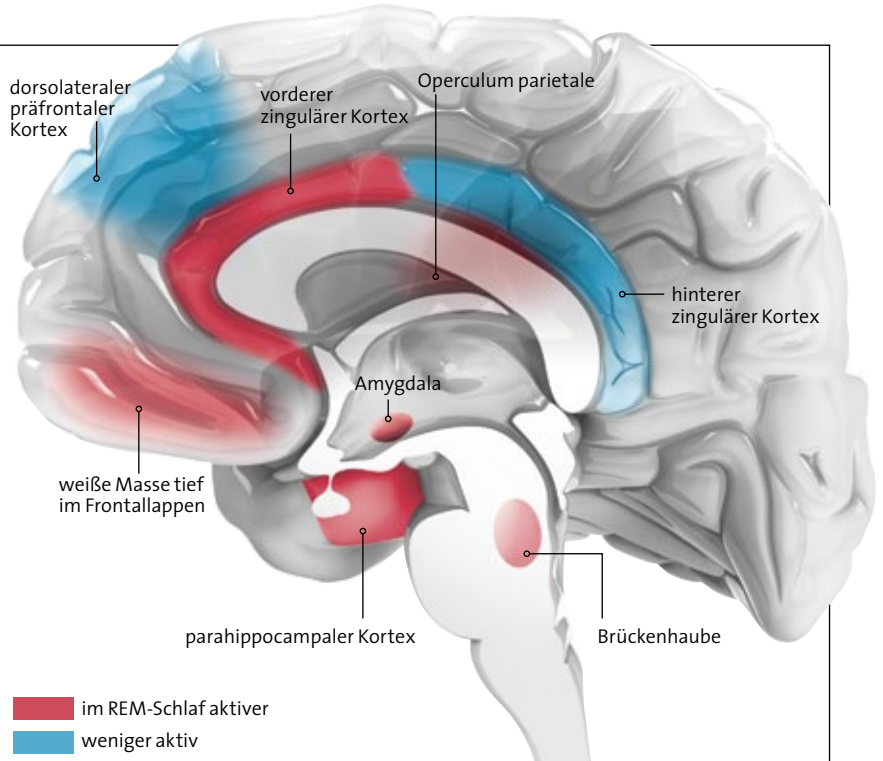
Beim Menschen werden Reaktionen ähnlicher Art indirekt in ausgeklügelten Tests erfasst. In einer Studie von Hans Van Dongen von der Washington State University müssen Testpersonen beispielsweise jedes Mal einen Knopf drücken, sobald auf einem Bildschirm eine Stoppuhr erscheint. Ein Versuchsdurchlauf dauert nur zehn Minuten, aber die Probanden reagieren währenddessen immer langsamer. Laut Van Dongen sind bei dieser Aufgabe stets dieselben Neuronenbahnen beansprucht, was diese schließlich so sehr erschöpfe, dass sie zwangsläufig in Schlaf fallen. Ein Anzeichen

Hirnaktivitäten – nicht immer im Gleichklang

Früher galt grundsätzlich: Die einzelnen Schlaf- und Wachstadien lösen einander im Gehirn schön koordiniert ab (Bild rechts). Dass das jedoch nicht immer stimmt, zeigen neue Forschungen.

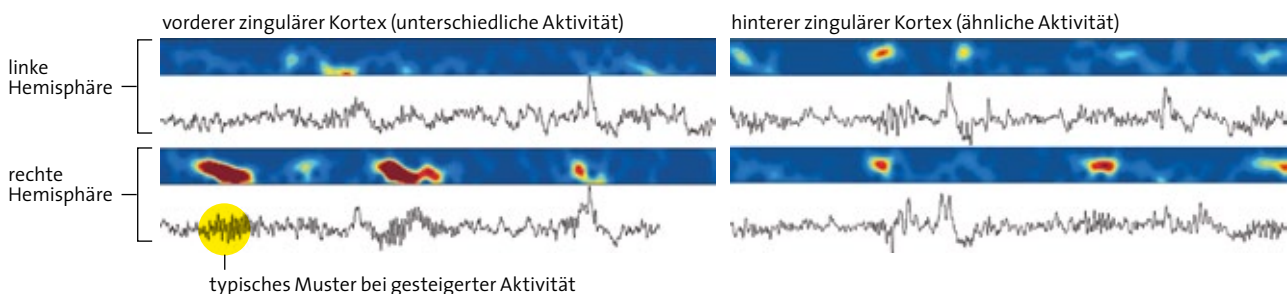
HIRNMUSTER BEIM TRÄUMEN

Im REM-Schlaf steigt die Aktivität in Hirngebieten, die sich am Aufspüren von Irrtümern und Konflikten beteiligen – so vom vorderen zingulären Kortex und vom parahippocampalen Kortex, der für die Ausbildung von Langzeitgedächtnis wichtig ist. Dagegen sinkt die Aktivität in dem Bereich, der Schmerz erfährt, dem hinteren zingulären Kortex.



AUS DEM TAKT

In diesen EEG-Messungen bei Nicht-REM-Schlaf zeigen die gleichen Gebiete der linken und der rechten Gehirnhälfte teilweise unterschiedliche Aktivität (im vorderen zingulären Kortex).



AXIS BIOMEDICAL ANIMATION STUDIO. GEHIRN NACH HOBSON, J.A.: REM SLEEP AND DREAMING (...). IN: NATURE REVIEWS NEUROSCIENCE 10, S. 803–813, 2009. UNTEN NACH NIR, Y. ET AL.: REGIONAL SLOW WAVES AND SPINDLES IN HUMAN SLEEP. IN: NEURON 70, S. 153–169, 2011

dafür, dass es sich nicht um eine generelle, sondern nur um eine lokale Müdigkeit handelt, sei, dass die Probanden sofort wieder rascher reagieren, wenn man ihnen eine neue Aufgabe stellt, die andere Verschaltungen erfordert.

Wenn einige Hirngebiete schlafen können, während die Person augenscheinlich wach ist, müsste auch das Umgekehrte möglich sein – ein Mensch, der an sich schläft, dessen Gehirn aber in Teilen wach ist. Hierzu steuern Mediziner folgende Beobachtung bei, die sie früher nicht verstanden: An Schlaflosigkeit leidende Patienten erklären nicht selten nach einer Nacht im Schlaflabor, sie hätten kein Auge zugetan; doch das EEG zeigt die typischen Wellenmuster für Schlaf. Daniel Buysse von der University of Pittsburgh (Pennsylvania) klärte den Widerspruch, indem er von solchen »Schlaflosen« nachts mit modernen bildgebenden Verfahren die Hirnaktivität aufzeichnete. Offenkundig schlummerten die Hirnbereiche, deren Aktivität sich im EEG zeigt, tatsächlich, und auch äußerlich wirkten diese Menschen schlafend. Die Scheitelhirnrinde blieb dagegen die ganze Nacht über aktiv – das Gebiet für die Wahrnehmung von Wachsein.

Am 19. Oktober 2005 hatte Benjamin Adoyo früh um 3 Uhr 41 die Notrufzentrale angerufen. Das Gespräch ging wie folgt:

»Worum geht es?« – »Kommen Sie her!« – »Sie müssen mir sagen, was los ist.« – »Jemand ist tot.« – »Jemand ist tot?« – »Ja!« – »Wo sind die Leute?« – »In der Wohnung von denen. Jemand ist tot. Kommen Sie!«

Adoyo hatte das Handy seiner Frau benutzt. Da lag sie wohl bereits im Bad in einer Blutlache.

Auffällige Sprechweise des Täters beim Notruf

Als die Schlafforscher des Forensikbüros von dem Vorfall Monate später erfuhren, versuchte sich Bornemann zunächst ein möglichst genaues Bild vom gesamten Hergang zu machen, denn für ein Gutachten kann jedes Detail wichtig sein. Also ließ er sich nicht nur von Adoyos Anwalt über die Einzelheiten in Kenntnis setzen, sondern studierte auch den Polizeibericht und das Protokoll des ersten Verhörs wenige Stunden nach der Tat. Er besichtigte sogar die Wohnung des Paares und ließ zudem eine Computeranimation vom Tathergang erstellen, denn hiervon erhoffte er sich Hinweise auf die Hintergründe.

Die Sprechweise des Täters bei dem Notruf fiel ihm gleich auf. Adoyo hatte nicht gesagt, »meine Frau ist tot«, sondern »jemand ist tot«, nicht »in unserer Wohnung«, sondern »in der Wohnung von denen« – als ob er nicht wusste, wer die Tote war, und auch nicht, was passiert war. Er klang wie jemand, der eben aufwacht und desorientiert ist.

Natürlich war es möglich, dass sich der Mann seiner Tat bewusst war und dies nur vertuschen wollte. Dafür sprach allerdings zunächst wenig. Er hatte draußen auf der Treppe auf die Polizei gewartet. Und auf dem Revier, nachdem man ihn über seine Rechte aufgeklärt und ihm gesagt hatte, er dürfe die Aussage verweigern, gab er ohne Weiteres zu, seine Frau



angegriffen zu haben. An Einzelheiten schien er sich aber nicht recht erinnern zu können. Einmal fragte er während des Verhörs: »Wie geht es ihr?«

Das alles konnte nach dem ersten Eindruck durchaus für Schlafwandel als Tathintergrund sprechen. Zur Entlastung des Täters würde diese Beweislage einem Gericht aber vermutlich nicht ausreichen. Ein Schlafexperte muss zusätzlich darlegen, wieso eine Parasomnie unter Umständen zu einem Gewaltakt führen kann.

Der Neuromediziner wird zunächst den normalen Schlafverlauf darlegen. Dabei, so Bornemanns Kollege Mahowald, beeinflussen hunderte physiologische Parameter die Wechsel zwischen Wachsein, REM- und Nicht-REM-Phasen. Vielerlei hormonelle, neuronale, sensorische und muskuläre Variablen wirken mit. In der Regel schwingen diese Parameter im Gleichklang. Auch geschehen solche Wechsel im Tagesverlauf etliche Male. Gewöhnlich sind die Zustände und die Übergänge zwischen ihnen im Großen und Ganzen eindeutig, auch wenn ein schlafendes Gehirn wache Inseln aufweisen kann und umgekehrt.

Nicht so bei Parasomnien. Da verlaufen die betreffenden physiologischen Parameter nicht synchron – mit der Folge eines Durcheinanders von Eigenschaften von Schlaf- und Wachzuständen. Lokaler Schlaf kann nun in geradezu extremer Weise auftreten, wobei Merkmale für Wachsein, Tiefschlaf und Träumen gleichzeitig vorkommen. Ein Mensch kann dann herumlaufen und Aktionen durchführen, obwohl seine kognitiven Funktionen abgeschaltet sind.

Wie hieraus Gewaltakte hervorgehen können, zeigen diverse entsprechende Vorkommnisse. Bornemann selbst war kürzlich mit dem Fall eines US-Soldaten befasst, der heftig mit der Pistole um sich geschlagen hatte, als seine Frau ihn wecken wollte. Dieser Mann beteuerte später, er habe sie bestimmt nicht angreifen wollen und könne sich auch an nichts dergleichen erinnern. Er wusste aber noch, was er geträumt hatte: Ein Nazispion habe ihn attackiert, und er habe sich mit einem Messer zur Wehr gesetzt. Für Bornemann klingt das nach einer mit dem REM-Schlaf assoziierten Aufwachstörung. Der Betroffene träumt zwar, aber seine Mus-

kulatur ist nicht entspannt und unbeteiligt wie sonst beim Träumen.

Bornemann erzählt auch von einem gut situierten Geschäftsmann, mit dem er zu tun hatte. Dessen neunjährige Tochter war nachts zum Vater ins Bett geschlüpft, was sie mitunter tat, wenn sie schlecht schlief. Irgendwann wachte der Mann auf und merkte entsetzt, dass er das Kind am Genital befummelte und Beckenstöße vollführte. Bislang war er noch nie wegen Sexualdelikten aufgefallen. Nun machte er psychologische Untersuchungen, auch einen Lügendetektortest, und ließ sogar prüfen, ob ihn kinderpornografisches Material sexuell erregte. Nach allen Tests war er eindeutig nicht pädophil.

Bornemann vermutet, dass auch hier eine Aufwachstörung vorlag, und zwar von einer Unterform der Parasomnien, bei der sich Nicht-REM-Schlaf mit komplexen Bewegungsmustern vermischt, die eigentlich nur im wachen Zustand auftreten. Diese Unterform bedingt unter anderem Nachtwandeln, Essen und eben auch sexuelles Verhalten im Schlaf.

Hirnaufnahmen zufolge ist der so genannte präfrontale Kortex im Nicht-REM-Schlaf sehr viel weniger aktiv als im wachen Zustand – also jene Hirnrindengebiete gleich hinter der Stirn, die als Sitz von Verstand und Moral gelten. Hingegen ist das Mittelhirn, das viele grundlegende, evolutionär alte Verhaltensmuster generiert, dann aktiv. Es kann einfache Regungen wie Stehen, Gehen, Essen und Trinken, Sichwaschen, auch Jagdverhalten sowie sexuelles und mütterliches Verhalten anstoßen. Solche Antriebe stehen normalerweise unter der Kontrolle des präfrontalen Kortex. Wenn diese Oberinstanz im Schlaf aber ausfällt, können sie zum Vorschein kommen – und zwar charakteristischerweise impulsiv und ungezügelt.

Um die Sachlage eines Einzelfalls beurteilen zu können, hilft es nach Bornemanns Erfahrung, auch mit dem Täter selbst, am besten von Angesicht zu Angesicht, darüber zu sprechen. Der Gutachter muss ja nicht nur feststellen, ob dieser unter einer der genannten Schlafstörungen leidet, sondern auch ermessen, ob das der Tathintergrund gewesen sein könnte. Bei Adoyo lag der besondere Fall vor, dass der Arzt die Diagnose Schlafwandel damals selbst gestellt hatte. Angehörige bezeugten, er sei auch als Kind schon immer nachts herumgeirrt. Trotzdem – hatte der Mann die Tat wirklich unwissentlich begangen?

Laien denken gern, dass beim Nachtwandeln so ziemlich alles an Gräueltaten möglich ist. Nach den Erkenntnissen von Schlafforschern sind die Verhaltensmöglichkeiten im Schlaf jedoch stark eingegrenzt, und auch die Zeitspanne dafür ist gewöhnlich nicht besonders lang. Auffällig oft befand sich das Opfer bei aggressiven Akten vorher dicht beim Täter. Es hatte neben ihm gelegen oder versucht, ihn zu wecken. So war es auch bei dem erwähnten Mann gewesen, der seine Schwiegermutter umbrachte. Er wurde gewalttätig, als die Schwiegereltern, bei denen er plötzlich nachts auftauchte, ihn rüttelten. Typischerweise findet sich in solchen Fällen kein Tatmotiv, keine Vorgeschichte von Streit oder derglei-

chen beziehungsweise keinerlei Anzeichen für eine abnorme sexuelle Veranlagung.

Im Fall von Adoyo wurde Bornemann hellhörig, als er erfuhr, dass dieser in der fraglichen Nacht auf der Wohnzimmerecouch geschlafen hatte und seine Frau im Schlafzimmer. Auch hatte er sie eine ganze Zeit lang und auf verschiedene Weise traktiert. Zuerst war er an ihr Bett gekommen und mit einem Hammer auf sie losgegangen. Als sie ins Treppenhaus flüchtete, rannte er hinterher und jagte sie ins Badezimmer, wo er sie schließlich niederstach und würgte. Für einen Nachtwandler wäre eine so lange, einigermaßen koordinierte Verhaltenskette höchst ungewöhnlich.

Auf Nachfrage gestand Adoyo, dass das Paar tags zuvor heftigen Streit gehabt hatte. Das bezeugte auch der letzte Tagebucheintrag der Frau. Der Ehemann glaubte, sie würde ihn betrügen – zwischen ihrer Wäsche hatte er Kondome gefunden. Damit hatte er sie am Abend vor der Tat konfrontiert. Ein Motiv hätte es somit gegeben. Dies alles trug der Schlaf Forscher auch dem Gericht vor. Der Angeklagte gab schließlich zu, seine Frau ermordet zu haben, und erhielt 37 Jahre Gefängnis.

Bornemanns vordringliches Anliegen ist nicht, die Schuld oder Unschuld von Tätern herauszufinden. Ihn interessieren vielmehr Verhaltensextreme infolge von Schlafstörungen, die sich in Laborstudien niemals erforschen lassen. Er möchte Juristen wie auch der Allgemeinheit die vielerlei Facetten von Schlaf und Bewusstsein darlegen und dafür Material zusammentragen. Denn den Erkenntnissen der Neurowissenschaften hinken die Paradigmen des Rechtssystems derzeit weit hinterher. ~

DER AUTOR



James Vlahos ist freier Journalist und schreibt für verschiedene amerikanische Magazine.

QUELLEN

Krueger, J. M., Tononi, G.: Local Use-Dependent Sleep; Synthesis of the New Paradigm. In: Current Topics in Medicinal Chemistry 11, S. 2490–2492, 2011

Siclari, F. et al.: Violence in Sleep. In: Brain 133, S. 3494–3509, 2010; 10.1093/brain/awq296

LITERATURTIPP

Schlafen und Träumen. Expeditionen ins Reich der Nacht. Gehirn und Geist, Dossier 3/2012
Artikel zu vielen Facetten des Schlafens, auch zu Gewalt im Schlaf

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171174

Aus dem Bauch heraus

Die Darmflora scheint eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Allergien zu spielen. Offenbar hilft sie dem sich entwickelnden Immunsystem von Kleinkindern, zwischen gefährlichen und harmlosen Stoffen zu unterscheiden. Jetzt gilt es, diese Erkenntnis zur Vorbeugung und Therapie von Allergien zu nutzen.

Von Cassandra Willyard



DREAMSTIME / RUSLAN KERIMOV

DIE SERIE IM ÜBERBLICK

ALLERGIEN – GEISSEL DES 21. JAHRHUNDERTS



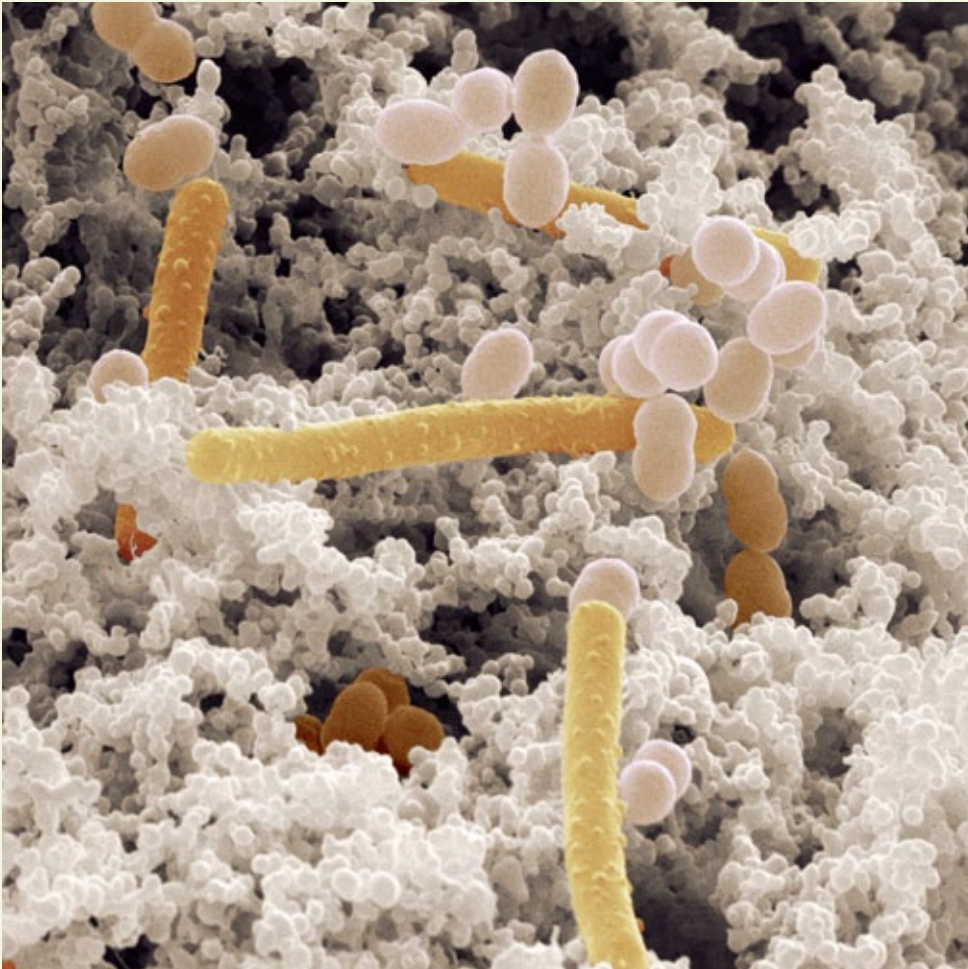
- | | | |
|--------|--|---------------|
| Teil 1 | ▶ Eine Allergikerkarriere
▶ Allergien auf dem Vormarsch
▶ Wenn im Essen der Tod lauert
▶ Was tun gegen Neurodermitis? | Dezember 2012 |
| Teil 2 | ▶ Aus dem Bauch heraus
▶ Blick ins Erbgut
▶ Risse in der Mauer | Januar 2013 |
| Teil 3 | ▶ Ansätze zur vorbeugenden Behandlung
▶ Asthma – unerwartet komplex
▶ Was bringen Tierversuche? | Februar 2013 |
| Teil 4 | ▶ Der Sinn allergischer Reaktionen
▶ Wohin geht die Forschung? | März 2013 |

POLLEN: FOTOLIA / SEBASTIAN KALITZKI

Unser Darm beherbergt ein vielfältiges Ökosystem aus zig Billionen von Bakterien (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2012, S. 26). Diese Mikroben sind keineswegs nur Schmarotzer. Vielmehr helfen sie beim Aufschließen schwer verdaulicher Nahrungsbestandteile und stehen in enger Wechselwirkung mit dem Immunsystem.

Derzeit gehen Forscher der Frage nach, ob ein Zusammenhang zwischen dem Wandel unseres Lebensstils in den letzten Jahrzehnten, Veränderungen der Darmflora und der explosionsartigen Verbreitung von Allergien in den Industrieländern besteht. Daraus könnten ganz neue Therapieansätze erwachsen, welche den zahllosen Menschen, die von Heuschnupfen, Asthma und anderen Überempfindlichkeitsreaktionen geplagt sind, endlich wirksam helfen.

Die »Hygienehypothese« postulierte erstmals eine ursächliche Beziehung zwischen dem westlichen Lebensstil und dem Auftreten von Allergien (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2012, S. 34). Wissenschaftler hatten festgestellt, dass der übermäßige Gebrauch antibakterieller Substanzen – von Putzmitteln bis zu Antibiotika – den Kontakt mit Krankheitserregern in der frühen Kindheit stark verringert. Offenbar störe die mangelnde Auseinandersetzung mit Keimen



Die Bakterien im Joghurt können Kleinkindern zu einer günstigen Darmflora verhelfen (links). In der angefärbten rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme (rechts) erscheinen sie als Stäbchen und Kugeln inmitten fester Milchbestandteile.

in den ersten Lebensjahren die Immunregulation, so ihre Schlussfolgerung.

Kurz vor der Jahrtausendwende brachte die Bakteriologin Agnes Wold von der Universität Göteborg (Schweden) die Darmbewohner ins Spiel. Zusammen mit ihren Kollegen hatte sie herausgefunden, dass der Dickdarm bei schwedischen Kindern später von den für ihn typischen Bakterien besiedelt wird als bei pakistanischen. Die Verzögerung könnte laut Wold die Immuntoleranz beeinträchtigen, so dass auch harmlose Antigene von Nahrungsmitteln oder Pollen am Ende eine Abwehrreaktion auslösen.

Der Mikrobiologe Garry Huffnagle von der University of Michigan in Ann Arbor kombinierte diese Überlegungen mit der Hygienehypothese zu seiner Mikroflorahypothese. Demnach geht der westliche Lebensstil mit dramatischen Veränderungen der Darmflora einher, die Allergien und andere entzündliche Erkrankungen begünstigen.

Verschiedene Beobachtungen stützen Huffnagles Idee. So ist bei Kindern im ländlich geprägten Burkina Faso, die selten Allergien haben und sich ballaststoffreich ernähren, die mikrobielle Flora im Stuhl deutlich anders zusammengesetzt als bei jungen Europäern. Zudem entwickeln Stadtbewohner, die weniger mit Bakterien in Berührung kommen als Men-

schen auf dem Land, häufiger Asthma oder Heuschnupfen. Und nicht zuletzt fällt die rasante Zunahme allergischer Erkrankungen in den westlichen Ländern mit dem vermehrten Einsatz von Antibiotika zusammen, insbesondere solchen mit breitem Wirkungsspektrum. Diese können die Zusammensetzung der Darmflora drastisch ändern. Tatsächlich ergaben Studien, dass Kinder, die im ersten Lebensjahr mit Antibiotika behandelt wurden, häufiger an Allergien erkranken.

»Die Hinweise auf eine wichtige Rolle der Darmflora bei der Entwicklung und Reifung des Immunsystems mehren sich«, beteuert Brett Finlay, Mikrobiologe an den Michael Smith Laboratories der University of British Columbia in Vancouver (Kanada). Laut seinem Fachkollegen David Artis von der University of Pennsylvania in Philadelphia enthält der menschliche Darm mehr Immunzellen als der gesamte übrige Körper. Sie alle stehen in permanentem Kontakt mit einer breiten Palette an Mikroorganismen, wobei sie harmlose oder nutzbringende zunächst einmal nicht von schädlichen unterscheiden können.

Die gutartigen Bakterien, auch Kommensalen genannt, haben jedoch gelernt, wie sie das Immunsystem von einem Angriff auf sie abhalten können. »Sie legen wichtige immunologische Schalter um«, erklärt Sarkis Mazmanian, Mikro-

biologe am California Institute of Technology in Pasadena. Wird der Darm nicht früh im Leben von ihnen besiedelt oder werden sie durch Antibiotika vernichtet, bleiben die Schalter in Ausgangsstellung, und das Immunsystem reagiert künftig überempfindlich auf harmlose Bakterien sowie andere ungefährliche Stoffe wie Pollen, Tierhaare oder Erdnüsse – so seine Vermutung.

Wissenschaftler arbeiten daran, herauszufinden, welche immunologischen Schalter besonders wichtig sind, wie es den Kommensalen gelingt, sie umzulegen, und welche Konsequenzen das für die Entstehung von Allergien hat. »Vermutlich können Darmbakterien das Immunsystem auf vielerlei Arten beeinflussen«, sagt Artis. Vieles spricht dafür, dass regulatorische T-Zellen eine große Rolle dabei spielen. Diese dämpfen Entzündungsreaktionen, indem sie das Immunsystem zügeln. »Die Körperabwehr gleicht einer geladenen Pistole – sobald ein Bakterium auftaucht, will sie feuern«, sagt Mazmanian. Regulatorische T-Zellen sorgen für eine ausgewogene Reaktion. Fehlen sie, entwickeln Mäuse im Experiment Allergien oder Autoimmunerkrankungen.

Einfluss auf regulatorische Immunzellen

Nach neueren Befunden können einige Mikroben Anzahl und Aktivität regulatorischer T-Zellen steigern. Dieser Spur folgt der Immunologe Kenya Honda von der Universität Tokio. Er arbeitet bevorzugt mit Bakterien der Gattung *Clostridium*. Viele *Clostridium*-Arten leben symbiotisch im Darm von Maus und Mensch, manche – wie *Clostridium difficile* – sind allerdings auch gefährliche Krankheitserreger. Hondas Arbeitsgruppe verabreichte keimfrei aufgezogenen Mäusen

eine Mischung aus 46 verschiedenen *Clostridium*-Stämmen. Wie sich zeigte, stimulierten diese die Produktion regulatorischer T-Zellen im Dickdarm, während die Gabe anderer Bakterienspezies kaum etwas bewirkte. »Zu klären bleibt allerdings, wie die Immunzellen aus der Dickdarmwand in andere Körperregionen gelangen und dort einen Schutz gegen Allergien aufbauen«, meint die Immunologin Cathryn Nagler von der University of Chicago (Illinois).

In einem späteren Versuch verabreichte Hondas Team die gleichen 46 *Clostridium*-Stämme an normale, nicht keimfreie Labormäuse, deren Darm normalerweise schon in geringem Umfang mit Clostridien besiedelt ist. Bei nachfolgenden Tests sprachen die vorbehandelten Mäuse auf Stoffe, die normalerweise allergische Reaktionen hervorrufen, wesentlich schwächer an als Kontrolltiere. Demnach scheint die Anreicherung der Darmflora mit Clostridien zumindest teilweise vor Allergien zu schützen.

Eine weitere Studie bestätigte Hondas Ergebnisse: Ein Team unter Naglers Leitung beobachtete, dass Mäuse, die mit Antibiotika gegen Clostridien behandelt wurden, mehr Nahrungsmittelallergien entwickelten als andere. Wie die Forscher ferner feststellten, kommen in der Darmschleimhaut solcher Mäuse weniger regulatorische T-Zellen vor.

Mazmanian setzt auf einen anderen Darmbewohner: das Bakterium *Bacteroides fragilis*. Es produziert eine Substanz namens Polysaccharid A (PSA). Bei Mäusen wirkt dieses Zuckermolekül, wie Mazmanians Gruppe bereits nachweisen konnte, vorbeugend und heilend gegen entzündliche Darmerkrankungen und multiple Sklerose. »PSA aktiviert regulatorische T-Zellen«, erklärt der Forscher – und zwar direkt

Die Rolle von Bakterien bei Asthma

Nicht nur Mikroben im Darm entscheiden über die Anfälligkeit für Allergien. Auch in der Lunge, die früher als steril galt, leben Bakterien, und die könnten insbesondere bei Asthma eine Rolle spielen. Das geht aus einer Untersuchung von Hans Bisgaard und seinen Kollegen an der Universität Kopenhagen hervor. Demnach leiden Kinder, in deren Lunge schon kurz nach der Geburt schädliche Keime vorkommen, später häufiger an Asthma als solche, bei denen das nicht der Fall ist. Ähnliches berichtete 2011 ein Forscherteam um Homer Boushey von der University of California in San Francisco. Wie es feststellte, enthalten die Lungen von erwachsenen Asthmapatienten wesentlich mehr Bakterien als die gesunder Menschen. Zudem war bei schwerem Asthma eine viel größere Palette von Bakterien nachweisbar als bei leichtem.

Paradoxerweise schützt allerdings ausgerechnet der Keim *Helicobacter pylori*, der die Magenschleimhaut befällt und nicht nur Magengeschwüre, sondern auch Magenkrebs verursacht, teilweise vor Allergien. Wie der Mikrobiologe Martin J. Blaser von der New York University 2008 herausfand, haben damit infizierte Kinder ein um 40 bis 60 Prozent verringertes Asthmarisiko.

In einer 2011 veröffentlichten Studie bestätigte eine Forschungsgruppe um Anne Müller von der Universität Zürich und Christian Taube von der Universitätsmedizin Mainz den günstigen Effekt dieses Bakteriums im Tierversuch. Die Wissenschaftler infizierten sechs Tage alte Mäuse mit *H. pylori* und setzten sie dann Allergenen aus, die bei Nagern normalerweise eine asthmaähnliche Erkrankung auslösen. Die Versuchstiere entwickelten hingegen keinerlei Allergiesymptome. Das änderte sich jedoch, wenn die Forscher die Bakterien im Magen der infizierten Mäuse mit Antibiotika wieder vernichteten. Danach zeigten die zuvor geschützten Tiere ebenfalls asthmaähnliche Symptome.

In den Lungen der infizierten Mäuse fanden die Forscher vermehrt regulatorische T-Zellen, die vermutlich den allergischen Reaktionen entgegenwirkten. Müller verweist darauf, dass solche Abwehrzellen von einer Schleimhaut zur anderen gelangen können, »daher vermag«, wie sie erklärt, »ein im Magen lebendes Bakterium die Immunreaktionen in anderen Regionen des Körpers zu beeinflussen«.

durch Wechselwirkung mit dem Toll-ähnlichen Rezeptor 2 (TLR2), einem Protein in der Oberflächenmembran von T- und anderen Immunzellen. Mazmanian vermutet deshalb, dass die Substanz auch gegen Allergien helfen könnte. Toll-ähnliche Rezeptoren erkennen bakterielle Moleküle und setzen daraufhin normalerweise eine Immunreaktion in Gang. PSA hingegen drosselt die Körperabwehr durch seine Wechselwirkung mit dem TLR2 regulatorischer T-Zellen.

Mit einem anderen Toll-ähnlichen Rezeptor namens TLR4 beschäftigt sich Nagler. Wie sie und ihre Kollegen 2004 berichteten, macht eine Mutation dieses Moleküls Mäuse erheblich anfälliger für Nahrungsmittelallergien. Denselben Effekt beobachtete die Wissenschaftlerin bei Nagern mit normalem TLR4 nach einer Antibiotikabehandlung.

TLRs scheinen also zu den Schaltern zu gehören, mit denen kommensalische Mikroorganismen das Immunsystem ausknipsen. Vermutlich sind es aber nicht die einzigen. Dafür sprechen laut Mazmanian indirekte Hinweise, wonach manche Kommensalen die Abwehrreaktion nicht über TLRs beeinflussen.

Nützen Probiotika?

Während sich die Grundlagenforscher für die Mechanismen interessieren, mit denen Mikroben das Immunsystem beeinflussen können, wollen klinische Wissenschaftler und Nahrungsmittelhersteller vor allem den betroffenen Menschen helfen. Deshalb gehen sie der Frage nach, wie sich die Darmflora modifizieren ließe, um Allergien vorzubeugen oder sie zu behandeln. Joghurt und andere als probiotisch etikettierte Nahrungsmittel enthalten Bakterienkulturen, die gut gegen



Eingefärbte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von *Helicobacter pylori*.

AUF EINEN BLICK

ALLERGIESCHUTZ DURCH DARMBAKTERIEN

1 Unser Darm enthält nicht nur **Millionen von Bakterien**, sondern auch mehr **Abwehrzellen** als der gesamte restliche Körper. Durch die Wechselwirkung zwischen beiden lernt das noch reifende Immunsystem von Kleinkindern, zwischen gefährlichen und harmlosen Keimen zu unterscheiden.

2 **Nützliche Bakterien** erhöhen im Darm die Konzentration so genannter **regulatorischer T-Zellen**, welche die Immunreaktion abschwächen.

3 **Übermäßige Hygiene** und **Antibiotika** verhindern, dass rechtzeitig die natürliche **Darmflora** entsteht. Die Prägung des Immunsystems verläuft dadurch fehlerhaft, wodurch es ein Leben lang zu empfindlich auch auf völlig unschädliche Fremdkörper reagiert. Das erklärt vermutlich die rasante Zunahme von Allergien.

verschiedene Beschwerden sein sollen. Ob sie zur Allergieverhütung taugen, wurde schon in mehr als 25 klinischen Studien untersucht. In vielen ging es um Stämme von Milchsäurebakterien der Gattung *Lactobacillus*, die seit jeher zur Herstellung von Käse, Joghurt und anderen teilweise vergorenen Nahrungsmitteln dienen.

In einer 2001 veröffentlichten Untersuchung aus Finnland nahmen schwangere Frauen aus allergiebelasteten Familien während der letzten Schwangerschaftswochen Kulturen des Stamms *Lactobacillus casei GG* zu sich. Dieselben Bakterien erhielten dann auch die Neugeborenen sechs Monate lang. Tatsächlich machte die Behandlung die betreffenden Kinder weniger anfällig für Hautausschläge. Der Vergleich der Probiotika- mit der Placebogruppe ergab bis zum Alter von zwei Jahren nur halb so viele Fälle von Neurodermitis. Kinder mit Ekzemen in dieser frühen Lebensphase entwickeln später meist zusätzlich Asthma. Auch dagegen bestand in der Probiotikagruppe noch bis zum Alter von sieben Jahren eine Schutzwirkung. Das legen die nach weiteren fünf Jahren Beobachtungszeit veröffentlichten Ergebnisse nahe. Allerdings zeigte sich in einer später in Deutschland durchgeführten Studie mit ähnlicher Vorgehensweise kein Effekt von *L. casei GG* auf die Ekzemmhäufigkeit bei Kleinkindern.

Wie lassen sich diese widersprüchlichen Befunde erklären? Marko Kalliomäki, Kinderarzt am Krankenhaus der Universität Turku und einer der Autoren der finnischen Studie, weist darauf hin, dass in beiden Untersuchungen unterschiedliche Methoden zur Diagnose von Neurodermitis dienten. Auch genetische Einflüsse hält er für denkbar. Nach Ansicht von Michael Cabana, der die Kinderklinik an der University of California in San Francisco leitet und derzeit die Wirkung desselben *L.-casei*-Stamms bei 270 Kleinkindern testet, könnten auch Unterschiede in der Ernährung die Ergebnisse beeinflusst haben. »Wenn die Nahrung ohnehin reich an vergorenen Produkten und Probiotika ist, lässt sich die Wirkung zusätzlich eingenommener Bakterien vermutlich nur schwer nachweisen«, erläutert er.

Eine weitere Studie ergab, dass acht Monate alte Säuglinge, die *L. casei GG* als Nahrungsergänzung erhielten, in ihrem Darm auch noch andere nützliche Bakterien beherbergten. Ihre mikrobielle Flora war zudem stabil und robust gegen Störeinflüsse; Krankheitserreger konnten sich kaum darin ausbreiten. Das Probiotikum »sorgt also offenbar für eine insgesamt günstig zusammengesetzte Bakteriengemeinschaft«, bemerkt Cabana. Er zieht einen Vergleich zum Baseball: »Manchmal kommt mitten in der Saison ein neuer Spieler in die Mannschaft, durch den sich die innere Dynamik des Teams komplett verändert, so dass es plötzlich allen anderen überlegen ist.«

Wie die Untersuchungen zum Schutzeffekt von Probiotika haben auch die zu ihrer therapeutischen Wirkung gegen Allergien widersprüchliche Ergebnisse geliefert. 2008 verglich das britische Zentrum der Cochrane Collaboration in Oxford insgesamt zwölf kontrollierte Doppelblindstudien und zog ein negatives Resümee: Die Studien würden in ihrer Gesamtheit »nicht darauf hindeuten, dass sich Probiotika zur wirksamen Behandlung von Ekzemen eignen«.

Möglicherweise haben die Probiotikaforscher aber einfach noch nicht den richtigen Stamm oder die optimale Kombination von Bakterien gefunden. In klinischen Studien verwenden sie nämlich bevorzugt Mikroben mit günstigem Sicherheitsprofil. Und das seien eben beispielsweise Milchsäurebakterien, für die langjährige Erfahrungen vorliegen, meint Cabana. Honda und seine Kollegen arbeiten daran, Stämme der Gattung *Clostridium* aus dem menschlichen Darm zu isolieren, um zu prüfen, ob sie beim Menschen regulatorische T-Zellen stimulieren, wie sie das in entsprechenden Versuchen bei Mäusen getan haben. »Vielleicht eignen sich diese *Clostridium*-Arten zur Therapie von Allergien«, hofft Honda.

Gezielte Förderung nützlicher Bakterien

Eine andere Möglichkeit zur Modifikation der Darmflora eröffnen so genannte Präbiotika, die als selektive Nährstoffe erwünschte Bakterien im Darm begünstigen sollen. Dazu zählt etwa Inulin, ein pflanzliches Mittel, das Menschen nicht verdauen können. Es gelangt deshalb unverändert bis in den Dickdarm, wo es insbesondere den Bifidobakterien als willkommene Nahrungsquelle dient. Diese lassen sich im Stuhl von Säuglingen nachweisen, die mit Muttermilch gestillt werden, und sind auch Bestandteil von Probiotika.

Nach Aussage des Molekularbiologen David Mills von der University of California in Davis gehören die heute erhältlichen Präbiotika allerdings noch zur »ersten Generation« und wirken ziemlich unspezifisch. »Bisher gibt es keine, die selektiv das Wachstum einzelner Keimpopulationen fördern«, konstatiert er. Ideal wäre es, bestimmte Pro- und Präbiotika zu kombinieren und so gezielt erwünschte Bakterienarten im Darm anzusiedeln und gedeihen zu lassen. Huffnagle glaubt, dass die Ärzte eines Tages Probiotika/Präbiotika-Kombinationen verschreiben werden, die dem individuellen Keimprofil eines Patienten angepasst sind. Doch diese nächste Generation von Bakteriencocktails wird man kaum

in einem Becher Joghurt verspeisen wollen. »Einige dieser Organismen produzieren übel riechende Stoffe«, gesteht Huffnagle, »man wird sie wohl verkapseln müssen.«

Eine Alternative wäre, die nützlichen bakteriellen Moleküle zu isolieren und statt lebender Mikroben nur deren wirksame Stoffwechselprodukte zu verabreichen. Mazmanian etwa vermutet, dass PSA eines Tages ein »Nahrungsergänzungsmittel sein könnte wie Inulin«.

Allerdings sind vor einer gezielten Anwendung von Pro- und Präbiotika noch einige Hindernisse zu überwinden. Die Forscher kennen nämlich weder das typische Keimprofil des gesunden noch das des »allergischen« Darms. Zudem spielt die Darmflora zwar eine Rolle bei der Entwicklung von Allergien, doch verweist Artis auf eine Reihe weiterer Faktoren: »Außer den potenziellen Effekten kommensalischer Bakterien bestimmen auch die genetische Ausstattung eines Menschen und sein Lebensstil die Wahrscheinlichkeit einer allergischen Erkrankung.«

Die Vielzahl von Einflussgrößen könnte erklären, weshalb manche Allergiker auf die Gabe von Probiotika ansprechen und andere nicht. Gleiches dürfte auch für viele Behandlungsarten gelten: Ihre Wirkung variiert von Person zu Person. Huffnagle: »Der Versuch, die gestörte Darmflora zu normalisieren, ist leider immer noch ein Schuss ins Blaue.«

DIE AUTORIN



Cassandra Willyard ist freie Wissenschaftsjournalistin und lebt im New Yorker Stadtbezirk Brooklyn.

QUELLEN

- Arnold, I. C. et al.:** *Helicobacter pylori* Infection Prevents Allergic Asthma in Mouse Models through the Induction of Regulatory T Cells. In: The Journal of Clinical Investigation 121, S. 3088–3093, 2011
- Atarashi, K. et al.:** Induction of Colonic Regulatory T Cells by Indigenous *Clostridium* Species. In: Science 331, S. 337–341, 2011
- Bisgaard, H. et al.:** Reduced Diversity of the Intestinal Microbiota during Infancy is Associated with Increased Risk of Allergic Disease at School Age. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology 128, S. 646–652, 2011
- Kopp, M. V. et al.:** A Randomized Placebo-Controlled Trial of Probiotics for Primary Prevention: No Clinical or Immunological Effects of *Lactobacillus GG* Supplementation. In: Pediatrics 121, S. 850–856, 2008
- Round, J. L. et al.:** The Toll-Like Receptor 2 Pathway Establishes Colonization by a Commensal of the Human Microbiota. In: Science 332, S. 974–977, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171178

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature Outlook 479, S. 5–7, 24. November 2011

GENETIK

Blick ins Erbgut

An der Entstehung von Allergien könnten seltene Genvarianten beteiligt sein. Sie lassen sich durch das Sequenzieren vollständiger Genome und mit anderen neuen Techniken erkennen.

Von Erica Westly

Wenn Sie mit Allergiesymptomen zum Arzt gehen, wird er Sie mit Sicherheit nach Ihrer familiären Vorgeschichte befragen. Denn dass Allergien auch eine erbliche Komponente haben, steht außer Zweifel. Die beteiligten Gene dingfest zu machen, hat sich jedoch als äußerst schwierig erwiesen. Seit im Jahr 2001 die vollständige Sequenz des menschlichen Genoms aufgeklärt wurde, hat sich der Schwerpunkt der Forschung verlagert. Es geht nun nicht mehr vorrangig darum, einzelne »Allergiegene« zu finden. Stattdessen versuchen die Wissenschaftler, in genomweiten Assoziationsstudien herauszufinden, ob sich Allergien in bestimmten Bevölkerungsgruppen häufen und wie Umweltfaktoren und genetische Vorprägungen zusammenwirken. Genomweite Assoziationsstudien untersuchen die Variationsbreite des menschlichen Genoms innerhalb einer Gruppe – meist, um eine Krankheit mit bestimmten genetischen Merkmalen in Verbindung zu bringen. Ihr Ziel ist es, herauszufinden, welche Genvarianten zusammen mit der Krankheit auftreten.

Dieser Ansatz verspricht einen großen Nutzen. Zum einen können allergische Erkrankungen bezüglich ihrer Symptome und ihres Schweregrads sehr unterschiedlich verlaufen. Die genetischen Faktoren zu kennen, die diese Vielfalt bedingen, würde eine genauere Diagnose und eine bessere Thera-

pie ermöglichen. Zum anderen möchten die Mediziner mit Hilfe der Genetik aufklären, wie Allergien und Asthma zusammenhängen. Epidemiologische Untersuchungen zeigen nämlich, dass etwa 80 Prozent der Kinder, die Asthma haben, auch an allergischem Schnupfen leiden. Die Gründe dafür sind weitgehend unklar.

Als Genetiker vor 40 Jahren damit begannen, die erblichen Komponenten von Allergien zu untersuchen, hielten sie zunächst nach »verdächtigen« Genen Ausschau – also solchen, die mit der Ausprägung bestimmter Symptome verknüpft zu sein schienen. Die meisten Erbanlagen, die dabei identifiziert wurden, hatten mit dem Immunsystem zu tun. Besonders interessant schienen die HLA-Gene (human leukocyte antigen) zu sein, die fast alle auf Chromosom 6 lokalisiert sind. Sie enthalten die Bauanleitungen für Proteine, die dem Organismus dabei helfen, Allergene und andere körperfremde Stoffe zu erkennen. Das Problem war jedoch, dass es nur selten gelang, einen statistisch bedeutsamen Zusammenhang zwischen genetischer Ausstattung und der Häufigkeit bestimmter Symptome zu finden. Bis zum Jahr 2010 waren beinahe 1000 Studien publiziert worden, in denen Wissenschaftler über Erbanlagen berichteten, die möglicherweise mit Allergien assoziiert sind – doch ein klares Bild ergab sich daraus nicht.

Immerhin sind mittlerweile einige hochinteressante Gene in den Blick gerückt, besonders in den letzten paar Jahren. Forscher der University of Dundee (Schottland) entdeckten einen Zusammenhang zwischen der Hautkrankheit Ichthyosis vulgaris und einer relativ seltenen Mutation im *FLG*-Gen, das für Filaggrin kodiert, ein wichtiges Protein der Oberhaut. Nachfolgende Untersuchungen zeigten, dass Veränderungen in diesem Gen verschiedene allergische Zustände begünstigen, darunter Ekzeme, Asthma und Erdnussüberempfindlichkeit. Gestützt auf biochemische Untersuchungen leiteten die Forscher daraus die These ab, dass Allergien vor allem auf Defekte in den oberen Hautschichten zurückgehen.

Genomweite Assoziationsstudien gehören zu den leistungsfähigsten Methoden, um nach verdächtigen Genen zu

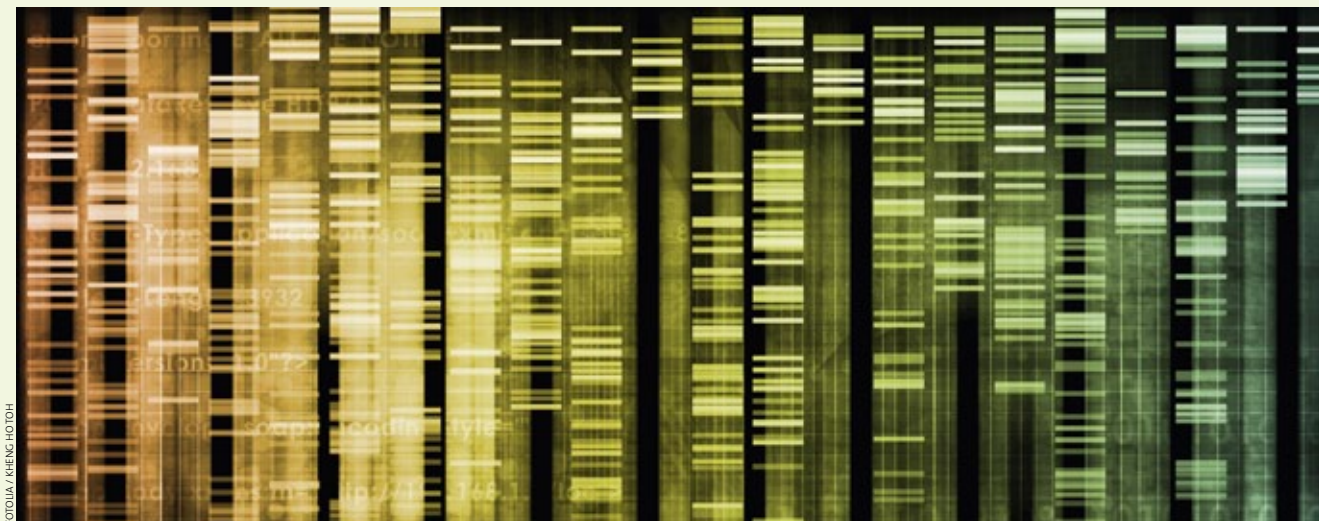
AUF EINEN BLICK

VIELE FRAGEZEICHEN

1 Es gilt als gesichert, dass Allergien eine erbliche Komponente besitzen. Wie die **Erbanlagen** sich jedoch konkret auf die **Krankheitsanfälligkeit** auswirken, ist noch schlecht verstanden.

2 **Genomweite Assoziationsstudien** gehören zu den leistungsfähigsten Verfahren, um diesen Zusammenhang aufzudecken. Sie erlangen eine immer größere Bedeutung.

3 In den zurückliegenden Jahren haben Forscher einige **Genvarianten** gefunden, die mit Allergien in Verbindung stehen. Sie haben bei verschiedenen **Ethnien** offenbar unterschiedliche Effekte.



FOTOLIA / KHEING HOTOH

suchen, weil sie mit großen Stichproben arbeiten und den Forschern erlauben, tausende genetische Varianten einzubeziehen. »Zudem kommen diese Studien ohne Anfangshypothese aus«, erklärt Michael Kabesch, Allergologe an der Medizinischen Hochschule Hannover. »Dadurch lassen sich Zusammenhänge aufdecken, die man zuvor nicht vermutet hat.« So ergab 2007 eine genomweite Assoziationsstudie in Europa, dass eine bestimmte Mutation auf Chromosom 17 das Entstehen von Asthma beeinflusst, aber nicht die genetische Veranlagung für bestimmte Überempfindlichkeitsreaktionen (Atopie). Dies war ein überraschender Befund, da viele Patienten von beidem betroffen sind. Mittlerweile konnten Forschergruppen in den USA, Japan und anderen Ländern das Ergebnis reproduzieren. Anscheinend werden Asthmasymptome weniger stark von Kontakten mit Allergenen beeinflusst als bislang angenommen. Erstaunlich ist auch, dass die Mutation mit der chronisch-entzündlichen Darmerkrankung Morbus Crohn in Verbindung zu stehen scheint – eine Spur, die Kabesch weiterverfolgt.

Was genau gibt das Erbgut vor?

Inwieweit sich das persönliche genetische Profil in spezifischen Allergieformen niederschlägt, ist umstritten. Eine These besagt, dass erbliche Faktoren zwar das Allergierisiko bestimmen – die konkreten Allergene jedoch, gegen die der Betroffene überempfindlich reagiert, von Umwelteinflüssen abhängen. Dazu passen Berichte über Patienten, die etwa eine Pollen- gegen eine Schimmelpilzallergie »eintauschten«, nachdem sie ihren Wohnsitz in eine andere Klimazone verlegt hatten. Andererseits gibt es Daten, die bestimmte Mutationen mit einzelnen Allergieformen in Verbindung bringen. So belegte eine Studie aus dem Jahr 2003, dass ein Zusammenhang besteht zwischen einer bestimmten HLA-Variante und der Überempfindlichkeit gegenüber Ratten-Allergenen.

»Unsere derzeitigen Erkenntnisse dazu widersprechen sich zum Teil«, bestätigt Rana Tawil Misiak, Mediziner und Allergologe am Henry Ford Health System in Detroit, USA.

Bei typischen DNA-Untersuchungen wird das Erbmolekül in Stücke zerschnitten. Trennt man diese voneinander und färbt sie an, entsteht ein Strichmuster (oben: künstlerische Darstellung). Darin fahnden Forscher auch nach mit Allergien assoziierten Genvarianten.

Diese Ungereimtheiten lassen sich laut Misiak am besten durch groß angelegte genomweite Assoziationsstudien aus der Welt schaffen. Einige Forscher vermuten, dass Allergien nur mit seltenen genetischen Varianten in Verbindung stehen, etwa der erwähnten Mutation im *FLG*-Gen. Dies würde erklären, warum Studien, die nach Zusammenhängen mit häufigen Erbgutmustern suchten, bislang nicht fruchtig wurden.

Genomweite Assoziationsstudien waren früher nicht empfindlich genug, um seltenen genetischen Varianten auf die Spur zu kommen. Das ändert sich jedoch in dem Maß, in dem das Sequenzieren vollständiger Genome billiger wird. Normalerweise fahnden solche Untersuchungen nach Variationen einzelner Basenpaare auf dem DNA-Strang, so genannten Einzelnukleotid-Polymorphismen (SNP). Die Sequenzierung kompletter Genome wird es den Forschern künftig ermöglichen, mehr genetische Varianten in die Untersuchung einzubeziehen. Im Rahmen des internationalen 1000-Genome-Projekts, dem bislang größten Vorhaben zur Erfassung vollständiger Genomsequenzen, haben Forscher bereits das komplette Erbgut von 2000 Menschen entziffert und dabei Millionen zuvor unbekannter Genvarianten entdeckt. Noch ist unklar, welche davon mit Asthma und Allergien zusammenhängen.

Die Ausweitung genetischer Untersuchungen auf Menschen nichteuropäischer Herkunft sollte ebenfalls dazu beitragen, bislang unbekannte Muster im Erbgut zu finden, die bei Allergien eine Rolle spielen. Denn bislang waren solche Personen in einschlägigen Studien erheblich unterrepräsentiert. Epidemiologische Befunde lassen vermuten, dass das Risiko, an Allergien oder Asthma zu erkranken, stark von der ethnischen Herkunft abhängt. Nach Angaben der Centers for

Disease Control and Prevention, einer US-Gesundheitsbehörde, haben Kinder mit puerto-ricanischer Abstammung das höchste Asthmarisiko aller ethnischen Gruppen in den USA: Jedes sechste Kind ist von der Erkrankung betroffen. Damit liegt die Krankheitshäufigkeit bei Puerto Ricanern um 125 Prozent höher als bei Weißen und um 80 Prozent höher als bei Afroamerikanern. Eine weitere Studie aus dem Jahr 2009 ergab, dass Ekzeme in afrikanischen und lateinamerikanischen Ländern signifikant häufiger auftreten als in asiatischen Ländern wie China oder Indien.

Forscher der Johns Hopkins University in Baltimore, USA, veröffentlichten 2010 die erste genomweite Suche nach asthma- und allergierelevanten Erbgutvarianten, in die ausschließlich Afroamerikaner und Menschen karibischer Abstammung einbezogen wurden. Für die Mutation auf Chromosom 17, die bei Asiaten und Europäern mit Asthma in Verbindung steht, zeigte sich in dieser Studie kein überzeugender Zusammenhang mit der Erkrankung, doch entdeckten die Forscher vier andere mit Asthma assoziierte Gene.

Schlecht für Europäer, gut für Afroamerikaner

Die ethnische Herkunft könnte auch für die Reaktion auf Allergene bedeutsam sein. Wissenschaftler fahnden nach Einzelnukleotid-Polymorphismen, die spezifisch in bestimmten Bevölkerungsgruppen auftreten, um die Asthma- und Allergiegenetik bei Lateinamerikanern und Afroamerikanern zu untersuchen. »Offenbar kann dieselbe Genvariante sowohl ein erhöhtes als auch ein vermindertes Krankheitsrisiko mit sich bringen – je nach ethnischer Herkunft«, sagt Esteban González Burchard, der an der University of California in San Francisco die genetischen Grundlagen von Asthma erforscht. So geht eine bestimmte Form des *DENND1B*-Gens bei Kindern europäischer Herkunft mit einem erhöhten Asthmarisiko einher, bei Kindern afroamerikanischer Abstammung hingegen schützt sie offenbar vor der Krankheit. Genetiker bezeichnen dies als Flipflop-Phänomen.

Nicht nur die DNA-Sequenz selbst kann sich auf die Krankheitsanfälligkeit auswirken, auch epigenetische Veränderungen des Erbguts sind dazu in der Lage. Sie bestimmen darüber, wie stark Gene abgelesen werden und zur Ausprägung von phänotypischen Merkmalen beitragen. In einer aktuellen Studie haben Burchard und sein Team mexikanische Kinder untersucht, die intensiv mit Tabakrauch in Kontakt gekommen waren. Dabei entdeckten die Forscher einen Zusammenhang zwischen epigenetischen Modifikationen am *CD14*-Gen, das die Bauanleitung für ein Protein des Immunsystems enthält, und dem Schweregrad von Asthmaerkrankungen. Auch Mikroben, die Haus- und Nutztiere besiedeln, können epigenetische Modifikationen am *CD14*-Gen verursachen, wie aktuelle Studien europäischer Arbeitsgruppen gezeigt haben. Zudem verändern sie die Kontrollgene der Toll-ähnlichen Rezeptoren, die ebenfalls an Immunreaktionen beteiligt sind und eine Schutzwirkung gegen Asthma und Allergien vermitteln. Um diese Erkenntnisse in neue

Therapien oder Vorsorgemaßnahmen umzusetzen, müssen die Forscher jedoch noch genauer klären, wann und wie es zu den epigenetischen Modifikationen kommt.

Methodische Probleme könnten die Erklärung dafür sein, warum es schwierig ist, solche Ergebnisse in groß angelegten Studien zu reproduzieren. »Bei epigenetischen Untersuchungen besteht die größte Hürde darin, dass wir das Erbgut aus den richtigen Zellen analysieren müssen – nur wissen wir oft nicht, welche Zellen das sind«, erläutert Carole Ober, Human-genetikerin an der University of Chicago. »Es ist ein schwieriges Arbeitsgebiet, da wir zunächst im Dunkeln tappen, wo genau wir suchen sollen. Die entscheidenden epigenetischen Veränderungen könnten in einem ganz speziellen Zelltyp der Lunge oder des Immunsystems auftreten, wo sie unter Umständen schwer zu entdecken sind.«

Entsprechende Gewebeprobe zu gewinnen, ist wesentlich aufwändiger als die Entnahme von Blut, dem üblichen Probenmaterial für genetische Analysen. Daher stecken epigenetische Studien noch in den Anfängen, und ihre Stichproben sind klein im Vergleich zu genomweiten Assoziationsstudien, die normalerweise einige tausend Probanden umfassen. »Viele Menschen sind bereit, Blut für Forschungszwecke zu spenden, doch eine Bronchoskopie zum Entnehmen von Lungengewebe ist wesentlich belastender«, erläutert Kabesch.

Trotzdem – epigenetische Studien könnten nicht nur helfen, die Entstehung von allergischen Erkrankungen nachzuvollziehen. Sie könnten auch zum Verständnis anderer Krankheiten beitragen, die auf Wechselwirkungen zwischen den Erbanlagen und der Umwelt beruhen, etwa Autismus oder Schizophrenie. Hier liegt ein großer Anreiz für weitere Forschungsarbeiten. ~

DIE AUTORIN



Erica Westly ist freie Wissenschaftsjournalistin und lebt im New Yorker Stadtbezirk Brooklyn.

QUELLEN

Mathias, R. A. et al.: A Genome-Wide Association Study on African-Ancestry Populations for Asthma. In: The Journal of Allergy and Clinical Immunology 125, S. 336–346, 2010

Misiak, R. T. et al.: Are Specific Allergen Sensitivities Inherited? In: Current Allergy and Asthma Reports 10, S. 336–339, 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/117179

© Nature Publishing Group

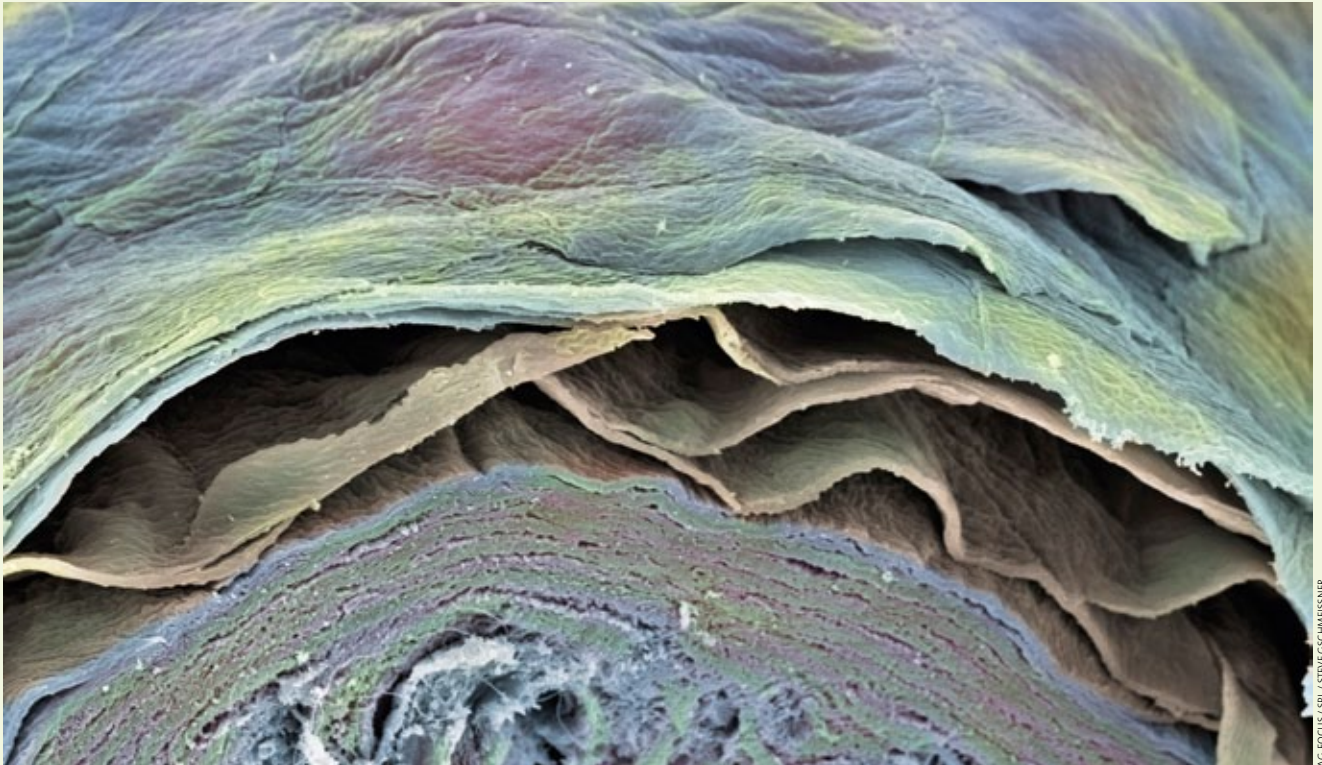
www.nature.com

Nature Outlook 479, S. 10–11, 24. November 2011

Risse in der Mauer

Neue Erkenntnisse über die Barrierefunktion der Haut werfen ein Licht darauf, wie Allergien entstehen.

Von Claire Ainsworth



Die regelmäßig angeordneten Schichten gesunder Haut (links) unterscheiden sich auffällig von den schuppenförmigen Aufwulstungen eines Ekzems (rechts).

AUF EINEN BLICK

UNZUREICHEND ABGEDICHTET

1 Patienten mit krankhaft geschädigter **Oberhaut** leiden überdurchschnittlich häufig an Allergien. Betroffen sind vor allem Menschen, bei denen genetische Mutationen die Ausbildung der Hautbarriere beeinträchtigen.

2 Vermutlich führen Schäden im **Deckgewebe** dazu, dass allergene Substanzen in den Körper eindringen und das Immunsystem zu einer überzogenen Reaktion veranlassen.

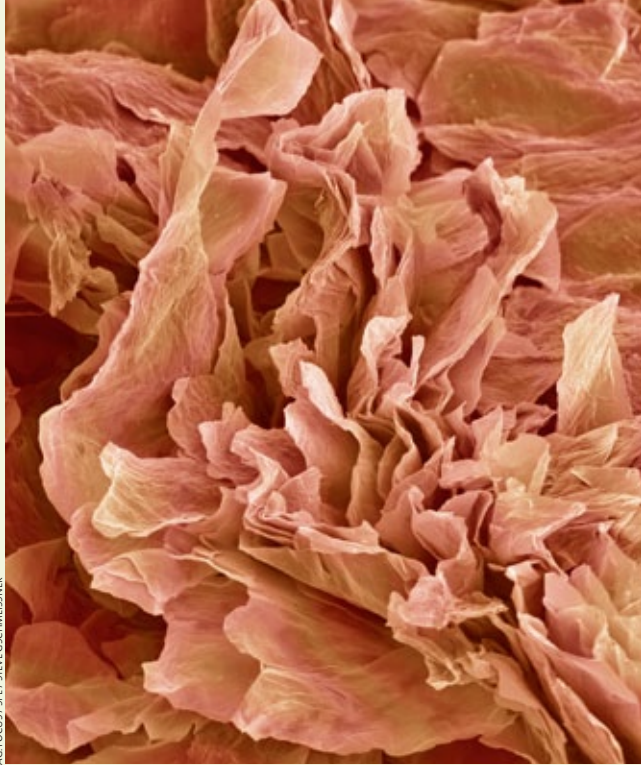
3 Forscher suchen nach Wirkstoffen, die das Wiederherstellen einer intakten **Hautbarriere** unterstützen sollen.

Im Herbst 2005 machte Alan Irvine, Hautarzt am Trinity College in Dublin, eine wichtige Beobachtung. Ihm fiel auf, dass Patienten mit Ichthyosis vulgaris, einer Erkrankung mit trockener und schuppiger Haut, überdurchschnittlich oft auch unter Neurodermitis litten und zu Überempfindlichkeitsreaktionen neigten. Dieser Befund deutete auf einen völlig neuen Erklärungsansatz hin: Waren die allergischen Symptome der Patienten vielleicht von den Hautproblemen verursacht worden? Könnten auch andere Allergien wie Asthma, Heuschnupfen und Lebensmittelüberempfindlichkeiten vielleicht auf Schäden in der Oberhaut zurückgehen – und nicht auf eine fehlgeleitete Immunabwehr, wie bislang angenommen?

Beide Konzepte müssen sich nicht unbedingt ausschließen. Haut- und Immundefekte könnten gemeinsam zum Entstehen von Allergien beitragen. Anscheinend spielt die Haut dabei jedoch die entscheidende Rolle. Darauf deuten

mehrere Beobachtungen hin – etwa die, dass Neurodermitiker häufig an diversen Allergien leiden. Deshalb zielen neue Therapien gegen allergische Erkrankungen oft auf Vorgänge in der Oberhaut ab.

Nach herkömmlicher Auffassung haben manche Menschen den Hang, an Allergien zu erkranken, weil ihr Immunsystem erblich bedingt dazu neigt, auf körperfremde Substanzen überempfindlich zu reagieren. Diese genetische Anlage – die so genannte Atopie – beruht demnach vor allem auf der Aktivität von Th2-Lymphozyten und Antikörpern des



KAC FODOS / SPL / STEVE GÖSCHEWISSNER

Typs IgE. Doch schon vor zehn Jahren zeichnete sich ab, dass dieses Bild unvollständig ist.

Darauf deuteten etwa Forschungen über eine seltene Hauterkrankung hin, das Netherton-Syndrom. Die betroffenen Patienten haben eine sehr empfindliche, schuppige Haut, die leicht einreißt, und zeigen ausgeprägte Überempfindlichkeitsreaktionen. Das Netherton-Syndrom ist eine rezessiv vererbte Krankheit, die durch Mutationen im *SPINK5*-Gen ausgelöst wird. Normalerweise enthält das Gen die Bauanleitung für ein Eiweiß, das bestimmte Proteasen (Protein spaltende Enzyme) hemmt. Diese sind für die tägliche Erneuerung der Haut wichtig. Wenn sie aber zu früh aktiv werden, wie beim Netherton-Syndrom, zerstören sie die jüngeren, nachwachsenden Hautschichten noch vor deren Reifung. Bakterien und andere Organismen in der täglichen Umwelt stellen ähnliche Proteasen her. Auch in Pollen sind solche Enzyme zu finden – und im Kot von Hausstaub-

milben, der die Proteasen Der p I und Der p II enthält, welche die Oberhaut schädigen.

Im Jahr 2001 entdeckte ein Forscherteam des Wellcome Trust Centre for Human Genetics in Oxford (England), dass eine ganz bestimmte Variante von *SPINK5* sehr häufig bei Atopiepatienten vorkommt, die an Ekzemen und Asthma leiden. Daraus leiteten die Forscher die Vermutung ab, eine geschädigte Barrierefunktion der Haut könne die Entstehung von Ekzemen begünstigen und die Atopie spiele dabei eher eine untergeordnete Rolle.

Drei Jahre später gelang Irvines Team gemeinsam mit einer Gruppe um Irwin McLean, einem Genetiker an der University of Dundee (Schottland), ein wichtiger Durchbruch. Sie forschten über das Protein Filaggrin, das die hornbildenden Zellen der Oberhaut benötigen, um die undurchlässige äußerste Hautschicht auszubilden. Bestimmte Mutationen im Filaggrin-Gen führen zur Hautkrankheit Ichthyosis vulgaris (siehe Artikel ab S. 35).

Undichte Oberhaut begünstigt Allergien und Asthma

Jeder zehnte Nordeuropäer ist heterozygoter Träger von mutierten Filaggrin-Genen, besitzt also eine mutierte und eine normale Genkopie in seinem Erbgut. Irvine fiel auf, dass diese Personen zwar nicht an Ichthyosis vulgaris in voller Ausprägung leiden, aber ungewöhnlich zerfurchte Handflächen und sehr trockene, empfindliche Haut haben. Ein Vergleich von 50 Kindern, die an Ichthyosis vulgaris erkrankt waren, mit 200 gesunden zeigte, dass Mutationen im Filaggrin-Gen häufig zusammen mit Ekzemen auftreten.

Weitere Forschungen ergaben, dass bei Ekzempatienten, die mutierte Filaggrin-Gene tragen, die Krankheit oft besonders schwer verläuft und sich überdurchschnittlich viele Allergien entwickeln. Auch Asthmaerkrankungen treten häufig zusammen mit veränderten Filaggrin-Genen auf – ein überraschender Befund, denn die Lungen produzieren dieses Protein nicht. Weiterhin fand Sara Brown, Molekularmedizinerin an der University of Dundee, einen deutlichen Zusammenhang zwischen Filaggrin-Mutationen und Erdnussallergien. Filaggrin findet sich zwar nicht im Darm, aber in der Mundschleimhaut.

Demnach scheint eine gestörte Hautbarriere allergische Erkrankungen zu begünstigen. Weitere Beobachtungen erhärten diese Annahme. Zwar sind die genauen Mechanismen noch nicht geklärt, doch vermutlich führen Schäden in der Oberhaut dazu, dass allergene Substanzen in den Körper eindringen und das Immunsystem zu einer überzogenen Reaktion veranlassen. Diese These haben Forscher vor Kurzem an Mäusen überprüft. Tiere, denen intakte Filaggrin-Moleküle fehlten, hatten trockene, stark schuppige Haut, die ungewöhnlich dünn und durchlässig war. Wurde die Haut dieser Mäuse mit Ovalbumin bestrichen, einem Protein aus Hühnereiweiß, entwickelten die Tiere eine allergische Reaktion – im Gegensatz zu gesunden Mäusen.

Reparatur der Hautbarriere

Forscherteams an Hochschulen wie auch in Pharmaunternehmen erforschen Therapien, die allergischen Erkrankungen entgegenwirken, indem sie den Zellverband in Deckgeweben (Epithelien) stärken.

Irwin McLean und seine Kollegen von der University of Dundee (Schottland) beispielsweise suchen nach Wirkstoffen, um die Produktion von Filaggrin und anderen Molekülen zu fördern, die für eine intakte Hautbarriere notwendig sind. Sie forschen auch über Medikamente, die den Epithelzellen helfen sollen, so genannte Nonsense-Mutationen im Filaggrin-Gen zu ignorieren. Diese Mutationen führen zum vorzeitigen Abbruch der Proteinsynthese, so dass unvollständige Moleküle entstehen. Sie kommen vor allem im Erbgut von Nordeuropäern vor.

Eine bestimmte Gruppe von Antibiotika, die Aminoglykoside, erlauben es den Epithelzellen, die Nonsense-Mutationen zu überlesen. Wirkstoffe mit ähnlicher Funktionsweise werden bereits klinisch auf ihren therapeutischen Nutzen bei anderen Erbkrankheiten getestet, etwa bei der zystischen Fibrose.

McLean und seine Mitarbeiter sicherten sich bereits ein Patent zur Behandlung der Hautkrankheit Ichthyosis vulgaris mit Aminoglykosiden sowie dem Antibiotikum Gentamicin. Diese

Arzneistoffe führen die Filaggrin-Produktion der Zellen wieder in Richtung Normalniveau. Auf diese Weise soll die Barrierefunktion der Haut verbessert werden. Gentamicin hat jedoch schädliche Nebenwirkungen, daher sucht das Team nach alternativen Substanzen mit gleichem Wirkmechanismus.

Ein weiterer Ansatz, um die Epithelfunktion zu stärken, besteht darin, die Reparaturmechanismen der Haut zu verbessern. Die Atemwegsepithelien von Asthmapatienten sind nur eingeschränkt in der Lage, sich zu regenerieren. Experimente mit Gewebekulturen legen jedoch nahe, dass Wachstumsfaktoren ihre Reparaturfähigkeit verbessern. Forscher um Stephen Holgate von der University of Southampton (England) prüfen derzeit die klinische Unbedenklichkeit und Wirksamkeit des Keratinozyten-Wachstumsfaktors bei Asthmaerkrankungen. Dieser findet sich in der Mundschleimhaut und im Darmepithel. Dort fördert er das Wachstum von Zellen, die die Regeneration des Deckgewebes unterstützen. Französische Forscher in Lille und Paris beobachteten in Versuchen mit Ratten, dass der Keratinozyten-Wachstumsfaktor sowohl Entzündungen und Defekte im Lungenepithel lindert als auch dessen Widerstandskraft gegen die Wirkung von Allergenen fördert.

»Viele Dermatologen vermuten schon seit Langem, Ekzeme seien primär Erkrankungen der Haut«, sagt Sara Brown. Seit einigen Jahren erklären Wissenschaftler auch diverse Allergien mit schadhafte Deckgeweben (Epithelien) – etwa, dass Heuschnupfen auf eine durchlässige Nasenschleimhaut zurückgehe und Nahrungsmittelüberempfindlichkeiten auf eine undichte Darmschleimhaut.

Lange herrschte die Auffassung vor, Oberhautzellen seien lediglich eine passive Barriere gegen körperfremde Substanzen. Inzwischen schreiben Forscher ihnen eine aktivere Funktion zu. Demnach präsentieren hornbildende Zellen den Akteuren des Immunsystems fremde Antigene und schütten Signalsubstanzen aus – etwa das Regulatorprotein TSLP (thymic stromal lymphopoietin), das die Ausprägung verschiedener Allergien fördert, sowie andere Botenstoffe, die bestimmte Immunreaktionen verstärken.

Wie zahlreiche Untersuchungen in den vergangenen 20 Jahren gezeigt haben, ist das Epithel, das die Atemwege auskleidet, bei Asthmapatienten geschädigt. So entdeckte ein Team um Stephen Holgate, Mediziner und Asthmaforscher an der University of Southampton, England: Jene Proteinbänder, die Epithelzellen miteinander verbinden – die so genannten Tight Junctions –, fügen sich in der Lunge von Erkrankten fehlerhaft zusammen. Andere Arbeitsgruppen fanden weitere defekte Zellverbindungen in Atemwegsepithelien von Asthmapatienten.

Zudem zeigten Studien an Lungenepithelien in Laborkultur, dass mehrere Substanzen, die erwiesenermaßen Asth-

ma begünstigen, die Zell-Zell-Verbindungen im Gewebe zerstören – und zwar besonders bei Epithelien von Asthmapatienten. Einige Allergene reizen zusätzlich noch das Immunsystem. So interagiert die Protease Der p II, die im Kot von Hausstaubmilben vorkommt, mit Zellrezeptoren des angeborenen Immunsystems, den so genannten Toll-ähnlichen Rezeptoren. Das löst ein Alarmsignal aus und provoziert eine Reaktion des erworbenen Immunsystems. »Es ist das Zusammenspiel aller dieser Effekte, das einer allergischen Erkrankung wirksam Vorschub leistet«, fasst Holgate zusammen. ~

DIE AUTORIN



Claire Ainsworth ist freie Wissenschaftsjournalistin und lebt in Southampton, Großbritannien.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171180

© Nature Publishing Group
www.nature.com

Nature Outlook 479, S. 12–13, 24. November 2011

DER SPIEGEL

Heftpreis
€ 7,90

NR. 6 | 2012

GESCHICHTE



KARL DER GROSSE

DER MÄCHTIGSTE KAISER DES MITTELALTERS

Jetzt
im
Handel.

Querschnitt € 4,29 - Schweiz € 11,90 - Belgien € 11,90 - Österreich € 12,90 - Frankreich € 12,90 - Portugal € 12,90 - Spanien € 12,90 - Italien € 12,90 - Dänemark € 12,90 - Norwegen € 12,90 - Polen € 12,90 - Tschechien € 12,90 - Ungarn € 12,90 -

PRINTED IN GERMANY

MEROWINGER
Die geheimnisvollen
Reichsgründer

WISSENSCHAFT
Genies im
Dienst der Krone

SACHSENKRIEGE
Der grausame Feldzug
gegen die Heiden

PAPST Karls rätselhafte Krönung in Rom

BAUERN Schinderei für die fränkischen Herren

AACHEN Entdeckungen in der einstigen Pracht-Residenz

Molekulare Türöffner

Die äußere Membran von Zellen stellt für viele therapeutisch interessante Moleküle eine unüberwindliche Barriere dar. Spezielle Peptide können hier als Transporter dienen und damit das Zellinnere für diese Stoffe zugänglich machen. Das ermöglicht neuartige, hochspezifische Medikamente und Therapien, etwa gegen Krebs.

Von Roland Brock und Wouter Verdurmen

Anfang der 1990er Jahre untersuchten Alain Prochiantz und Alain Joliot an der École normale supérieure in Paris die Entwicklung der Nervenzellen von Taufiegen. Vor allem interessierten sich die beiden Biologen dafür, wie genau das so genannte Antennapedia-Protein (kurz Antp) seine wichtige Aufgabe erfüllt: Es bewirkt, dass aus nicht spezialisierten Zellen Nervenzellen entstehen (»neuronale Differenzierung«). Um das Protein in Zellen hineinzubringen, die in Kulturschalen wuchsen, machten sie die Zellmembranen durch Zugabe bestimmter Stoffe ein wenig durchlässig, denn normalerweise nehmen Zellen nicht so einfach derart große Moleküle wie Proteine von außerhalb auf.

Zu ihrer Überraschung stellten Prochiantz und Joliot bei ihren Versuchen jedoch fest, dass Antp auch in völlig intakte Zellen eindrang. Dabei erfüllte es weiterhin seine normale Aufgabe der neuronalen Differenzierung. Offenbar war das Protein also sogar bis in den Zellkern gelangt, wo es seinen Part bei der Genregulierung spielte.

Schon bald nach dieser Entdeckung konnte dieselbe Forschergruppe 1994 die Fähigkeit, Membranen zu durchdringen, an einem bestimmten Abschnitt des Proteins festmachen: der dritten alpha-Helix der Antp-Homöodomäne (sie-

he Glossar, S. 44). Es zeigte sich, dass ein synthetisches, 16 Aminosäuren großes Peptid, das diesem Bereich entsprach, die Zellmembran ebenso überwinden konnte. Ein solches kleines Proteinstück lässt sich problemlos und effizient herstellen. Von hier war es daher nur noch ein kleiner Schritt bis zur ersten biotechnologischen Anwendung dieses »zellpenetrierenden Peptids« (kurz CPP für die englische Bezeichnung cell-penetrating peptide), auch Penetratin genannt. Die Wissenschaftler interessierte vor allem, ob sich andere Moleküle in Zellen einschleusen lassen, wenn sie an das Penetratin-Peptid gekoppelt sind. Der erste solche »Frachttransport« gelang mit einem Peptid, welches das Enzym Proteinkinase C hemmt.

Etwa zur gleichen Zeit wollten die Forscher herausfinden, welche strukturellen Eigenschaften des Penetratin-Peptids der bemerkenswerten Transportfähigkeit zu Grunde lagen. Schnell wurde deutlich, dass eine effiziente Aufnahme sowohl von positiv geladenen als auch von einigen großen hydrophoben Aminosäureseitenketten abhing.

Bereits 1988 hatten Maurice Green und Paul Lowenstein von der St. Louis University School of Medicine in Missouri sowie Alan Frankel und Carl Pabo von der Johns Hopkins School of Medicine sehr ähnliche Beobachtungen für das Tat-Protein des humanen Immundefizienzvirus (HIV) veröffentlicht: Zellen nahmen das Protein spontan auf, worauf es Virusgene anschalten konnte. Die Gruppe von Bernard Lebleu am Institut für Molekulare Genetik in Montpellier identifizierte später im Tat-Protein eine nur elf Aminosäuren lange »proteintransduzierende Domäne« (PTD), die für den Vorgang verantwortlich ist. Dieser Abschnitt wurde in der Folge als weiteres CPP detaillierter erforscht.

Die Beobachtungen zur Zellpenetration stießen bei Biotechnologen sofort auf starkes Interesse, denn sie widerlegten ein bis dahin geltendes Dogma: Diesem zufolge können größere hydrophile (Wasser liebende) Moleküle grundsätzlich nicht ohne Schädigung der Membran ins Zellinnere, das Zytoplasma, gelangen. Das hatte sich etwa bei früheren Ver-

AUF EINEN BLICK

FRACHTTRANSPORT IN ZELLEN

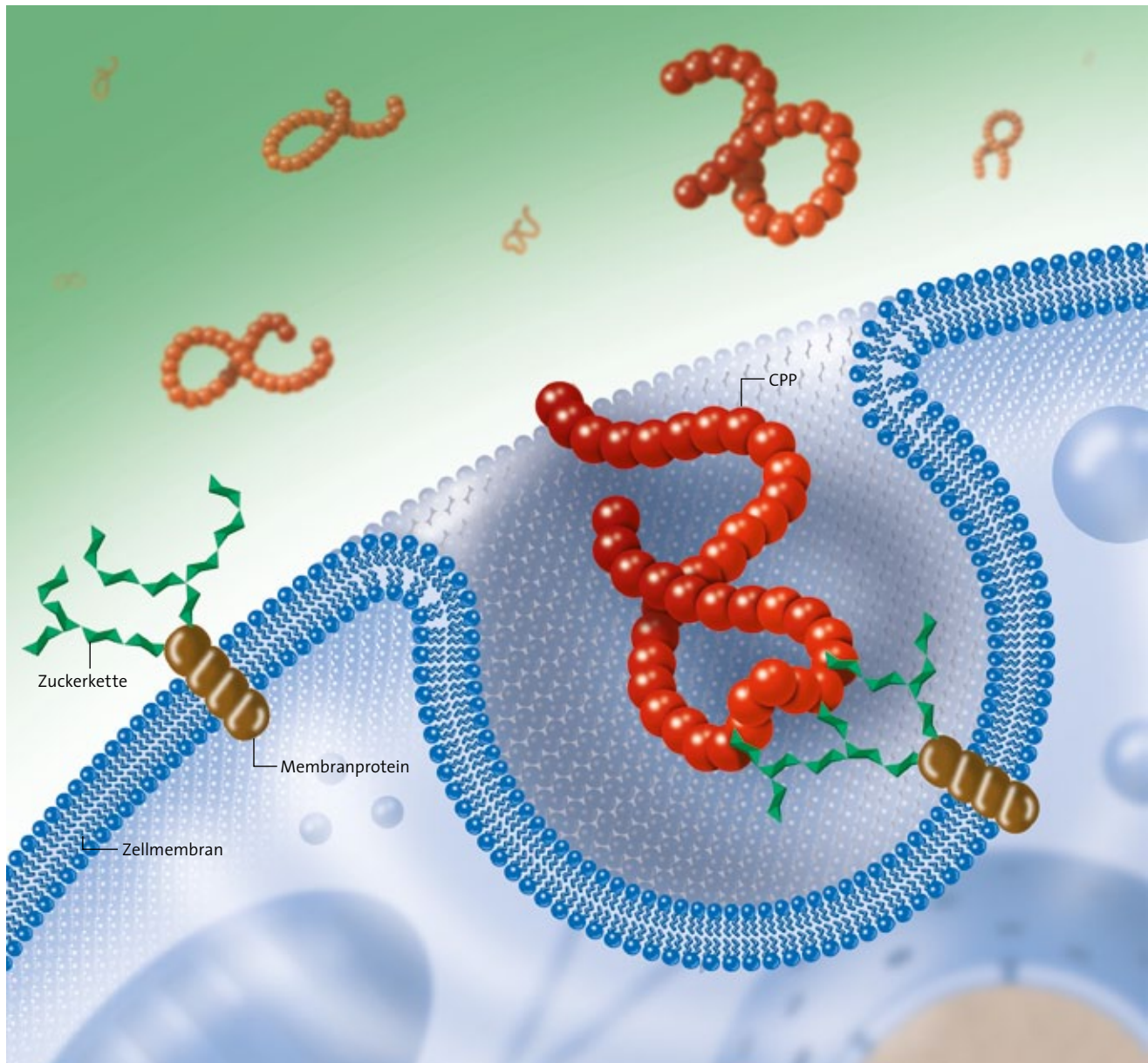
- 1 Die äußere **Membran** von Zellen lässt normalerweise nur wenige, meist kleine und ungeladene Moleküle durch.
- 2 Forscher suchen nach Möglichkeiten, auch größere, therapeutisch geeignete Moleküle, etwa **DNA** oder **Proteine**, gezielt in bestimmte Zellen einzuschleusen.
- 3 Hier können so genannte **zellpenetrierende Peptide** (CPP) helfen, die mit einem speziellen Mechanismus die Membranbarriere überwinden. **Wirkstoffe** lassen sich an sie koppeln und auf diese Weise in Zellen einbringen.

suchen mit so genannten membranaktiven Peptiden und Polymeren gezeigt. Solche Moleküle, die in einigen Eigenschaften den CPP ähneln, können die Aufnahme von Proteinen in Zellen zwar stark fördern. Doch sie wirken auf die Membranen massiv ein, lagern sich sogar manchmal in sie ein und ändern dadurch deren Eigenschaften – bis hin zur Zerstörung.

So hatten Hugues Ryser und Ronald Hancock von der Harvard Medical School in Boston bereits 1965 demonstriert, dass in Gegenwart von Ketten aus vielen positiv geladenen Aminosäuren, etwa poly-Lysin, das Protein Albumin mehr als 50-mal häufiger als sonst in Zellen eindringt. In den

1970er Jahren koppelte dieselbe Forschergruppe dann poly-Lysin an Proteine sowie an kleinere Moleküle, woraufhin diese dann ebenfalls leichter in die Zellen gelangten. Jedoch erwiesen sich die Lysinpolymere wegen ihres starken Effekts auf die Membran als zellschädigend – genau wie auch die bereits vor der Entdeckung der CPP bekannten membranaktiven Peptide.

Zellpenetrierende Peptide (CPP) können in Zellen eindringen und dabei auch angeheftete Moleküle mitnehmen – etwa Krebstherapeutika zur Tumorbekämpfung.



Weit gehend schädigungsfrei verläuft dagegen der Transport mit Hilfe angekoppelter CPPs. Diese verschaffen Molekülen, die auf Grund ihrer Eigenschaften nicht durch die Membran hindurchdiffundieren können und für die es auch keine Kanäle oder Transporter gibt, Zutritt zum Zellinneren. Beispiele dafür sind so genannte Oligonukleotide, beispielsweise siRNA, mit der sich die Aktivität von Genen kontrollieren lässt, aber auch Proteine, Peptide und sogar Nanopartikel (siehe Bild rechts).

CPP boten sich damit als universelles Hilfsmittel für den Import von therapeutisch wirksamen Makromolekülen in Zellen an. Grundsätzlich lässt die Zellmembran nämlich nur

sehr wenige Moleküle durch. Sie dient als hochselektive Barriere und kontrolliert so die Zusammensetzung des Zytoplasmas. Während die innere und die äußere Oberfläche der Membran elektrisch geladen und hydrophil sind, stößt das Innere, das aus Fettsäuren besteht, Wasser ab – es ist hydrophob. Daher können auch nur kleine ungeladene und hydrophobe Moleküle durch die Membran hindurch. Alle geladenen beziehungsweise größeren polaren Moleküle benötigen Kanal- oder Transporterproteine, um die Barriere zu überwinden.

Für Makromoleküle wie DNA- und RNA-Oligonukleotide, Peptide oder Proteine gibt es allerdings keine derartigen Transporter. Wenn überhaupt, werden sie daher nur mittels Endozytose aufgenommen. Hierbei fangen die Zellen Moleküle und Partikel mit Hilfe von Oberflächenmolekülen (Rezeptoren) und schließen sie dann in Membranbläschen – Endosomen genannt – ein. Diese vereinigen sich mit anderen Bläschen, so genannten sauren Lysosomen, welche Enzyme enthalten, die Makromoleküle wie Proteine oder DNA abbauen. Entsprechend gelangen danach nur deren Bausteine, also Aminosäuren und Nukleotide, in das Zytoplasma. Daher erweist sich dieser Weg als wenig nützlich für den Import von therapeutischen Molekülen: Bevor diese innerhalb der Zelle ihre Aufgabe erfüllen können, werden sie überwiegend zerstört.

Wie bekommt man Moleküle in Zellen hinein – und zwar ohne Endozytose?

Das erklärt auch die rasch aufflammende Begeisterung der Forscher über die Entdeckung der CPPs. Denn die ersten Untersuchungen ließen auf einen direkten Import der CPP mit samt ihren Frachtmolekülen in das Zytoplasma schließen – also ohne die problematische Endozytose. Laut des damaligen Modells stören die CPP die Membranstruktur nur geringfügig, was dieser Sichtweise zufolge allerdings für die direkte Passage des Peptids sowie seiner Fracht über die Membran in das Zytoplasma genügt.

Eine Reihe von Befunden stützte das Modell. So sprachen zwei Beobachtungen gegen einen Endozytosemechanismus, der Rezeptoren nutzt: Zum einen bleibt die Peptidaufnahme auch dann konstant, wenn das CPP aus so genannten D-Aminosäuren an Stelle der natürlich vorkommenden L-Aminosäuren synthetisiert wird. Ein spezifischer Rezeptor könnte ein solches D-CPP wegen seiner anderen räumlichen Struktur dagegen nicht mehr erkennen. Zum anderen näherte sich die Transferrate selbst bei hohen Konzentrationen keinem Maximalwert – es tritt keine Sättigung auf, wie Fachleute sagen. Bei rezeptorabhängiger Endozytose würde das jedoch geschehen, da irgendwann alle verfügbaren Rezeptoren belegt sind.

Darüber hinaus ließ sich der Import auch nicht durch solche Bedingungen stören, die normalerweise die – von Energiezufuhr abhängige – Endozytose blockieren, etwa die Abkühlung der Zellen auf vier Grad Celsius oder ein Mangel an biologisch nutzbaren Energieträgern. Physikochemische

Glossar

ALPHA-HELIX: spiralförmige Gestalt einer Polypeptidkette, die als Strukturelement häufig in Proteinen und Peptiden anzutreffen ist

D-AMINOSÄUREN: verhalten sich in der räumlichen Struktur zu den natürlich vorkommenden L-Aminosäuren wie die rechte zur linken Hand beziehungsweise wie Bild zu Spiegelbild

ENDOZYTOSE: Mechanismus, über den Zellen Bläschen (Endosomen) aus Zellmembran, die mit extrazellulärer Flüssigkeit gefüllt sind, nach innen einstülpen, abschnüren und aufnehmen

FIXIERUNG: chemischer Prozess, der idealerweise eine Momentaufnahme von einem Zustand einer Zelle anfertigt, indem er alle biochemischen Prozesse stoppt und die Biomoleküle durch Vernetzung immobilisiert

HOMÖODOMAINE: Teil eines so genannten Homöodomänen-Proteins, der an spezifische DNA-Stellen binden kann, was es dem Protein erlaubt, als Transkriptionsfaktor die Aktivität bestimmter Gene zu regulieren

LYSOSOM: Membranbläschen, in dem Proteine und Nucleinsäuren in ihre Einzelbestandteile zerlegt werden

OLIGONUKLEOTID: kurzes DNA- oder RNA-Stück aus weniger als etwa 50 Nucleinsäuren

SIRNA: Abkürzung für »small interfering RNA«; Oligonukleotid, das innerhalb der Zelle den Abbau von Boten-RNA verursacht, was sehr spezifisch die Herstellung bestimmter Proteine hemmen kann

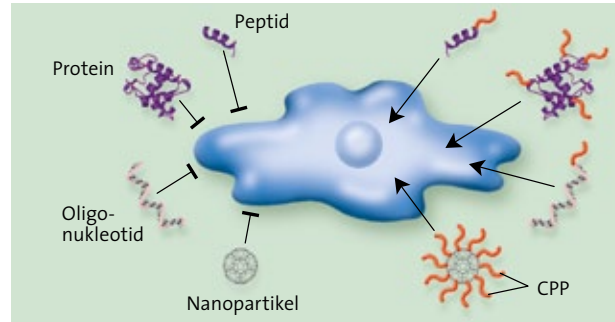
SPLEISSEN: Vorgang, bei dem nach Ablesen eines Gens durch Herausschneiden von Abschnitten aus der RNA die reife Boten-RNA entsteht. Er kann infolge von Genmutationen fehlerhaft ablaufen, so dass eine Boten-RNA entsteht, von der kein funktionsfähiges Protein hergestellt werden kann

ZELLMEMBRAN: die Membran, die eine Zelle umschließt

ZYTOPLASMA: die Flüssigkeit innerhalb der Zellmembran, in der sich die kleineren, von Membranen umschlossenen zellulären Kompartimente (Organellen) wie Lysosomen, Mitochondrien oder der Zellkern befinden

Vehikel für Wirkstoffe

Moleküle, die die Zellmembran sonst nicht durchqueren können, bewerkstelligen dies mit Hilfe zellpenetrierender Peptide (CPP). Das eröffnet neue Klassen von Molekülen wie Peptide, Proteine und Oligonukleotide als potenzielle Medikamente, die innerhalb von Zellen ihre Wirkung entfalten. Nanopartikel können ebenfalls zum Transport von großen und kleinen Molekülen genutzt oder für diagnostische Zwecke in Zellen hinein gebracht werden.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE, NACH: ROLAND BRÖCK

Untersuchungen darüber, wie sich CPP und Membran gegenseitig beeinflussen, sowie Experimente mit Modellmembranen unterstützten das Konzept einer direkten Aufnahme zusätzlich. Ende der 1990er Jahre schien damit die Frage des zellulären Imports von Makromolekülen geklärt.

Entsprechend setzten wir, als wir 1999 begannen, die Wechselwirkungen von Proteinen im Zellinneren zu untersuchen, dafür zellpenetrierende Peptide ein. Bemerkenswerterweise stellten jedoch bereits unsere ersten Ergebnisse die etablierte Vorstellung in Frage, wonach die Aufnahme in Zellen unabhängig von der Fracht verlaufe. Denn wenn wir das gleiche CPP an Peptide koppelten, die sich nur in wenigen Aminosäuren unterschieden, fanden wir deutliche Abweichungen in der Importrate.

Das Jahr 2003 markierte dann einen Wendepunkt in der CPP-Forschung. Das Team von Bernard Lebleu, das zuvor das Tat-Peptid identifiziert hatte, veröffentlichte eine Studie über den Einfluss der so genannten Fixierung, bei der die biologischen Moleküle chemisch miteinander vernetzt werden, auf die zelluläre Verteilung von CPP. Bis zu diesem Zeitpunkt waren fast alle Experimente zur Peptidaufnahme mit fixierten Zellen durchgeführt worden, da die Peptide für die Mikroskopie mit einem Farbstoff markiert wurden, der nur nach Fixierung in das Zellinnere gelangen konnte.

Laut den Forschern um Lebleu schien nun aber ein Großteil der experimentellen Belege für eine direkte Aufnahme auf einem Nebeneffekt des Fixierungsprozesses zu beruhen. Dieser schädigt nämlich die Membranen, wodurch CPP, die entweder außen an der Zelle kleben oder in Endosomen eingeschlossen sind, in das Zytoplasma gelangen, sich dort gleichmäßig verteilen und dann erst mit Proteinen verbinden. Damit war auch klar, warum in den vorherigen Experimenten Kälte oder Energiemangel die Aufnahme scheinbar nicht gehemmt hatten: Die Peptide hefteten sich unter diesen Bedingungen ebenfalls an die Außenseite der Zelle und gelangten dann wie beschrieben durch die Fixierung ins Innere.

»CPP sind vor allem eine Aufnahme-strategie für Makromoleküle – und die sind teurer herzustellen als herkömmliche Medikamente«

Gaben die Forscher hingegen zu lebenden, nicht fixierten Zellen in Kulturschalen CPP hinzu, die an einen fluoreszierenden Farbstoff gekoppelt waren, so zeigten sich im Mikroskop leuchtende Punkte, die auf intrazelluläre Bläschen – Endosomen – hindeuteten. Hemmten sie die Endozytose, etwa durch Abkühlung, fiel diese Färbung schwächer aus. Demnach gelangen die Peptide eben doch nicht direkt durch die Membran in die Zelle, sondern im Wesentlichen mittels Endozytose – allerdings ohne Beteiligung von Rezeptoren. Der eingangs beschriebene direkte Aufnahmemechanismus für den Antennapedia-Transkriptionsfaktor scheint dagegen tatsächlich zuzutreffen.

Zwar hatten bereits zuvor andere Untersuchungen auf eine Aufnahme via Endosomen hingedeutet, doch letztlich war es diese Studie, die zu einem Paradigmenwechsel in der CPP-Forschung führte. Bis dahin galten CPP vor allem als molekulare Werkzeuge, und ihre Anwendung schien sehr einfach. Nun kam plötzlich doch die viel komplexere endosomale Aufnahme ins Spiel, die ja in den meisten Fällen zu einem Abbau der aufgenommenen Moleküle in den Lysosomen führt. Zudem erbrachten mehrere CPP-Experimente nicht die erhofften Resultate, was vermehrt Zweifel an der Methode schürte.

Diese Widrigkeiten hätten das Ende der Erforschung der CPP bedeuten können – doch stattdessen verstärkten die Wissenschaftler ihre Anstrengungen noch, und zwar in ganz unterschiedliche Richtungen. Die CPP-Forschung wurde interdisziplinär und bezog die Chemie, Pharmakologie und Zellbiologie mit ein. Mehrere Faktoren trugen zu dieser überraschenden Entwicklung bei:

- Die effiziente Aufnahme per Endosomen ohne Beteiligung von Rezeptormolekülen war für sich schon eine wichtige Entdeckung.
- Es gab bereits Beispiele für die erfolgreiche Anwendung von CPP – irgendwie schien es also doch zu klappen. Die Herausforderung bestand nun darin, die Ursachen für den Erfolg zu verstehen und diese dann auf andere Situationen zu übertragen.

► Inzwischen existierten Strategien für die Freisetzung von Molekülen aus Endosomen in das Zytoplasma, wo sich die Zielmoleküle für die meisten potenziellen Wirkstoffe befinden und wodurch der Abbau in den Endosomen vermieden werden konnte. Nun mussten sie nur noch so angepasst werden, dass sie in Kombination mit CPP funktionierten.

► Oligonukleotide – und hier vor allem die erwähnten siRNAs, mit denen sich Gene inaktivieren lassen, – stellten sich als sehr viel versprechende neue Therapeutika heraus, und man hoffte, sie mittels CPP ans Ziel zu bringen.

► Und schließlich wollte man sich ganz grundsätzlich von der Beschränkung auf kleine Moleküle als Wirkstoffe befreien und neue Medikamente auf Basis von Makromolekülen entwickeln, die dafür in Zellen eingebracht werden müssen.

Seitdem hat eine zunehmende Anzahl von Forschergruppen vor allem in Europa, den USA und Japan rund 100 CPP und Varianten einzelner CPP identifiziert. Es gibt offenbar mehrere Aufnahmekanäle, die von dem CPP, der damit verknüpften Fracht und der verwendeten Konzentra-

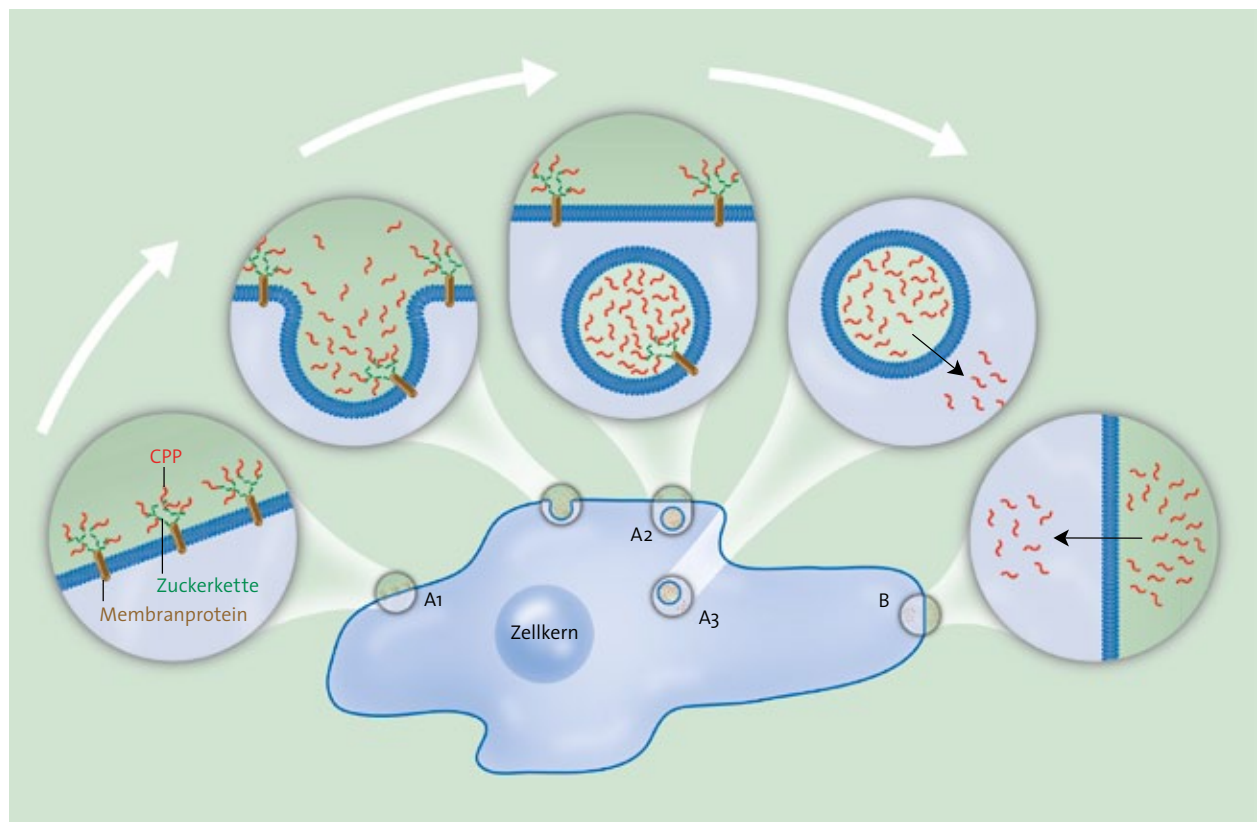
tion abhängen. Für kleine Moleküle, etwa Krebswirkstoffe, die nicht allzu hydrophil sind, gibt es Belege, dass sie – an CPP gebunden – direkt durch die Membran hindurch aufgenommen werden. Makromoleküle wie Proteine nutzen dagegen die beschriebene CPP-vermittelte Endozytose. Außerdem hängt die Wirksamkeit eines spezifischen CPP vom jeweiligen Zelltyp ab, wobei die molekulare Grundlage dieser Beobachtung noch nicht verstanden ist. Dennoch zeichnet sich ab, dass die geeignete Wahl eines CPP es ermöglicht, Wirkstoffe ganz gezielt in bestimmte Zellen, beispielsweise Krebszellen, zu transportieren, was die Gefahr von Nebenwirkungen verringert.

Die molekularen Abläufe bei der Aufnahme eines CPP in die Zelle sind noch nicht durchgängig geklärt. Im ersten Schritt heftet sich das Peptid an die Zellmembran. Dabei spielt die Bindung von positiv geladenen Teilen des Peptids an negative Ladungen auf der Membran eine wichtige Rolle. Diese negativen Ladungen finden sich beispielsweise in Zuckermolekülen, die auf Membranbausteinen sitzen (siehe

Zwei Wege führen ins Zellinnere

Zellpenetrierende Peptide gelangen über verschiedene Mechanismen in Zellen hinein. Ein wichtiger ist die Endozytose (A1 bis A3). Positiv geladene Moleküle binden sich typischerweise mittels negativ geladener Zuckermoleküle, die auf Membranpro-

teinen sitzen, an die Zelloberfläche (A1). Nach der Endozytose (A2) gelangen die Peptide sowie etwaige angekoppelte Fracht in das Zytoplasma (A3). Alternativ ist in einigen Fällen ein direkter Durchtritt über die Membran möglich (B).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE, NACH: ROJAND BROCK

Bild links unten). Wie genau das Anheften des Peptids an die Außenseite der Membran dann die eigentliche Aufnahme auslöst, bleibt zu erforschen. Bekannt ist lediglich, dass einige CPP eine Neuorganisation des Zellskeletts bewirken. Innerhalb der Endosomen wird allerdings ein erheblicher Teil der CPP-gebundenen Moleküle abgebaut, und nur vergleichsweise wenig gelangt intakt in das Zytoplasma. Wie viel, hängt vom verwendeten CPP ab und bestimmt entscheidend, wie gut sich ein Peptid als Importhilfsmittel eignet. Aus diesem Grund haben Forscher Strategien entwickelt, um die Freisetzung aus den Endosomen zu fördern. Zum einen erreichten sie dies durch strukturelle Veränderungen des CPP, zum anderen verabreichen sie zusammen mit dem CPP andere Moleküle, welche die Membran der Endosomen destabilisieren. Eine dieser Strategien haben sie vom Grippevirus abgeschaut, der seine Erbsubstanz nach Endozytose recht effizient in das Zytoplasma freisetzt.

Der heilige Gral der CPP-Forschung

Die Aussicht, mittels CPP bislang therapeutisch nicht nutzbare Moleküle in Zellen einschleusen zu können, ließ die Forscher schon bald erste Versuche an Mäusen durchführen. Dem Team von Steven Dowdy, zu diesem Zeitpunkt am Howard Hughes Medical Institute und an der Washington University tätig, gelang es, bei den Tieren ein Enzym gekoppelt an das Tat-CPP in die Zellen einzuführen – ein Schlüsselexperiment der CPP-Forschung. Nachdem die Wissenschaftler das Enzym Mäusen gespritzt hatten, konnten sie es in allen Geweben nachweisen, einschließlich des Gehirns. Letzteres war besonders wichtig, denn der erfolgreiche Import von Makromolekülen in Nervenzellen gilt geradezu als heiliger Gral auf dem Gebiet.

Angefeuert von diesen Grundlagenexperimenten nahmen Forschergruppen an Universitäten und Biotech-Unternehmen Studien an Mäusen und auch bei Menschen in Angriff. Als Erstes erprobte die US-Firma Psorban ein Heptarginin-CPP, das an das Immunsuppressivum Cyclosporin gekoppelt ist, zum Einsatz auf der Haut bei Psoriasis (Schuppenflechte). Das zeigte jedoch keine hinreichende Wirksamkeit. Anders der Einsatz von CPP-Oligonukleotiden zur Behandlung der Duchenne-Muskeldystrophie, einer tödlich verlaufenden Muskelschwäche vor allem bei Jungen. Ziel ist es, das bei den Betroffenen gestörte Zurechtschneiden (»Spleißen«) der mRNA eines bestimmten Gens zu korrigieren. Hier zeigten vorklinische Studien erste Erfolge. Und: Weder bei Mäusen noch bei Menschen riefen CPP bislang schädliche Effekte hervor, was die in den Zellkulturexperimenten beobachtete geringe Toxizität bestätigt.

Gegenwärtig tritt die CPP-Forschung in ihre bislang aufregendste Phase ein. Rund 20 Jahre nach der ersten Beschreibung der Peptide und bei ständig wachsender Anzahl klinischer Studien beginnen sich die Anstrengungen allmählich auszuzahlen. So ermöglichte es das bessere Verständnis der molekularen Aufnahmemechanismen, die Peptide für den therapeutischen Einsatz zu optimieren. Vor allem für ange-

koppelte Oligonukleotide lässt sich heute schon ein sehr effizienter Importwert erreichen.

Zu diesem Zweck verändern Forscher einerseits die Aminosäureabfolge der CPP gezielt, andererseits bauen sie auch zusätzliche molekulare Gruppen ein. So heftete das Team von Ülo Langel an der Universität Stockholm, einem der Pioniere der CPP-Forschung, chloroquinartige Molekülgruppen an CPP, was den zellulären Import von Oligonukleotiden deutlich verbesserte. Das Malaria-medikament Chloroquin fördert die Freisetzung von Molekülen aus Endosomen.

Trotz aller Fortschritte verstehen wir aber bislang die molekularen Mechanismen der Aufnahme von CPP in Zellen noch zu wenig, um eine perfekte Version davon zu entwerfen. Im Wesentlichen prägen nach wie vor Versuch und Irrtum die Weiterentwicklung dieser Peptide. Denn der Importvorgang ist schlicht zu komplex, da hierbei mehrere Faktoren korrekt ineinandergreifen müssen: Membranbindung, Aufnahme, Freisetzung aus den Endosomen sowie Schutz vor Abbau. Für klinische Anwendungen gilt es letztendlich, Kosten und therapeutischen Nutzen abzuwägen. CPP sind vor allem eine Aufnahmestrategie für Makromoleküle – und diese sind meist teurer herzustellen als gewöhnliche Wirkstoffe, die aus kleineren Molekülen bestehen.

Nicht zuletzt wird die Entschlüsselung der CPP-Mechanismen aber auch unserem Verständnis der zellulären Aufnahme von Makromolekülen im Allgemeinen dienen. So gibt es Gemeinsamkeiten in der Art und Weise, in der bestimmte Viren und CPP in Zellen gelangen. CPP lassen sich daher als vereinfachtes Modellsystem nutzen, um grundlegende biologische Abläufe zu verstehen. ~

DIE AUTOREN



Roland Brock (links) ist Professor für Biochemie an der Universitätsklinik der Radboud-Universität Nijmegen, Niederlande. Sein Interesse gilt den Mechanismen und den Anwendungen des zellulären Molekülimports. **Wouter**

Verdurmen hat an der Radboud-Universität biomedizinische Wissenschaften studiert und in der Arbeitsgruppe von Roland Brock über Peptidimport promoviert.

QUELLEN

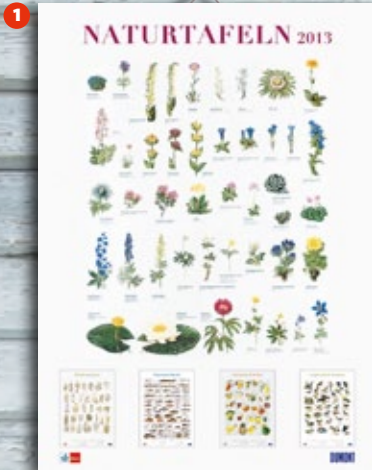
Jarver, P. et al.: In Vivo Biodistribution and Efficacy of Peptide Mediated Delivery. In: Trends in Pharmacological Sciences 31, S. 528–535, 2010

Milietti, F.: Cell-Penetrating Peptides: Classes, Origin, and Current Landscape. In: Drug Discovery Today 17, S. 850–860, 2012

Verdurmen, W. P., Brock, R.: Biological Responses towards Cationic Peptides and Drug Carriers. In: Trends in Pharmacological Sciences 32, S. 116–124, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171173



1 NATURTAFELN

Mit Zweimonats-Kalendarium, 7 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2878 € 26,99

Sechs Schreiber-Tafeln zu interessanten Wissensgebieten aus Flora und Fauna mit vielen detailgetreuen Abbildungen befinden sich in diesem Kalender. Bleiben Sie ein Jahr lang der Natur auf der Spur!

3 WEGE

Kalendarium dreisprachig, mit Jahresübersicht, 13 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2433 € 29,95

Sie wissen doch: Der Weg ist das Ziel! Wege durch interessante Landschaften in den jeweiligen Jahreszeiten – wunderschön fotografiert.

4 HIMMEL UND ERDE

13 farb. Blätter, Format: 55,5 x 45,5 cm, Spiralbindung, Weingarten

Bestell-Nr. 1338 € 32,-

In diesem Kalender von STERNE UND WELTRAUM präsentieren Astronomen zwölf faszinierende Aufnahmen von Sternen, Planeten und dem Welt- raum. Das Kalendarium bietet zusätzlich Hinweise auf wichtige Himmelsereignisse im Jahr 2012.

6 M. C. ESCHER

Internationales Kalendarium, 12 Monatsblätter, Foliendeckblatt, Format: 50 x 66 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2173 € 34,95

Eschers technische Konstruktionen wirken perfekt – sind aber nicht Realität. Gerade im Großformat der Abbildungen dieses Kalenders entfaltet Eschers faszinierende konstruierte Welt ihre eindruckliche, suggestive Wirkung!

2 ANIMALS IN FOCUS – POSTER-KALENDER

13 farb. Blätter, 12 Passepartoutblätter, Format: 33 x 66 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3668 € 34,95

Die mattschwarzen Rahmen setzen die hochglänzenden Tierfotografien gekonnt in Szene und sorgen für spannende Einblicke durch besondere Ausschnitte. Klappen Sie die Passepartouts ganz nach hinten weg, wird der Kalender zur hochwertigen Postersammlung für viele Jahre.

5 STERNZEIT

Kalendarium dt.-engl., 13 farb. Blätter, Maxi-Format: 70 x 50 cm, Palazzi Verlag

Bestell-Nr. 1335 € 44,80

Modernste Teleskope geben uns verblüffende Ausblicke und tiefe Einblicke in die Struktur und Entwicklung des Universums. Mit informativen Texten und Detail-Abbildungen.

7 KREATUREN DER TIEFSEE

Internat. Kalendarium, 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 3673 € 19,95

In einer Tiefe von 1000 Metern gibt es keinerlei Lichteinfall. So produzieren die Wesen, die hier leben, ihre eigenen Lichtquellen, um Futter anzulocken oder Feinde abzuschrecken.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



8 NATURE PHOTO ART

Text dttsch.-engl., 13 Duplex-Blätter, Format: 50 x 70 cm, Palazzi

Bestell-Nr. 3669 € 44,80

Zwölf Natur-Studien von Michel Rajkovic in höchster Druck-Qualität – nah am Original-Fotoabzug. Die bewußte Beschränkung auf Schwarz und Weiß mit einer Palette feinsten Grau-Töne verleihen diesen Bildern besondere Präsenz.

9 ZWEITAUSENDDREIZEHN

13 farb. Blätter m. formgestanzten Zahlen, Format: 33 x 45 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3666 € 24,95

Einen ungewöhnlichen Anspruch an Ablauf und Sehgewohnheiten stellt der Kalender an seinen Nutzer und Betrachter. Gegen den üblichen Rhythmus von hinten nach vorne geblättert, überlagern sich die formgestanzten Zahlen dieses Kalenders Monat für Monat zu immer komplexer werdenden grafischen Mustern.

10 LEUCHTTÜRME

Kalendarium dttsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 33 x 67,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2876 € 19,95

Majestätisch und geheimnisvoll wachen Leuchttürme über Wasser und Land. Der Kalender präsentiert Bauwerke aus Deutschland, Frankreich, Australien, Dänemark, den USA und Namibia.

11 VOM ZAUBER ALTER BÄUME

Kalendarium dreisprachig, 13 kolorierte SW-Blätter, Format: 58,4 x 48,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3361 € 26,99

Zwölf verwitterte und steinalte Baumriesen präsentieren sich in ihrer ganzen Ehrwürdigkeit und Imposanz. Heinz Wohner hat sie in Deutschland aufgespürt und fotografiert. Anschließend hat er seine Schwarzweiß-Fotografien kunstvoll von Hand koloriert.

12 VERBORGENE WELTEN

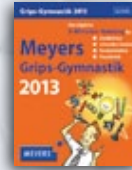
Kalendarium mehrsprachig, 13 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2176 € 34,99

Entdecken Sie die Welt der Pflanzen, Insekten und Bakterien aus nächster Nähe. Die mehrfach ausgezeichneten Wissenschaftsfotografen Oliver Meckes und Nicole Ottawa führen Sie in die Welt des Raster-Elektronenmikroskops. Wissenschaftliche Fotografien, abgerundet durch sachkundige und informative Texte.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de

Abreißkalender - Wissen für jeden Tag



MEYERS! GRIPS-GYMNASTIK

320 zweifarb. Bl., 11 x 14 cm, Meyers

Bestell-Nr. 1535 € 9,99

Das tägliche 5-Minuten-Training für Gedächtnis, Konzentration, Kreativität und schnelles Denken.



DENKST DU NOCH ODER PHILOSOPHIERST DU SCHON?

Ein vergnüglicher Exkurs in die wunderbare Welt der Philosophie

320 farb. Bl., 12,5 x 16 cm, Harenberg

Bestell-Nr. 3676 € 15,99

Humorvolle und alltagsnahe Antworten auf die großen und kleinen Fragen der Philosophie.



EINSTEIN FÜR QUANTEN-DILETTANTEN

Ein vergnüglicher Crashkurs in Sachen Naturwissenschaften

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, Abreißkalender, Harenberg

Bestell-Nr. 3093 € 15,99

Täglich spannende Erklärungen aus Biologie, Physik, Chemie usw. Verblüffend leicht verständlich!

Notizkalender



HEIMISCHE VÖGEL Kalender

Mit Nutzkalendarium, 13 farb. Bl., 30 x 39 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2435 € 14,95

Dieser individuell gestaltete Kalender präsentiert zwölf heimische Vogelarten zusammen mit einem passenden Zitat.



WAS BLÜHT DENN DA?

13 farb. Bl., Spiralbindung, 22 x 49 cm., DuMont

Bestell-Nr. 3677 € 9,99

Dieser praktische und dekorative Notizkalender ist doppelt nützlich: Er erleichtert die Terminplanung und hilft bei der Beantwortung der Frage: Was blüht denn da?

Mehr Infos und weitere Kalender:
www.science-shop.de/kalender

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

TITELTHEMA: DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION

Großer Wirbel um die Turbulenz

Göttinger Forscher erkunden das Verhalten turbulenter Strömungen, einer speziellen Form dynamischer und selbst organisierter Systeme. Ihre mathematisch-physikalischen Methoden wenden sie inzwischen auch auf Phänomene der Biologie, Medizin und Hirnforschung an.

Von Gerhard Samulat



Das Leben verläuft nicht immer geradlinig. Und glaubt man Eberhard Bodenschatz, dann gedeiht es am besten unter turbulenten Verhältnissen. So weist der Forscher vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen darauf hin, dass etwa Phytoplankton – die Nahrungsgrundlage vieler Meeresbewohner – offenbar erst in verwirbelten Strömungen massenhaft zur Fortpflanzung zusammenfindet und nicht einfach aneinander vorbeigleitet wie in gleichmäßig (»laminar«) fließenden Gewässern. Desgleichen entstünden ohne die permanente Durchmischung atmosphärischer Schichten keine Wolken oder Stürme, kein Regen oder Schnee. Selbst im Weltall lässt sich Turbulenz als treibende Kraft identifizieren. Planeten, Sterne und Galaxien wären vor

Urzeiten wohl nicht entstanden, hätten nicht Verwirbelungen im Zusammenspiel mit der Schwerkraft zu Dichteschwankungen der kosmischen Staub- und Gasmassen geführt.

Grund genug für Eberhard Bodenschatz und seine Kollegen, den dahinterliegenden Prozessen systematisch auf den Grund zu gehen. Die Forscher haben sich viel vorgenommen, gilt die korrekte Beschreibung der Turbulenz sowie deren unvorhersehbares Verhalten doch als eines der letzten ungelösten Probleme der klassischen Physik. Historisch betrachtet wandten sich die Strömungsforscher zuerst der Turbulenz zu, also den Zuständen von Flüssigkeiten und Gasen, in denen Verwirbelungen auf allen Größenordnungen auftreten. Erst in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts begrif-



Bunte Wirbel: Die Geheimnisse der Turbulenz versuchen Forscher seit Jahrhunderten zu entschlüsseln. Heute rücken sie dem Problem mit neuartigen Windkanälen, Wolkenexperimenten und Simulationen zu Leibe – und mit guten Aussichten auf Erfolg.

DREAMSTIME / VITALY STAVINOV

fen sie solche Phänomene generell als Teil der »nichtlinearen Dynamik«, zu der auch die Chaosforschung gehört.

Kennzeichen dieser allgemeineren Prozesse sind vor allem stark limitierte Vorhersagbarkeit und eingeschränkte Reproduzierbarkeit; denn die konkreten Systemverläufe hängen in der Regel empfindlich von den Bedingungen zu Beginn eines Experiments ab. Das heißt, dass auch winzige Unterschiede in den Anfangsbedingungen exponentiell anwachsen können, was als »Schmetterlingseffekt« bekannt wurde. Die mathematischen Grundlagen der Turbulenz glaubt man seit Langem zu kennen: Es sind die so genannten Navier-Stokes-Gleichungen – benannt nach dem französischen Ingenieur Claude Louis Marie Henri Navier (1785–1836) sowie dem irischen Mathematiker und Physiker Sir George

Gabriel Stokes (1819–1903), die maßgeblich zum Verständnis von Strömungen beitrugen.

Diese so genannten partiellen Differenzialgleichungen zweiter Ordnung sind allerdings nichtlinear, was das Rechnen mit ihnen kompliziert macht. Erschwerend kommt hinzu, dass – im Gegensatz etwa zu normalen Wellenphänomenen in der Physik – die Summe zweier Lösungen der Grundgleichungen im Allgemeinen selbst nicht wieder eine Lösung darstellt. Das Superpositionsprinzip, wie es in linearen Theorien gilt, ist hier außer Kraft gesetzt.

Jedenfalls gelang es bisher noch niemandem, die Existenz und so genannte Regularität von allgemeinen Lösungen der Navier-Stokes-Gleichungen zu beweisen – nicht einmal für den wichtigen Spezialfall dreidimensionaler, inkompressib-

ler Fluide. Das Strömungsproblem zählt sogar zu den sechs verbliebenen nicht geknackten mathematischen Nüssen, die vom amerikanischen Clay Mathematics Institute als Millennium-Probleme bezeichnet werden.

Für deren Lösung hat die Institution ein Preisgeld von jeweils einer Million US-Dollar ausgelobt (siehe Spektrum-Dossier 6/2009, »Die größten Rätsel der Mathematik«; die Poincaré-Vermutung gilt mittlerweile als durch den russischen Mathematiker Grigori Perelman bewiesen). Das Gleichungsgebilde ist so vertrackt, dass sich die Clay-Juroren sogar schon mit »wesentlichen Fortschritten« in Richtung eines Beweises der Existenz und Eindeutigkeit von Lösungen begnügen würden, um das Geld auszuzahlen.

Haifischhaut-Effekt: Manche turbulente Strömungen zeigen weniger Widerstand als laminare

Zwischenzeitlich behelfen sich die Wissenschaftler mit Computersimulationen, in denen sie die physikalischen Randbedingungen bei den untersuchten Problemen modellhaft stark vereinfachen. Nach Vorstellung des britischen Meteorologen Lewis Fry Richardson (1881–1953), dem Begründer der numerischen Wettervorhersage, entsteht eine turbulente Strömung, indem eine treibende Kraft Energie in ein Medium einbringt. Im Fall von Fluiden – Gasen oder Flüssigkeiten – ist das oft die Bewegungsenergie der zahllosen Teilchen einer Strömung. Große Wirbel zerfallen danach kaskadenartig in ähnliche kleinere, wobei sich die Energie auf diese verteilt, was wiederum die Flüssigkeit durchmischt. Die Zeit und das Gebiet, in dem dies geschieht, nennen Turbulenzforscher den Inertialbereich.

Die Kaskade pflanzt sich so lange in immer kleineren Tochterwirbeln fort, bis die Zähigkeit (»Viskosität«) des Mediums die Oberhand gewinnt. Diese Zone kleinster Wirbel bezeichnen Experten nach dem russischen Mathematiker Andrei Kolmogorov (1903–1987) als die Kolmogorov-Skala. Unterhalb der so genannten Viskositätsschranke bremst die innere Reibung der Flüssigkeit die nun winzig kleinen Strömungen und wandelt deren Energie vollständig in Wärme um. In diesem Schritt ähnelt die Viskosität der Wärmeleitung oder Diffusion und wird mathematisch ähnlich modelliert.

Die saubere Berechnung des Übergangs zwischen Inertial- und Kolmogorov-Bereich ist noch immer eine wissenschaftliche Herausforderung. Zum Leidwesen der Forscher kann man die gesamten Erscheinungen der Turbulenz mit numerischen Verfahren nicht vorherzusagen, weshalb Experimenten eine große Bedeutung zukommt.

Dies umso mehr, als bereits simpelste Geometrien wie etwa ein Abflussrohr eine Flüssigkeit oder ein Gas zu einem reichlich komplizierten Gebaren zwingen können. Zudem erstrecken sich technische oder natürliche Strömungsvorgänge oft über so viele Größenordnungen, dass sie selbst mit heutigen Supercomputern nicht exakt berechenbar sind. Beispiel Wolken: Zur vollständigen Beschreibung ihrer Dynamik müssten in der Regel Dimensionen von Mikrometern bis einigen hundert Metern berücksichtigt werden sowie

Zeitintervalle, die sich von Millisekunden bis über viele Minuten erstrecken.

Erschwerend kommt hinzu, dass Wirbel nichtlinear miteinander wechselwirken können. Das hat mitunter paradoxe Effekte. So erzeugt eine etwas turbulente Strömung mitunter sogar weniger Widerstand als eine glatte, laminare. Genau deswegen haben manche Oberflächen Dellen – Golfbälle beispielsweise. Die kleinen Vertiefungen verwirbeln geringfügig die vorbeiströmende Luft, verringern dadurch den Luftwiderstand, und der Ball fliegt weiter.

Ähnliches gilt im Wasser für die Haut von Haien. Deren Schuppen verfügen über feinste Rillen. Dadurch bilden sich an der Oberfläche winzige Wasserstrudel aus, die den effektiven Reibungswiderstand reduzieren. Auch deswegen gehören die Raubfische zu den flinksten Meeresbewohnern. Den Haifischhaut-Effekt nutzen Konstrukteure heute, um den Treibstoffverbrauch von Schiffen, U-Booten oder Flugzeugen zu verringern und Schwimmern in modernen Badeanzügen bei Wettkämpfen aufs Siegertreppchen zu verhelfen.

Doch bis heute ist man einem echten Verständnis turbulenter Strömungen nicht wesentlich näher gekommen. »Ich habe vor Kurzem eine Statistik gesehen, wie viele Flugzeugmodelle man in einem Windkanal testen muss, bis ein richtiges Flugzeug gebaut wird«, sagt Max-Planck-Forscher Eberhard Bodenschatz. »Die Zahl ist in den letzten zehn Jahren mehr oder weniger konstant geblieben.«

Selbst die Überzeugung, dass reale Strömungen sich tatsächlich nach den Navier-Stokes-Gleichungen verhalten, betrachten einige Wissenschaftler bisweilen als reine Glaubenssache. Womöglich könnte ein modifiziertes Gleichungssystem, bei dem noch höhere Gradienten (»Ableitungen«) der Variablen wie Druck, Dichte oder Geschwindigkeit eine Rolle spielen, besser zur Wirklichkeit passen – was die Mathematik noch aufwändiger machen würde.

»Wir wissen nach wie vor nicht immer, mit welchen Näherungen wir die Computer füttern müssen, um die Realität am zuverlässigsten beschreiben zu können«, gibt Bodenschatz zu. Dieser Mangel an sicheren Prognosen hat weit rei-

AUF EINEN BLICK

LETZTES RÄTSEL DER KLASSISCHEN PHYSIK

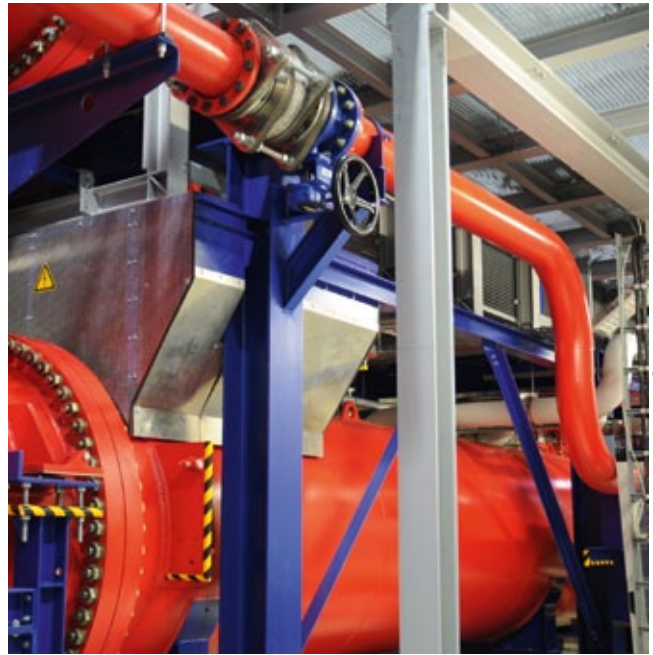
1 **Turbulenzen und Chaos** faszinieren Forscher seit Langem. Noch aber sind viele Fragen offen, da sie die physikalischen Grundgleichungen mathematisch nicht immer gut verstehen. Es ist das letzte große Rätsel der klassischen Physik.

2 Erkenntnisfortschritte bei turbulenten Fundamentalprozessen gelangen in **Experimenten mit großen Röhren und Windkanälen**. Mit dichten Gasen, hohen Drücken und tiefen Temperaturen enthüllen sie neuerdings Details, die sich bisher der Beobachtung entzogen.

3 In den letzten Jahren hat sich das neue Gebiet der **Dynamik und Selbstorganisation** entwickelt und sich wissenschaftliche und technische Anwendungen erschlossen: von Biologie und Hirnforschung bis hin zu Netzwerken für die Stromversorgung.



Eberhard Bodenschatz prüft ein neues Gitter für den Windkanal (oben). Es hat flexibel einstellbare Öffnungen, mit denen sich unterschiedliche Wirbelmuster erzeugen lassen. Das Gitter wird nachher in den roten Turbulenzwindkanal (rechts) eingebaut, der sich in dem Gebäude über zwei Stockwerke zieht.



LINUS: RONALD SCHMIDT, RECHTS: MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION

chende Konsequenzen. Prominentes Beispiel ist der Klimawandel. Selbst so banale Vorgänge wie die Entstehung von Regen oder Schnee sind bis heute nicht ausreichend verstanden.

»Bekanntlich kondensieren kleinste Feuchtigkeitsmengen in der Luft und verschmelzen durch Kollisionen mit anderen zu größeren Tropfen.« Doch dieser Prozess läuft in der Realität deutlich schneller ab, als es die Wettermodelle vorhersagen. »Vermutlich ist es eben die Turbulenz, welche die Tropfen schneller anschwellen lässt«, mutmaßt der Physiker. Numerische Simulationen scheinen seine These zu bestätigen. Belastbare quantitative Aussagen liefern sie aber noch nicht. Deshalb baut der Göttinger Forscher jetzt mit Kollegen auf dem Schneefernerhaus unterhalb des Zugspitzgipfels ein Experiment auf, um in den Wolken einzelne Tröpfchen beim Entstehen zu beobachten (siehe Interview ab S. 54).

Um diesen Prozess zusätzlich unter kontrollierten Bedingungen zu verfolgen, experimentiert Bodenschatz zugleich an seinem Institut. Das wurde 1924/25 von dem deutschen Strömungspionier Ludwig Prandtl (1875–1953) gegründet und ist die Vorgängerorganisation des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Neben zahlreichen Laboren beherbergt die neue Experimentierhalle am Göttinger Faßberg heute ein feuerrotes Mammutgebilde: einen Turbulenzwindkanal, 18 Meter lang und 6 Meter hoch, hausintern bisweilen »roter Elefant« genannt. Die o-förmige Röhre hat einen Innendurchmesser von 1,8 Metern. In die beiden sieben Meter langen geraden Zwischenstücke sind seit Neuestem geräumige Messkammern eingebaut.

In dem Rohr strömen komprimierte Gase mit einem Druck von bis zu 15 Bar. Deswegen besitzt der Kanal keine Fenster, und alle Elektronik und Messvorrichtungen befinden sich innerhalb der Röhre. Die Forscher haben gezeigt,

dass nach kleinen Modifikationen sogar die teuren Hochgeschwindigkeitskameras unter diesem Druck perfekt funktionieren. Durch eine Glasscheibe von der Strömung getrennt, bewegt ein Linearmotor am Innenboden der Röhre einen 300 Kilogramm schweren Messschlitten. Obwohl er Geschwindigkeiten von bis zu fünf Metern pro Sekunde erreicht, stört er die Strömung kaum.

Auf dem Schlitten sind vier Hochgeschwindigkeitskameras montiert, die 40 000 Bilder pro Sekunde aufzeichnen können. Sie vermessen die dreidimensionale Verteilung so genannter Tracer oder Inertialteilchen – das sind in der Regel mikroskopisch kleine Öltröpfchen oder Kunststoffkügelchen –, die die Forscher vorher dem Gasstrom zugeführt haben und die von der Strömung mitgerissen werden. Um die Partikel sichtbar zu machen, läuft zeitgleich mit dem Kameraschlitten auf der Oberseite des Kanals ein zweiter Schlitten. Auf ihm befindet sich ein 120-Watt-Laser für grünes Licht, der die Partikel beleuchtet.

Das alles engt den Gasstrom ein. Doch bleibt noch ein lichter Querschnitt von anderthalb mal einem Meter für die Experimente übrig. Gerade genug für Bodenschatz: »Wenn ich das Ding noch einmal bauen dürfte, wäre es allerdings doppelt so groß. Dann wäre mein Leben als Physiker wesentlich einfacher.«

Derzeit bauen die Techniker ein Gitter mit mehreren Dutzend Öffnungen ein, die sich einzeln verschließen lassen. Mit dieser Vorrichtung können die Experimentatoren verschiedenartige Verwirbelungen einstellen und erreichen so turbulente »Reynolds-Zahlen« von fünf Millionen.

Das sind Werte, wie sie auch in der Natur auftreten – bei atmosphärischen Turbulenzen ebenso wie bei vulkanischen Eruptionen, den gewaltigsten Wirbeln auf der Erde (siehe Kasten S. 56). In der gleichen Halle befindet sich zudem ein

»Jetzt gibt es erstmals eine Chance, das Turbulenzproblem zu lösen«

Eberhard Bodenschatz vom Göttinger Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation über das turbulente Leben eines Strömungsforschers, die Schönheit von Wolken und was das mit dem Leben und dem Bau von Sandburgen zu tun hat. Kurz vor dem Interviewtermin kam er aus den Alpen zurück.

Spektrum der Wissenschaft: Ich habe gehört, Sie waren auf der Zugspitze. Was haben Sie dort gemacht?

PROF. EBERHARD BODENSCHATZ: Ja, ich war auf der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, das ist nicht weit vom Gipfel der Zugspitze. Da wollen wir die Feinstruktur von Wolken beobachten. Aus Osten, in Richtung Kufstein, steigen dort im Sommer regelmäßig sehr schöne thermische Wolken auf. Wir versuchen, mikroskopisch kleine Wassertropfchen mit Hochgeschwindigkeitskameras in 3-D zu verfolgen.

Wofür soll das gut sein?

BODENSCHATZ: Klimaforscher können das Entstehen und den Einfluss von Wolken derzeit noch nicht richtig modellieren. Ohne diese Fähigkeiten lässt sich aber die Entwicklung des Klimas nur sehr schwer vorhersagen. Denn Wolken haben einen zwiespältigen Einfluss – sie können die Erde sowohl aufheizen als auch abkühlen.

Was genau beobachten Sie da?

BODENSCHATZ: Wir nennen das die Mikrophysik der Wolke. Die Tröpfchen sind vergleichsweise schwer und können wegen ihrer Masse der originären turbulenten Luftströmung nicht exakt folgen. Es trägt sie aus der Kurve wie die Sitze eines Kettenkarussells. Dort, wo Wirbel aneinandergrenzen und es etwas ruhiger zugeht, können sich die Tröpfchen aber sammeln und durch Zusammenstöße nach und nach weiterwachsen, bis die Schwerkraft sie nach unten zieht und sie zu Boden fallen.

Um diese dynamischen Vorgänge detailliert zu verfolgen, gehen wir so vor: Wir beleuchten ein Kubikzentimeter großes Volumen der Wolke mit einem Laser. Dann lassen wir vier Hochgeschwindigkeitskameras auf einem Schlitten ein Stück mit dem Wind fahren. Die Kameras schaffen 15 000 Bilder pro Sekunde! So verfolgen wir die Dynamik der Wolkentröpfchen hoch aufgelöst in allen drei Raumrichtungen. Das liefert uns ganz neuartige Details der Wolkendynamik.

Ihr Institut beschäftigt sich auch mit biologischen Studien, beispielsweise über Herzprobleme oder aus den Neurowissenschaften. Was haben die mit Wolken zu tun?

BODENSCHATZ: Das glaubt man zunächst nicht, dass das zusammenhängt, aber methodisch sind die Themen eng miteinander verwandt. Beides – die Turbulenz in den Wolken sowie das Kammerflimmern eines Herzens – sind ungeordnete, chaotische Zustände. Sie sind dynamisch und selbst organisiert. Die Prozesse unterliegen einer nichtlinearen Mathematik. Ziel dieser Arbeiten ist es etwa, einen Defibrillator zu entwickeln, der schonender arbeitet als die aktuellen Geräte. Zwei Kollegen am Institut, Stefan Luther und Uli Parlitz, und ich haben gerade den Go-Bio-Wettbewerb gewonnen, um die Methode in die Klinik zu bringen.

Schon einzelne Zellen gelten als hochkompliziert, biologische Systeme noch viel mehr. Wie lassen sich die zu Grunde liegenden Naturgesetze überhaupt ermitteln?

BODENSCHATZ: Viele Lebensvorgänge sind extrem nicht-linear und dynamisch. Sie lassen sich nur mit neuen mathematischen Methoden untersuchen. Aber es geht uns nicht nur um einzelne Zellen. Wir wollen die Vorgänge systemweit verstehen und suchen nach übergreifenden Gesetzmäßigkeiten, etwa in den Wanderungseigenschaften von Zellen, die bei der Krebsausbreitung entscheidend ist.

Gibt es auch technische Anwendungen?

BODENSCHATZ: Selbstverständlich. Turbulenz und Strömungen spielen in vielen Bereichen eine entscheidende Rolle. Ein Beispiel: Flugzeughersteller wollen die Luftströmungen in einer Passagierkabine optimieren. Das ist ziemlich vertrackt, weil jede Person als »menschliche Heizung« schon bis zu 300 Watt Wärme abstrahlt. Die unterschiedlich heißen Köpfe der Menschen verändern aber die Luftzirkulation in der Kabine. So kann es passieren, dass einer im Luftzug sitzt, während der andere zu ersticken glaubt. Dies wird in Göttingen von meinen Kollegen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt experimentell untersucht.



RONALD SCHMIDT

Eberhard Bodenschatz ist Geschäftsführender Direktor des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. Bevor ihn die Max-Planck-Gesellschaft Anfang 2003 auf diese Position berief, forschte er 14 Jahre in den Vereinigten Staaten – zuerst in Santa Barbara, dann an der Cornell University. Vor ihm steht ein Modell des Göttinger Strömungskanal.

Wo wir schon beim Flugverkehr sind: Vulkanwolken haben über Europa ja tagelang den Luftverkehr lahmgelegt. Was kann die Turbulenzforschung dazu beitragen?

BODENSCHATZ: Sie sprechen die berühmte Aschewolke beim Ausbruch des Eyjafjallajökull in Island 2010 an. Ja, turbulente Ausbreitungsprozesse beschäftigen uns natürlich. Da geht es auch um die Abluft bei Chemieunfällen oder den radioaktiven Fallout nach der Atomkatastrophe in Fukushima.

Das Überraschende daran ist, wie ungleichmäßig sich die Verunreinigungen durchmischen. Im Gegensatz zu einer homogenen Emulsion von Fett in Wasser in der Milch klumpen die Teilchen inhomogen. Für die Ausbreitung etwa von Asche oder Chemieabgasen ist dies von größter Bedeutung, da man nicht am Mittel der Ausbreitung interessiert ist, sondern an den Fluktuationen.

Gilt das auch für Vulkane?

BODENSCHATZ: Natürlich. Bei dem Vulkan auf Island war für den Flugverkehr die mittlere Belastung ja gar nicht so gefährlich. Aber große Fluktuationen ließen sich eben nicht ausschließen. Als Flugreisender interessiert mich vor allem die Wahrscheinlichkeit, ob mein Flugzeug durch eine hohe Staubfluktuation fliegt und dabei abstürzen kann. Genau diese Effekte hofft man mit Turbulenzmessungen und Berechnungen zu verstehen.

Meiner Ansicht nach war es konsequent, dass die Bundesregierung damals beim Vulkanausbruch des Eyjafjallajökull den kompletten Luftraum gesperrt hat. Schließlich treten bei solch turbulenten Vorgängen immer wieder riesige Schwankungen der Staubdichte auf.

Ich habe gelesen, dass sich Wissenschaftler am Institut auch mit dem Bau von Sandburgen beschäftigen ...

BODENSCHATZ: Da geht es um granulare Medien, die sind ebenfalls ein hochinteressantes Forschungsfeld. Diese Arbeit meines Kollegen Stephan Herminghaus wirkt vielleicht wie eine Spielerei, ist aber durchaus wichtig für die Vorhersage von Erdbeben, zum Beispiel im alpinen

Raum oder bei Dünenwanderungen. Auch bei der Entstehung von Planeten spielt das übrigens eine Rolle.

Noch immer gibt es offenbar grundsätzliche Probleme im Verständnis der Theorie mit den Navier-Stokes-Gleichungen. Wird man das bald in den Griff bekommen?

BODENSCHATZ: Ich bin da zuversichtlich. Das Ziel ist es, aus den Navier-Stokes-Gleichungen eine Art effektive Feldgleichung zu entwickeln. Das sollte ich vielleicht genauer erläutern. Mit effektiv meine ich, dass wir aus den mikroskopischen Grundgleichungen eine mathematische Näherung oder statistische Mittelung herleiten und mit diesen Derivatgleichungen arbeiten. Wenn das gelänge und die Ersatzgleichungen immer noch die Statistik der Turbulenz beschreiben, dann hätte man das Problem dramatisch vereinfacht. Daran arbeiten die Theoretiker.

Wie beeinflussen solche Näherungen die Computersimulation von Strömungen?

BODENSCHATZ: Unterschiedlich. Bei technischen Strömungen kann man große Skalen eigentlich schon recht gut simulieren. Für kleine räumliche Dimensionen muss man sich aber noch mit einfachen Modellen begnügen. Die gesamten Navier-Stokes-Gleichungen zu simulieren, wäre hier viel zu aufwändig, weil man über mehrere Größenordnungen in Raum und Zeit rechnen müsste.

Zum Beispiel haben wir bis jetzt noch nicht die Grundlagen, um die Ablösung von Wirbeln an einem Flugzeug exakt zu berechnen. Bis ein neuer Jet fliegt, braucht es heute immer noch fast genauso viele Tests im Windkanal wie vor zehn Jahren. Wir wissen nicht, welche effektiven Gleichungen wir in den Computer eingeben müssen, um die Realität zuverlässig abzubilden. Der Fortschritt ist also mühsam. Aber mit den neuen Möglichkeiten bei Experimenten und Simulationen glaube ich, dass wir jetzt erstmals eine echte Chance haben, das letzte große Problem der klassischen Mechanik zu lösen. ~

Die Fragen stellte **Gerhard Samulat**.

fünf Meter langer und knapp drei Meter hoher Druckzylinder; wegen seiner Ähnlichkeit mit dem Einstiegsturm eines Tauchboots auch »U-Boot« genannt. Der Zylinder dient der Erforschung von Mischprozessen sowie turbulenten thermischen Konvektionsströmungen. »Darin können wir sogar Vorgänge untersuchen, wie sie für die Konvektion in der Sonne wichtig sind«, erläutert Bodenschatz.

Wie schnell breiten sich Schmutzteilchen aus?

Je nach Bedarf werden der Windkanal sowie das U-Boot wahlweise mit Luft oder mit Schwefelhexafluorid (SF_6) geflutet. Das vergleichsweise schwere Gas, das sonst elektrische Schaltanlagen schützt, wird für manche Versuche auf bis zu 20 Bar verdichtet.

»Wir komprimieren es, bis es ein Zehntel der Wasserdichte erreicht«, erläutert Bodenschatz. Weil das SF_6 klimaschädlich ist, achten die Forscher penibel darauf, dass nichts davon in die Atmosphäre entweicht. Der erhöhte Gasdruck gestattet es den Experimentatoren, im Windkanal mit verkleinerten Modellen zu arbeiten und dennoch aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Für die Versuche stehen ihnen verschiedene Laser- und andere Messsysteme zur Verfügung.

Was die Wissenschaftler besonders fasziniert, klingt wie eine scheinbar banale Frage: Wie entfernen sich zwei Teilchen voneinander, die von der Strömung mitgerissen werden? Dazu gibt es eine alte Vorhersage des Meteorologen Lewis Fry Richardson vom Beginn des letzten Jahrhunderts. Die besagt, dass das Abstandsquadrat benachbarter Teilchen im Bereich makroskopischer Wirbel mit der dritten Potenz der Zeit (t^3) anwächst.

Diese Annahme wird beispielsweise in Modellen zur Vorhersage der Ausbreitung von Verunreinigungen in der Atmosphäre oder in Ozeanen benutzt. Nach Richardson würden diese sich sehr schnell durchmischen. In Laborexperimenten am Max-Planck-Institut konnten Bodenschatz und Kollegen aber bislang nur eine Proportionalität von t zum Quadrat (t^2) nachweisen. Verschiedene Ausbreitungsgeschwindigkeiten machen natürlich einen drastischen Unterschied, etwa bei der Frage, ob demnächst eine Stadt evakuiert werden sollte oder nicht.

Die Skalierung mit t^3 lässt sich aus der Theorie der Richardson-Energiekaskade veranschaulichen. Zwei Teilchen mit einem Anfangsabstand driften eine bestimmte Zeit mit konstanter Geschwindigkeit auseinander, wobei die Zeitdauer durch den Anfangsabstand und der Energiedichte des Gases gegeben ist. Anders gesagt: Die Teilchen bewegen sich so auseinander, als ob sie eine konstante Geschwindigkeitsdifferenz in Richtung ihrer Verbindungslinie hätten.

Noch bleibt offen, ob sich in der atmosphärischen Turbulenz die Vorhersage nach Richardson korrekt anwenden lässt. Denn in der Atmosphäre ist die Turbulenz noch sehr viel stärker als im Labor. Genau dieses Ausmaß an Verwirbelung können jetzt die Göttinger in ihrem Kanal erzeugen und erstmalig auch die Vorhersage testen. Der Unterschied zwischen beiden Skalierungen ist von fundamentaler Bedeutung. Falls

nämlich Richardson Recht hat, ist die Bewegung zweier Teilchen in der Turbulenz unabhängig vom Anfangsabstand der Teilchen. In so einem Fall lässt sich die Ausgangsposition der Teilchen nicht mehr zurückverfolgen – die Strömung verliert gewissermaßen ihr Gedächtnis. Dies wäre ein Beispiel eines deterministischen Systems, das sich völlig stochastisch (also noch dynamischer als chaotisch) verhält. Solche Fragen können jetzt in dem neuen Windkanal untersucht werden.

Für ihre Wolkenexperimente geben die Forscher so genannte Inertialteilchen in den Gasstrom. Die sind schwerer als die Gasmoleküle. Turbulenz schleudert die Teilchen daher wie ein zu schnelles Auto aus der Kurve. Die Partikel sammeln sich schließlich in Zonen, in denen die Wirbel zeitweise weniger stark wüten, den Stagnationspunkten.

In fließenden Gewässern konzentrieren sich an solchen Punkten häufig Blätter oder Müll. Dort haben die Teilchen länger Gelegenheit, um zusammenzustoßen. »Das macht zugleich die Schönheit einer Wolke aus«, sagt Bodenschatz. »Ohne das Wechselspiel von Turbulenz und Stagnationszonen wäre der Himmel außerordentlich langweilig.«

Wie Wolken entstehen, glauben die Forscher mittlerweile zu verstehen: Aerosole bilden so genannte Kondensationskeime, an denen sich Feuchtigkeit festsetzt. Wenn sie nicht gleich wieder verdunstet, kollidieren die nassen Aerosole

Strömungen mit Reynolds-Zahl

Der wichtigste Parameter der Fluidodynamik ist die nach dem britischen Forscher Osborne Reynolds (1842–1912) benannte dimensionslose Reynolds-Zahl. Für jedes bewegliche Medium lässt sie sich als das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften ermitteln. Nach dem so genannten Reynoldschen Ähnlichkeitsgesetz ist es möglich, von Beobachtungen an verkleinerten Modellen etwa im Windkanal auf das Verhalten des Originals zu schließen.

Das gelingt am besten, wenn in beiden Fällen die Reynolds-Zahl den gleichen Wert hat. Um das zu erreichen, erhöht man im Windkanal oft durch Kühlung oder Druck die Dichte der Luft oder nutzt schwerere Gase wie beispielsweise Schwefelhexafluorid (SF_6). Es gibt Windkanäle, die mit Drücken bis 120 Bar oder Temperaturen bis –200 Grad Celsius arbeiten.

Überschreitet die Reynolds-Zahl den kritischen Wert von etwa 2000, können in einer bis dahin laminaren Strömung spontan Verwirbelungen entstehen. Dieser Wert ist jedoch nicht scharf bestimmt: Ähnlich wie beim radioaktiven Zerfall handelt es sich um einen statistischen Vorgang. So ist es in Experimenten bereits gelungen, laminare Strömungen mit Reynolds-Zahlen um 50 000 zu erzeugen. Diese Erkenntnis ist von enormer praktischer Bedeutung für den Transport von Flüssigkeiten oder Gasen durch Pipelines – etwa von Wasser, Erdöl oder Erdgas. Hier sind Turbulenzen unerwünscht, da sie oft große Mengen Energie verbrauchen.



Unweit der Zugspitze versuchen Forscher, mikroskopisch kleine Wassertröpfchen in nahen Wolken zu beobachten. Auf einem Schlitten montieren sie dazu Hochgeschwindigkeitskameras, die sie mit der vorwiegend östlichen Strömung mitbewegen. Die Physiker wollen unter anderem verstehen, wie Regen entsteht.

miteinander und bilden winzige Tröpfchen. Manchmal entscheiden nur wenige Zusammenstöße darüber, ob es regnet oder nicht. Irgendwann beginnt die Schwerkraft, die Tröpfchen nach unten zu ziehen.

Im freien Fall vereinigen sie sich dann mit weiteren schwebenden Wasserteilchen, die ihnen auf dem Weg nach unten in die Quere kommen. Rund eine Million der mikroskopisch kleinen Teilchen bilden schließlich einen makroskopischen Regentropfen von einem Millimeter Durchmesser. Bodenschatz und sein Team wollen sich diese Prozesse im Detail anschauen, denn noch ist vieles graue Theorie.

Insbesondere interessieren sich die Forscher für die so genannten Lagrange-Eigenschaften der Strömung. So nennen sie das Vermögen eines Mediums, etwas zu transportieren oder zu vermischen. Diese Eigenschaften wurden in der Vergangenheit vernachlässigt – unter anderem deshalb, weil es keine geeigneten Kameras oder Methoden gab, um die Bahnen der Verfolgungs- beziehungsweise Inertialteilchen detailliert in 3-D zu verfolgen. »Die meisten Experimentatoren an den Windkanälen sind eher an Luft- oder Raumfahrt interessiert«, weiß Bodenschatz. »Endlich macht man sich etwas mehr Gedanken über die Transporteigenschaften in den Strömungen.«

In Zusammenarbeit mit der Universität Braunschweig untersuchen die Max-Planck-Forscher ferner, wie Planeten entstehen. Da gibt es ein Problem, an dem sich Astrophysiker schon seit Jahren die Zähne ausbeißen, die »Ein-Meter-Barriere«. Schon lange ist nämlich bekannt, dass alle Gesteinsbrocken mit mehr als einem Meter Durchmesser, die in einer protoplanetaren Scheibe herumwirbeln, bei Kollisionen eigentlich zerbersten müssten. Denn weder die Eigenschwerkraft der Brocken noch ihre innere Festigkeit reichen aus, um mehrere Zusammenstöße zu überstehen.

Daher fragen sich die Astrophysiker, wie durch Zusammenbacken und Verschmelzen von kleinen Teilchen über diese Schwelle hinweg größere Objekte und schließlich ausgewachsene Planeten entstehen. Ideen gibt es schon: So vermuten sie, dass sich in den protoplanetaren Scheiben so etwas wie Verdichtungsgebiete ausbilden, in denen sich Staub

in hoher Konzentration ansammelt – ähnlich wie bei Regentropfen in der Wolke. Aber noch ist unklar, ob das schon reicht.

Ruderfußkrebse begegnen und paaren sich häufiger in Stagnationszonen turbulenter Strömungen

Ein ähnlicher Prozess scheint die Fortpflanzung vieler mikroskopischer Meeresbewohner zu begünstigen, die ganz am unteren Ende der Nahrungskette stehen und daher für die Entwicklung der marinen Fauna besonders wichtig sind. Zusammen mit Meeresforschern untersuchten die Göttinger beispielsweise, wie sich Männchen und Weibchen von Ruderfußkrebse der Art *Copepoda* zur Begattung zusammenfinden. In laminaren Strömungen würden sich die millimetergroßen Tiere – sie bilden einen großen Teil des Planktons – kaum häufig genug treffen.

In den Stagnationspunkten angrenzender Turbulenzen können sich die Meeresbewohner aber in gewissen Bereichen konzentrieren, was die Wahrscheinlichkeit der Paarung erhöht. Ähnliches scheint für die Evolution und Selektion generell zu gelten, meinen die Forscher. Möglicherweise finden schwächere Arten abseits der Populationsmehrheiten in Inertialbereichen turbulenter Strömungen ökologische Nischen – und können darin überleben.

Für all diese Vorgänge braucht es Fluktuationen. Ohne Turbulenz, da sind sich die Experten sicher, wäre die Entstehung von Leben kaum vorstellbar. Daher war es ein natürlicher Schritt, dass sich die Strömungsforscher mittlerweile auch mit biologischen und medizinischen Phänomenen beschäftigen. Denn: »Viele Lebensvorgänge sind extrem nicht-linear und lassen sich mit unserer Herangehensweise und unseren mathematischen Methoden gut untersuchen«, erklärt Bodenschatz.

Bei biologischen Prozessen, die von Enzymen katalytisch mitgesteuert werden, können schon wenige Moleküle über den Ausgang entscheiden. So folgen bei der Embryonalentwicklung einige Zellen plötzlich einem chemischen Stimulus, kriechen los, organisieren sich neu, um danach etwa ein Herz zu bilden oder ein Gehirn. Ähnliches kann auch bei der

Wundheilung eine Rolle spielen oder sogar bei Krebs, wenn Tumorzellen spontan ihren ursprünglichen Gewebeverband verlassen und Metastasen bilden. Eine Arbeitsgruppe am Institut untersucht daher, weswegen Zellen so etwas überhaupt tun und welche nichtlinearen Prozesse dabei ablaufen.

Allerdings möchten die Wissenschaftler gar nicht unbedingt jede einzelne Zelle oder jede einzelne chemische Reaktion mikroskopisch exakt verstehen. Es geht ihnen um übergreifende Gleichungen, mit denen sie das Verhalten des Gesamtsystems beschreiben und konkrete Rückschlüsse ziehen können. Bodenschatz: »Es ist wie beim Auto – da muss ich auch nicht jedes technische Detail kennen, um damit von A nach B zu fahren.«

Auch vor Organen machen die Erforscher nichtlinearer dynamischer und selbstorganisierender Systeme nicht Halt. Zur Kontraktion des Herzmuskels etwa läuft normalerweise ein elektrisches Anregungspotenzial von Muskelzelle zu Muskelzelle, wie eine La-Ola-Welle in einem Sportstadion. Beim Herzkammerflimmern gerät diese Anregung jedoch durcheinander. Die Muskelfibrillen kontrahieren dann bis zu 600-mal pro Minute, das Herz pumpt aber nicht mehr. In einem solchen Fall müssen Ärzte mit einem Defibrillator sozu-

sagen einen Neustart der entgleisten Erregungssequenz erreichen.

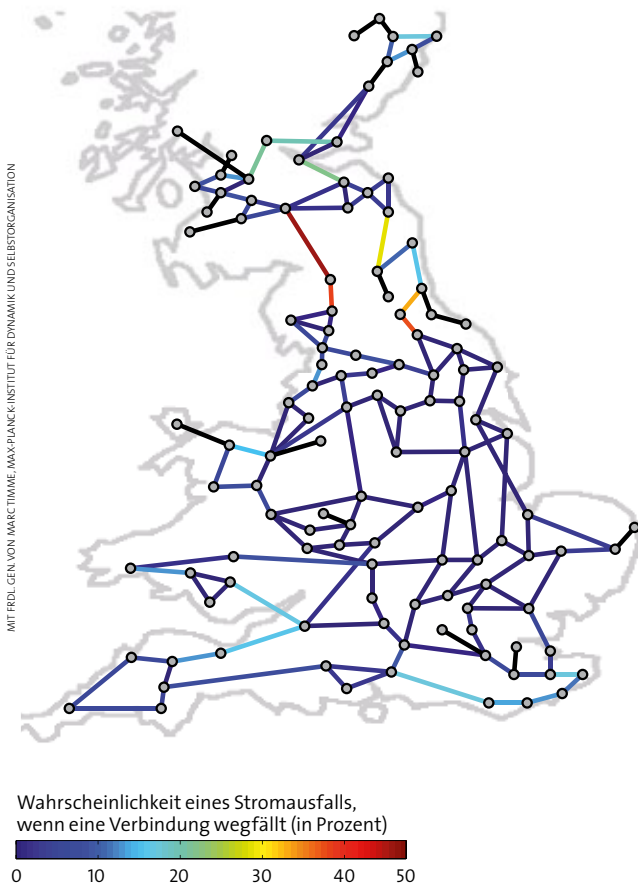
Die heute üblichen Geräte erreichen Stromstärken von bis zu 30 Ampere und elektrische Spannungsspitzen von bis zu 1000 Volt. Die Wiederbelebung erleben die Patienten daher häufig als äußerst schmerzhaft, auch wird dabei das umgebende Gewebe geschädigt. Bodenschatz' Kollege, der Physiker Stefan Luther, arbeitet deshalb daran, eine schonendere Methode für die Defibrillation zu entwickeln. Seine Apparatur setzt gezielt fünf Pulse, die jeweils nur ein Zehntel der Energie von Standardgeräten benötigen – ein ungewöhnlicher Ausflug von der Grundlagenforschung in die medizinische Praxis.

Berechnung neuronaler Schaltpläne

Prinzipien der Dynamik und Selbstorganisation finden sich auch in der Neurowissenschaft. Forscher fragen sich etwa, wie Erinnerungen entstehen oder wie das Gehirn Muster verarbeitet. Ein Team um den Physiker Theo Geisel vom Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation, der Universität Göttingen sowie dem Bernstein Center for Computational Neuroscience Göttingen hat kürzlich eine Methode entwickelt, mit der es die Wahrscheinlichkeit berechnen kann, dass ein bestimmtes Neuron ein weiteres aktiviert. Die Forscher verwenden dazu Messungen der Hirnaktivität, die bei Patienten an der Universität de Barcelona aufgezeichnet wurden. Das Verbindungsnetz der Neurone verspricht wertvolle Informationen über die Funktionsweise des Gehirns. »Unsere Methode ermöglicht eine Rekonstruktion von neuronalen Netzwerken«, erklärt der Physiker Demian Battaglia, der an der Kooperation beteiligt ist. Die Wissenschaftler hoffen nun, einen Algorithmus zu entwickeln, der es erlaubt, neuronale Schaltpläne zu berechnen.

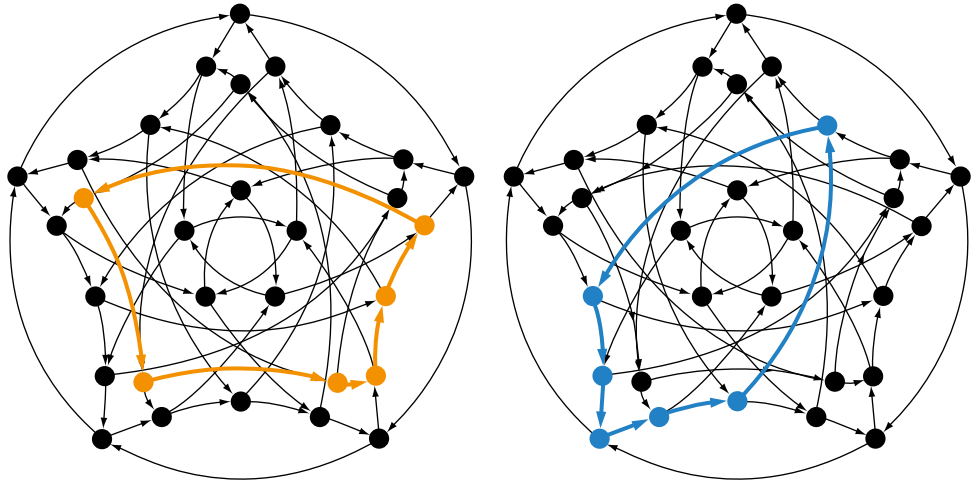
Von der Hirnforschung ist es gedanklich nur ein kleiner Schritt zu komplexen technischen Netzen. So befasst sich der Physiker Marc Timme, Leiter der Max-Planck-Forschungsgruppe Netzwerk-Dynamik desselben Instituts, speziell mit der Frage, wie Stromnetze auf das Einspeisen vieler dezentraler Stromquellen reagieren. Dabei spürte er einen Effekt auf, den die Stromwelt bisher nicht kannte: das so genannte Braess-Paradoxon. Das Phänomen wurde 1968 vom deutschen Mathematiker Dietrich Braess eigentlich im Zusammenhang mit dem Straßenbau formuliert. Es besagt, dass zusätzliche Wege in einem Verbindungsnetz den Verkehrsfluss nicht unbedingt verbessern, sondern manchmal sogar verschlechtern können.

Für das Stromnetz war das Paradoxon bislang kaum von Belang. In einem weit verzweigten, dezentralen Netzwerk mit Hunderten von Verknüpfungen erlangt es aber hohe Relevanz. Denn in Simulationen erwiesen sich etwa fünf Prozent aller geplanten neuen Verbindungen als nachteilig für die Stromversorgung. Der Grund: Plötzlich passten die Phasen unterschiedlicher Teile des Wechselspannungsnetzes nicht mehr zusammen. »In der Physik kennt man dieses Phänomen als Frustration«, erklärt Marc Timme. Der Effekt



Beispiel Großbritannien: Was passiert, wenn einzelne Stromleitungen ausfallen? Streikt die blaue Verbindung, ist ein Zusammenbruch des Netzes eher unwahrscheinlich. Für dunkelrote Trassen liegt die Wahrscheinlichkeit bei 50 Prozent.

In einem System gekoppelt schwingender Elemente bilden die Sattelpunkte eine Art Netzwerk. Die Grafiken gehören zu einem System aus jeweils fünf Elementen. Die Sattelpunkte sind darin als Punkte dargestellt. Jeder Sattelpunkt ist mit vier anderen verbunden – jeweils zwei Verbindungen führen zu ihm hin, zwei von ihm weg. Eine Rechenoperation beginnt mit der definierten Störung des Systems. Je nach Art des Eingangssignals entstehen unterschiedliche periodische Muster. Zwei mögliche sind hier in Orange respektive Blau dargestellt; sie entsprechen jeweils dem Ergebnis einer Rechnung.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: MPI FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION

macht das Netz als Ganzes ineffizient und instabil. Vermied der Physiker bei der Planung solche abträglichen neuen Verknüpfungen, wurde die erweiterte Infrastruktur mit ihren vielen dezentralen Einspeisern sogar stabiler und leistungsfähiger als im vorherigen Zustand. Wie die Berechnungen zeigten, lassen sich derartige Netzerweiterungen genauso gut synchronisieren, und der elektrische Strom kann sich einfacher Alternativrouten suchen.

In einem anderen Projekt zeigte Marc Timme, dass man mit Netzwerken in gewisser Weise sogar rechnen kann. Sein »Complex Network Computer« besteht aus einem gekoppelten System schwingender Elemente. Dies können Pendel, Laser oder elektrische Schaltkreise sein. Die Dynamik eines solchen Systems lässt sich nutzen, um alle logischen Operationen auszuführen, wie Addition, Subtraktion und Multiplikation. Im Schwingsystem sind instabile Gleichgewichtspunkte zentral. Das sind Zustände, wie sie etwa ein Pendel am Überschlagspunkt erreicht, mathematisch beschrieben durch einen »Sattelpunkt« in einer Potenziallandschaft, in der sich das System bewegt. Von so einem Punkt geht es in mehrere Richtungen nur abwärts. Stabile Gleichgewichtspunkte liegen dagegen am tiefsten Punkt von Tälern.

Im Fall gekoppelter Pendel, wenn also Pendel an anderen hängen oder sonst wie miteinander verkettet sind, entspricht einem solchen Sattelpunkt ein spezielles Zusammenwirken von Schwingungen der Elemente. Als Eingangssignal dient ein kleiner Schubs, den jedes Pendel erhält. Danach bewegt sich der Systemzustand durch das Netzwerk der Sattelpunkte. Diese sind das Ergebnis eines solchen analogen Netzwerkcomputers. Als besonders schnell schaltende Elemente bevorzugt Marc Timme Laser. Mit ihren hohen optischen Frequenzen von über 10^{14} Hertz ließe sich mit Hochgeschwindigkeit rechnen. Systeme mit nur 100 Elementen könnten bereits $5 \cdot 10^{20}$ (500 Trillionen) Operationen pro Sekunde durchführen, kalkulieren die Forscher. Der Complex Network Computer könnte daher Aufgaben wie das Sortieren von Zahlen deutlich schneller lösen als konventionelle Rechner. In einem ersten Schritt programmierten die Forscher

nach dem neuen Verfahren einen Roboter, der sich selbst den Weg durch einen Hindernisparcours sucht.

Konkrete Anwendungen im Alltag sind freilich noch Zukunftsmusik. Doch wird sichtbar, dass die Erforschung von nichtlinearen Prozessen nicht nur dem Verständnis von fundamentalen Abläufen dient, sondern eine große Zahl technologischer Anwendungen erschließt. Bis zur Verwirklichung dieser Ideen werden aber wohl noch viele Wirbel ihre Kreise drehen. ~

DER AUTOR



Gerhard Samulat hat in Hamburg Physik studiert. Heute ist er Wissenschaftsjournalist und lebt in Wiesbaden.

QUELLEN

Avila, K., Hof, B.: Von Wirbelballen zur Turbulenz. In: Spektrum der Wissenschaft 3/2012, S. 16–18

Bodenschatz, E. et al.: Can we Understand Clouds without Turbulence? In: Science 327, S. 970–971, 2010

WEBLINKS

www.spektrum.de/alias/inhaltsverzeichnis/dossier-6-2009/1013071

Zehn Jahre Klima- und Höhenforschung am Schneefernerhaus

www.ictr.eu/

ICTR International Collaboration for Turbulence Research

www.euhit.org/

European High-Performance Infrastructures in Turbulence EuHIT

www.spektrum.de/alias/pdf/14-23-sdw-03-2012-pdf/1142204

Von Wirbelballen zur Turbulenz

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171181



ATMOSPÄRENPHYSIK

Gammablitz aus den Wolken

Seit 20 Jahren wissen Physiker, dass Gewitter energiereiche Gammastrahlung emittieren. Doch wie und warum, dieses Rätsel lösen sie erst jetzt Stück für Stück.

Joseph R. Dwyer und David M. Smith

Kurz nachdem die Raumfähre Atlantis 1991 ein neues Weltraumteleskop in eine Erdumlaufbahn gebracht hatte, machte Gerald Fishman vom Marshall Space Flight Center der NASA eine merkwürdige Entdeckung. Das Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) sollte eigentlich Gammablitz von entfernten astrophysikalischen Objekten wie Neutronensternen, Schwarzen Löchern und Supernova-Überresten aufzeichnen. Das tat es zwar – darüber hinaus registrierte es aber auch Gammasignale, die nicht aus dem Weltall, sondern von der Erde stammten.

Für Astrophysiker war Gammastrahlung schon damals nichts Ungewöhnliches. Sie wussten: Elektronen und andere Teilchen im All können etwa durch Sternexplosionen auf so hohe Energien beschleunigt werden, dass sie bei der Kollision mit einem Atomkern energiereiche Strah-

lung aussenden. Wie aber sollen Teilchen in der Erdatmosphäre derart hohe Energien erreichen? Zumal sie hier ständig mit Atomen und Molekülen kollidieren, während sich ihre kosmischen Pendanten praktisch ungebremst durch ein fast perfektes Vakuum bewegen.

Seither stellen die so genannten terrestrischen Gammablitz Forscher vor immer neue Rätsel. Die ersten Daten ließen uns und andere Wissenschaftler zunächst annehmen, sie entstünden rund 65 Kilometer oberhalb der Wolken. Heute, nach vielen Messungen und theoretischen Überlegungen, wissen wir jedoch, dass sie durch elektrische Entladungen in gewöhnlichen Gewitterwolken erzeugt werden – also in viel geringerer Höhe. Allmählich stellte sich auch heraus, dass die Energie der atmosphärischen Gammastrahlung viel höhere Werte erreichte, als man für möglich gehalten hatte. Die Theoretiker hatten daher in der Zwischenzeit alle Hände voll zu tun, immer neue Beobachtungsdaten in ihre Modelle zu integrieren.

Ursprünglich vermuteten Forscher, Gammablitz könnten mit einem anderen atmosphärischen Phänomen verwandt sein, den Kobolden. 1989 hatte man begonnen, diese kurz und hell aufflackernden Leucht-

Auf einen Blitz folgt Sekunden später der Donner. Doch wer hätte damit gerechnet, dass Gewitterwolken auch Gammastrahlung aussenden? Diese recht junge Erkenntnis birgt noch viele Rätsel in sich. Einigen von ihnen sind Forscher nun auf die Spur gekommen.

erscheinungen von Flugzeugen und Spaceshuttles aus gezielt zu fotografieren. Die Bilder zeigten rötliche Gebilde in 80 Kilometer Höhe über dem Erdboden, die sich über mehrere Kilometer erstreckten und wie riesige Quallen erschienen. Da diese gewaltigen elektrischen Entladungen fast an der Grenze zum Weltraum auftreten, schien es plausibel, dass von ihnen Gammastrahlung ausgeht, die ein Satellit in einer Umlaufbahn würde messen können.

Elektrische Felder erzeugen Elektronenlawinen

Kobolde gelten als Begleiterscheinungen gewöhnlicher Blitze, die in weit darunter liegenden Wolken entstehen. Bei einem Blitz, der durch ein drastisches Ungleichgewicht elektrischer Ladungen ausgelöst wird, öffnet sich vorübergehend ein elektrisch leitender Kanal in der sonst elektrisch isolierenden Luft. Durch den Blitzstrahl werden die Ladungsträger dann in rasender Geschwindigkeit von einer Region der Atmosphäre zu einer anderen oder zur Erdoberfläche transportiert. Die an dem Vorgang beteiligten elektrischen Feldstärken erreichen Werte von mehr als 100 Millionen Volt pro Meter. Anschließend ist das elektrostatische Gleichgewicht zumindest teilweise wieder hergestellt.

Doch wie bei einem Teppich, der an einer Stelle glatt gezogen wird, nur um anderswo eine neue Falte zu werfen, führt der Ladungsausgleich innerhalb einer Wolke oft dazu, dass anderswo ein neues Feld entsteht. Ein solches sekundäres Feld kann sich zum Beispiel am Boden bilden, wo es möglicherweise einen aufwärtsgerichteten Blitz auslöst, oder knapp unterhalb der Ionosphäre, was dann vielleicht zu einem Kobold führt.

Bald unternahmen theoretische Physiker erste Versuche zu erklären, wie bei diesen Vorgängen auch Gammaphotonen in den Weltraum abgestrahlt werden könnten. Alexander V. Gurevich und seine Mitarbeiter vom Moskauer Lebedew-Institut für Physik fanden heraus, dass sekundäre elektrische Felder in der Nähe der Ionosphäre Lawinen sehr energiereicher Elektronen erzeugen könnten. Beim Zusammenstoß mit Atomen würden diese nicht nur die charakteristischen roten Leuchterscheinungen der Kobolde hervorrufen, sondern auch hochenergetische Photonen freisetzen: Röntgenstrahlung und sogar die noch energiereichere Gammastrahlung.

Der von Gurevich vorgeschlagene Mechanismus baut auf einer Vermutung auf, die der schottische Physiker und Nobelpreisträger C. T. R. Wilson bereits in den 1920er Jahren formuliert hatte. Elektronen, die von einem elektrischen Feld allmählich beschleunigt werden, bewegen sich wie betrunkenen Matrosen: Sie taumeln gewissermaßen von Molekül zu Molekül und verlieren bei jedem Zusammenstoß Energie. Bei hohen Energien und damit Geschwindigkeiten beginnt sich dieser Prozess aber umzukehren. Dann setzen die Moleküle den Elektronen immer weniger Widerstand entgegen, je schneller sich diese bewegen. Je mehr das Feld die Elektronen beschleunigt, desto niedriger wird also der Widerstand. Ein sich selbst verstärkender Prozess kommt in Gang.

Diese hochenergetischen Teilchen nennt man »Run-away«- oder Ausreißerelektronen, denn sie laufen den anderen Teilchen regelrecht davon, während sie beschleunigt werden. Sie können dabei fast Lichtgeschwindigkeit erreichen und Distanzen von mehreren Kilometern überwinden, während ein durch Luft fliegendes Elektron gewöhnlich schon nach wenigen Metern gestoppt wird. Gurevich und seine Arbeitsgruppe vermuteten, dass ein Ausreißerelektron, wenn es schließlich mit einem Gasmolekül in der Luft zusammenstößt, ein weiteres Elektron freisetzen könnte, das seinerseits ausreißt. Das Ergebnis wäre eine Art Kettenreaktion: eine Lawine hochenergetischer Elektronen, die mit dem zurückgelegten Weg exponentiell wächst und sich so weit erstreckt, wie das elektrische Feld reicht. Ein solcher Lawineneffekt würde den Berechnungen von Gurevichs Team zufolge die Intensität der bei Kollisionen mit Atomen entstehenden Röntgen- und Gammastrahlung um viele Größenordnungen steigern.

Diese Theorie wirkte sehr schlüssig, da sie zwei verschiedene atmosphärische Phänomene, Gammablitz und Kobolde, zueinander in Beziehung setzte. Von etwa 1996 an wurde sie daher immer weiter entwickelt. Dafür, dass Kobolde mit Lawinen von Ausreißerelektronen zusammenhängen, sprachen auch die vom Compton-Observatorium gemessenen Energiespektren. Den Weltraum und damit den Satelliten erreichen eher die hochenergetischen Gammablitz, weil sie größere Strecken durch die Atmosphäre zurücklegen können als niederenergetische Strahlung. Zählt man also, wie viele Gammaquanten aus jedem Energiebereich auf einen Satelliten treffen, kann man auf die Höhe schließen, in der sie erzeugt wurden. Die ersten Analysen der CGRO-Messungen schienen auf eine Strahlungsquelle in sehr großer Höhe hinzuweisen und damit tatsächlich auf einen Zusammenhang mit Kobolden.

Doch die Wirklichkeit erwies sich als komplizierter. Einer von uns (Dwyer) arbeitete 2003 an einem Blitzforschungszentrum in Florida. Dort feuerten er und seine Kollegen Raketen in den Himmel, die einen Strom führenden Draht hinter sich herzogen, um so Blitze auszulösen. Das Team maß

AUF EINEN BLICK

ENERGIEREICHE ENTLADUNGEN

1 Gewitterwolken emittieren Gammastrahlung in heftigen, einige Millisekunden währenden Ausbrüchen. Solche **terrestrischen Gammablitz** wurden erstmals von Weltraumobservatorien entdeckt.

2 Alle Erklärungen, die für diese Phänomene vorgeschlagen werden, beruhen auf starken elektrischen Feldern, die im Innern von Wolken **Elektronenlawinen** auslösen. Dabei könnten sogar große Mengen von **Antimaterie** im Spiel sein.

3 Neue **Weltraummissionen** zur Erforschung terrestrischer Gammablitz und **Forschungsflugzeuge** sollen dazu beitragen, das Rätsel zu lösen und möglicherweise auch Gefahren von Fluggpassagieren abzuwenden.

die von ihnen auf den Boden treffende Röntgenstrahlung und entdeckte bei der Datenauswertung auch einen Ausbruch sehr heller Gammastrahlung, die über das gesamte Terrain gefegt war. Dieser Gammablitz hatte seinen Ursprung offensichtlich in einer Gewitterwolke (siehe »Vom Blitz getroffen« von Joseph R. Dwyer, SdW 11/2005, S. 38).

Aus Dwyers Daten gingen die Energie der Gammastrahlung und ihre Dauer hervor – genau solche Werte erwartete man auch von terrestrischen Gammablitzen. Doch damals war man davon überzeugt, dass solche Gammablitze aus viel größeren Höhen stammten und auf dem Boden nicht mehr beobachtbar wären. Der Widerspruch war offensichtlich: Einerseits legten die Daten die Vermutung nahe, die von den Satelliten nachgewiesene Gammastrahlung könnte auch von Blitzen im Innern von Gewitterwolken ausgelöst werden. Andererseits erschien diese Idee geradezu verrückt. Denn der Blitz hätte unglaublich hell sein müssen, damit es ein ausreichend großer Anteil der Strahlung durch die Atmosphäre hindurch bis in den Weltraum schafft.

Widersprüchliche Ergebnisse: Entstehen Gammablitze auf Wolkenhöhe oder nahe dem Weltraum?

Schon 2002 hatte die NASA auch den Forschungssatelliten RHESSI (Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager) in eine Umlaufbahn gebracht. Er untersucht die Röntgen- und Gammaemissionen der Sonne, seine großen Germaniumdetektoren eignen sich aber auch hervorragend zur Messung der Gammastrahlung aus der Atmosphäre. Weil die Detektoren auf die Sonne gerichtet sind, können die irdischen Gammaquanten allerdings nur durch die »Rückseite« des Satelliten beobachtet werden.

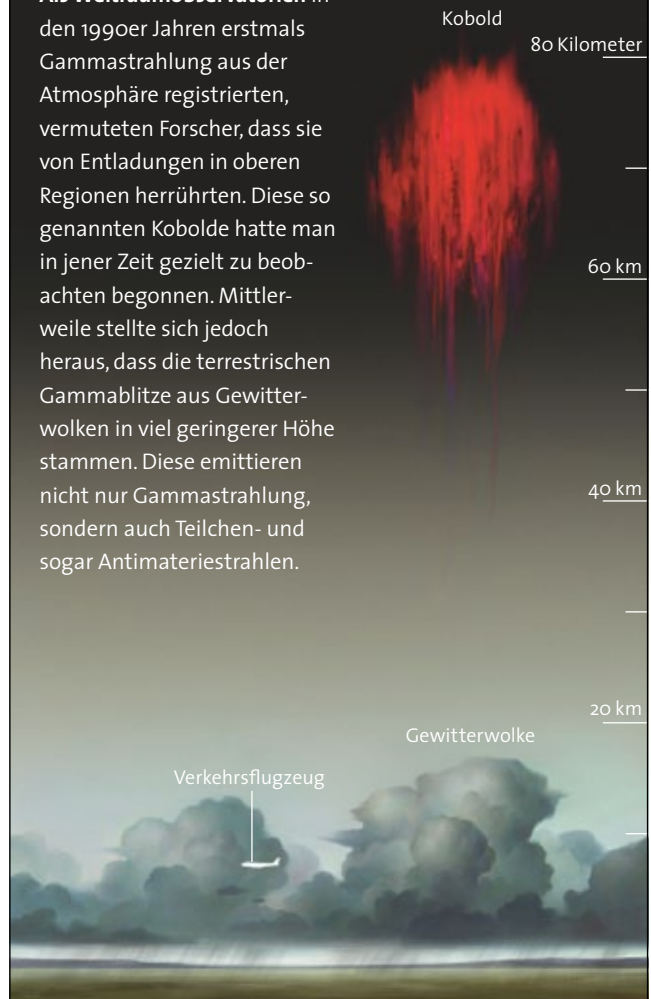
Einer von uns (Smith) war damals Mitglied des Instrumententeams von RHESSI. Er beauftragte Liliana Lopez, eine Studentin der University of California, Berkeley, die bei RHESSI eingehenden Datenströme nach Anzeichen für Gammablitze aus der Atmosphäre zu durchsuchen. Zu dieser Zeit ging man davon aus, dass terrestrische Gammablitze sehr selten seien. Überraschenderweise stieß Lopez aber auf einen wahren Datenschatz, denn RHESSI zeichnete alle paar Tage einen Gammablitz auf. Die Ausbeute des Satelliten war damit zehnmal größer als die des CGRO-Teleskops. Zudem erfasste er die Gammaquanten von Strahlungsausbrüchen weitaus präziser, als es das Compton-Observatorium je vermocht hatte.

Das gemessene Spektrum sah tatsächlich genau so aus, wie es das Modell der Runaway-Elektronen erwarten ließ. Als wir die Messdaten mit Simulationen verglichen, kamen wir jedoch zu dem Schluss, dass die Gammablitze weite Strecken durch die Luft zurückgelegt hatten: Sie mussten in Höhen zwischen 14 und 20 Kilometern entstanden sein. Das ist typisch für die oberen Ausläufer von Gewittern, liegt jedoch weit unterhalb der Region, in der sich Kobolde beobachten lassen.

Weitere Befunde erhärteten unser Ergebnis. Steven Cummer von der Duke University im US-Bundesstaat North Carolina hatte an einigen der Gewitterblitze, die sich mit den von RHESSI aufgezeichneten Ereignissen in Verbindung

Aus welcher Höhe stammen die Gammablitze?

Als Weltraumobservatorien in den 1990er Jahren erstmals Gammastrahlung aus der Atmosphäre registrierten, vermuteten Forscher, dass sie von Entladungen in oberen Regionen herrührten. Diese so genannten Kobolde hatte man in jener Zeit gezielt zu beobachten begonnen. Mittlerweile stellte sich jedoch heraus, dass die terrestrischen Gammablitze aus Gewitterwolken in viel geringerer Höhe stammen. Diese emittieren nicht nur Gammastrahlung, sondern auch Teilchen- und sogar Antimateriestrahlen.



bringen ließen, Radiomessungen vorgenommen. Seine Analyse ergab, dass diese Blitze viel zu schwach waren, um Kobolde zu erzeugen. Aufschlussreich war auch eine auf Basis der RHESSI-Daten erstellte Karte. Sie zeigte die Verteilung der Gammablitze rund um den Erdball und ähnelte sehr stark der Verteilung normaler Gewitter, die sich in den Tropen konzentrieren. Die Verteilung von Kobolden, die gelegentlich gehäuft in höheren Breiten zu beobachten sind, hat mit jener der Gammablitze hingegen nur wenig zu tun.

Doch die Compton-Spektren wiesen weiterhin auf Entstehungsorte hin, die wegen ihrer großen Höhe eher mit Kobolden als mit Gewitterstürmen vereinbar waren. Viele von uns fingen schon an zu glauben, dass es zwei Arten von Gammablitzen geben könne, solche aus großer und solche aus geringer Höhe.

2008 konnten wir die vermeintliche Verbindung zwischen Kobolden und Gammastrahlung jedoch endgültig ad acta legen. In Zusammenarbeit mit dem damaligen Stu-



denten Brian Grefenstette erkannten wir nämlich, dass terrestrische Gammablitzte weitaus heller waren als bislang gedacht. Sie blendeten die Compton-Detektoren teilweise, und so wurde nicht ihre volle Intensität registriert. Unsere Messungen hatten also stets zu niedrige Werte ergeben. Von dem Sättigungseffekt war auch RHESSI betroffen, allerdings in geringerem Ausmaß. 2010 analysierten Forscher der norwegischen Universität Bergen die Daten unter Berücksichtigung der Sättigung erneut und stellten fest, dass die Ergebnisse nun mit einer Strahlungsquelle in niedrigerer Höhe übereinstimmen.

Gammastrahlung hat viele Quellen – doch Kobolde gehören nicht dazu

In nicht einmal zwei Jahren war also klar geworden, dass die einstigen Vermutungen über die Höhe des Entstehungsorts von Gammablitzten um mehr als 50 Kilometer nach unten revidiert werden mussten. Es entbehrt auch nicht einer gewissen Ironie, dass Kobolde noch als Paradebeispiel für die Entstehung hochenergetischer Strahlung in der Erdatmosphäre galten, als wir uns vor zehn Jahren diesem Forschungsfeld zuwandten. Tatsächlich aber scheinen alle möglichen Phänomene nachweisbare hochenergetische Strahlung zu emittieren – von Gewitterwolken über verschiedene Arten von Blitzen bis hin zu im Labor erzeugten Funken –, nur eben Kobolde nicht. Auf Grund ihrer niedrigen Strahlungsenergie, so lautet der Konsens unter Forschern mittlerweile, kommen sie als Quelle für Gammablitzte nicht in Frage.

Wenn Gammablitzte also nicht durch Kobolde erzeugt werden, wodurch dann? Die Energien, die bei dem von Gurevich und seinen Mitarbeitern modellierten Lawinenmechanismus auftreten, sind höher, als sie mit Kobolden vereinbar wären. Gleichwohl reichen sie nicht aus, um die von RHESSI gemessenen Helligkeiten oder die neu interpretierten Compton-Daten zu erklären. Doch es gibt eine viel versprechende Variante des Lawinen-Mechanismus. Den Berechnungen von

Dwyer zufolge könnte dabei Billionen Mal mehr Energie freigesetzt werden als gedacht, zudem könnte ein solcher Mechanismus auch im Innern einer Gewitterwolke funktionieren. Mehr noch: Auch große Mengen an Antimaterie würden entstehen.

Diesen Überlegungen zufolge werden Ausreißerelektronen in einem starken elektrischen Feld einer Gewitterwolke auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt und senden beim Zusammenstoß mit Atomkernen der Luftmoleküle Gammastrahlung aus. Die emittierten Gammaquanten treten ihrerseits mit Atomkernen in Wechselwirkung und erzeugen dabei Paare von Teilchen: Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen. Die Positronen gewinnen nun ebenfalls Energie aus dem elektrischen Feld und reißen aus. Während sich die Elektronen im Feld nach oben bewegen, fliegen die entgegengesetzt geladenen Positronen jedoch nach unten. Im unteren Bereich des elektrischen Felds stoßen sie mit Luftatomen zusammen und setzen dabei neue Elektronen frei, die wieder nach oben ausreißen. Dieser Prozess wird als »relativistic feedback discharge« oder kurz relativistisches Feedback bezeichnet.

Die nach oben fliegenden Elektronen erzeugen also abwärtsfliegende Positronen, die wiederum aufwärtsfliegende Elektronen entstehen lassen und so weiter. Durch die fortlaufende Erzeugung neuer Lawinen würden sich die Entladungen rasch über ein weites Gebiet der Gewitterwolke verbreiten, das mehrere Kilometer ausgedehnt sein könnte. Tatsächlich stimmen die Voraussagen dieses Modells perfekt mit der Intensität, der Dauer und dem Energiespektrum der vom Compton-Observatorium und von RHESSI beobachteten Gammastrahlung überein.

Trotzdem könnte dem Phänomen auch eine andere Erklärung zu Grunde liegen. Dieses alternative Modell, das mathematisch allerdings noch nicht vollständig ausgearbeitet ist, betrachtet Gammablitzte als energiereichere Varianten der von Blitzen ausgelösten Röntgenstrahlung. Letztere wird seit einigen Jahren von Forschern des Florida Institute of Technology, der University of Florida und des New Mexico Institute of Mining and Technology untersucht. Sie vermessen die auf den Boden treffende Röntgenstrahlung natürlicher und künstlicher Blitze und zeichnen die Ereignisse zudem mit einer Hochgeschwindigkeitsröntgenkamera auf. Die Filme zeigen, dass die Ausbrüche von der jeweiligen Spitze des Blitzkanals ausgehen, entlang dessen sich der Blitz seinen Weg von der Wolke zum Boden bahnt. Die meisten Wissenschaftler vermuten, dass sie von Ausreißerelektronen erzeugt werden, die ihre Energie aus starken, den Blitzen vorausgehenden elektrischen Feldern beziehen.

Vielleicht sind Blitze, die sich durch das elektrische Feld in einer Gewitterwolke bewegen, tatsächlich besonders gut geeignet, um solche Ausreißerelektronen zu erzeugen. Ob diese Idee zutrifft, steht allerdings noch nicht fest. Falls ja, könnten die von Weltraumdetektoren aufgezeichneten Ereignisse tatsächlich mit Röntgenstrahlung zusammenhängen, die

durch einen noch unbekanntem Mechanismus zu Gammastrahlung verstärkt wurde.

Ende 2005 waren wir davon überzeugt, dass die meisten terrestrischen Gammablitzte, egal ob von Antimaterie oder irgendwie verstärkten Blitzen erzeugt, aus dem Innern von Gewitterwolken oder ihrem oberen Bereich stammen. Eine weitere Beobachtung stellte diese Hypothese allerdings erneut auf eine harte Probe: Einer der von RHESSI aufgezeichneten Gammablitzte ereignete sich mitten in der Sahara – an einem sonnigen Tag, an dem keine Gewitterwolke weit und breit zu sehen war. An dieser harten Nuss bissen wir uns monatelang die Zähne aus, gemeinsam mit unseren Studenten. Natürlich gab es an jenem Tag durchaus Gewitterwolken – aber eben nicht dort, wo der Satellit danach Ausschau hielt. Die Gewitterstürme tobten viele tausend Kilometer weiter südlich, wo sie von RHESSI aus gesehen hinter dem Horizont lagen. Eines war also schnell klar: Die dort entstandenen

Gammablitzte konnten die Raumsonde nicht erreicht haben, weil sie sich wie alle Formen von Licht geradlinig ausbreiten.

Für geladene Teilchen wie zum Beispiel Elektronen gelten jedoch andere Regeln. Für sie ist es zum Beispiel ganz natürlich, sich – wenn auch in einer Spiralbahn – entlang den gekrümmten Linien des Erdmagnetfelds zu bewegen. Tatsächlich stellten wir fest, dass sich die Gewitterstürme genau am entgegengesetzten Ende der magnetischen Feldlinien befanden, die auch durch den Satelliten liefen. Elektronen, die in sehr große Höhe gelangt wären, hätten entlang dieser Linien große Strecken zurückgelegt und unter Aussendung von Gammastrahlung auf die Detektoren von RHESSI prallen können. Allerdings schien es ausgeschlossen, dass Elektronen aus dem Innern einer Gewitterwolke so viele Kilometer durch die Luft aufsteigen, um sich dort schließlich an die Magnetfeldlinien zu heften. Wieder einmal deutete eine neue Messung auf eine Strahlungsquelle in großer Höhe hin.

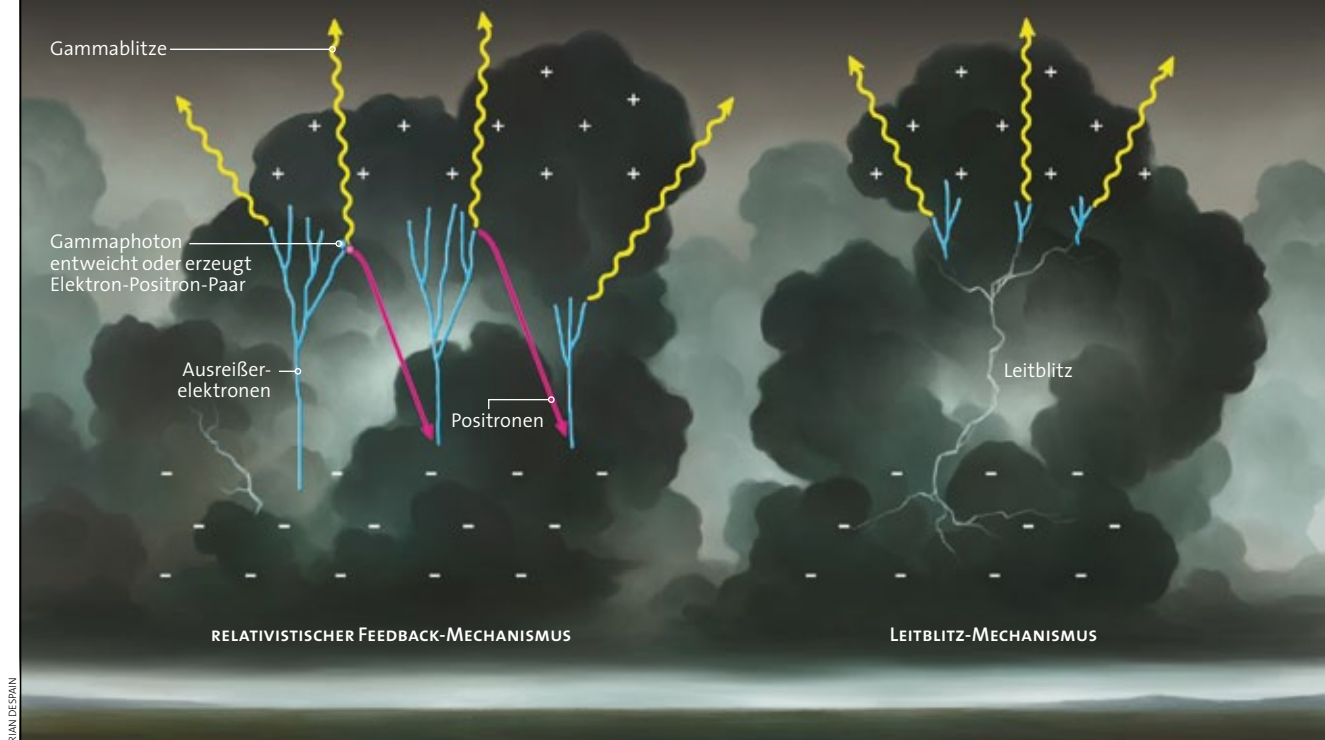
Wie entstehen Gammablitzte?

Wissenschaftler sind sich darin einig, dass terrestrische Gammablitzte unter anderem auf Elektronenlawinen beruhen, die in den starken elektrischen Feldern im Innern von Gewitterwolken bis fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. Beim Zusammenstoß der Elektronen mit Atomkernen in Luftmolekülen bilden sich dann Gammaquanten sehr hoher Energie.

Elektronenlawinen allein können diese hohen Energien, die Werte ähnlich jenen bei Sternexplosionen erreichen, aber nicht erklären. Forscher haben daher den relativistischen Feedback-Mechanismus vorgeschlagen (links). Ihm zufolge erzeugen eini-

ge der Gammastrahlen Teilchenpaare, die aus einem Elektron und einem Positron, dem Antimateriepartner des Elektrons, bestehen. Die negativ geladenen Elektronen fliegen in der Gewitterwolke nach oben, die positiven Positronen hingegen nach unten, wo sie weitere Elektronenlawinen auslösen. Letztlich sind an dem Prozess also sehr viele Ladungsträger beteiligt, wodurch er energiereicher wird.

Gemäß der Leitblitz-Hypothese (rechts) könnte aber auch ein Blitzkanal oder Leitblitz, der sich in der Wolke von unten nach oben fortpflanzt, fortlaufend neue Elektronenlawinen erzeugen.



Im vergangenen Jahr lieferte das Weltraumteleskop Fermi eine weitere Erkenntnis. Als Forscher mit seiner Hilfe ebenfalls auf Teilchenstrahlung entlang der geomagnetischen Feldlinien gestoßen waren (siehe »Blitz, Donner, Antiteilchen«, Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 12), entdeckten sie Verblüffendes: Ein beträchtlicher Teil davon besteht aus Positronen! Atmosphärische Phänomene schleudern also nicht nur Elektronen und Gammastrahlung, sondern auch Antimaterieteilchen ins All. Rückblickend erscheint dies allerdings weniger überraschend. Zwar ist Antimaterie in der Natur sehr selten anzutreffen, doch angesichts der hohen Gammaenergie hätten wir diese Beobachtung eigentlich voraussehen können.

Nicht die letzte Überraschung des Jahres

Wie steht es um das rätselhafte Ereignis in der Sahara? Die Gammaquanten, so fanden wir heraus, stammten nicht etwa von einer Quelle in großer Höhe, vielmehr entstanden sie in den Gewitterwolken in weitaus größerer Menge, als man für möglich gehalten hatte. Die Wahrscheinlichkeit, dass sie es bis in große Höhen schafften, war zwar klein, aber eben dennoch größer als null. Daher flogen einige von ihnen sehr weit in Richtung Weltraum, trafen oberhalb einer Höhe von 40 Kilometern vereinzelt auf Luftmoleküle und erzeugten dabei Elektron-Positron-Paare. Diese Teilchen folgten schließlich den magnetischen Feldlinien und wurden von RHESSI registriert.

Die Entdeckung von Positronen sollte nicht die letzte Überraschung des Jahres bleiben. Ebenfalls 2011 entdeckten Forscher mit Hilfe des italienischen Observatoriums AGILE, dass die Energiespektren terrestrischer Gammablitz bis in eine Größenordnung von 100 Millionen Elektronvolt reichen können. Das wäre selbst für eine Sonneneruption beachtlich. Sollten sich diese Beobachtungen als zutreffend erweisen, müssen wir unsere Modelle überprüfen, da es höchst unwahrscheinlich ist, dass allein der Runaway-Mechanismus so hohe Energien erzeugen kann. Tatsächlich ist völlig unklar, welcher Prozess im Innern von Gewitterwolken Elektronen auf solche Energien beschleunigen könnte (siehe Kasten S. 65). Zum Glück planen Arbeitsgruppen in den USA, Europa und Russland in den nächsten Jahren erste Weltraummissionen speziell zur Erforschung terrestrischer Gammastrahlung, deren Messungen uns Anhaltspunkte für eine neue Theorie geben können.

Wir selbst haben in der Zwischenzeit ein Instrument entwickelt, das an Bord von Flugzeugen die Gammastrahlung in Gewitterstürmen misst. Wegen der Gesundheitsrisiken verbietet es sich natürlich, direkt in ein Gewitter hineinzufiegen. Bei einem frühen Testflug geriet das Flugzeug mit einem von uns (Dwyer) jedoch unabsichtlich in einen Gewittersturm. Der anfängliche Schrecken wich schnell einem Hochgefühl, als die Detektoren plötzlich aufleuchteten. Zum Glück blieb die Intensität des Ausbruchs niedrig, er entwickelte sich auch nicht so explosionsartig wie die vom Weltall aus beobachteten Ereignisse. Wie die spätere Analyse ergab,

wurde in dem fraglichen Gebiet genau jene Art von Ausreißerelektronen beschleunigt, von der wir vermuten, dass sie für Gammablitz verantwortlich ist.

Auf Grund unserer Flüge wissen wir mittlerweile, dass Gewitter meist eine relativ harmlose, kontinuierliche Gammastrahlung emittieren. Besatzung und Passagiere eines Verkehrsflugzeugs, das zufällig von den hochenergetischen Elektronen und Gammablitz eines Gewitters getroffen würde, wären vorläufigen Berechnungen zufolge durchaus gefährdet. Im Bruchteil einer Sekunde würden die Menschen, ohne es zu spüren, einer Strahlendosis ausgesetzt, die der lebenslangen natürlichen Dosis entspricht. Da ist es nur gut, dass sich Piloten ohnehin von Gewittern fernhalten.

Die Blitzforschung ist zwar kein ganz neues Forschungsgebiet. Angeblich ließ schon Benjamin Franklin einen Drachen in ein Gewitter steigen (sicher belegt ist dies allerdings nicht), um festzustellen, ob es sich bei Blitzen um elektrische Entladungen handelt. Doch selbst heute, über 250 Jahre später, haben Wissenschaftler noch immer keine allzu genaue Vorstellung davon, wie Gewitterwolken Blitze hervorbringen oder gar Gammaimpulse erzeugen. Uns beide, die wir während eines Großteils unseres beruflichen Lebens exotische Objekte weit außerhalb des Sonnensystems erforscht haben, hat die Faszination dieser Fragen jedenfalls wieder auf die Erde zurückgeholt. Wie einst Benjamin Franklin wollen wir endlich wissen, was Gewitter eigentlich genau zu bieten haben. ~

DIE AUTOREN



Joseph R. Dwyer (links) ist Astrophysiker und Professor am Florida-Institut für Technologie in Melbourne (Florida). In den letzten Jahren beschäftigte er sich vorwiegend mit der Physik von Blitzen. **David M. Smith** ist Associate Professor für Physik

an der University of California, Santa Cruz. Seine Forschungsgebiete sind neben Blitzen auch die Strahlungsgürtel der Erde und Sonneneruptionen. Außerdem untersucht er die Röntgen- und Gammaemissionen Schwarzer Löcher.

QUELLEN

- Briggs, M. S. et al.:** Electron-Positron-Beams from Terrestrial Lightning Observed with Fermi GBM. In: Geophysical Research Letters, Artikel-Nr. L02808, 2011
- Dwyer, J. R.:** Source Mechanisms of Terrestrial Gamma-Ray Flashes. In: Journal of Geophysical Research, Artikel-Nr. D10103, 2008
- Fishman, G. J. et al.:** Discovery of Intense Gamma Ray Flashes of Atmospheric Origin. In: Science 264, S. 1313–1316, 1994
- Gurevich, A. V., Zybin, K. P.:** Runaway Breakdown and the Mysteries of Lightning. In: Physics Today 58, S. 37–43, 2005

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171183

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Wozu braucht die Forschung Stammzellen?
Können wir Organe bald im Labor züchten?
Was bedeutet Regenerative Medizin?

Do **07.02.2013/19.00 / HANNOVER**

DIE ZELLEN-ZAUBERER:

Was verbirgt sich hinter der Stammzellenforschung?

MIT **Prof. Dr. Axel Haverich** REBIRTH, Medizinische Hochschule Hannover, **Prof. Dr. Michael Brand** DFG-Forschungszentrum für Regenerative Therapien, Technische Universität Dresden, **Prof. Dr. Andreas Trumpp** Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg, **Prof. Dr. Norbert Paul** Institut für Geschichte, Theorie und Ethik der Medizin, Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

MODERIERT VON **Dr. Carsten Könneker** Chefredakteur Spektrum der Wissenschaft

VERANSTALTUNGSORT Schloss Herrenhausen, Hannover

ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de

MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Grenzen des Wachstums

Die Tröpfchenverteilung auf beschlagenen Glasscheiben ist immer noch für eine Überraschung gut.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

In früheren Zeiten gehörten sie zum Alltag: mit einem feinen Tröpfchenschleier überzogene Fensterscheiben als Folge des Temperaturgefälles zwischen innen und außen. Heute sorgen Isolierglasscheiben und moderne Heizungstechnik für thermisch ausgeglichene Verhältnisse; nur im Badezimmer ist das Phänomen noch mit schöner Regelmäßigkeit zu beobachten, wenn Wasserdampf aus der heißen Dusche den Spiegel blind werden lässt.

Gleichwohl sind beschlagene Scheiben – genauer: Kondensationsvorgänge an hydrophilen Oberflächen – weiterhin ein Objekt der Forschung und keineswegs nur der Grundlagenwissenschaft. Überraschend fanden Göttinger Forscher jüngst sogar Neues über die Größenverteilung der Tröpfchen heraus.



Auf einer beschlagenen Scheibe finden sich zwischen großen Wassertropfen viele kleinere Exemplare – und zwischen den kleineren viele noch kleinere. Ein Potenzgesetz beschreibt diese Größenverteilung allerdings nur ungenau.

Widmen wir uns zunächst einer näherliegenden Frage. Warum trotzen die Tröpfchen der Schwerkraft und bleiben an der Scheibe haften? An hydrophilem, »Wasser liebendem« Glas ist zur Bildung einer Grenzschicht zwischen Wasser und Glas weniger Energie nötig als für eine Wasser-Luft-Schicht. Darüber hinaus sind natürliche Systeme gemäß dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik bestrebt, so viel Energie wie möglich an die Umgebung abzugeben. Je größer die Grenzschicht zwischen Wasser und Glas, desto besser gelingt das.

Folglich sollte sich die ganze Scheibe mit einem dünnen Wasserfilm überziehen. Gar so weit geht die Liebe zwischen Wasser und Glas aber meist nicht, denn Verunreinigungen lassen den Film in der Regel schnell in Tropfen zerfallen – in recht flache Exemplare allerdings, die der flächenhaften Benetzung sehr nahekommen. Die Natur »wählt« eben die zweitbeste Variante, wenn das optimale Ergebnis unerreichbar ist.

Die Wassermoleküle selbst stammen aus der Umgebung. Die Wasserdampfkonzentration in der Luft, die absolute Luftfeuchte, kann bei gegebener Temperatur aber nur einen Maximalwert annehmen, die maximale Luftfeuchte. Dieser liegt umso höher, je höher die Temperatur ist.

Doch was, wenn feuchte Raumluft in die Nähe der kühleren Fensterscheiben gerät? Dann kühlt sie selbst ein wenig ab, und es kann passieren, dass der Wert der absoluten Luftfeuchte den der maximalen übersteigt. Ein Teil des Dampfes wird nun flüssig und legt sich von innen auf die Scheiben. Gelegentlich beschla-

Unentwegt lösten sich Wassertropfen an der beschlagenen Fensterscheibe; wie langsam sich verzweigende Blitze leuchteten die klaren Farben des Wintertags in ihren Bahnen auf, ein zähes Durchdringen der Wirklichkeit.

Thomas Lehr (geboren 1957)

gen Fensterscheiben allerdings auch von außen: in heißen Ländern nämlich, in denen Wohnungen durch Klimaanlage gekühlt werden.

Es sind im Wesentlichen drei Mechanismen, die das Wachstum der Tröpfchen bestimmen:

1. Tröpfchen wachsen, indem sie Wassermoleküle aus der Umgebung aufnehmen. Entweder lagern sich Wassermoleküle aus der Luft an bereits bestehende Tröpfchen an, oder aber Moleküle, die bereits auf der Scheibe gelandet sind, driften zu den Tröpfchen und werden von diesen aufgenommen.
2. Tropfen, die etwa dieselbe Größe besitzen, kommen sich so nahe, dass sie miteinander verschmelzen.
3. Ein kleines Tröpfchen, das noch wächst, berührt einen großen Tropfen und wird von diesem geschluckt.

Die treibende »Kraft« ist auch in diesen Fällen die Minimierung der Grenzflächenenergie: Verschmelzen Wassertropfen oder einzelne Moleküle miteinander, verkleinert sich ihre Grenzfläche mit der Luft.

Über die bloße Feststellung hinaus, dass kleinere Tropfen häufiger vorkommen als größere, ging man bisher allerdings davon aus, dass die Verteilung der Tropfengrößen einem Potenzgesetz entspricht. Statistisch gesehen ist jeder Tropfen einer bestimmten Größenordnung also von der gleichen Anzahl Tropfen der nächstkleineren Größenordnung umgeben. Anschaulich heißt das: Jeder Ausschnitt des Bilds gleicht, weil auf ihm ein ähnliches Tropfenmuster zu sehen ist, dem ursprünglichen Bild. Das gilt auch dann noch,



Ein feiner Tröpfchenschleier, der sich auf der Innenseite einer Fensterscheibe niederschlägt, ist Folge des Temperaturgefälles zwischen innen und außen. Überschreitet die Gewichtskraft eines Tropfens die Adhäsionskraft, mit der er an der Glasscheibe haftet, rutscht er abwärts.

wenn man von diesem Ausschnitt erneut nur einen Ausschnitt betrachtet und so weiter.

Potenzgesetze sind in Natur und Alltag vielfach am Werk. Sie beschreiben so verschiedene Phänomene wie die Verteilung der Größe von deutschen Städten, die Ausmaße von Mondkratern oder auch die Unterschiede der Stoffwechselintensität zwischen großen und kleinen Tieren. Auf einer beschlagenen Scheibe allerdings, so haben die Göttinger Wissenschaftler um Jürgen Vollmer und Björn Hof durch sehr sorgfältiges Auszählen herausgefunden, wachsen kleine Tropfen schneller, als es einem Potenzgesetz entspricht – und große langsamer. Computersimulationen auf Basis der beschriebenen Wachstumsmechanismen untermauerten diese Ergebnisse noch.

Nur anfangs wachsen die winzigen Tröpfchen außerordentlich schnell

Die Abweichungen erklären die Forscher dadurch, dass sich der Mechanismus der Tropfenbildung im Verlauf des Wachstums verändert. Anfangs vereinigen sich einzelne Wassermoleküle zu winzigen Tröpfchen. Solange diese noch sehr weit über die Fläche verteilt sind, »fliegen« ihnen weitere Moleküle nur so zu. Sie nehmen nämlich nicht nur diejenigen auf, die direkt auf ihnen landen, sondern ziehen auch jene an, die sich in direkter Nachbarschaft niedergeschlagen haben.

Doch dieser letztere Mechanismus verliert mit der Zeit an Bedeutung. Denn weil sich die Tropfen durch ihr Wachstum allmählich näher kommen,

nimmt die Fläche zwischen ihnen ab. Auch am anderen Ende der Skala ist das Wachstum begrenzt. Nach einiger Zeit kommt es nahezu zum Erliegen, weil große Tropfen immer seltener noch größere Exemplare antreffen, von denen sie verschluckt werden könnten.

Geraten manche Tropfen so schwer, dass ihre Gewichtskraft die Adhäsionskraft überschreitet, dank derer sie bis dahin an der Scheibe hafteten, rutschen sie an dieser herunter. Das ist nicht so selbstverständlich, wie es auf den ersten Blick scheint. Mit zunehmender Größe der Tropfen nimmt schließlich auch die Kontaktfläche zwischen Scheibe und Tropfen und damit die Adhäsionskraft zu. Aber die Masse der Tropfen und damit die Gewichtskraft wächst schneller als die Adhäsionskraft. Denn die Masse erhöht sich proportional zum Volumen, also mit der dritten Potenz der Tropfengröße, die Kontaktfläche aber nur mit der zweiten. Daher »überholt« die Gewichtskraft die Adhäsionskraft bei einer bestimmten Tropfengröße.

Auf ihrem Weg nach unten nehmen die Tropfen dann noch viele weitere mit sich. Der dünne Wasserfilm, der dabei entsteht, ist in der Regel aber instabil, so dass sich auf der Fläche schon bald neue Tropfen bilden.

Warum lohnt es sich nun, den winzigen Tröpfchen so viel Aufmerksamkeit zu widmen? Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) würde sagen: »Die Neigung der Menschen, kleine Dinge für wichtig zu halten, hat sehr viel Großes hervorgebracht.« Tatsächlich haben Kondensationsvorgänge und

Tröpfchenbildung auch technische Aspekte. Beispielsweise muss in den Kondensatoren von Wärmekraftwerken die Energie, die beim Verdampfen des Wassers aufgewandt wurde, wieder abgegeben werden. Um diesen Vorgang zu optimieren – und so auch den Wirkungsgrad des Kraftwerks –, müssen die Ingenieure den Kondensationsablauf genau kennen. Auch in der Kältetechnik ist Wissen um die Mechanismen der Tropfenbildung von Bedeutung, und sogar in der Landwirtschaft: Bei modernen Bewässerungsmethoden werden gezielt Tropfen bestimmter Größen erzeugt, um das Wasser möglichst sparsam einsetzen zu können.

Trotz allem bleibt die Kondensation aber auch ein Teil der Alltagsphysik. Damit ist sie nicht nur exklusiven Forscherkreisen zugänglich, sondern ganz im Gegenteil: Erste Einblicke lassen sich schon am Badezimmerspiegel gewinnen. ~

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

Blaschke, J. et al.: Breath Figures: Nucleation, Growth, Coalescence, and the Size Distribution of Droplets. In: Physical Review Letters 109, 068701, 2012.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171184

Muslimische Wurzeln der Renaissance?

Das islamische Reich al-Andalus gilt schon lange als Vermittler antiken Wissens an die Höfe Italiens. Archäologische Untersuchungen einer Gartenanlage bei Córdoba lassen nun vermuten, dass das neue Menschenbild der Renaissance zudem von muslimischen Errungenschaften inspiriert war.

Von Felix Arnold

Als der Mönch Johann von Gorze im Jahr 950 als Gesandter des ostfränkischen Königs Ottos I. nach Córdoba kam, staunte er nicht schlecht. Die Hauptstadt des muslimischen Reichs al-Andalus war von breiten, mitunter sogar gepflasterten Straßen durchzogen, es gab öffentliche Bäder und ein Postamt. Dennoch haderte von Gorze mit all der Pracht, denn sie stand ihm auch für Heidentum und verwerfliche Sinneslust. Den späteren Papst Silvester II. wiederum schreckte die orientalischere Lebensweise nicht davon ab, 967 die Iberische Halbinsel selbst aufzusuchen, um dort die Schriften arabischer Gelehrter zu Astronomie und Mathematik zu studieren. Insbesondere Córdoba barg einen Schatz von zehntausenden Manuskripten – eine Bibliothek, die zu jener Zeit wohl alle anderen in Europa weit übertraf. Diese Sammlung bewahrte das verbliebene Wissen der Antike, überwiegend in Form arabischer, in Bagdad angefertigter Übersetzungen. Deshalb zog die Metropole Gelehrte aller Konfessionen an. Dort forschten etwa der muslimische Philosoph Averroës und der jüdische Arzt

Moses Maimonides; durch Übersetzungen ins Lateinische fanden auch die Werke des Aristoteles ihren Weg nach Paris, wo Thomas von Aquin auf ihrer Grundlage die Scholastik entwickelte: die Keimzelle der modernen Philosophie.

Dieser Wissenstransfer zwischen christlicher und islamischer Welt in Córdoba, später dann in den von christlichen Fürsten zurückeroberten Städten wie Sevilla und Toledo, schuf wichtige Grundlagen der als Renaissance bekannten Wiederentdeckung antiken Wissens und antiker Kunst im Italien des 15. Jahrhunderts. Vom engen Kontakt profitierten aber nicht nur die Wissenschaften. In dem seit 711 muslimisch besetzten Teil der Iberischen Halbinsel erreichte auch die aus dem Orient und Nordafrika mitgebrachte arabische Gartenkunst einen Höhepunkt – und lieferte nach Ansicht vieler Historiker Impulse für die Gärten der Renaissance.

Die erbauenden Anlagen fanden sich in der Regel bei Palästen, herrschaftlichen Stadthäusern und prächtigen Villen im ländlichen Umfeld. Wie Gärten im Orient bestanden sie aus einem Verbund in sich geschlossener und meist quadratischer Einheiten. Eine Eigenentwicklung Spaniens war eine Terrassenarchitektur, die darauf abzielte, Ausblicke in die Weite zu gestalten.

Arabischer Dichter wurden nicht müde, gerade von den Gärten Córdoba zu schwärmen. So findet sich bei dem maghrebinischen Historiker Ahmad al-Makkari (1578–1632) folgende Beschreibung zu Hair al-Zaggali, einem vermutlich vor dem Nordtor Córdoba gelegenen Kleinod: »Dieser Garten ist einer der wundervollsten, schönsten und vollkommensten Orte; ein Bach durchläuft ihn wie eine sich dahinwindende Schlange, und dort ist ein Becken, in dem sich die Wasser sammeln. Das Dach seines Pavillons, seine Wände und Mauern sind verziert mit Gold und Lapislazuli. Der Garten zeigt symmetrisch angeordnete Pflanzenreihen, und seine Blumen tragen ein Lächeln in den Blüten. Die Sonne kann

AUF EINEN BLICK

BÄUME STATT BLUMEN

1 Die **Gärten des spanischen Kalifats al-Andalus** und seiner Nachfolgereiche gaben vermutlich wichtige Impulse für die italienischen **Renaissancegärten des 15. Jahrhunderts**.

2 Bislang beruhte diese These vor allem auf muslimischen Texten, **kaum auf archäologischen Grabungen**. Heute noch bekannte Anlagen in Córdoba oder Granada wurden in späterer Zeit verändert und liefern so kein eindeutiges Bild mehr.

3 Seit 2006 erforschen deutsche und spanische Archäologen ein Landgut des 10. Jahrhunderts nahe Córdoba. Noch ergibt sich kein klares Bild, doch vor allem **architektonische Details** erinnern an Entwicklungen der Renaissance.

seine feuchte Erde nicht berühren, die Brise verbreitet seine Düfte Tag und Nacht, als wäre sie gemacht aus verliebten Blicken oder als trenne sie sich von den Tagen ihrer Jugend« (übersetzt von der Arabistin Maria Jesús Rubiera, Universidad de Alicante).

Für den modernen Leser klingt das recht vertraut. »Symmetrisch angeordnete Pflanzenreihen« lassen an Barockgärten denken, der erwähnte Bach vielleicht an Landschaftsgärten nach englischem Vorbild. Symmetrien, die Verteilung der Anlage auf Terrassen, die ihrerseits gegliedert waren, Wasserläufe und Becken – all dies gehörte später zum Kanon der italienischen Renaissancegärten. Historiker halten es für wahrscheinlich, dass solche Elemente und Ideen über Zwischenstufen von al-Andalus weitergereicht wurden.

Doch leider kennen wir dafür fast nur literarische Belege wie den zitierten. Von den einst so üppigen Anlagen Córdoba hat sich lediglich die des Kalifen in seiner Palaststadt

Madinat al-Zahra als archäologisches Denkmal erhalten. In der Mitte einer fast quadratischen Fläche mit 150 Meter langen Seiten stand einst ein Pavillon, umgeben von vier Becken. Wege, von in Stein gefassten Kanälen begleitet, führten in alle vier Himmelsrichtungen und bildeten so ein großes Kreuz – ein Motiv, das in Persien als »chahar bagh«, als »viergeteilter Garten« bekannt ist.

Ob in dieser Palastanlage tatsächlich »symmetrisch angeordnete Pflanzenreihen« den Betrachter entzückten, lässt sich aber nicht beantworten. Denn leider wurde sie bereits in den 1940er Jahren frei gelegt. In diesen frühen Tagen der spanischen Archäologie gab es die Möglichkeiten der Archäobotanik noch nicht, mikroskopisch kleine Pflanzenreste zu erkennen und zu bestimmen. Eine Nachuntersuchung ist heutzutage nicht mehr möglich, hat man das Gelände doch neu bepflanzt und damit eventuell noch erhaltene Spuren durch Kontaminationen unlesbar gemacht.

In der islamischen Welt galten Gärten als Abbild des Paradieses und wurden dementsprechend aufwändig in Szene gesetzt.



BIBLIOTECA APOSTOLICA VATICANA, MS. VATICANO ARABICO 368 (RESERVA), FOL. 13 RECTO



FOTO: JOHN PATTERSON / DAI MADRID; ZEICHNUNG RECHTS: FELIX ARNOID / DAI MADRID

Auch der bekannte »maurische Garten« des Alcazar-Palastes in Sevilla hilft nur bedingt, Fragen zu beantworten wie: »War der Wasserlauf wie ein natürliches Vorbild gestaltet oder eher wie ein Kanal?« und »Welche Düfte umwehten den Besucher?«. Denn die Anlage aus dem 11. Jahrhundert wurde bereits ab dem Spätmittelalter, also ab dem 13. Jahrhundert, durch Neubauten überformt. Und die bei Touristen beliebten Gärten der Alhambra in Granada entstanden überhaupt erst in dieser Zeit, spiegeln demnach die Moden einer späteren Phase des islamischen Spanien wider.

Im Herbst 2006 entschlossen sich deutsche und spanische Forscher daher, das Gelände eines anderen Gartens zehn Kilometer westlich von Córdoba zu untersuchen, da es in weiten Bereichen ungestört vorliegt, also keinerlei spätere Eingriffe die archäologische Fundsituation verändert haben. Neben dem Autor gehören die Archäologen Antonio Vallejo Triano und Alberto Canto García zum Team; Ersterer ist oberster Denkmalpfleger von Madinat al-Zahra, Letzterer lehrt Mittelalterarchäologie an der Universidad Autónoma de Madrid. Gefördert wird das Projekt mit Sondermitteln des Auswärtigen Amtes und der Gerda-Henkel-Stiftung.

Schon 1910 hatte der spanische Architekt und Bauhistoriker Ricardo Velázquez Bosco den Wohntrakt des Landguts erforscht. Unter anderem entdeckte er Teile der Marmordekoration, die heute im archäologischen Museum von Córdoba zu sehen sind. Der Winzer Marqués de Murrieta, dessen Weingut nach wie vor zu den wichtigsten der Anbauregion Rioja zählt, ließ sich auf dem Grundstück in den Jahren 1926 bis 1931 eine Sommerresidenz errichten. Heute werden auf dem verwilderten Gelände Bullen für den Stierkampf gezüchtet.

Der Landsitz am Südhang der Sierra Morena wird in Schriftquellen als Munyat al-Rummaniya bezeichnet, zu Deutsch »Villa des Granatapfelbaumtals«. Er umfasste einst vier etwa 150 Meter breite und 50 Meter tiefe Terrassen, von denen drei als Gärten gestaltet waren (siehe Bild rechts oben); der Höhenunterschied zwischen den einzelnen Ebenen betrug etwa drei Meter. Auf der obersten Terrasse standen Empfangs- und Wohngebäude. Dort befand sich auch ein großes Wasserbecken, das Regenwasser speicherte.

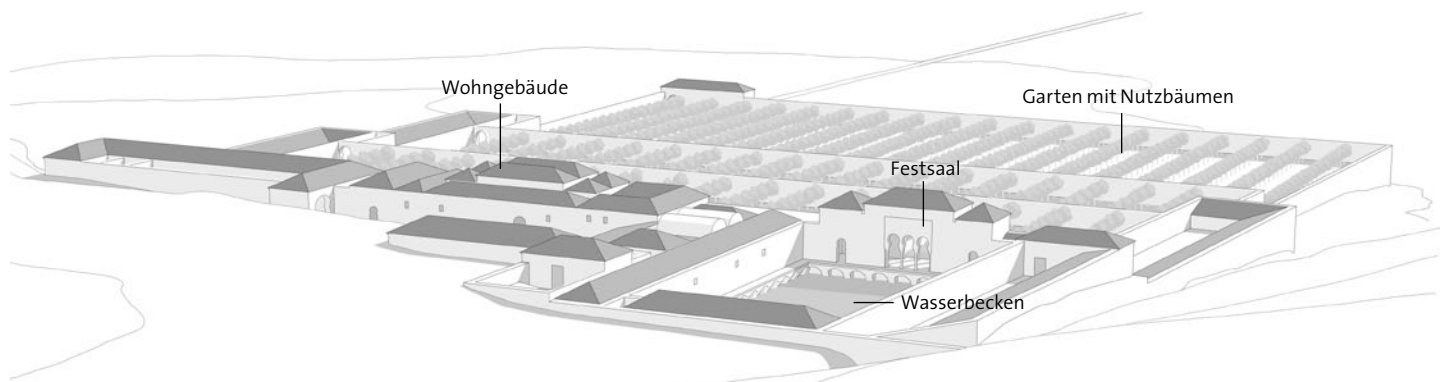
Eigentümer der Villa war al-Durri, genannt »der Kleine«, ein Finanzminister des Kalifen al-Hakam II. (915–976). Aus einer einflussreichen Familie stammend, war al-Durri innerhalb weniger Jahre in hohe Ämter aufgestiegen. Sein Vermögen steckte er ab 965 in den Bau des Landguts. Lange konnte er sich dessen allerdings nicht erfreuen: Im April 973 fiel er bei Hof in Ungnade, da er – unter anderem zur Finanzierung des Bauvorhabens – Staatsgelder veruntreut haben sollte. Letztlich wurde der Fall einvernehmlich beigelegt – al-Durri schenkte das Anwesen seinem Herrn und veranstaltete zu diesem Anlass ein großes Fest. Nach dem Tod des Kalifen wurde der Minister allerdings Opfer einer Hofintrige und starb bei einem Fluchtversuch.

Ein ausgeklügeltes System der Wasserversorgung

Die Wohn- und Repräsentationsbauten auf der oberen Terrasse bildeten einen Schwerpunkt der Arbeiten in den vergangenen Jahren, die gesamte Wasserversorgung einen zweiten. Zunächst dokumentierten wir die heute sichtbaren, von Sträuchern überwucherten Ruinen. Manche Gebäudeteile ragen immer noch gut vier Meter hoch auf. Ein Abschnitt der äußeren Mauer, die das gesamte Gelände umfriedete, ist besonders gut erhalten (siehe Foto). Wer immer dafür als Baumeister fungierte, experimentierte gern: Er hatte sich eine Art Fachwerkkonstruktion ausgedacht – ein Gitter aus Kalksteinblöcken, dessen Öffnungen mit Lehm verfüllt wurden.

Architektonischer Höhepunkt aus damaliger Sicht war sicherlich das große Wasserbecken. Mit einer Länge von 50 Metern, einer Breite von fast 30 Metern und vier Meter Tiefe war es damals eines der größten in der islamischen Welt. Die Bauarbeiter hatten die Grube mit Steinmauerwerk eingefasst, dieses dann zur Abdichtung verputzt und den Kalkputz noch poliert. In das Beckeninnere ragende Pfeiler trugen einst Steinplatten (siehe Bild S. 74) – es war sicher sehr erbaulich, quasi über das Wasser gehend dem Treiben der Fische zuzuschauen. Vermutlich bot der Umgang den Tieren auch Schutz vor der Sonne, denn einen Bewuchs gab es nicht.

Was wir über die Wasserversorgung des Beckens und des benachbarten Wohntrakts erfuhren, beeindruckte uns eben-



Wo heute Stiere weiden, erstreckte sich im 10. Jahrhundert das Landgut al-Rummaniya (oben: Rekonstruktion). Noch immer sind einige der Mauerzüge erhalten (im Foto links: Reste der einstigen Außenmauer). Archäobotanische Analysen zeigten, dass dem Bauherrn al-Durri, Finanzminister am Kalifenhof von Córdoba, der Sinn nicht nach Blumen stand – auf drei der vier Terrassen wuchsen vermutlich Nutzbäume.

falls. Zwar war das meiste wohl schon zur Römerzeit erdacht worden, doch das Zusammenspiel diverser Techniken der Wassergewinnung, -speicherung und -verteilung zeugt vom großen Können der Planer. Was zum Beispiel im Winter bei Starkregen über einen Bergbach ablief, wurde geschickt in das Becken geleitet. Möglicherweise gab es eigens zu diesem Zweck eine Staumauer bachaufwärts, von der eine Rinne abging. Auch verschiedene Quellen auf dem Gelände wurden in Stein gefasst, um daraus zu schöpfen. Selbst eine unterirdische Sickergalerie war vorhanden – also ein horizontaler Brunnen, der Grundwasser aus den nahen Bergen heranzuführte.

Während die Zisterne Trinkwasser lieferte, versorgte das große Becken die Pflanzen. Zudem brachte es Kühlung für einen Festsaal, der zwischen dem Becken und den tiefer liegenden Gartenterrassen lag: Wasser hält seine Temperatur länger als Erde oder Stein, weshalb an heißen Tagen ein angenehmer Luftzug entstand. Davon profitierten die Besucher des Saals, der durch weite Maueröffnungen in Form von Arkaden zum Becken wie zu den Terrassen hin offen war.

Die Art der Bepflanzung haben wir in den Jahren 2008 und 2009 erstmals mit archäobotanischen Techniken untersucht. Die durch Grabungsschnitte gewonnene Erde wurde dazu aufgeschlämmt, und unsere Kollegen von der Universidad de Jaén bestimmten die so frei gelegten Pflanzenreste. Die Gartenterrasse direkt unterhalb des Gebäudeareals lieferte besonders aufschlussreiche Ergebnisse. Da der Wohntrakt während eines Bürgerkriegs im Jahr 1009 eingestürzt war, hatte dort der Schutt den Boden mehr oder weniger versiegelt und so die originale Gartenerde über die Jahrhunderte bewahrt.

Überraschenderweise enthielt diese weder Spuren von Lilien, Rosen, Margeriten, Veilchen, Hyazinthen noch sonst einer Zierpflanze, die den arabischen Chronisten zufolge in solchen Anlagen wuchsen. Vielmehr war ausgerechnet dieser Teil des Gartens, bei dem wir auf Grund seiner Nähe zu den Bewohnern der Villa alle Merkmale eines Ziergartens erwartet hätten, ein Olivenhain. Unsere Kollegen entdeckten zudem Hinweise auf andere Nutzbäume, unter anderem Mandel-, Pflaumen- und Sauerkirschbäume, nicht aber auf

den namensgebenden Granatapfel. Nach derzeitigem Stand der Untersuchung ergibt sich also das Bild einer Plantage, nicht das eines ornamentalen Ziergartens. Aus dieser Anlage umwehten den Betrachter keine feinen Aromen, sondern eher ein erdiger Geruch. Diesem Befund entspricht auch, dass gepflasterte Spazierwege allem Anschein nach fehlten.

Das bestätigt die erhaltenen Schilderungen zu al-Durris Villa, denn auch darin ist nicht von Blumen die Rede. Was Gartenhistoriker bislang vor dem Hintergrund der Dichtungen über die Paradiese auf Erden irritierte, erweist sich nun als geschichtliche Realität. Leider gibt es keine Vergleichsmöglichkeiten zu anderen Anlagen der Zeit, doch vermutlich existierten damals einfach verschiedene Spielarten des Landguts.

Auch bezüglich der Frage, inwieweit die Gärten von al-Andalus Impulse für jene der Renaissance setzten, stört al-Rummaniya keinesfalls das Bild. Denn es gibt auffällige Ähnlichkeiten insbesondere zu den frühen Anlagen im Umfeld von Florenz. Die dort herrschenden Medici bevorzugten ebenfalls Hänge, um mehrere Terrassen anlegen zu können. Und gerade in ihren ersten Versuchen spielten Blumen keine große Rolle bei dem Bemühen, eine harmonische Gesamtgestaltung entsprechend dem neuen antikisierten Schönheitsideal zu erreichen.

Zwischenstationen für den Wissenstransfer

Zwischen Córdoba im 10. Jahrhundert und Florenz im 15. Jahrhundert liegen aber fünf Jahrhunderte, ganz zu schweigen von der räumlichen Entfernung. Kein Florentiner Architekt dürfte je einen andalusischen Garten gesehen haben. Ein muslimischer Einfluss impliziert daher eine ganze Reihe von Zwischenstationen, die Knowhow aus dem einen in den anderen Kulturkreis transportierten. Dazu gehören beispielsweise die Anfang des 13. Jahrhunderts angelegten Gärten der mallorquinischen Könige in Palma. Dies geschah bald nach der Befreiung von der muslimischen Herrschaft, aber noch unter ihrem Einfluss. Auch die im 13. und 14. Jahrhundert zurückeroberten Städte Toledo, Sevilla und Córdoba warfen ihre muslimische Tradition nicht einfach über Bord, sondern deuteten sie im christlichen Sinn um. Anknüpfungspunkte



Mauer des großen Beckens.



Blick vom Becken auf den großen Festsaal.

gab es dafür durchaus, beispielsweise das erwähnte Wegekreuz von Madinat al-Zahra, das dem in Klostergärten gleichkam. Hintergrund: In beiden Religionen gibt es die Vorstellung eines Paradieses, in dem Flüsse von einem Zentrum aus in die vier Himmelsrichtungen fließen. Überdies dauerte die Reconquista, die Rückeroberung Spaniens durch christliche Heere, bis 1492. In Granada etwa existierten islamische Gärten zeitgleich zu den Anlagen der Medici.

Neben formalen Ähnlichkeiten bestand möglicherweise eine Art Seelenverwandtschaft, die erklären könnte, warum eine orientalisch geprägte Kultur Blaupausen für eine europäische Entwicklung lieferte. Die Gärten von Florenz etwa waren auch Ausdruck eines neuen Menschenbilds, das dem Individuum einen Raum gab, der ihm im Mittelalter zu Gunsten strenger Gläubigkeit verwehrt geblieben war. In den neuen Gärten suchte die Florentiner Elite nach innerer Harmonie, nach einem Einklang mit der Natur und einem Ausgleich zwischen dem Leben in der Stadt und dem – freilich idealisierten – Leben auf dem Land.

Die Villen von Córdoba sind Produkt eines ganz ähnlichen Phänomens. Sie wurden als Orte der Muße beschrieben, an die man sich im Sommer zurückzog, um der Hitze in der Innenstadt zu entfliehen, aber auch, um sich nach Feldzügen zu erholen. Auf den Landgütern fanden zudem wichtige soziale Ereignisse wie Hochzeiten oder Beschneidungsfeste statt. Und es wurde dort in einer gebändigten, gestalteten Natur Politik gemacht, weshalb repräsentative Bauten nicht fehlen durften. Auch darin gleichen die muslimischen Gärten denen von Florenz und Rom.

Zu dieser Form der Architektur gehört der erwähnte Saalbau am großen Wasserbecken von al-Rummaniya. Erste Hinweise darauf entdeckten wir 2006; in den Grabungskampagnen 2008 und 2009 konnten wir den Grundriss aufklären. Zudem kamen, neben Teilen des Dachs, auch Marmorfragmente des Dekors zu Tage. Die Arkaden trugen demnach Reliefs und plastische Darstellungen von Pflanzen – Akanthusblätter, Weinreben und Granatäpfel – sowie von Tieren – Vögeln, aber auch Löwen und Gazellen. Evoziert wurde damit,

ganz in der Tradition islamischer Gartenkultur, das Bild des Paradieses im Übergang zwischen Architektur und Landschaft.

Diese Bogengänge verraten vielleicht sogar noch mehr über das Gedankengut der Elite jener Zeit. Der Saal öffnete sich über eine Arkade nach Norden, in Richtung des Wasserbeckens und der Berge, sowie über eine zweite nach Süden, zu den Gartenterrassen und der weiten Flussebene des Guadalquivir hin (siehe Bilder oben rechts). Der nun ermittelte Grundriss lässt vermuten, dass die Weite dieser beiden Bögen jeweils nach einem geometrischen Prinzip bestimmt wurde: Ihre Breite entspricht der Basislänge eines gleichseitigen Dreiecks, dessen Spitze in der Mitte der jeweils gegenüberliegenden Rückwand des Saals zu liegen kommt.

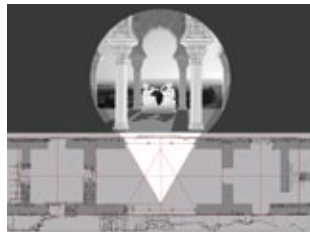
Überraschende Kenntnis der Perspektive

Gleichseitige Dreiecke haben aber noch eine weitere Eigenschaft. Ihre Winkel sind gleich und messen jeweils 60 Grad. Jeder Architekt, Maler oder Fotograf wird bei dieser Angabe aufhorchen. Denn sie entspricht in etwa dem Blickwinkel des Menschen bei unbewegtem Kopf. Perspektivische Darstellungen in der Malerei müssen das berücksichtigen, sonst wirken sie verzerrt.

Konnten die Baumeister von al-Rummaniya davon womöglich schon wissen? Der Mathematiker und Astronom Ibn al-Haytham (965–1040), latinisiert Alhazen, der am Hof der Fatimiden in Kairo forschte, beschrieb derlei optische Prinzipien in seinem Werk »Kitab al-Manazir«. Als »De Aspectibus« und »Opticae Thesaurus« Ende des 12. Jahrhunderts ins Lateinische übersetzt, inspirierte es europäische Gelehrte und bereitete der perspektivischen Darstellung in der Renaissance den Weg. Doch Alhazens Werk entstand Jahrzehnte nach dem fraglichen Garten. Dass er mit antiken Vorstellungen über das Licht und das Sehen brach, gilt auch heute noch als die herausragende Leistung des genialen Forschers.

Dennoch wird er von den Strömungen seiner Zeit und den Vorarbeiten islamischer Gelehrter profitiert haben, beispielsweise des in der zweiten Hälfte des 10. Jahrhunderts in Córdo-

Die Seele mit der Landschaft in Harmonie zu bringen, danach strebte der Architekt des Landguts al-Rummaniya. Den Höhepunkt seines Gesamtkonzepts bildete ein Ensemble aus Wasserbecken und angrenzendem Festsaal. Ersteres versorgte die tiefer liegenden Gartenterrassen mit Wasser, diente zur Kühlung und Erbauung. Die Weite der Arkaden des Festsaals waren überraschenderweise so bemessen, dass diese den natürlichen Blickwinkel eines Betrachters »einrahmten«. Das aber setzte Kenntnisse voraus, die Kunsthistoriker erst in der Jahrhunderte später anbrechenden Renaissance vermuteten.



ba wirkenden Mathematikers al-Maslama, der sich insbesondere mit Geometrie befasst hat.

Es ist zwar nur Spekulation, doch der Befund aus al-Rummaniya spricht dafür, dass nicht erst Alhazen die Begrenzung des menschlichen Blickfelds erkannte. Denn der Baumeister hat sie bereits in seine Gestaltung einbezogen: Die Arkaden geben dem Schauenden einen festen Rahmen, so dass er in der Betrachtung der Landschaft verweilen kann. Bei einem Renaissancegebäude läge es auf der Hand, dass der Architekt genau dies beabsichtigt hat.

In seinem Buch »Florenz und Bagdad. Eine westöstliche Geschichte des Blicks« vertrat der deutsche Kunsthistoriker Hans Belting vor wenigen Jahren hingegen die These, die islamische Kultur habe zwar die Prinzipien der Optik erstmals richtig bestimmt, sie aber nicht auf die Kunst angewendet. Das hätte nämlich erforderlich gemacht, einen Betrachter des gestalteten Raums zu postulieren. Dieser Schritt gilt für Belting wie für andere Experten als Wesensmerkmal der Renaissance und als eng mit ihrem Menschenbild verbunden. Ohne einen Menschen, der vom Festsaal aus nach draußen schaut, machen die Arkaden von al-Rummaniya aber keinen Sinn, denn nur von einem bestimmten Punkt im Raum aus rahmen sie das Blickfeld exakt ein.

Al-Durris Anlage war somit vielleicht nicht nur ein Vorläufer der Gärten der Renaissance, sondern nahm in ihrer Architektur auch deren Neubewertung des Individuums vorweg. Hätte dann aber in Córdoba nicht eine islamische Renaissance ihren Anfang nehmen müssen? Umso mehr, als die hier realisierten Gestaltungsprinzipien im darauf folgenden 11. Jahrhundert beispielsweise im Palast der Aljafería in Zaragoza und auf der Alcazaba von Almería beachtet wurden – dort ziehen jeweils gestaffelte Arkaden den Blick in den Garten hinaus. Doch vielleicht war die Zeit noch nicht reif dafür. Um die Jahrtausendwende spitzten sich ethnische Konflikte in al-Andalus zu – zwischen der alteingesessenen Bevölkerung, Einwanderern aus Nordafrika und importierten Sklaven aus Europa. Im Jahr 1009 brach der erwähnte Bürgerkrieg aus, bei dem weite Teile Córdoba zerstört und verlas-

sen wurden. Auch die Villa al-Rummaniya fiel einem Brand zum Opfer. Gelehrte und Künstler verließen die Stadt und fanden Zuflucht an den Höfen der nun von keiner Zentralmacht mehr kontrollierten regionalen Herrscher, der so genannten »taifa-Könige« – etwa in Sevilla, Valencia, Almería oder Toledo.

Dort erblühte zwar erneut eine höfische Kultur, doch galt sie den fundamentalistisch orientierten, aus Nordafrika stammenden Almoraviden- und Almohaden-Dynastien als dekadent oder gar unislamisch und geriet immer mehr ins Abseits. Nutznießer der kulturellen Errungenschaften Córdoba war somit das abendländische Europa. Toledo, eines der Zentren islamischer Kultur, wurde 1085 von kastilischen Truppen erobert und bildete bald einen Knotenpunkt, über den Werke arabischer Gelehrter, Handwerker und Künstler ihren Weg in die christliche Gesellschaft fanden. ~

DER AUTOR



Der Bauforscher **Felix Arnold** leitet die Ausgrabungen des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) von al-Rummaniya. Einen Schwerpunkt seiner Arbeit bildet die islamische Architektur, einen weiteren die Bauforschung im pharaonischen Ägypten. Seit 2011 gehört er zur DAI-Abteilung Kairo.

QUELLEN

- Arnold, F. et al. (Hg.):** Ar-Rummāniya. Ein islamischer Landsitz bei Córdoba. Madrider Beiträge 34. Reichert, Wiesbaden, im Druck
- Barrucand, M., Bednorz, A.:** Maurische Architektur in Andalusien. Taschen, Köln 1991
- Belting, H.:** Florenz und Bagdad. Eine westöstliche Geschichte des Blicks. C.H.Beck, München 2008
- Fairchild Ruggles, D.:** Gardens, Landscape, and Vision in the Palaces of Islamic Spain. Penn State Press, University Park 2000

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171185

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Fruchtbare Irrtümer

Die meisten Forschungsfehler sind einfach nur ärgerlich und meist schnell wieder vergessen. Doch manche Irrtümer erweisen sich als gar nicht so unnütz: Sie liefern wichtige Denkanstöße, und mitunter verändern sie sogar das wissenschaftliche Weltbild.

Von David Kaiser und Angela N.H. Creager



DAN SÄELINGER

AUF EINEN BLICK

DURCH SACKGASSEN ANS ZIEL

1 Fehler bringen die Forschung mitunter voran. Irrwege, die tiefe Naturzusammenhänge berühren, können langfristig wertvoller sein als in engem Sinn zutreffende Ideen.

2 Abseits des Universitätsbetriebs erdachte ein Physiker in den 1980er Jahren einen Telegrafen, der Nachrichten mit Überlichtgeschwindigkeit befördern sollte. Die Widerlegung dieser Idee trug zur **Entstehung der Quanteninformatik** bei.

3 In den 1940er Jahren traf **Max Delbrück**, ein Begründer der Molekularbiologie, mehrere falsche und irreführende Annahmen, die zu wichtigen Entdeckungen führten. Später wurde er dafür mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Wissenschaftler legen größten Wert darauf, dass ihre Aussagen stimmen. Natürlich begehen sie trotzdem zahllose Fehler, denn irren ist nun einmal menschlich. Aber nicht alle Irrtümer sind negativ zu werten. Historiker haben mehrere Beispiele ausgegraben, in denen sich eine falsche Idee als unerwartet folgenreich erwies. Ein solcher produktiver Fehler betrifft fundamentale Eigenschaften der uns umgebenden Welt und regt weitere Forschungen an, die zu echten Durchbrüchen führen. Ohne diese Irrtümer wäre die Wissenschaft viel ärmer.

Zum Beispiel schuf der dänische Physiker Niels Bohr (1885–1962) ein Atommodell, das in fast jeder Hinsicht falsch war und dennoch die quantenmechanische Revolution zündete. Oder: Gegen ein Heer von Skeptikern behauptete der deutsche Geologe Alfred Wegener (1880–1930), die Kontinente drifteten unter dem Einfluss zentrifugaler Kräfte auseinander; dabei erkannte er zwar das richtige Phänomen, gab aber eine falsche Erklärung. Und der italienische Kernphysiker Enrico Fermi (1901–1954) glaubte, er habe künstliche Transurane – Elemente mit einer größeren Atommasse als Uran – erzeugt, während er in Wahrheit auf die Kernspaltung gestoßen war.

Zwei besonders drastische Beispiele stammen aus der Physik der 1970er beziehungsweise aus der Biologie der 1940er Jahre. Die Autoren waren in beiden Fällen nicht einfach Pfuschler, die rein zufällig Glück hatten. Vielmehr stellten sie hartnäckig Fragen, die nur wenige ihrer Kollegen aufwarfen, und kombinierten Ideen, die damals kaum jemand in Betracht zog. Damit leisteten sie wichtige Vorarbeiten für die hochmodernen Forschungsgebiete Biotechnologie und Quanteninformatik. Sie lagen zwar falsch, doch die Welt sollte ihnen dafür dankbar sein.

Das Phantom des geklonten Photons

Der Fehler im ersten Beispiel trug zur Klärung eines Disputs bei, der in der Frühphase der Quantenmechanik ausgebrochen war. Albert Einstein und Niels Bohr lieferten sich damals eine legendäre Debatte über das Wesen und die Konsequenzen der Quantentheorie. Einstein sträubte sich gegen mehrere seltsame Eigenschaften der Theorie. Beispielsweise können die Physiker aus den quantenmechanischen Gleichungen keine eindeutigen Vorhersagen herleiten, sondern nur Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Ereignisse. Gott würfeln nicht, lautete Einsteins berühmter Einwand. Dabei blieb es 30 Jahre lang. Weder Einstein noch Bohr konnten den anderen überzeugen.

Jahrzehnte später nahm ein junger Physiker aus Nordirland die Bohr-Einstein-Debatte erneut unter die Lupe. John Bell (1928–1990) analysierte ein Gedankenexperiment, das Einstein 1935 publiziert hatte: Eine Quelle emittiert Quantenteilchen wie Elektronen oder Photonen paarweise in entgegengesetzte Richtungen. Nachdem sich beide Partnerpartikel weit voneinander entfernt haben, messen Physiker gewisse Eigenschaften der separaten Partikel. Wie hängen die Ergebnisse dieser Messungen voneinander ab?

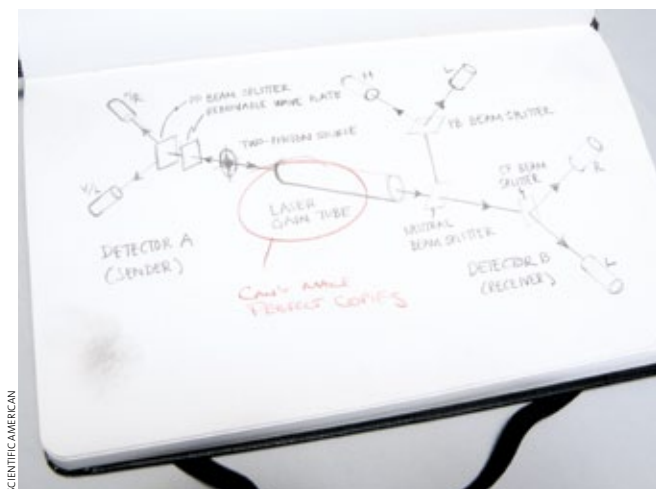
Im Jahr 1964 veröffentlichte Bell einen bemerkenswert kurzen und eleganten Artikel, in dem er zeigte, dass gemäß der Quantenmechanik das Ergebnis der einen Messung – etwa der in einer bestimmten Richtung gemessene Spin des einen Teilchens – davon abhängt, welche Art von Messung an dem anderen Teilchen durchgeführt wird. Wie Bell bewies, muss jede Theorie, die dieselben empirischen Vorhersagen wie die Quantenmechanik trifft, einen Mechanismus enthalten, durch den die Einstellung des einen Messapparats die Ableseung des anderen beeinflusst, wie groß ihr Abstand auch sein mag. Außerdem folgerte er, das entsprechende Signal müsse instantan – augenblicklich – übertragen werden. Solche Korrelationen über beliebige Entfernungen waren damals bereits als Quantenverschränkung bekannt.

Heute ist Bells Arbeit unter Physikern berühmt, doch seinerzeit erregte sie wenig Aufsehen, obwohl die instantane Signalübertragung dem Grundprinzip der speziellen Relativitätstheorie widerspricht: Nichts vermag sich schneller auszubreiten als das Licht. Ein Physiker, dem das auffiel, war Nick Herbert, der für Elektronikfirmen in der Bay Area, der Bucht von San Francisco, arbeitete. Das Thema nahm ihn immer mehr gefangen und brachte ihn von seinem Brotberuf als Industriephysiker ab. Damals gehörte Herbert zum Kern eines schrulligen Debattierklubs in Berkeley, der sich Fundamental Fysics Group nannte. Die Teilnehmer waren zumeist junge Physiker, die an Eliteuniversitäten promoviert hatten – Herbert an der Stanford University –, nur um danach Opfer einer noch nie da gewesenen Stellenknappheit zu werden. Beispielsweise bewarben sich 1971 mehr als 1000 junge US-Physiker um 53 freie Jobs.

Herbert und seine Kumpel waren daher unterbeschäftigt und hatten viel Zeit. Mitte der 1970er Jahre trafen sie sich wöchentlich, um über die Rätsel der modernen Physik zu spekulieren. Solche Themen waren im Studium kaum behandelt worden. Das Bellsche Theorem und die Quantenverschränkung faszinierten sie. Einer aus der Gruppe, John Clauser, führte den weltweit ersten Test des Bellschen Theorems durch und fand die seltsamen Vorhersagen über Verschränkung bestätigt. Im Jahr 2010 erhielt er dafür – zusammen mit dem Franzosen Alain Aspect und dem Österreicher Anton Zeilinger – den angesehenen Wolf-Preis.

Unterdessen begann man sich rundum in der Bay Area für bizarre Phänomene wie extrasensorische Wahrnehmung und Präkognition zu interessieren. Die Zeitungen berichteten über Experimente mit Telepathie, und Okkultisten feierten den Beginn des New Age, einer Ära der übersinnlichen Vereinigung. Das brachte Herbert und seine Diskussionspartner auf den Gedanken, hinter all den modischen Wundern könnte Bells Theorem stecken, das eine mysteriöse, unmittlere Verbindung zwischen den entlegensten Objekten zu postulieren schien.

Herbert fragte sich, ob die – Bell zufolge instantan übermittelten – Signale zwischen Quantenteilchen nicht auch Botschaften mit Überlichtgeschwindigkeit transportieren können. Er skizzierte Pläne für einen »Überlichttelegraphen«.



1981 entwarf der Physiker Nick Herbert ein Gerät, das scheinbar Nachrichten mit Überlichtgeschwindigkeit versenden kann. Eine Quelle («Two-Photon Source» im aufgeschlagenen Notizbuch) erzeugt verschränkte Photonenpaare. Ein Partnerteilchen wandert zu Detektor A, der die Polarisation misst. Die Messung legt augenblicklich die Polarisation des anderen Partners fest, der durch einen Laserverstärker (rote Markierung) vervielfacht und von Detektor B gemessen wird. Damit hat B ein instantanes Signal von A empfangen. Gemäß Einsteins Relativitätstheorie ist ein derartiger Überlichttelegraf nicht möglich, doch zunächst fand niemand den schwachen Punkt in Herberts Überlegungen. Mit der Zeit ergaben eingehende Analysen den Fehler: Elementarteilchen lassen sich niemals so exakt kopieren, wie Herbert es voraussetzte. Diese Erkenntnis führte zu wichtigen Fortschritten in der Quanteninformatik.

der mit Hilfe der Quantentheorie die Relativitätstheorie überlisten sollte. Nach ein paar Fehlschlägen konzipierte Herbert im Januar 1981 sein FLASH-Schema. Die Abkürzung stand für »first laser-amplified superluminal hookup« (erste laserverstärkte Überlichtverbindung). Das Gerät nutzte ein ausgeklügeltes Lasersystem, um eine Nachricht mit Überlichtgeschwindigkeit zu versenden.

Sicher falsch – aber warum?

Herberts Schema sah hieb- und stichfest aus. Mehrere Gutachter der Fachzeitschrift, bei der er seine Idee einreichte, waren beeindruckt. »Wir konnten bei dem vorgeschlagenen Experiment keinerlei grundlegende Fehler feststellen, die den Ursprung des Paradoxons aufdecken«, schrieben zwei Gutachter. Ein anderer, Asher Peres, erklärte in seiner kurzen Stellungnahme kühn, Herberts Arbeit müsse falsch sein – und sei darum unbedingt zu veröffentlichen. Da der Fehler nicht auf der Hand liege, müsse er fundamental sein und würde somit weitere Fortschritte anregen.

Die ungewöhnlich mutige Einschätzung von Peres sollte sich rasch bestätigen. Drei Gruppen von Physikern unterzogen Herberts Arbeit einer genauen Analyse. GianCarlo Ghirardi und Tullio Weber in Italien, Wojciech Zurek und Bill Wootters in den USA sowie Dennis Dieks in den Niederlanden entdeckten unabhängig voneinander, dass Herbert bei der Berechnung dessen, was beim Empfänger des Signals ankommt, einen subtilen Fehler begangen hatte. Herbert unterstellte, das in seiner Vorrichtung vom Laserverstärker emittierte Licht würde großteils denselben Zustand haben wie das ursprüngliche Licht. Doch wie die anderen Forscher erkannten, konnte der Laser keine Kopien einzelner Photonen herstellen, sondern lieferte ein Zufallsgemisch – wie ein Fotokopierer, der verschiedene Bilder zu einem unscharfen Wirrwarr überlagert.

Indem die drei Teams Herberts Vorschlag auseinandernahmen, entdeckten sie eine zuvor unbemerkte Eigenart der Quantenmechanik. Das FLASH-System scheitert auf Grund des »No-Cloning-Theorems« – dieses verbietet, dass ein unbekannter Quantenzustand kopiert oder »geklont« wird, ohne

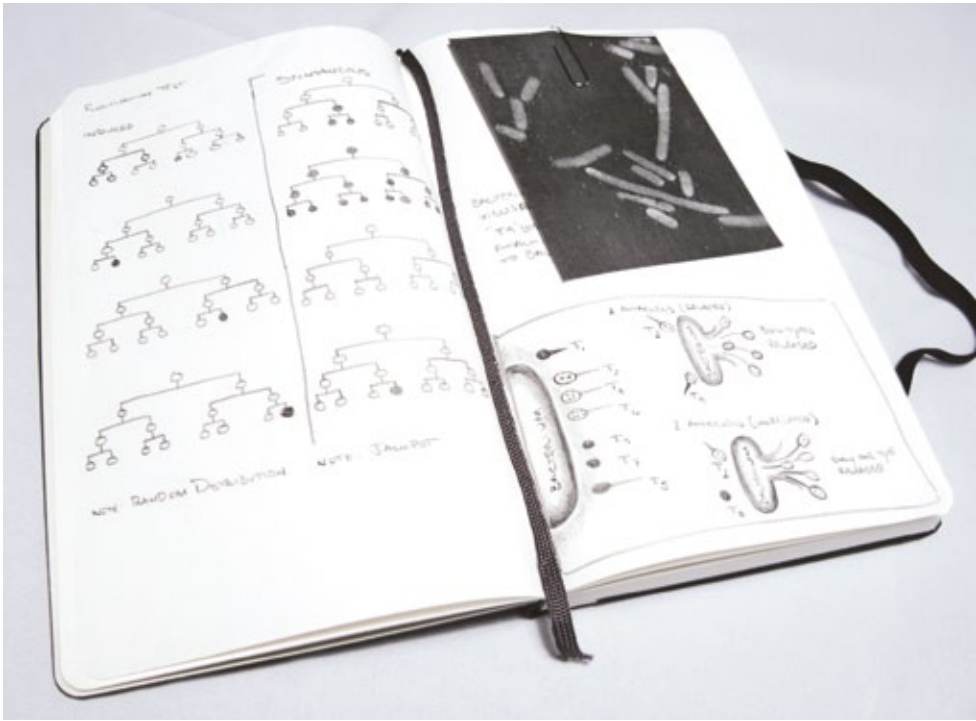
den Zustand zu stören. Das Theorem hindert Mochtegerfinder daran, mittels Quantentheorie Überlichttelegrafen zu bauen, und garantiert die friedliche Koexistenz von Quantenverschränkung und Relativitätstheorie. Zwar arrangieren sich bei jedem Einzelereignis die Zwillingsteilchen tatsächlich entsprechend ihrer instantanen Korrelation, aber diese Verbindung lässt sich niemals dafür nutzen, eine Nachricht mit Überlichtgeschwindigkeit zu versenden.

Rasch erkannten einige andere Physiker, dass im No-Cloning-Theorem mehr steckt als nur eine Antwort auf Herberts seltsamen Artikel oder die Basis für einen ungemütlichen Waffenstillstand zwischen Verschränkung und Relativitätstheorie. 1984 entwickelten der amerikanische Informatiker Charles Bennett und sein kanadischer Kollege Gilles Brassard ausgehend vom No-Cloning-Theorem das erste Protokoll für die »Quantenverschlüsselung« – ein völlig neuartiges Verfahren, um digitale Signale vor dem Abhören zu schützen. Wie Bennett und Brassard erkannten, folgt aus der Tatsache, dass die Quantenmechanik das Kopieren eines unbekanntem Quantenzustands verbietet, die Möglichkeit, Geheimbotschaften durch verschränkte Photonen zu kodieren. Wenn jemand versucht, eines dieser Photonen abzufangen und zu kopieren, zerstört er sofort das gesamte Signal und offenbart den Abhörversuch.

Seither steht die Quantenverschlüsselung im Mittelpunkt einer weltweit betriebenen Forschungsdisziplin, der Quanteninformatik. Die Physiker Anton Zeilinger an der Universität Wien und Nicholas Gisin an der Université de Genève haben bereits das Quantenverschlüsseln von Banküberweisungen und elektronischen Wahlvorgängen demonstriert. Am Beginn all dessen stand Herberts ebenso faszinierendes wie fehlerhaftes FLASH-Schema.

Das genetische Paradoxon

Das zweite Beispiel für einen fruchtbaren Irrtum betrifft den deutsch-amerikanischen Biophysiker Max Delbrück (1906–1981), der als Professor an der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee) und später am California Institute of Technology in Pasadena lehrte. Als Student übernahm Delbrück



Max Delbrück und seine Mitarbeiter wollten herausfinden, wie Gene funktionieren und woraus sie bestehen. Als Modellorganismen wählten sie Bakteriophagen – Viren, die Bakterien befallen. Im Jahr 1943 untersuchten sie mit ihrem »Fluktuationstest«, wie Bakterien mutieren und resistent gegen Virusinfektion werden. Dabei stützte sich Delbrück auf ein von ihm entwickeltes statistisches Verfahren, um die Reproduktion der Viren zu erforschen. Der Test erwies sich als ein bahnbrechendes Experiment – aber nicht für die Erforschung von Viren, sondern von Bakterien.

aus Bohrs berühmter Vorlesung von 1932 über »Licht und Leben« die Idee, beim Erforschen biologischer Prozesse entstünden neue Paradoxien, deren Lösung wiederum zur Entdeckung neuer physikalischer Gesetze führen könne. Delbrück sammelte weitere Forscher um sich, und aus dieser Zusammenarbeit entstand nach dem Zweiten Weltkrieg die Molekularbiologie.

In den 1940er Jahren lautete eine Grundfrage: Was ist ein Gen? Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts hatte der Mönch Gregor Mendel die Existenz von Erbfaktoren, den später so genannten Genen, postuliert, die zwei entscheidende Eigenschaften haben: die Fähigkeit, sich zu duplizieren, sowie jene, zu mutieren. Letzteres bedeutet, dass spontan Genvarianten – Mutationen – entstehen können, die danach ebenso dupliziert werden wie das ursprüngliche Gen.

Aber in den 1940er Jahren wusste niemand, woraus Gene bestehen oder wie sie sich reproduzieren. Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) betonte 1944 in seinem Buch »Was ist Leben?«, kein gewöhnliches physikalisches System sei zur Selbstreplikation fähig. Wenn Gene diese Fähigkeit besäßen, müssten sie den zweiten Hauptsatz der Thermodynamik überlisten.

Delbrück suchte nach dem atomaren Gen – dem nicht mehr weiter teilbaren physikalischen System, das für die Mysterien der Vererbung verantwortlich ist. Dafür beschloss er, die kleinsten und einfachsten biologischen Einheiten zu erforschen: die Viren. Insbesondere wählte er Bakteriophagen – kurz Phagen –, das sind Viren, die Bakterien befallen. Sie sind besonders leicht zu isolieren und wachsen sehr schnell. Zwar vermehren sich Phagen wie alle Viren nur innerhalb einer Wirtszelle, doch Delbrück versuchte diese vermeintlich unnötige Komplikation zu missachten. Mit

seinem Kollegen Emory Ellis entwickelte er eine Züchtungsmethode, die ihnen erlaubte, sich auf die Vermehrung der Phagen zu konzentrieren und die Komplexität der infizierten Bakterienzellen zu ignorieren.

Delbrück war davon überzeugt, dass Gene aus Protein bestehen. Er dachte: Wenn man weiß, wie die Proteine der Viren sich reproduzieren, dann versteht man auch die Gene. Und um die Vermehrung von Viren zu erforschen, ist es am besten, ihnen beim Vermehren zuzusehen.

Doch wie geht das? Da die Reproduktionszeit unterschiedlicher Bakteriophagen variiert, heckten Delbrück und sein Mitarbeiter, der italienische Mikrobiologe Salvador Luria (1912–1991), folgenden Trick aus: Man infiziert eine Bakterienart mit zwei Phagenstämmen, die sich verschieden schnell vermehren; dann kann man Zwischenstufen der langsameren Vermehrung ertappen, wenn die Zellen platzen und ihren parasitären Inhalt entleeren.

Das Experiment mit der Doppelinfection verlief allerdings nicht wie geplant. Wie Luria und Delbrück feststellten, verhinderte die Infektion mit dem einen Virenstamm die Ansteckung durch den anderen. Ungefähr gleichzeitig untersuchte der Biophysiker Thomas Anderson an der University of Pennsylvania in Philadelphia die Probe eines Phagenstamms von Delbrück und Luria unter dem Elektronenmikroskop. Wie er entdeckte, war das Virus viel komplexer als vermutet; jedenfalls bestand es gewiss nicht bloß aus einem einzelnen atomaren Gen. Das Teilchen hatte die Form einer Kaulquappe, es enthielt außer Proteinen auch Nukleinsäuren, und es heftete sich an die Außenseite von Bakterien, um eine Infektion auszulösen. Delbrücks Vorstellung, ein Virus entspräche mehr oder weniger einem Gen, begann sich aufzulösen.

Aber Delbrück blieb bei seiner Ansicht. Um die Resistenz einiger Bakterienstämme gegen Phageninfektion zu erklären, konzipierten Luria und er den so genannten Fluktuationstest: Sie infizierten mehrere Bakterienkolonien mit für diese tödlichen Phagen, und nach ein bis zwei Tagen Wartezeit ermittelten sie die Anzahl der »überlebenden« und somit resistenten Kolonien. Mit einem von Delbrück konzipierten statistischen Modell ließ sich erkennen, ob die Resistenz durch nachträgliche Anpassung der Bakterien entstanden war oder durch eine Auslese unter bereits vorhandenen Mutationen.

Das raffinierte Experiment lieferte zwar kaum Erkenntnisse über Virusreplikation, doch dafür zeigte es, dass Bakterien sich nach darwinschen Regeln entwickeln: durch Zufallsmutationen, die gelegentlich Überlebensvorteile bieten. Dieser Meilenstein der Bakteriengenetik eröffnete völlig neue Forschungsgebiete. Nicht zuletzt dafür erhielten Delbrück und Luria 1969 – zusammen mit dem amerikanischen Biologen Alfred Hershey (1908–1997) – den Medizinnobelpreis.

Zu Delbrücks Ärger brachte der Fluktuationstest die Forschung über Virusreproduktion nicht voran. Im Jahr 1946 beschwerte er sich sogar öffentlich, die von ihm geschaffenen »explosiven« Möglichkeiten der Bakterienforschung drohten die Virusforschung an den Rand zu drängen. Außerdem wurde bald klar, dass der Phage das Zellmaterial seines Wirtsbakteriums zur Fortpflanzung benötigt. Im Gegensatz zu Delbrücks vorschneller Annahme durfte der Wirt also keinesfalls vernachlässigt werden.

Dennoch erwies sich seine instinktive Konzentration auf das einfache System als sehr fruchtbar – obwohl er dabei die Komplexität der Bakteriophagen weit unterschätzte. Der Phage wurde zum Modellorganismus für eine ganze Biologengeneration; er sollte sogar bei der Entschlüsselung der DNA-Struktur eine Rolle spielen. Delbrück hatte sein Forschungsobjekt geschickt ausgewählt und bahnbrechende Analysemethoden ersonnen.

Ehre, wem Ehre gebührt

In den 1950er Jahren gab er die Phagenforschung ganz auf und konzentrierte sich anhand des Pilzes *Phycomyces* auf die Biophysik der Sinneswahrnehmung. Zwar konnte er einige junge Physiker zur Arbeit an dem neuen Modellsystem gewinnen, doch erwies es sich als viel weniger ergiebig als die Phagen. Trotzdem blieb er ein lebhafter Kritiker anderer Phagenexperimente, und seine Neigung, wichtige Entdeckungen falsch einzuschätzen, wurde legendär. Der Schweizer Molekularbiologe Jean Weigle (1901–1968) vom California Institute of Technology erzählte gern von einem jungen Forscher, den Delbrücks Reaktion auf ein von ihm vorgeschlagenes Experiment am Boden zerstört hatte. Delbrück mochte die Idee – ein sicheres Zeichen dafür, dass sie hoffnungslos war. Wer auf der richtigen Spur war, durfte als höchstes Lob von Delbrück erwarten: »Ich glaube kein Wort davon!«

In beiden geschilderten Beispielen brachten kluge Wissenschaftler falsche Ideen vor. Ihre Fehler regten wichtige

Entwicklungen in unterschiedlichen Gebieten der Grundlagenforschung an. Binnen kurzer Zeit gingen daraus aufwändige Forschungsprogramme und Industriezweige hervor, die unser heutiges Leben prägen.

Doch in einem wichtigen Punkt hatten Herberts und Delbrücks Fehler ziemlich unterschiedliche Folgen. Delbrück erfreute sich mit Recht einer ungemein erfolgreichen Karriere. Er schätzte unkonventionelle Ideen und unterwarf sogar die beste Forschung eingehender Kritik. Sein hoher wissenschaftlicher Rang wurde durch Irrwege nicht geschmälert. Herbert hingegen kam nur mit Mühe über die Runden, lebte sogar zeitweise von Sozialhilfe – kaum angemessen für einen Denker, dessen Arbeit dazu beitrug, tiefe quantenmechanische Probleme zu klären und eine völlig neuartige Technologie vorzubereiten.

Angesichts solch enorm unterschiedlicher Laufbahnen brauchen wir offenbar ein neues Bezugssystem für das Ansehen, das wir Naturwissenschaftlern zubilligen. Wer wissenschaftliche Beiträge bewerten will, wird niemals über so eindeutige Kriterien verfügen wie ein Fußballstatistiker, der fleißig Torschüsse, Eckbälle und Abseitsstellungen zählt. Die Bedeutung wissenschaftlicher Fehler wandelt sich mit der Zeit. Es mag sich lohnen, gewisse schöpferische Sprünge auch dann anzuerkennen – und zu ermuntern –, wenn sie in die Irre gehen; denn sie treiben die Forschung voran. ~

DIE AUTOREN



David Kaiser ist Professor für Wissenschaftsgeschichte am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge. Er promovierte sowohl in Physik als auch in Wissenschaftsgeschichte an der Harvard University in Cambridge (Massachusetts). **Angela N.H. Creager** ist Geschichtspräsidentin an der Princeton University (New Jersey). Sie promovierte in Biochemie an der University of California in Berkeley und studierte anschließend Wissenschaftsgeschichte in Harvard und am MIT.

QUELLEN

Creager, A.: The Life of a Virus: Tobacco Mosaic Virus as an Experimental Model, 1930–1965. University of Chicago Press, Chicago 2001
Holton, G. (Hg.): Errors: Consequences of Big Mistakes in the Natural and Social Sciences. In: Social Research 72 (Sondernummer), 2005
Kaiser, D.: How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival. W.W. Norton, New York 2011

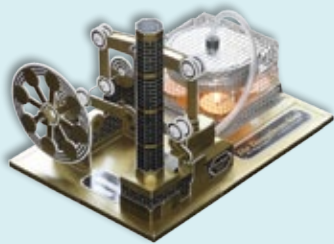
WEBLINKS

www.spektrum.de/FruchtbareFehler
 Eine ausführliche Erklärung, wie Nick Herberts *Telegraf mit Überlichtgeschwindigkeit funktionieren sollte*

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171186



Unser besonderer Tipp:



DIE DAMPFMASCHINE – KARTONBAUSATZ

Kartonbausatz für eine vollfunktionsfähige Dampfmaschine

komplett mit Zubehör, Länge 30 cm, Breite 21 cm, Höhe 21 cm, SunWatch

Bestell-Nr. 3769 € 32,90

Eine Dampfmaschine als Kartonbausatz, die von richtig kochendem Dampf angetrieben wird – kann das gut gehen? Aber ja, und viel! Überzeugen Sie sich selbst: Dieses Modell ist nicht nur prächtig anzuschauen, es funktioniert auch prächtig. Der Kessel aus korrosionsfestem Aluminium hat ein magnetisches Überdruckventil, das Feuer aus 5 Teelichtern wird durch ein verzinktes Drahtgitter abgeschirmt und der Dampf wird durch ein geschlossenes Schlauch- und Foliensystem geleitet und über einen Kamin ins Freie entlassen. Die Kraftentfaltung bleibt zwar bescheiden, der sicherheitsrelevante Kesseldruck dafür aber auch. Bauzeit je nach Bastelerfahrung 10–15 Stunden.



LERNPAKET EXPERIMENTE MIT DEM STIRLINGMOTOR

2012, Stirlingmotor, Generator, Steckbrett, 20 Bauteile und Handbuch, Franzis

Bestell-Nr. 3526 € 149,-

Dieses Franzis-Lernpaket enthält ein voll funktionsfähiges Stirlingmotor-Modell, einen elektrischen Generator, ein Experimentiersteckbrett und viele weitere Elektronikbauteile. Damit können Sie Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten des Stirlingmotors praktisch erfahren und erforschen. Das Modell ist komplett vormontiert und kann nach dem Zusammenbau des Brenners sofort in Betrieb genommen werden. Dazu brauchen Sie nichts weiter als handelsüblichen Brennspritus (nicht enthalten). Das Handbuch führt vom einfachen Bauteil zum fertigen Projekt. Die physikalischen Grundlagen und die unterschiedlichen Typen der Stirlingtechnik werden genau erklärt.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,-

Acht verschiedene gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengesetzt. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult so spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.



IPSOL 4/4S SOLAR

Ladeschale mit eingebautem 2400-mAh-Lithium-Polyme-Akku für iPhone 4/4S

mit Micro USB-Kabel, Farbe: schwarz, Inprosolar

Bestell-Nr. 3716 € 89,-

Die Ladeschale verschmilzt mit dem iPhone zur einer Einheit. Sie ist sehr ergonomisch in der Handhabung und löst mit dem zusätzlichen Energiespeicher jedes Problem des täglichen Nachladens. Und wenn mal keine Energie in beiden Speichern vorliegt, sorgt das Solar-Modul für eine vernünftige Notstromversorgung: 1 Stunde in der Sonne laden ermöglicht 1 Stunde telefonieren.



ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren des Biskuitporzellans erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!



ZAHLEN AM LAUFENDEN METER Albrecht Beutelspachers Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x 2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.



DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schieber-

steuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfkondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan



WISSENSBECHER MATHEMATIK

Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK

Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE

Bestell-Nr. 3432 € 9,95

VIDEO-HELICOPTER SAFARI RTF/ GSY/3+3CH/MHZ Mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und LED-Beleuchtung

LxBxH: 365x85x175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beliebiges Ladegerät, Controller mit 6x1,5-V-AA-Batterien (nicht enthalten), Revell

Bestell-Nr. 3717 € 99,-

Ready-to-Fly-MHZ-Helikopter in auffälligem Design mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und über die Fernsteuerung schaltbarer LED-Beleuchtung. Der Helikopter hat sehr gute Flugeigenschaften durch das elektronische Kreiselsystem (Gyro) und ist gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät. Indoorgeeignet – Outdoor nur bei Windstille. Einsteigermodell, ab 15 Jahren.



Bequem bestellen:

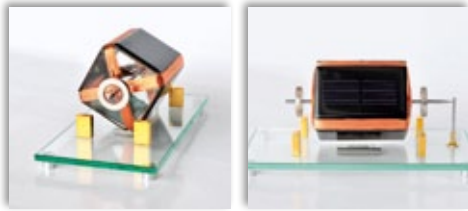
→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas,
Maße: 20 x 10 x 10 cm, Carl Aero

Bestell-Nr. 3652 € 159,-

Dieser Solar-Elektromotor ist eine Konstruktion, die schon auf den ersten Blick Aufmerksamkeit erregt. Oft wird erstaunt gefragt, wie sich ein solcher frei schwebender Körper überhaupt in Bewegung versetzt.

Der Motor verfügt über eine Lagerung aus sechs Hochleistungs-Neodym-Magneten. Dadurch scheint der Anker des Motors frei im Raum zu schweben. Der Anker selbst ist mit hocheffizienten monokristallinen Solarzellen bestückt. Diese liefern nur dann Strom, wenn sie sich im Lauf der Drehbewegung jeweils auf der Oberseite befinden. Die Kommutation dieses Motors findet auf optischem Weg statt.

Ein Video zum *Mendocino-Motor* finden Sie hier:
www.science-shop.de/artikel/1156118

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):
Bestell-Nr. 3653 € 139,-



DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker
für Freizeit, Sport
und Alltag

Mit 2 Schnüren zum
Üben in Metallbox,
moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.



Thomas Riegler

DAS GROSSE RETRO-RADIO-BAUBUCH

2012, 32seitiges Buch und alle
Bauteile für ein Mittelwellenradio
im Retro-Stil, ohne Löten, Franzis

Bestell-Nr. 3757 € 29,95

Das dekorative Retro-Radio-Gehäuse lässt Ihr fertiges Radio fast wie ein original Grundig-Gerät Modell 2012 aussehen. Zusätzlich brauchen Sie nur noch eine 1,5-V-Batterie Typ AA (nicht enthalten), und schon kann es losgehen! Und im Begleitbuch: Alles, was zum Bau Ihres Radios und zum Verständnis seiner Technik notwendig ist, auf 30 Seiten mit großen, farbigen Abbildungen und Grafiken.



FLEDERMAUSDETEKTOR ZUM SELBERBAUEN

Inhalt: Buch und alle Bauteile,
zusätzlich benötigt werden: Löt-
kolben für den Aufbau, 9-V-Batterie
(nicht enthalten), Franzis

Bestell-Nr. 1929 € 29,95

Belauschen Sie die Natur mit moderner Elektronik! Die Platine des Bausatzes ist bereits mit zahlreichen SMD-Bauelementen bestückt. Sie müssen nur noch wenige Teile selbst einlöten und die Platine mit Mikrofon, Lautsprecher und den Einstellreglern verdrahten. Moderne integrierte Schaltungen sorgen für hohe Empfindlichkeit und Lautstärke. Mit dem fertigen Detektor lassen sich die Ultraschall-Rufe von Fledermäusen hörbar machen. So können Sie diese faszinierenden Flugkünstler in der Dunkelheit auch dort aufspüren, wo sie sonst völlig unbemerkt auf der Jagd nach Insekten sind.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker,
Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv:
42 mm. Benötigt wird eine
CR123A-Batterie (nicht im Liefer-
umfang enthalten), Omeon

Bestell-Nr. 3655 € 199,-

Das *Night Eye* ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. *Night Eye* ist kompakt und mit einer Hand bedienbar.



BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-
Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox
mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern
und Deckgläschen, Präparierbesteck,
Garnelenbrutanlage, MikrOkular II mit
Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618 € 89,-

Hochwertiges Schülermikroskop
mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, einem MikrOkular I (PC-Okular mit 640 x 480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optische Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.

Das Zometool Konstruktionssystem bietet die einfache Möglichkeit, fast alle geometrischen Grundkörper und ihre Beziehungen untereinander zu erforschen. Jetzt gibt es das beliebte Konstruktionssystem auch in elegantem Schwarzweiß.



ZOMETOOL DESIGN 5

227 Teile mit 8-seitiger
Beschreibung, Zometool

Bestell-Nr. 3760

€ 60,-

Design 5 beschäftigt

sich vor allem mit dem Rhombentrikontaeder. Sie können einen Rhombentrikontaeder mit weißen Streben und Kugeln bauen, ferner die Schattenprojektionen dieses 3-D-Modells in 2-facher, 3-facher und 5-facher Symmetrie.

ZOMETOOL DESIGN 3



120 Teile mit 8-seitiger
Beschreibung, Zometool

Bestell-Nr. 3759

€ 30,-

Um die Schönheit der

Symmetrien zu zeigen, beschäftigen wir uns hier mit dem Würfel. Seine hohe Symmetrie wird durch die Gleichartigkeit seiner Kanten, Ecken und Flächen bestimmt.

ACHTUNG! Nicht für Kinder unter 3 Jahren geeignet.
Erstickungsgefahr wegen verschluckbarer Kleinteile.



Carmen Skupin

ABENTEUER ELEKTRONIK

2012, Set aus Bauteilen und Buch,
24 S. m. zahlr. farb. Abb., ab 8 Jahren,
Franzis

Bestell-Nr. 3742 € 29,95

Ob drinnen oder draußen, bei
Tag oder Nacht, in diesem Set
immer das richtige Elektronikabenteuer.

Das Einzigartige an diesem Bastelbuch: alle elektrischen Teile sind bereits enthalten und die restlichen Materialien lassen sich in jedem Haushalt finden. Carmen Skupin will mit diesem Experimentierbuch Mädchen und Jungen für Elektronik begeistern.



SOLAR- METALLRADLER

L 14,5 cm x B 12 cm x H 13 cm,
InproSolar

Bestell-Nr. 2815 € 49,95

Bekommt der Radler Licht,
setzt er sich gemächlich in
Bewegung – ein Schelm, wer da an die Tretmühle
denkt, in der wir alle stecken! Die edle Verarbeitung,
die massive Grundplatte und die technische Aus-
stattung machen den Radler zu einem wertvollem
Geschenk.

Bequem
bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

CHEMISCHE UNTERHALTUNGEN

Überraschungen aus der Molekülwelt

Chemiker entdecken immer wieder Verblüffendes – etwa eine Verbindung zwischen Gold und dem Edelgas Xenon. Manchmal ist ein Ergebnis aber gar nicht so erstaunlich, wie es zunächst aussieht.

VON ROALD HOFFMANN

In den nun schon bald 50 Jahren als Chemiker habe ich durch Kollegen oder aus Fachveröffentlichungen von sehr vielen zuvor unbekanntem Molekülen erfahren. Einige haben mich überrascht. Im Nachhinein frage ich mich, was es eigentlich ist, das mich über ein neues Molekül staunen lässt. Diese Frage ist gar nicht so einfach zu beantworten, und es lohnt, ihr hier anhand einiger Beispiele nachzugehen.

Einige neue Moleküle sind überraschend, weil es sich um Abwandlungen derart vertrauter Strukturelemente handelt, dass vorher niemand auf die Idee gekommen war, etwas daran zu ändern. Nehmen wir eine Substanzklasse, die den zunächst kryptisch wirkenden Namen N-invertierte Porphyrine trägt, der sich bei genauerer Betrachtung jedoch als sehr passend und einleuchtend entpuppt.

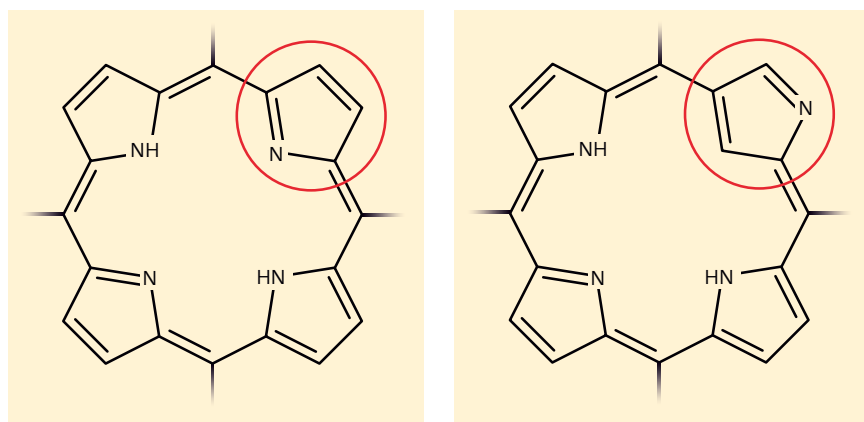
Porphyrine (links im nebenstehenden Bild) sind eine in der Natur weit verbreitete Stoffgruppe. Sie enthalten vier so genannte Pyrrolringe – Fünfringe mit vier Kohlenstoffatomen und einem Stickstoff. Diese sind so zu einem größeren Ring verbunden, dass die Stickstoffatome in die leere Mitte zeigen. Dort sitzt in der Regel ein Metallatom, zum Beispiel Eisen in der Häm-Einheit des Blutfarbstoffs Hämoglobin. Dessen tiefrote Farbe war auch namensgebend für die Stoffgruppe (von griechisch: porphyreos = dunkelrot). Das Pyrrol dagegen erhielt seine übliche Bezeichnung – in der systematischen Nomenklatur heißt es Azol, was aber kaum jemand sagt –, weil seine Dämpfe einen

in Salzsäure getauchten Fichtenspan feuerrot (griechisch: pyrrhos) färben.

In den N-invertierten Porphyrinen (rechts im Bild unten) ist ein Pyrrolring (rot eingekreist) »invertiert«, das heißt umgedreht, so dass statt des Stickstoffs ein Kohlenstoffatom ins Zentrum zeigt. So klein die Änderung, so groß der Unterschied bei den Eigenschaften des Moleküls; zum Beispiel ist es nicht mehr eben und bindet auch kein Eisen mehr. Deshalb bin ich froh, dass jemand darauf kam, ein klassisches System so zu »verdrehen«. Tatsächlich hatten sogar zwei Forschergruppen fast gleichzeitig diese Idee. Es waren die Teams von Lechoslaw Latos-Grazinsky an der Universität Breslau (Polen) und von Hiroyuki Furuta an der Universität Oita (Japan), die beide 1994 erstmals über N-invertierte Porphyrine berichteten.

Einige neue Moleküle sind dagegen verblüffend, weil sie zuvor schlicht unmöglich schienen. Zum Beispiel sah es lange Zeit so aus, als würden die Edelgase keinerlei Reaktionen eingehen, was ihnen auch ihren Namen eintrug. Inzwischen hat sich jedoch gezeigt, dass einige von ihnen mit sehr reaktionsfreudigen Elementen wie Fluor, Chlor, Sauerstoff und Kohlenstoff durchaus Verbindungen bilden. Das gilt insbesondere für das Xenon.

Aber nie hätte ich mir träumen lassen, dass dieses Edelgas auch mit dem fast genauso reaktionsträgen Edelmetall Gold (Au) eine Liaison eingeht – und das sogar als »Ligand«, der zur Bindung an das Metallatom eines seiner Elektronenpaare zur Verfügung stellt. Normalerweise bestehen solche Liganden aus einem Ion oder Molekül, nicht aber ei-



Porphyrine enthalten vier Ringe aus jeweils vier Kohlenstoffatomen und einem Stickstoffatom, wobei letzteres nach innen zeigt (links, roter Kreis). In N-invertierten Porphyrinen ist ein Ring umgedreht, so dass sein Stickstoffatom (N) nach außen weist (rechts). Die Eigenschaften der beiden Moleküle unterscheiden sich erheblich.

AMERICANSOCIETY, NACH: ROALD HOFFMANN

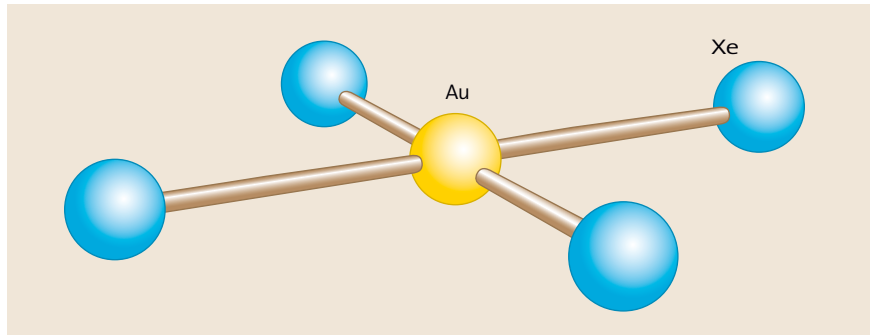
nem nackten Atom. Es war also eine Sensation, als 2000 Stefan Seidel und Konrad Seppelt von der Freien Universität Berlin das Kunststück vollbrachten, einen quadratisch planaren AuXe_4^{2+} -Komplex herzustellen (Bild rechts).

Quetschen von Benzol im Computer

Eine dritte Art von Überraschung habe ich kürzlich in meinem eigenen Labor erlebt. Darauf möchte ich hier ausführlicher eingehen, weil mir die Geschichte am lehrreichsten zu sein scheint; denn es war eine Überraschung, die eigentlich keine hätte sein dürfen.

Xiao-Dong Wen, ein talentierter Postdoc in der kleinen Gruppe, die ich zusammen mit Neil Ashcroft an der Cornell University in Ithaca (New York) leite, wollte durch theoretische Berechnungen herausfinden, was mit Benzol (C_6H_6) unter sehr hohem Druck geschieht. Experimentatoren quetschen es schon seit einigen Jahren zwischen Diamantambossen. Dabei entsteht unter extremen Bedingungen aus dem ringförmigen Molekül, das unter Normalbedingungen flüssig ist, schließlich ein bisher nur schlecht charakterisierter amorpher Festkörper – ein Polymer, in dem sich Benzolringe über Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen miteinander verknüpft haben. Als Theoretiker interessieren sich meine Mitarbeiter und ich schon seit Längerem für eine hypothetische metallische Hochdruckform von Benzol, in der sich womöglich Elektronen, Protonen und Kohlenstoffatome mehr oder weniger frei und unabhängig voneinander bewegen können.

Wie Xiao-Dong anhand seiner Berechnungen herausfand, sollte sich Benzol bei genügend hohem Druck spontan gleich in eine ganze Familie von regelmäßigen zweidimensionalen Polymeren verwandeln und nicht nur in ein einziges (Bild auf S. 86). Dabei bleibt das Mengenverhältnis 1:1 zwischen Wasserstoff (H) und Kohlenstoff (C) erhalten. Im Gegensatz zu Benzol enthalten die Polymere allerdings nur



Xenon (Xe) galt lange Zeit als unfähig zu einer chemischen Reaktion. Doch wie sich später herausstellte, verbindet es sich unter geeigneten Bedingungen sehr wohl mit anderen Elementen – beispielsweise mit Halogenen, Sauerstoff und Kohlenstoff. Die größte Überraschung aber war, dass es sogar eine Verbindung mit Gold (Au) bildet, das ebenfalls sehr reaktionsträge ist. Forscher in Berlin konnten um die Jahrtausendwende das Molekül $\text{AuXe}_4(\text{Sb}_2\text{F}_{11})_2$ herstellen, welches das hier gezeigte quadratisch planare AuXe_4^{2+} -Ion enthält; Sb steht für Antimon und F für Fluor.

noch Kohlenstoff-Kohlenstoff-Einfachbindungen. Chemiker bezeichnen sie als Graphane – in Anlehnung an eine andere Substanz, die kürzlich Berühmtheit erlangte: Graphen.

Vor drei Jahren erhielten Andre Geim und Konstantin Novoselov, beide an der University of Manchester in England, den Physiknobelpreis, weil es ihnen 2004 gelungen war, Graphen aus Graphit zu isolieren und seine höchst ungewöhnlichen Eigenschaften zu bestimmen (siehe Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 16). Schon lange wusste man, dass im Graphit wabenförmige Kohlenstoffschichten nur durch schwache zwischenmolekulare Kräfte lose aneinander gebunden sind. Doch brauchte es die Kühnheit, ein geradezu lächerlich simples Verfahren anzuwenden, um diese Schichten voneinander zu trennen: Geim, Novoselov und ihre Mitarbeiter zogen einfach einen Block reinsten Graphits über ein Stück durchsichtiges Klebeband. So erhielten sie in reproduzierbarer Weise Mehrfach- und Einfachschichten, die sie genauer untersuchen konnten. Für die Einfachschicht hatte Hans-Peter Boehm von der Universität München schon früher den Namen Graphen vorgeschlagen.

Graphen enthält wie Benzol ein delokalisiertes System aus alternierenden Kohlenstoff-Einfach- und -Doppelbindungen, was ihm seinen »aromatischen« Charakter verleiht (darauf gehe ich weiter unten näher ein). Sein Name leitet sich einerseits vom Graphit und andererseits von den Alkenen ab. Das sind Kohlenwasserstoffe mit Doppelbindungen. Durch Hydrierung, also Anlagerung von Wasserstoff, gehen sie in Alkane über, die keine Doppelbindung mehr enthalten. Analog ist Graphen gewissermaßen ein hydriertes Graphen, das gleichfalls seine Doppelbindungen eingebüßt hat. Wie beim Graphen bilden die Kohlenstoffatome ein wabenartiges Netz aus aneinandergefügten Sechsecken, die allerdings nicht mehr eben, sondern gewellt sind. Das liegt daran, dass jedes Kohlenstoffatom nun ein Wasserstoffatom trägt. Aus drei Bindungen, die in einer Ebene liegen und einen Winkel von 120 Grad einschließen, sind dadurch vier geworden, die unter einem Winkel von etwa 109,5 Grad ein Tetraeder aufspannen.

Dasselbe passiert, wenn Benzol zum Cyclohexan hydriert wird. Auch in diesem Fall wellt sich der Sechsring. Das kann allerdings auf verschiedene Arten

geschehen, wobei Anordnungen entstehen, die beispielsweise an einen Sessel oder eine Wanne erinnern. Beim Cyclohexan können diese Formen – Chemiker sprechen von Konformationen – ineinander übergehen.

Beim Graphan, in dem die Sechsringe starr miteinander verbunden sind, ist das nicht der Fall. Hier bleibt die einmal gebildete Struktur bestehen und hängt davon ab, von welcher Seite sich die Wasserstoffatome an das Graphen anlagern. Kommen sie in regelmäßigem Wechsel von oben und unten, entsteht das, was die Chemiker als »all-chair«-Konformation bezeichnen: Alle Sechsecke haben darin die Sesselform (nebenstehendes Bild, oben). Denkbar ist aber auch eine Variante, in der alle Sechsringe in Wannenform vorliegen (Mitte). Schließlich gibt es eine dritte mögliche Struktur (unten). Sie ist insofern interessant, als sie ganz ähnlich in Hunderten von Metalllegierungen vorkommt – beispielsweise in BaIn_2 oder TiNiSi .

Graphen gibt es tatsächlich, aber was ist mit Graphan? Ein Stoff, den Daniel C. Elias und seine Kollegen an der University of Manchester 2009 hergestellt haben, kommt ihm wohl am nächsten. Inwieweit es sich dabei wirklich um Graphan handelt, lässt sich allerdings nicht sicher sagen; denn es gibt von dem Material keine röntgenografisch ermittelte Kristallstruktur, sondern lediglich grobe Bilder, die mit einem Transmissionselektronenmikroskop angefertigt wurden.

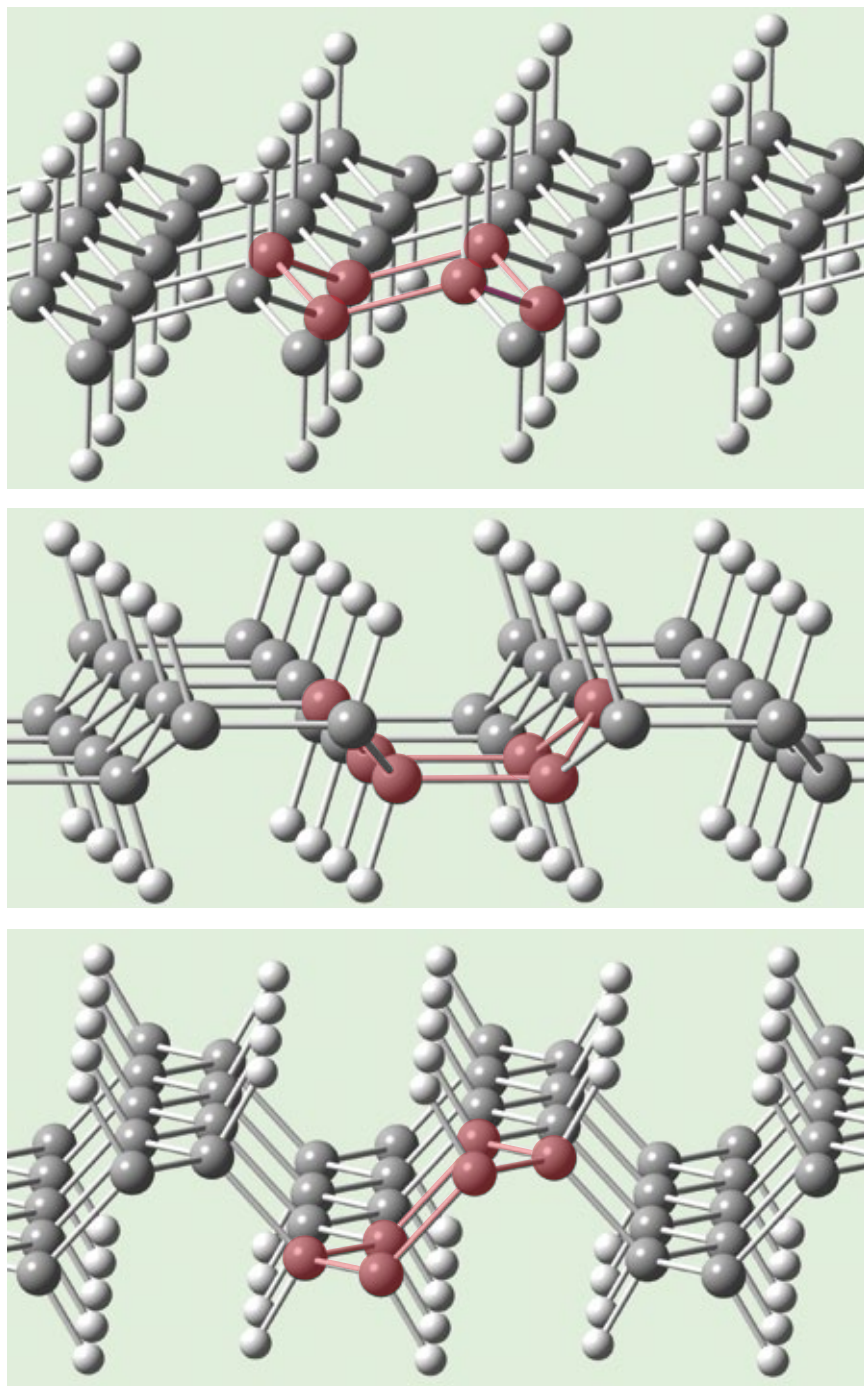
Unerwartete Instabilität

Die Berechnungen von Xiao-Dong gaben nicht nur Auskunft über die Bindungsverhältnisse in den verschiedenen Graphanen, sondern auch über deren Stabilität. Demnach sollten alle drei über einen weiten Druckbereich pro CH-Einheit thermodynamisch stabiler sein als Benzol. Als mein Mitarbeiter mir das erzählte, sagte ich, was die meisten anderen Chemiker wohl auch sofort gesagt hätten: »Mit deinen Rechnungen kann etwas nicht stimmen.« Doch Xiao-Dong widersprach energisch. Und als er mir dann bewies, dass

seine Berechnungen in der Tat absolut korrekt waren, lehnte ich mich erst einmal zurück und schloss eine Weile die Augen.

Meine durch 50 Jahre Praxis geschärfte chemische Intuition sagte mir,

dass kein Kohlenwasserstoff mit einem C-H-Verhältnis von 1 stabiler sein kann als Benzol. Benzol ist der Prototyp eines aromatischen Moleküls, ein Grundbaustein der Chemie, ja der unverrückbare Fels, auf den sie zu großen Teilen ge-



Theoretischen Berechnungen zufolge sollte sich Benzol bei hohem Druck spontan in Graphane umwandeln: regelmäßige zweidimensionale Polymere, die keine Doppelbindungen mehr zwischen den Atomen haben. Sie kommen in mehreren Varianten vor, die sich darin unterscheiden, wohin die Wasserstoffatome in den gewellten Sechsringen zeigen. Diese Ringe sind in zwei Fällen (oben und unten) wie Sessel und in einem (Mitte) wie Wannen geformt (rot).

ROYAL LIFEMANN

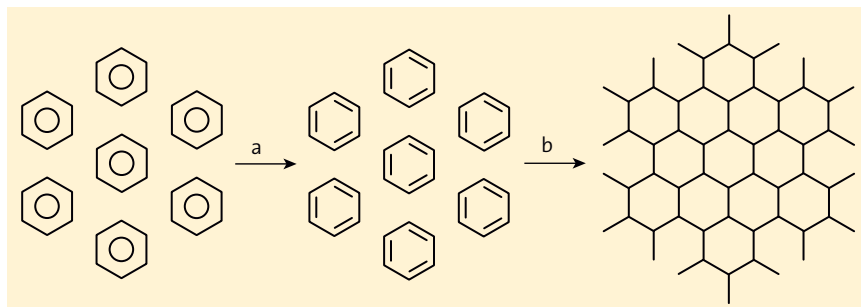
baut ist. Der ebene Sechsring bildet den Ausgangspunkt für eine Unmenge von Substanzen, in denen die Wasserstoffatome ganz oder teilweise durch andere Elemente oder Gruppen ersetzt sind. So gelangt man auf Wegen, welche die Chemiker teils schon im 19. Jahrhundert beschrrieben, zum Chlorbenzol (C_6H_5Cl), zum Toluol ($C_6H_5CH_3$), zum Nitrobenzol ($C_6H_5NO_2$), zum Explosivstoff Trinitrotoluol (TNT, $C_6H_2(CH_3)(NO_2)_3$), zu Aspirin, Mescaline, Novocain, Estron und zu jeder der Millionen inzwischen bekannten aromatischen Verbindungen. Und stets, in biologischen Systemen wie im Labor, bleibt der Kohlenstoff-Sechsring intakt – ein klarer Beweis für seine Stabilität.

Auch Theoretiker liefern Gründe, warum Benzol ungewöhnlich beständig ist. Sie verweisen darauf, dass sich die an den Doppelbindungen beteiligten Elektronen frei im Ring bewegen können, und sprechen von Mesomerie, Resonanz und einem delokalisierten $\pi(\pi)$ -System. All das erniedrigt die Energie des Moleküls und verleiht ihm seine einzigartige Stabilität. Dieses Konzept der »Aromatizität« ist so überzeugend und populär, dass die chemische Literatur geradezu davon wimmelt. Und so wird es gelegentlich auch in Fällen bemüht, in denen es tatsächlich gar keine Rolle spielt. Doch an der Stabilität des Stammmoleküls C_6H_6 ist nicht zu rütteln.

Außer dass Benzol instabil in Bezug auf die Umwandlung in Graphan ist. Das geht nicht nur klipp und klar aus den Rechnungen meines Mitarbeiters hervor – ich hätte es auch wissen müssen, wie ich nach einigem Nachdenken erkannte!

Ein aufschlussreiches Gedankenexperiment

Betrachten Sie die hypothetische Bildung von Graphan aus Benzolmolekülen (Bild rechts oben). Diese werden im ersten Schritt – zumindest auf dem Papier – ihrer Aromatizität beraubt. Die Doppelbindungen sind dann lokalisiert, und wir haben es mit Cyclohexatrienen zu tun. So hatte sich August Kekulé, einer der Pioniere der chemischen



Ein Gedankenexperiment zur Bildung von Graphan aus Benzol. Im ersten Schritt (a) werden die Doppelbindungen in jedem Benzolmolekül lokalisiert, wodurch es seine besondere Stabilität verliert. Im zweiten Schritt (b) verbinden sich die so entstandenen Cyclohexatrien-Moleküle miteinander, indem sie auf Kosten der drei Doppelbindungen im Ring sechs Einfachbindungen zu den jeweiligen Nachbarn bilden.

Strukturtheorie, Mitte des 19. Jahrhunderts Benzolmoleküle vorgestellt, als ihm in jenem berühmten Tagtraum aufging, dass sie ringförmig sind. Wie viel wird wohl dieser »Verlust der Resonanzenergie« energetisch kosten? Dazu gibt es unterschiedliche Berechnungen, die 270 Kilojoule pro Mol als guten Schätzwert liefern. Ein Mol ist dabei die Menge einer Substanz in Gramm, die ihrer Molekülmasse (früher: Molekulargewicht) entspricht; ein Mol Benzol, dessen Molekülmasse 78 beträgt, sind also 78 Gramm.

Im nächsten Schritt verknüpfen sich die »entaromatisierten« Benzolmoleküle miteinander zu einem ebenen, zweidimensionalen Netzwerk. Dabei werden sechs Kohlenstoff-Kohlenstoff-Sigma(σ)-Bindungen gebildet. Tatsächlich sind es allerdings nur drei pro Ring, weil sich zwei Benzolringe jeweils eine neue Bindung teilen. Die drei Doppelbindungen in jedem Cyclohexatrien werden somit in genauso viele Einfachbindungen umgewandelt.

Wie sieht die Energiebilanz für diesen zweiten Schritt aus? Eine Doppelbindung besteht aus einer σ - und einer π -Bindung. Bei der ersten durchdringen sich die beteiligten Elektronenwolken weit gehend, bei der zweiten überlappen sie sich dagegen nur seitlich. Diese Bindung ist deshalb schwächer und damit energetisch weniger wert. Der Energieunterschied lässt sich jedoch nicht direkt messen. Eine Schätzung erhält man durch Vergleich mit der Umwand-

lung von drei Ethylen-Molekülen (C_2H_4) in ein Cyclohexan (C_6H_{12}). Auch dabei entstehen aus drei π - drei σ -Bindungen. Die bei dieser Reaktion in Form von Wärme freigesetzte Energie wurde experimentell zu 282 Kilojoule pro Mol bestimmt.

Man kann die zum Bruch einer π -Bindung benötigte Energie auch auf andere Art abschätzen. Im Ethylen zwingt die π -Bindung die beiden CH_2 -Gruppen in eine Ebene. Sie wird gebrochen, wenn man eine der beiden Gruppen um 90 Grad aus der Ebene herausdreht. Der Energieaufwand für diese Rotation lässt sich bestimmen und mit der Stärke einer C-C- σ -Bindung vergleichen. Das ergibt einen etwas höheren Schätzwert von 315 Kilojoule pro Mol für den Energiegewinn bei der Umwandlung von drei π - in σ -Bindungen.

Die Differenz der Werte für die beiden Schritte ist also $270 - 282$ (oder -315) = -12 (oder -45) Kilojoule pro Mol. Das aber heißt, dass Graphan energieärmer und damit stabiler ist als Benzol. Natürlich gehen in diese Überschlagsrechnung einige vereinfachende Annahmen ein, weshalb das Ergebnis mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist. Außerdem habe ich den offensichtlichen Beitrag der Entropie unterschlagen, die sich im zweiten Schritt erniedrigt, weil die Unordnung des Systems beziehungsweise die Anzahl seiner Freiheitsgrade dabei abnimmt. Das gibt dem Benzol einen zusätzlichen Stabilitätsbonus. Aber all diese Effekte sind so

klein, dass sie das Resultat nicht grundsätzlich ändern.

Auch die genaueren quantenchemischen Rechnungen von Xiao-Dong lieferten dasselbe Ergebnis. Ähnliche Kalkulationen mit gleichem Resultat hatten übrigens, wie ich erst später erfuhr, 2008 bereits Jorge O. Sofo, Ajay S. Chaudhari und Greg D. Barber von der Pennsylvania State University durchgeführt. Der Zahlenwert variiert je nach verwendeter quantenchemischer Methode etwas. Mein Mitarbeiter errechnete für das ausschließlich in der Sesselform vorliegende Graphan, dass es um 90 Kilojoule pro Mol C_6H_6 stabiler ist als Benzol. Ich frage mich, ob die Forscher aus Pennsylvania als chemisch nicht vorbelastete Physiker auch über ihr Ergebnis staunten. Vielleicht hat es ja nur mich überrascht, weil das Gewicht meiner chemischen Erfahrung allzu schwer auf mir lastete.

Warum lässt sich Graphan so schwer herstellen?

Aber sollte man eine Substanz, die thermodynamisch stabil ist, nicht auch leicht herstellen können? Nicht unbedingt. Ob sich eine Verbindung synthetisieren lässt, hängt nur zum Teil von ihrer thermodynamischen Stabilität ab. Eine fast ebenso wichtige Rolle spielen kinetische Faktoren. Chemie ist das Reich thermodynamisch stabiler oder – der interessantere Fall – auch instabiler Moleküle, die hohe Energiebarrieren daran hindern, ein energetisch günstigeres Arrangement anzunehmen. Das lässt sich mit einer Kugel vergleichen, die in der Mulde zwischen zwei Bergen gefangen ist und deshalb nicht von allein in die tiefer gelegene Ebene rollen kann; sie braucht erst einen kräftigen Stoß, der sie über den Muldenrand befördert.

Tatsächlich ist fast jedes Molekül in unserem Körper mit Ausnahme von Wasser, Kohlendioxid, Phosphat und einigen anderen kleinen Ionen in Gegenwart von Sauerstoff thermodynamisch nicht beständig. Gäbe es nicht hohe Barrieren bezüglich der Oxidation sowie das viele Wasser in unserem Gewebe, würden wir ganz hübsch brennen –

im wörtlichen Sinn, nicht nur vor Leidenschaft.


Ein weiteres Beispiel: Von den vier stabilsten Molekülen, die aus zwei identischen Atomen bestehen – N_2 , C_2 , P_2 und O_2 –, können Sie nur zwei, abgefüllt in stählernen Gasflaschen, käuflich erwerben. Die anderen beiden werden Sie nirgends bekommen. Hingegen sind zweiatomige Moleküle wie F_2 und Cl_2 , die sich viel leichter aufspalten lassen, ohne Weiteres erhältlich.

Sogar Benzol ist nicht nur energiereicher als Graphan, sondern auch thermodynamisch instabil in Bezug auf die Elemente, aus denen es besteht, wenn man deren übliche Modifikation betrachtet, nämlich Graphit und zweiatomiger Wasserstoff. Dennoch droht es nicht in diese Bestandteile zu zerfallen, denn die Barrieren für die Zersetzungsreaktion sind enorm.

Trotz der großen Stabilität von Graphan existiert kein Verfahren, es einfach aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen zusammenzubauen. Dasselbe gilt übrigens auch für die fußballartigen Fullerene. Elias und seine Kollegen schälten nach der Methode von Geim und Novoselov einzelne Graphen-Plättchen von Graphit ab, hängten sie auf wie Handtücher an der Wäscheleine und setzten sie einem Wasserstoffplasma aus.

Auch die oben geschilderte Herstellung von Graphan aus Benzol war nur ein Gedankenexperiment und keine tatsächlich existierende Syntheseroute. Theoretisch wäre die Reaktion zwar möglich, aber wieder stehen dem extrem hohe Barrieren entgegen. Deshalb glaube ich nicht, dass man jemals auf diesem Weg aus Benzol Graphan erhält. Dagegen bin ich sicher, dass eines Tages jemand eine chemische Syntheseroute findet, mit der sich Graphane auf ganz normale, reproduzierbare Art und Weise herstellen lassen. Ich verwende den Plural, weil die drei oben erwähnten Strukturen so genannte Stereoisomere sind, die sich in der dreidimensionalen Anordnung ihrer Atome im Raum unterscheiden. Obwohl sie ähnliche Energien haben, müssten beim Übergang von einem zum anderen in großem Stil Atome

und Bindungen neu arrangiert werden. Das stellt eine gigantische Hürde dar.

Zum Schluss bleibt als beruhigendes Fazit: Einmal hergestellt, werden sich die Graphane mit Sicherheit niemals spontan zu Benzol zersetzen. Auch wenn die Kinetik in der Chemie eine große Rolle spielt, so hat eben doch die Thermodynamik das letzte Wort. 

DER AUTOR



Roald Hoffmann ist emeritierter Frank H.T. Rhodes Professor of Humane Letters an der Cornell University in Ithaca (New York).

Zusammen mit Robert B. Woodward entwickelte er Regeln, die Aussagen über den Verlauf und die Produkte so genannter perizyklischer Reaktionen in der organischen Chemie erlauben. Dafür erhielt er 1981 den Nobelpreis für Chemie. Gemeinsam mit Carl Djerassi, einem anderen berühmten Chemiker, hat er außerdem das Theaterstück »Oxygen« verfasst, das sich um die Frage dreht, welches der bedeutendste Pionier der modernen Chemie war.

QUELLEN

- Elias, D. C. et al.:** Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane. In: *Science* 323, S. 610–613, 2009
- Senge, M. O.:** Extrovertierte Verwirrung – Linus Pauling, Melvin Calvin und Porphyrinisomere. In: *Angewandte Chemie* 123, S. 4360–4365, 2011
- Seppelt, K., Seidel, S.:** Xenon as a Complex Ligand: The Tetra Xenono Gold(II) Cation in $AuXe_4^+(Sb_2F_{11})_2$. In: *Science* 290, S. 117–118, 2000
- Sofo, J. O. et al.:** Graphane: A Two-Dimensional Hydrocarbon. In: *Physical Reviews B* 75, S. 153401–153404, 2007
- Wen, X.-D.:** Graphane Sheets and Crystals under Pressure. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 108, S. 6833–6837, 2011

WEBLINKS

www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3084133/
Originalpaper über Hochdruckmodifikationen von Benzol von Xiao-Dong Wen

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:
www.spektrum.de/artikel/1171187

© American Scientist
www.americanscientist.org

Sie möchten noch mehr WISSEN?

Erleben Sie ZEIT WISSEN, das intelligente Wissenschaftsmagazin!
Lesen Sie Neues und Spannendes über Wissenschaft, Technik, Umwelt und Gesundheit:
faszinierend, lebendig und lebensnah.



Was wir von der Religion lernen können



Das Comeback der Brennstoffzelle



Was die Globalisierung für unsere Ernährung bedeutet



Fotostrecke: Die Landschaft Islands



**Jetzt im Handel, mehr Informationen auch unter:
www.zeit-wissen.de oder per Tel. 0180/52 52 909**

(14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem Mobilfunknetz)





KEMP REMILLARD

NEUROPROTHESEN

Bewegender Geist

Dass Gelähmte eines Tages ihre künstlichen Gliedmaßen bloß mit der Kraft ihrer Gedanken steuern, ist keine Sciencefiction mehr. Schon in wenigen Jahren könnte eine Ganzkörperprothese die verlorene Beweglichkeit wiederherstellen.

Von Miguel A.L. Nicolelis

Milliarden Fernsehzuschauer werden vom Eröffnungsspiel der Fußballweltmeisterschaft 2014 in Brasilien hoffentlich nicht nur die Dribbelkünste der Starkicker im Gedächtnis behalten. Denn an diesem Tag möchten wir den Fußballfans – und der Welt – vorführen, wie weit die Steuerung von Robotergliedern durch elektrische Hirnsignale bereits gediehen ist.

Sofern mein Team von der Duke University in Durham (US-Bundesstaat North Carolina) bis dahin noch ein paar gewaltige technische Probleme überwindet, wird der feierliche Anstoß von einem gelähmten Teenager ausgeführt werden, der in einem Roboteranzug aufs Spielfeld spaziert. Der Anzug – von uns Exoskelett genannt – umschließt die Beine des Jungen. Seine Schritte werden von motorischen Signalen des Gehirns gesteuert, die von dort drahtlos zu einem Mini-computer auf dem Rücken unseres Patienten wandern. Der Rechner übersetzt die elektrischen Hirnsignale in digitale Bewegungsbefehle. Mit diesen stabilisiert das Exoskelett zunächst das Körpergewicht des Fußballers und veranlasst dann die Roboterbeine, koordiniert über den Rasen zu schreiten. Bei der Annäherung an den Ball stellt sich der Spieler vor, wie sein Fuß das Leder berührt, und 300 Millisekunden später weisen Hirnsignale den Roboterfuß des Exosketts an, einen kraftvollen Ankick zu vollziehen.

Die Demonstration der radikal neuen Technologie, an der Forscher in Europa und Brasilien mitwirken, soll einem Millionenpublikum vor Augen führen, dass die Gedankensteuerung von Maschinen nicht nur im Labor funktioniert, sondern tatsächlich gelähmten Patienten zu helfen vermag. Damit könnten in einigen Jahren nicht nur Unfallopfer und Kriegsversehrte ihre Beweglichkeit wiedergewinnen, sondern auch Patienten, die an der Nervenlähmung ALS, der Parkin-

sonkrankheit sowie an anderen Bewegungs- oder Sprachdefekten leiden.

Doch auch bei Gesunden würden Neuroprothesen oder Gehirn-Maschine-Schnittstellen deren sensorische und motorische Fähigkeiten in ungeahnter Weise steigern. In diesem futuristischen Szenario steuern willkürliche elektrische Hirnwellen – quasi das biologische Alphabet des menschlichen Denkens – kleine und große Roboter, lenken Luftschiffe von Weitem und ermöglichen dereinst vielleicht sogar die Direktübertragung von Gedanken und Gefühlen zwischen den Gehirnen vernetzter Menschen.

Gedankenmaschinen

Ein Prototyp des Körperanzugs entsteht gerade im Labor meines Mitarbeiters Gordon Cheng von der Technischen Universität München. Cheng ist Mitbegründer des Walk Again Project: einer internationalen gemeinnützigen Zu-

AUF EINEN BLICK

DIE GEHIRN-MASCHINE-SCHNITTSTELLE

1 **Gehirnwellen** können Mauszeiger, Roboterarme und demnächst sogar einen Ganzkörperanzug steuern. Mit einem solchen **Exoskelett** werden Querschnittsgelähmte und andere Patienten mit Bewegungsbeeinträchtigungen wieder gehen können.

2 Die Bewegungen der Körperprothese werden durch von der **Hirnrinde** abgeleitete Signale ausgelöst, die ein Computer in digitale Maschinenbefehle übersetzt.

3 Bei der **Fußballweltmeisterschaft 2014 in Brasilien** wollen Forscher ein gedankengesteuertes Exoskelett erstmals öffentlich präsentieren: Mit seiner Hilfe soll ein behinderter Teenager den Anstoß zum Eröffnungsspiel ausführen.

Der lange Weg zur neuronal gesteuerten Prothese

Ersatzgliedmaßen gibt es seit Jahrtausenden – als Hilfsmittel bei Kriegsverletzungen, Unfallfolgen oder Geburtsfehlern. Mit der Zeit wurde die Technik immer raffinierter, und heutzutage lassen sich Prototypen direkt durch elektrische Hirnsignale steuern.

1500–1000 v. Chr.

Die erste historische Quelle

Ein sakraler Hindutext aus jener Zeit erzählt von der Kriegerin Vishpala, der nach einem Kampf ein Bein amputiert wurde. Sie ließ es durch eine Prothese aus Eisen ersetzen und kehrte damit zu ihren Truppen zurück.



SCIENCE & SOCIETY PICTURE LIBRARY / JARON CHUBB

300 v. Chr.

Antikes Artefakt

Eine der frühesten Prothesen – hier eine Kopie – wurde 1858 in Süditalien ausgegraben. Sie wurde um 300 v. Chr. aus Kupfer und Holz gefertigt und diente



PUBLIC DOMAIN

anscheinend als Ersatz für einen amputierten Unterschenkel.

14. Jahrhundert

Feuerwaffen und Amputationen

Mit der Einführung des Schießpulvers auf Europas Schlachtfeldern nahmen Häufigkeit und Schwere von Kriegsverletzungen enorm zu. Im 16. Jahrhundert entwickelte Ambroise Paré, königlicher Chirurg mehrerer französischer Monarchen, verbesserte

sammenarbeit zwischen dem Duke University Center for Neuroengineering, der Technischen Universität München, der École polytechnique fédérale de Lausanne (Schweiz) und dem Instituto Internacional de Neurociências de Natal – Edmond e Lily Safra (Brasilien). In nächster Zeit werden weitere Forschungsinstitute und Universitäten hinzukommen.

Das Projekt fußt auf unserer fast 20-jährigen Pionierarbeit über Gehirn-Maschine-Schnittstellen. Schon in den 1960er Jahren versuchten Wissenschaftler erstmals, mit aus Tiergehirnen abgeleiteten Nervensignalen über einen Computer eine mechanische Vorrichtung in Bewegung zu setzen. Von 1990 an entwickelte mein Team an der Duke University eine neue Methode: Wir pflanzten hunderte Mikrodrähte – hauchdünne, flexible Sensoren – in die Gehirne von Ratten und Affen. Die Messfühler können winzige elektrische Signale, so genannte Aktionspotenziale, aufspüren, die von hunderten über den Frontal- und Scheitellappen der Großhirnrinde verteilten Nervenzellen ausgehen. Diese Zellen gehören zu einem weiträumigen Netzwerk, das willentliche Bewegungen erzeugt.

Ein entscheidender Durchbruch gelang 2011: Zwei unserer Affen lernten, über diese Schnittstelle einen computersimulierten Arm zu steuern, der Objekte in einer virtuellen Welt berührte und dabei ein künstliches taktiles Feedback-Signal direkt ins Gehirn der Tiere lieferte. Durch die Software konnten wir den Primaten beibringen, wie es sich anfühlt, einen Gegenstand mit »eigenen« virtuellen Fingern anzufassen.

Das Walk-Again-Konsortium hat mittlerweile damit begonnen, aus diesen Tierversuchen eine völlig neue Methode zur weit gehenden Rehabilitation von Querschnittsgelähmten zu entwickeln. Dabei wird es unterstützt durch ein internatio-

nales Team aus Robotikspezialisten, Neuro- und Computerwissenschaftlern, Neurochirurgen und Physiotherapeuten. Die allerersten Schritte wird unser zukünftiger Weltmeisterschaftseröffnungskicker virtuell tun, und zwar in einer Kammer, deren Wände, Fußboden und Decke als Projektionsflächen dienen. Ausgerüstet mit einer 3-D-Brille und einer speziellen Kopfbedeckung, die mittels Elektro- und Magnetenzephalografen nicht invasiv Hirnwellen registriert, taucht unser Fußballer in Gestalt eines Avatars – eines virtuellen Doppelgängers – in eine virtuelle räumliche Umgebung ein. Darin wird er lernen, immer kompliziertere Bewegungen seines Avatars nur mit Gedanken zu steuern. Am Ende wird er als elektronisches Double feinmotorische Fertigkeiten besitzen und beispielsweise über unebenes Gelände wandern oder ein virtuelles Marmeladenglas öffnen können.

Wie man Neurone anzapft

Doch ein mechanisches Exoskelett lässt sich noch viel schwieriger beherrschen als ein Softwareavatar. Um die Roboterglieder zu steuern, müssen Elektroden direkt ins Gehirn eingepflanzt werden. Außerdem gilt es, zahlreiche über die Hirnrinde verteilte Neurone gleichzeitig abzulesen. Die meisten Sensoren sollen in den Motorkortex implantiert werden. Vor allem in dieser Region des Frontallappens entsteht das Bewegungsprogramm, das normalerweise über das Rückenmark zu den Motoneuronen gelangt, die dann letztlich unsere Muskeltätigkeit steuern und koordinieren. Einige Neurowissenschaftler glauben zwar, das Zusammenspiel zwischen Geist und Bewegungsapparat lasse sich auch nicht invasiv per EEG erreichen, doch das muss erst die Praxis erweisen.

Methoden, stark blutende Gliedmaßen zu amputieren und durch bewegliche Metallprothesen zu ersetzen.

1861–1865

Amerikanischer Bürgerkrieg

Der Sezessionskrieg hatte viele Amputationen zur Folge. Ein prominentes Opfer war Brigadegeneral Stephen Joseph McGroarty, der einen Arm verlor. Durch staatliche Förderung und Narkosemittel, die längere Operationen ermöglichten, verbesserte sich die Prothesentechnik.

1963

Primitive Schnittstelle

José Manuel Rodríguez Delgado implantierte eine funkgesteuerte Elektrode im Nucleus caudatus – einer tief liegenden Hirnregion – eines Stiers und konnte das heranstürmende Tier per Knopfdruck zum völligen Stillstand bringen. Sein Apparat war ein Vorläufer heutiger Gehirn-Maschine-Schnittstellen.



CORBIS / MEDFORD HISTORICAL SOCIETY COLLECTION

1969

Bahnbrechende Experimente

An der University of Washington trainierte Eberhard Fetz Affen darauf, willkürlich das Feuern einzelner Neurone auszulösen, welches gleichzeitig mit einer Mikroelektrode aufgezeichnet wurde.

1980er Jahre

Deutung von Hirnströmen

Apostolos Georgopoulos entdeckte an der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) bei Versuchen mit Rhesusaffen ein Erregungsmuster in den Motoneuronen, das immer dann auftrat, wenn die Versuchstiere ihren Arm in einer bestimmten Richtung drehten.

Anfang der 1990er Jahre

Simultane Aufzeichnung

John Chapin, jetzt am Downstate Medical Center der State University of New York in Brooklyn, und Miguel A.L. Nicolelis ent-

Mein Mitarbeiter Gary Lehew hat einen neuen Sensortyp ausgetüftelt: einen Würfel, der nach der Implantation Signale aus einem dreidimensionalen Hirnrindbereich aufnimmt. Während herkömmliche Hirnsensoren aus flächig angeordneten Mikroelektroden bestehen, deren Spitzen die elektrischen Nervenimpulse aufzeichnen, streckt Lehew's Würfel zahlreiche empfindliche Messfühler nach oben, unten und seitwärts aus.

Die aktuelle Version unserer Messwürfel enthält bis zu 1000 Mikrodrähte. Da jeder davon mindestens vier bis sechs einzelne Neurone erfassen kann, zeichnet ein Würfel die Aktivität von 4000 bis 6000 Nervenzellen auf. Wenn es uns gelingt, mehrere Würfel im Frontal- und Scheitellappen zu implantieren, gewinnen wir gleichzeitig Daten von zehntausenden Nervenzellen. Das sollte nach unseren Modellschät-

zungen genügen, ein Exoskelett mit zwei Beinen zu steuern und unseren Patienten die selbstständige Beweglichkeit zurückzugeben.

Um die Datenflut dieser Sensoren zu bewältigen, konstruieren wir momentan eine neue Generation spezieller Neurochips. Sie werden zusammen mit den Mikrosensoren in den Schädel des Patienten implantiert und erzeugen die motorischen Befehle, die notwendig sind, um ein Ganzkörper-exoskelett zu steuern.

Natürlich müssen diese Signale dann noch aus dem Gehirn an die Prothesen gesendet werden. Kürzlich hat unser Teamkollege Tim Hanson einen drahtlosen Rekorder konstruiert, der im Schädel implantiert wird und dort aufgezeichnete Gehirnwellen an einen externen Empfänger überträgt. Die erste Version unserer Neurochips wird derzeit erfolgreich an Affen



wickelten ein Verfahren, die Aktivität von Dutzenden separaten Neuronen mit fest implantierter Elektroden simultan zu überwachen.



1997

Bessere Bewegung

Mit der mikroprozessorgesteuerten C-Leg-Knieprothese konnte der Träger erstmals vorprogrammierte Bewegungsabläufe einschalten, um beispielsweise Rad zu fahren.

1999–2000

Gutes Feedback

Die Teams von Chapin und Nicolelis beschrieben erstmals eine Hirn-Maschine-Schnittstelle, bei der Ratten

die Bewegung durch ein optisches Feedback-Signal wahrnehmen konnten. Im folgenden Jahr publizierte die Gruppe um Nicolelis die erste Studie, in der ein Affe einen Roboterarm nur mit Hilfe seiner Hirntätigkeit steuerte.

2008–2011 »Blade Runner«

Nachdem Oscar Pistorius die Qualifikation für die Olympischen Sommerspiele 2008 verfehlt hatte, triumphierte er bei den Para-



getestet. Jüngst hat erstmals eines der Tiere eine Gehirn-Maschine-Schnittstelle mittels drahtlos übertragener Hirnsignale rund um die Uhr betrieben. Im Juli 2012 haben wir schließlich bei der brasilianischen Regierung die Genehmigung beantragt, diese Technik auch bei Menschen einzusetzen.

Bei unserem künftigen Fußballspieler sollen die Daten des Rekordlers drahtlos zu einem kleinen, in einem Rucksack mitgeführten Computer wandern. Mehrere Prozessoren übersetzen die motorischen Signale in digitale Befehle, welche über Servomotoren die beweglichen Teile an den Gelenken des Exoskeletts steuern und so die künstlichen Gliedmaßen richtig positionieren.

Kraft der Gedanken

Auf diese Weise kann der Träger des Exoskeletts ganz nach Wunsch schneller oder langsamer einen Fuß vor den anderen setzen, sich bücken oder eine Treppe hinaufsteigen. Einfache Haltungsanpassungen können die elektromechanischen Schaltkreise des Anzugs selbstständig – ohne neuronalen Input – durchführen. Das Exoskelett verhält sich zugleich flexibel und fest wie ein Raumanzug; es stützt seinen Träger und übernimmt die Rolle der Wirbelsäule. Wenn die vom Gehirn ausgehenden Steuersignale, wie wir hoffen, perfekt mit den elektronischen Reflexen der Servomotoren zusammenspielen, wird unsere Gehirn-Maschine-Schnittstelle den Fußballer buchstäblich durch pure Willenskraft über den Platz tragen.

Der Spieler soll sich nicht nur fortbewegen, sondern auch den Boden unter den Füßen fühlen. Durch Mikrosensoren, die dem Gehirn den Kraftaufwand einer Bewegung und die aktuelle Haltung des Anzugs melden, wird eine Form von Tast- und Gleichgewichtssinn simuliert. Der Spieler soll füh-

len, dass eine Zehe den Ball berührt. Nach unserer Erfahrung mit Hirn-Maschine-Schnittstellen wird das Gehirn die Roboterglieder rasch als echte Erweiterung des eigenen Körpers erleben. Wenn durch Training die Erfahrung darüber wächst, wie Bodenkontakt und Stellung des Roboterbeins zusammenhängen, dürften die Schritte bald flüssig und locker erfolgen.

Noch sind wir nicht so weit. Zunächst einmal müssen alle Phasen des Projekts in Tierversuchen getestet sowie von brasilianischen, US-amerikanischen und europäischen Behörden genehmigt werden. Doch trotz aller Unwägbarkeiten hat die kühne Idee in der brasilianischen Öffentlichkeit ein kaum da gewesenes Interesse an der Wissenschaft geweckt.

Ein ferngesteuertes Double

Der Ankick zur Fußball-WM – oder, falls uns die Zeit knapp wird, zwei Jahre später anlässlich der Paralympics 2016 in Rio de Janeiro – soll mehr sein als ein Kunststück ohne Nachfolger. Was diese Technik vielleicht einmal zu leisten vermag, lässt ein spektakuläres Tierexperiment erahnen, das wir 2007 zusammen mit Gordon Cheng durchführten. Zunächst trainierten wir an der Duke University Rhesusaffen, aufrecht in einem Laufrad zu gehen, während simultan die Aktivität von gut 200 Nervenzellen der Großhirnrinde aufgezeichnet wurde.

Unterdessen entwickelte Cheng, damals an den ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories in Kioto, ein extrem schnelles Internetprotokoll, mit dessen Hilfe wir diesen neuronalen Datenstrom direkt nach Kioto in die elektronische Steuereinheit des humanoiden Roboters CB1 schicken konnten. Im ersten Teil dieses weltumspannenden Experiments zeigten Cheng und mein Team an der Duke

lympics desselben Jahrs. 2011 erreichte er das 400-Meter-Halbfinale der Leichtathletik-Weltmeisterschaft in Daegu (Südkorea).

2011

Gedankenspiele

Das Team um Nicolelis an der Duke University demonstrierte, dass ein Affe mit seinen Gedanken die Bewegungen eines virtuellen Avatars – eines Softwaredoppelgängers – zu steuern vermag.



MIGUEL A. NICOLELIS

2012

Vom Gehirn zum Roboterarm

An der Brown University in Providence (Rhode Island) führte John Donoghue sein BrainGate Neural Interface System

vor. Die Testperson steuerte über ein Hirnimplantat eine Armprothese und führte damit ein Getränk zum Mund.



BRINGATE.ORG

2014

Fußballweltmeisterschaft

Das Team um Nicolelis möchte ein Exoskelett konstruieren, mit dem ein behinderter Jugendlicher den Anstoß zur Fußball-WM in Brasilien ausführen kann.

University, dass derselbe Algorithmus, der ursprünglich Gedanken in Steuerbefehle für künstliche Arme übersetzen sollte, auch zwei mechanische Beine zum Laufen bringen kann. Sobald Idoya, einer unserer Affen, in Durham Schritte machte, setzte sich in Kioto der Roboter leicht verzögert ebenfalls in Gang. Anfangs benötigte CB1 noch eine Körperstütze, lief aber später ganz selbstständig.

Der zweite Teil des Experiments bescherte uns eine echte Überraschung. Selbst wenn die Affendame Idoya aufhörte, zu laufen, konnte sie weiterhin die Beine des Roboters in Kioto steuern, indem sie CB1 über eine Livevideoschaltung beobachtete und sich dessen nächste Schritte lediglich vorstellte. Idoya produzierte die Hirnmuster, die CB1 zum Laufen brachten, obwohl ihr eigener Körper dabei motorisch untätig blieb.

Über solche Schnittstellen könnte man Roboter in für Menschen absolut unzugänglichen Umgebungen agieren lassen. Bloße Gedanken würden beispielsweise ein mikrochirurgisches Instrument im Körperinnern steuern oder einen Roboter, der ein Leck in einem Atomreaktor reparieren soll. Auch könnten wir damit Werkzeuge bedienen, die viel fester oder zarter zugreifen als unsere Hände – und schneller: Idoyas Gedankenübertragung um die halbe Welt beanspruchte mit 20 Millisekunden weniger Zeit, als die Äffin zur Aktivierung ihres eigenen Beins braucht.

Das ist freilich noch Zukunftsmusik. Vorerst hoffen wir, dass der Weltfußballverband Fifa unseren Vorschlag aufnimmt, die Fußballweltmeisterschaft 2014 durch einen querschnittsgelähmten Jugendlichen eröffnen zu lassen. Zahlreiche bürokratische Hürden und wissenschaftliche Unwägbarkeiten sind zu überwinden, bevor unser Traum Wirklichkeit

werden kann: Vor drei Milliarden Zuschauern erhebt sich wie durch ein Wunder ein gelähmter Halbwüchsiger, schreitet über den Rasen, tritt den Ball und erzielt einen unvergesslichen Treffer für die Wissenschaft. ☺

DER AUTOR



Miguel A.L. Nicolelis gilt als ein Wegbereiter der Neuroprothetik. Er ist Professor für Neurowissenschaften an der Duke School of Medicine sowie Kodirektor des Center for Neuroengineering an der Duke University in Durham (North Carolina).

QUELLEN

Nicolelis, M.: Beyond Boundaries: The New Neuroscience of Connecting Brains with Machines – and how it will Change our Lives. St. Martin's Griffin, New York 2012

Veliste, M. et al.: Critical Control of a Prosthetic Arm for Self-Feeding. In: Nature 453, S. 1098–1101, 2008

LITERATURTIPP

Nicolelis, M. A. L., Chapin, J.: Roboter steuern von Geistes Hand. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 74–82

WEBLINKS

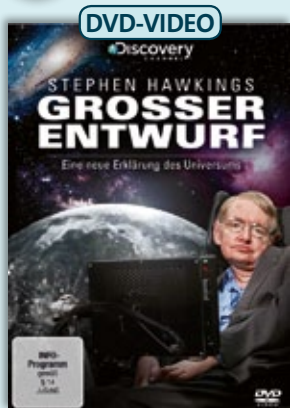
www.scientificamerican.com/sep2012/exoskeleton
Das Video zeigt einen Exoskelett-Prototyp im Tierversuch.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1171188

Bücher und mehr



Unser besonderer Tipp:



STEPHEN HAWKINGS GROSSER ENTWURF Eine neue Erklärung des Universums

2012, Laufzeit: circa 135 Minuten, Polyband

Bestell-Nr. 3761 € 17,99

In dieser Dokumentation blickt der populäre Astrophysiker über den Tellerrand der Wissenschaft hinaus und geht bedeutenden philosophischen Fragen auf den Grund: Beruht unsere Existenz auf einer höheren Macht? Was ist der Sinn des Lebens? Wie lauten die kosmischen Gesetze? Spektakuläre 3-D-Computeranimationen und faszinierende Bilder machen die Reise zu den größten Rätseln des Weltalls perfekt.

Technische Angaben: Sprachen: Deutsch und Englisch; Untertitel: keine; Ton: Dolby Digital 5.1; Bild: 16:9 (1,78:1); Medium: DVD 9; Region: 2 PAL; FSK-Freigabe: INFO-Programm.



WUNDER DES UNIVERSUMS BBC

2012, Laufzeit ca. 200 Min., Verlag: Polyband

Bestell-Nr. 3656
€ 14,99 (D), € 14,99 (A)

Die Dokumentation nimmt Sie mit auf eine Entdeckungsreise quer über unseren Planeten, von den verbrannten Ebenen Afrikas hin zu den schneebedeckten kanadischen Rockies. Diese Reisen quer über unseren Planeten werden mit spektakulären Bildern aus dem Weltraum kombiniert. Mittels beeindruckender Bilder aus Teleskopen und computergenerierten HD-Aufnahmen liefert *Wunder des Universums* Eindrücke von gigantischen Supernovae, Gammastrahlenexplosionen und kürzlich entdeckten Galaxien und gibt Aufschluss über die entferntesten Bereiche des Universums. Sprachen: Deutsch und Englisch; INFO-Programm gem. §14 JuSchG.



Joachim Wambsganß

UNIVERSUM FÜR ALLE 70 spannende Fragen und kurzweilige Antworten

2012, 439 S. m. zahlr. Farbabb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3646
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Heidelberger Astronomen erklären Ihnen hier die Rätsel des Universums. Die Artikel basieren auf der Vortragsreihe *Uni(versum) für alle!* – Halbe Heidelberger Sternstunden: Von April bis Juli 2011 gab es dabei jeden Tag eine »Astronomische Mittagspause« in der Heidelberger Peterskirche mit einem 15-minütigen Kurzvortrag. In diesem Buch sind alle 70 Vorträge zu allen erdenklichen Themen der Astronomie für Sie zum Nachlesen zusammengestellt.

Alle Vorträge wurden gefilmt und stehen für Sie auf YouTube zur Verfügung. Sie können mit Ihrem Smartphone den jeweiligen QR-Code am Ende jedes Beitrags fotografieren und werden so direkt zu dem passenden Video geleitet oder Sie gehen direkt zum YouTube-Kanal von *Spektrum der Wissenschaft*: www.spektrum.de/universumfueralle



Peter M. Higgins

DAS KLEINE BUCH DER ZAHLEN Vom Abzählen bis zur Kryptographie

2012, VIII, 354 S. m. 35 Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3748
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Peter Higgins verarbeitet Jahrhunderte des Fortschritts zu einer ergaulichen Erzählung, die das Geheimnisvolle der Zahlen hervorhebt und erklärt, wie die verschiedenen Arten von Zahlen aufgetaucht sind und weshalb sie nützlich sind. Das Buch enthält viele historische Anmerkungen und interessante Beispiele, und es behandelt einfache Zahlenrätsel und Zaubertricks ebenso wie Verbindungen zu Problemen des Alltags.



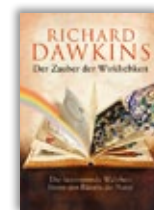
Wolfgang W. Osterhage

STUDIUM GENERALE PHYSIK Ein Rundflug von der klassischen bis zur modernen Physik

2012, 254 S. m. 80 SW-Abb., 7 Tab., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3749
€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch nähert sich den großen Komplexen der Physik, ohne Spezialistenwissen vermitteln zu wollen. Dabei werden zunächst die Grundlagen der klassischen Physik erörtert: Mechanik, Elektrizitätslehre, Felder, Wellen und Wärmelehre. Auf dieser Basis werden dann die wesentlichen Erkenntnisse der Quantenphysik (Atomphysik, Kernphysik) einerseits und der Kosmologie (Relativitätstheorie) andererseits bis zum aktuellen Wissensstand entwickelt; ein Buch, geschrieben für alle, die in die Physik einsteigen oder sich einen Überblick verschaffen wollen – mit vielen weiterführenden Literaturhinweisen und Gedanken zum Weiterdenken.



Richard Dawkins

DER ZAUBER DER WIRKLICHKEIT Die faszinierende Wahrheit hinter den Rätseln der Natur

2012, 270 S. m. zahlr. Abb., geb., Ullstein

Bestell-Nr. 3752
€ 26,99 (D), € 27,80 (A)

Seit jeher hat die Menschheit versucht, sich die rätselhafte Natur durch Mythen begreiflich zu machen. Auf den Herbst folgt der Winter, weil Hades, Persephone in sein Reich entführt hat und die blühende Natur mit ihr; in Wirklichkeit gibt es unterschiedliche Jahreszeiten, weil die Erdachse geneigt ist. Und die Welt entstand auch nicht, weil der indische Gott Vishnu seinem Diener Brahma ihre Erschaffung auftrug, sondern durch den Urknall. So wunderbar die Mythen sind, weitaus spannender ist die wissenschaftliche Betrachtung. Genau das tut Dawkins, indem er die Wahrheit hinter den Rätseln erklärt. Ein faszinierendes, üppig illustriertes Buch, das den Zauber der Wirklichkeit feiert.



Udo Gansloßer, Kate Kitchenham

FORSCHUNG TRIFFT HUND Neue Erkenntnisse zu Sozialverhalten, geistigen Leistungen und Ökologie

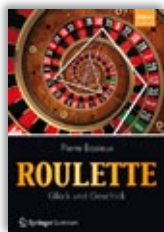
2012, 240 S. m. 250 Farbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3751
€ 29,99 (D), € 30,90 (A)

Immer mehr Forschungsprojekte in Europa und den USA befassen sich mit dem Haushund, seiner Entwicklung, seinem Verhalten, seiner Intelligenz und seinen Emotionen. Dr. Udo Gansloßer und Kate Kitchenham berichten über die Forscher und ihre Arbeit, fassen die interessantesten Ergebnisse zusammen und geben damit Hundehaltern Anleitung für ein besseres Verständnis ihres Vierbeiners.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



Pierre Basieux

ROULETTE – GLÜCK UND GESCHICK

2012, 498 S. m. 143 SW-Abb., geb., Spektrum

Bestell-Nr. 3743
€ 69,95 (D), € 72,- (A)

Pierre Basieux, promovierter Mathematiker, hat die wissenschaftliche und praktische Erforschung dieses Spiels nicht nur einige Jahrzehnte als Hobby betrieben, sondern es auch revolutioniert. Über das bereits Bekannte hinaus enthält sein Buch vor allem a) entscheidende Ergänzungen, die bisher in Buchform absichtlich nicht preisgegeben wurden, b) neue praktische Aspekte, vor allem in den Bereichen Wurfweitenspiel und Kesselgucken, und c) wesentliche Vereinfachungen, die sich aus diesen neuen praktischen Erkenntnissen ergeben.

Kurze Erläuterung zu den Angaben hinter den Preisen: (D) ist der Preis für Deutschland, (A) der Preis für Österreich

Bequem
bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH



Werner Gruber, Heinz Oberhummer, Martin Puntigam
GEDANKENLESEN DURCH SCHNECKENSTREICHELN
Was wir von Tieren über Physik lernen können
 2012, 296 S., geb., Hanser
Bestell-Nr. 3648
€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

In *Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln* begeben sich die beiden Physiker Heinz Oberhummer und Werner Gruber sowie der preisgekrönte Satiriker Martin Puntigam auf eine Reise ins Tierreich. Dabei stoßen sie auf faszinierende wissenschaftliche Phänomene. Wissenschaft für alle: Spektakulär, lehrreich und unterhaltsam.



Josef Honerkamp
WAS KÖNNEN WIR WISSEN?
Mit Physik bis zur Grenze verlässlicher Erkenntnis
 2012, 367 S. 21 SW-Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag
Bestell-Nr. 3649
€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Was wissen Physiker über die Welt und wie sicher wissen sie es? – Den Autoren bewegten Begegnungen und Gespräche aus seinem Alltag dazu, über die faszinierendsten Fragen nachzudenken: Über Zeit, Materie, Quanten, Zufall und die Realität, bis zu kritischem Rationalismus, Emergenz, Vorwissen sowie die Physik aus der Gottesperspektive.



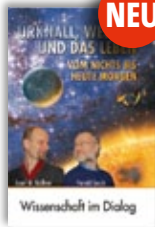
Alice Roberts (Hg)
DIE ANFÄNGE DER MENSCHHEIT
Vom aufrechten Gang bis zu den frühen Hochkulturen
 2012, 256 S. m. über 800 farbige Abb. u. Ktn., geb., Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3718 € 29,95 (D), € 30,80 (A)

Dieses imposante Werk dokumentiert mit mehr als 800 Abbildungen die Geschichte der menschlichen Evolution. Dabei geht es nicht nur um die biologische, sondern auch um die kulturelle Entwicklung bis zu den frühen Hochkulturen. Mit beeindruckende Schädelrekonstruktionen von den niederländischen Präparatoren und Künstlern Adrie und Alfons Kennis.



Alain Lieury
EIN GEDÄCHTNIS WIE EIN ELEFANT?
Tipps und Tricks gegen das Vergessen
 2012, 320 S. m. 57 SW-Abb., kart., Spektrum
Bestell-Nr. 3727
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Humorvoll geschrieben und bestückt mit zahlreichen Beispielen bietet dieses heitere und zugleich lehrreiche Werk einen Überblick über die unterschiedlichen Bereiche der Gedächtnisforschung und Methoden zur Steigerung der Gedächtnisleistung.



NEU Josef Gaßner, Harald Lesch
URKNALL, WELTALL UND DAS LEBEN
Vom Nichts bis heute Morgen
 2012, 352 S. m. 123 Abb., geb., Komplett Media
Bestell-Nr. 3766
€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Den Urknall, das Weltall und das Leben verstehen? Vielleicht ist das zu hoch gegriffen – aber eines können Harald Lesch und Josef M. Gaßner versprechen: Sie erklären die Geheimnisse des Kosmos so verständlich wie nur möglich. Die beiden Gelehrten plaudern miteinander über Fragen wie: Woher wissen wir das alles? Wie konnte Alles aus dem Nichts entstehen? Was war vor dem Urknall? Warum gibt es Sterne und Galaxien? Wie ist das Leben entstanden? Was sind Neutrinos, Higgs und LHC? Gibt es Leben auf fernen Planeten? Wo ist die Grenze der wissenschaftlichen Erkenntnis? Ist noch Platz für Gott in unserem Weltbild?

Lieferbar auch als Hörbuch unter: www.science-shop.de/artikel/1167971 – oder rufen Sie uns einfach an!

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



% Rüdiger Glaser, Hans Gebhardt, Winfried Schenk
GEOGRAPHIE DEUTSCHLANDS
 2007, 280 S. m. zahlr. meist farb. Abb. u. Ktn., geb., Wissenschaftliche Buchgesellschaft
Bestell-Nr. 3702

früher € 49,90, jetzt nur € 24,90 (D), € 25,60 (A)
 Ob es um Ost-West- oder Nord-Süd-Gegensätze, um die Spaß-, die Konsum- oder die Risikogesellschaft geht, ob Geologie, Landschaft und Klima, Umweltbelastungen, der Wirtschaftsstandort Deutschland, die Lage in Mitteleuropa oder der demographische Wandel beschrieben werden: Mit klaren Texten, eindrücklichen Bildern und aussagekräftigen Karten und Grafiken bieten die Autoren und ihr Team ein neues Standardwerk für alle, die etwas über die Geographie Deutschlands erfahren wollen.



% Douglas R. Hofstadter
ICH BIN EINE SELTSAME SCHLEIFE
 2008, 528 S. m. 30 Abb., farb. Bildtaf., geb., Klett-Cotta
Bestell-Nr. 3703 früher € 29,95, jetzt nur € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Jeder Mensch ist eine seltsame Schleife – diesem merkwürdig-einzigartigen Phänomen hat Douglas R. Hofstadter sein neuestes Buch gewidmet. Voller verbäufelnder Einfälle stellt Hofstadter einem breiten Publikum seine Gedankenexperimente und intellektuellen Abenteuer vor und verbindet sie mit seiner einzigartigen Lebensgeschichte – zu einer seltsamen Schleife.



Thomas Eversberg
HOLLYWOOD IM WELTALL
Waren wir wirklich auf dem Mond?
 2012, 174 S. 40 Farbbabb., kart., Spektrum
Bestell-Nr. 3647
€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

Der Astrophysiker Thomas Eversberg setzt sich mit den bekanntesten Verschwörungstheorien der Mondlandungsleugner auseinander und analysiert diese in farbigen Detailaufnahmen und mit vielen vom Buch aus abrufbaren Filmsequenzen. Dabei geht er sowohl auf die ältesten gut bekannten, aber auch die aktuellsten Zweifel an der Mondlandung ein und bietet seinen Lesern so einen spannenden Krimi aus Physik, Politik und Geschichte. Thomas Eversberg arbeitet im Raumfahrtmanagement des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und weiß daher, wovon er schreibt.



W. Engländer, H.-H. Bergmann
DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD
220 Vögel, Filme und Stimmen
 2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box, INFO-Progr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos
Bestell-Nr. 1859
€ 49,99 (D), € 49,99 (A)

220 Vogelarten mit ihren Rufen und Gesängen erfreuen uns durch wunderschöne Bilder in Filmen, die Vögel singen dabei schnabelsynchron! Ein Sprecher erklärt jede Darstellung, das Begleitbuch informiert noch ausführlicher.



Ken Taylor
KOSMISCHE KULTSTÄTTEN DER WELT
Von Stonehenge bis zu den Maya-Tempeln
 2012, 240 S. m. 200 Farbbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3638 € 29,99 (D), € 30,90 (A)

Überall auf der Welt zeigen beeindruckende Bauten das himmelskundliche Wissen unserer frühen Vorfahren. In diesem reich bebilderten Buch beschreibt der Archäologe Ken Taylor ausführlich über fünfzig bedeutende Kultstätten auf der ganzen Welt.



Jürgen Beetz
1+1=10: MATHEMATIK FÜR HÖHLENMENSCHEN
 2012, X, 334 S. m. 100 Abb., kart., Spektrum
Bestell-Nr. 3731
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Mehr als die einfache Logik eines Frühmenschen brauchen Sie nicht, um die Grundzüge der Mathematik zu verstehen. Denn Sie treffen in diesem Buch viele einfache, fast gefühlsmäßig zu erfassende mathematische Prinzipien des täglichen Lebens. Eine umfassende Übersicht über die »gesamte« Mathematik (definiert durch Abitur- bzw. Erstsemester-Level).



Martin Rietze, Marc Szeglat

Vulkane

Schöpfung und Zerstörung

Herbig (terra magica), München 2012.

176 S., € 49,99

GEOLOGIE

Atemberaubendes Feuerwerk

Wer den Auswurf glühenden Gesteins oder zähflüssige Lavaströme lieber nicht aus unmittelbarer Nähe genießen möchte, findet in diesem Buch einen gefahrlosen und fast ebenso faszinierenden Ersatz.

Die Kontinentalverschiebung ist ein äußerst langsamer Prozess; aber ihre Sekundäreffekte – Erdbeben und Vulkanausbrüche – sind häufig spektakulär und von faszinierender Gewaltigkeit. Selbst an längst erkalteten Vulkankuppen, die der Bergbau zur Steingewinnung erschlossen hat und gleichsam als Tomogramme präsentiert, lassen sich die Wucht der Eruptionen und die davon ausgelösten Verheerungen nachvollziehen.

Knapp 2000 Vulkane weltweit gelten als potenziell gefährlich, und jedes Jahr bieten uns etwa 50 von ihnen das fulminante Schauspiel eines Ausbruchs – in Süditalien, entlang des pazifischen Feuergürtels und an vielen anderen Stellen der Erde. Aber abgesehen von vergleichsweise harmlosen Erscheinungsformen wie Geysiren, siedenden Schlammputzen oder blubbernden Mofetten (Kohlenstoffdioxidquellen) will man einen aktiven Vulkan nicht wirklich aus nächster Nähe erleben. Da mag die visuelle Teilhabe an vulkanischer Geodynamik aus der Armsesselperspektive ein durchaus diskutabler Ersatz sein.

Diesen bietet der vorliegende Band in einzigartiger Weise. Im üppigen Format von 29 mal 31 Zentimetern inszenieren die Autoren Martin Rietze (Fotos)

und Marc Szeglat (Text) in rund 140 ganz- oder gar doppelseitigen Fotos die gesamte Bandbreite des fantastischen

Feuerzaubers an den vulkanischen Brennpunkten in aller Welt. Sie zeigen aus allernächster Nähe Fontänen glutflüssiger Gesteinsschmelzen, die parabolischen Flugbahnen kühlstrankgroßer Bomben, Flankeneruptionen, Gipfelausbrüche, fliegende Magmafetzen, glühende Materialströme, geheimnisvoll glimmende Lavaseen sowie – in dieser beeindruckenden Qualität bisher nur sehr selten fotografisch dokumentiert – heftige Blitzentladungen in den aufschießenden Asche- und Staubsäulen (Bild unten). Viele Aufnahmen sind in der Dämmerung oder gar bei Nacht entstanden, was ihnen eine atemberaubend infernalische Wirkung verleiht.

Der Band präsentiert die Feuerberge ohne Anspruch auf Vollständigkeit, mit Schwergewicht auf aktuellen Ereignissen und nach Kontinenten sortiert. Die



In der Ausbruchswolke eines Vulkans (hier Sakura-jima) entstehen zuweilen Blitze.

Reise beginnt in Europa mit dem (im Jahr 2012 geradezu hyperaktiven) Ätna und durchläuft dann den Ostafrikanischen Grabenbruch, wo den Leser allerlei Überraschungen erwarten: den Nyiragongo, der über den größten Lava-see der Welt verfügt, den Ol Doinyo Lengai, der wasserartig dünnflüssige Karbonatitlava ausstößt, und den Erta Alé, auf dessen Lavasee erstarrte Platten an der Oberfläche eine Kontinentalverschiebung im Miniaturmaßstab vollführen. Neuseeland mit seinem aktiven Vulkanismus auf der Nordinsel und der Yasur auf dem Vanuatu-Archipel stehen beispielhaft für Ozeanien. Weiter geht es zu den drei Vulkanen Bromo, einem der aktivsten Berge auf Java, zum Sakurajima in Südjapan und zum Merapi auf den Philippinen, dessen Ausbrüche mit ihren weltweiten atmosphärischen Aus-

wirkungen kaum übertroffen werden, zum Kilauea auf Hawaii und zu den Sofrière Hills in der Karibik. Die Reise endet mit einigen Vulkanen in den Hochanden Südamerikas.

Der Untertitel »Schöpfung und Zerstörung« ist trefflich gewählt. Vulkane bringen nicht nur neue Oberflächenformen hervor, sondern können gleichzeitig auch erbarmungslos destruktiv wirken, was in allen Bildern überaus deutlich wird.

Jedem der Hauptkapitel ist ein Text vorangestellt, der die wichtigsten geologische Grundlagen erläutert, aber auch den in den regionalen Mythen und Naturreligionen verankerten Umgang mit dem Phänomen Vulkanismus behandelt. Wissenschaftliche Fakten werden nicht systematisch abgehandelt, sondern zum jeweiligen Objekt

präsentiert. Für den kognitiven Notfall hält der Band ein Glossar zu den wichtigsten, glücklicherweise sparsam verwendeten Fachbegriffen bereit. Die Bildlegenden muten fallweise ein wenig hilflos und flach an und treffen nicht immer punktgenau die dargestellten Sachverhalte, aber das schränkt den überzeugenden Gesamteindruck nicht ein.

Die »Vulkane« sind ein respektabler Augenschmaus mit einzigartigen Bild-dokumenten, die so in der sonstigen geowissenschaftlich orientierten Literatur wenig bis gar nicht zu finden sind.

Bruno P. Kremer

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet am Zentrum für Naturwissenschaftliche und Mathematische Bildung der Universität zu Köln.



Michael Haller, Martin Niggeschmidt (Hg.)

Der Mythos vom Niedergang der Intelligenz

Von Galton bis Sarrazin:

Die Denkmuster und Denkfehler der Eugenik

Springer VS, Wiesbaden 2012. 212 S., € 29,95

POLITIK

Deutschland schafft Sarrazin ab

Wissenschaftler verschiedener Fachrichtungen zerpflücken die Thesen des umstrittenen Autors.

Ein ausgewiesener Verwaltungs- und Finanzspezialist schreibt ein Buch wie »Deutschland schafft sich ab«, in dem er unter dem Vorwand, über Sozial-, Bildungs- und Bevölkerungspolitik zu reden, latent eine schichtspezifische und ethnische Segregation propagiert. Warum tut er das, und warum findet er damit eine derart breite gesellschaftliche Zustimmung? Offensichtlich erregt die Problematik so manches Gemüt. Der vorliegende Sammelband, herausgegeben von dem Medienwissenschaftler Michael Haller und dem Hamburger Redakteur Martin Niggeschmidt, legt

nun das Messer an das Dickicht aus Halbwahrheiten und einseitiger Rhetorik, das in der Diskussion herangewachsen ist.

»In der Sache kann man Sarrazin nicht widerlegen.« Diese Aussage wurde von verschiedenen Seiten in der medialen Debatte immer und immer wieder kolportiert – so lange, bis die Phrase als unumstößliches Faktum wahrgenommen wurde. Der Wissenschaftsjournalist Claus-Peter Sesin sowie die Soziologen Peter Weingart und Andreas Kemper eröffnen die Widerlegung, indem sie minutiös den Quellen und dem

Kontext von Sarrazins Thesen nachspüren. Ihr Fazit: Sarrazin bedient sich einschlägiger angelsächsischer und deutscher Literatur, die in einer durch und durch tendenziös eugenischen Tradition steht.

Vorrangige Quelle ist ein hinlänglich bekanntes Zitierkartell rund um den rassistischen »Pioneer Fund« und die assoziierte Publikation »Mankind Quarterly«, das unter dem Deckmäntelchen der Wissenschaft eine politisch motivierte Agenda unters Volk zu bringen sucht. Das bekannteste Beispiel ist das Buch »The Bell Curve« von Richard Herrnstein und Charles Murray (1994). Es trug zu dem geistigen Klima bei, das in den USA während der Präsidentschaft Bill Clintons zur – von Sarrazin gelobten – nahezu völligen Abschaffung der Sozialhilfe führte. Derlei erhellende Hintergrundinformationen sind im öffentlichen Diskurs bislang zu kurz gekommen.

Mit diesem Vorwissen im Hinterkopf erfährt man im zweiten Teil des Buchs unter anderem, was seriöse Wissenschaftler aller Disziplinen von der »Erblichkeit der Intelligenz« halten. Das ist eine der Kernthesen in »Deutschland schafft sich ab«: Nicht nur die Intelligenz sei erblich, sondern auch einige daran gekoppelte Variablen, insbe-

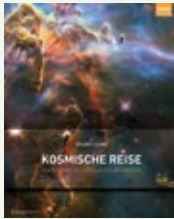


Christian Hesse

Christian Hesses mathematisches Sammelurium. 1: 0 = ∞

C.H.Beck, München 2012. 237 S., € 14,-

Dieses Buch ist offensichtlich aus einem großen Zettelkasten entstanden. Unschwer lässt sich aus der Sammlung das Lieblingsthema des Autors erschließen: Statistik, just das Fach, das Christian Hesse als Professor in Stuttgart vertritt. Die besten und tiefsinnigsten unter den 137 kurzen Stücken handeln von den Fallstricken der Wahrscheinlichkeitsrechnung: Bei der Suche nach einem Job sind kleine Frauen erfolgreicher als kleine Männer und große Frauen erfolgreicher als große Männer, aber Frauen insgesamt weniger erfolgreich als Männer insgesamt. Daneben beeindruckt die Beschreibung etlicher überraschender Zauberktricks. Und ein paar Zettel sind schon angegilbt – oder aber unvollständig: »Von Kissing (11 300 Einwohner) über Petting (2300 Einwohner) bis Fucking (93 Einwohner) braucht man in Bayern im Durchschnitt 2 Stunden 50 Minuten.« Hier verschweigt der Autor, dass dieser Weg eine Grenzüberschreitung erfordert: Fucking liegt in Österreich. CHRISTOPH PÖPPE



Stuart Clark

Kosmische Reise. Von der Erde bis zum Rand des Universums

Aus dem Englischen von Ivo Gallmetzer. Springer Spektrum, Heidelberg 2012. 240 S., € 39,95

Mit bisweilen unbeholfener Weltraumprosa, zumindest in der deutschen Ausgabe dieses Bildbands, geht Stuart Clark, Redakteur bei der Europäischen Weltraumagentur ESA, auf große Tour durchs Universum: »Die dunklen Staubbänder in den Spiralarmen der angreifenden Galaxie symbolisieren die Zähne dieser Kettensäge, die direkt auf das Herz ihres Opfers zuhielten ...« Trotzdem lehren die Begleittexte zu den großformatigen, gestochen scharfen Aufnahmen den Betrachter das genaue Hinsehen. Sie machen aufmerksam auf Aspekte der Marsoberfläche, auf leuchtende Partikeljets, die von Schwarzen Löchern aus ins All strömen, auf Spuren gewaltiger Kollisionen von Sternsystemen und auf kosmische Galaxien-»Wände«, deren Ausdehnung sich nach Gigalichtjahren bemisst. Wer ähnliche Werke schon besitzt, wird zwar kaum Neues finden. Für alle anderen könnte der auf glänzendem Lackpapier gedruckte Band das Ticket für eine spektakuläre »Kosmische Reise« sein. THILO KÖRKELE



Karl Brunner

Kleine Kulturgeschichte des Mittelalters

C.H.Beck, München 2012. 269 S., € 14,95

In diesem Buch liest sich der Laie schnell fest – und vermutlich auch der Historiker. Denn der Autor, emeritierter Professor für mittelalterliche Geschichte an der Universität Wien, greift kenntnis- und detailreich auf seine jahrzehntelangen Studien zurück. Spannend, immer verständlich und oft erfrischend schildert und kommentiert Brunner Leben und Weltbild, Entwicklungen und Wechselwirkungen in den einzelnen Phasen des Mittelalters – und knapper auch deren »Überbleibsel« in der Neuzeit, teils bis heute. Die Titel der Buchabschnitte zeigen die Bandbreite: »Der kulturell geformte Körper«; »Haus und Hof«; »Kirche und Kloster«; »Die Stadt«; »Fest – Turnier – Krieg«; »Kultur-Landschaften«. Brunner gelingt es, ein ungeheures Wissensgebiet übersichtlich mit viel Gewinn für den Leser darzustellen. Dank an den Autor! ADELHEID STAHNKE



Brian Clegg

Vor dem Urknall. Eine Reise hinter den Anfang der Zeit

Aus dem Englischen von Hubert Mania. Rowohlt, Reinbek 2012. 346 S., € 19,95

Weit ist das Universum, und weit holt Brian Clegg aus, um die Neugier des Lesers zu stillen. Der britische Autor, der Naturwissenschaften in Cambridge lehrt, informiert zunächst sehr ausführlich über frühe Schöpfungsmythen, den Anfang der Astronomie und das Wesen von Theorien und Messmethoden. Ungeduld stellt sich ein, wenn Clegg jeden großen Kosmologen mit allen Details vorstellt, den Denkfaden mit kommentierten Anekdotchen unterbricht und dreimal schulmeisterlich das Prisma erklärt. Am Ende kommt er doch noch zur Sache. Neben der etablierten inflationären Urknalltheorie, von der er nicht viel hält, bespricht er deren prominenteste Konkurrenten: M-Theorie, Multiversumsansatz, »It-from-bit-Theorie« und Theorie des holografischen Universums. Diese Teile sind richtig gelungen; über die lehrbuchartigen Abschnitte muss man eben hinweglesen. ANTJE HANISCH

sondere sozialer Erfolg oder Misserfolg. Zunächst analysieren die Psychologen Leonie Knebel und Pit Marquardt das Messverfahren – den Intelligenztest – in seinen diversen Ausprägungen unter Verweis auf seine Entstehungsgeschichte. Seit den Anfängen, die auf Francis Galton und Alfred Binet zurückgehen, bilde die Intelligenzforschung bis heute das Rüstzeug von Ungleichwertigkeitstheorien. Diese haben gemeinhin das Ziel, gesellschaftliche Unterschiede zu biologisieren. Gilt eine solche Ungleichheit erst als naturgegeben, dann ist es nicht mehr schwer, sie für unveränderlich und sogar für »richtig« zu erklären. Methodische Mängel lassen die Anwender solcher Analysemethoden ebenso gern unter den Tisch fallen wie die Tatsache, dass eine allgemein gültige Definition von Intelligenz nicht existiert und somit nicht einmal Konsens herrscht, worüber man sich in diesem Zusammenhang unterhält.

Diethardt Tautz, Leiter des Max-Planck-Instituts für Evolutionsbiologie,

attestiert Sarrazin und ideologisch Nahstehenden, dass sie von Genetik und Evolution »Grundsätzliches nicht verstanden haben«. So gehöre die menschliche Spezies einerseits zu den genetisch homogensten dieser Erde, und keine ethnische Gruppe habe ein bestimmtes Gen exklusiv für sich. Darüber hinaus handle es sich bei der kognitiven Leistungsfähigkeit um eine polygenetische Eigenschaft, die im Gegensatz zu dem, was Sarrazin uns glauben machen wolle, nicht nach den mendelschen Gesetzen vererbt werde.

Auch bildungswissenschaftlich lässt sich die Behauptung, dass der kulturell-religiöse Hintergrund von Muslimen bildungsfeindlich sei, entkräften, wie der Soziologe Coskun Canan nachdrücklich und fundiert darlegt. Die Undurchlässigkeit des deutschen Bildungssystems etwa in Bezug auf Schichtzugehörigkeit treffe Deutsche mit und ohne Migrationshintergrund gleichermaßen, wobei die Religion so gut wie keine Rolle spiele. Vielmehr seien soziostrukturelle

Einflüsse maßgeblich für den Bildungserfolg verantwortlich.

Im letzten Teil des Sammelbands suchen der Historiker Thomas Etzemüller, der Bildungswissenschaftler Fabian Kessel und der Soziologe Rainer Geißler nach nicht offensichtlichen Beweggründen Sarrazins. Eigentlich spreche hier durch den Autor eine bestimmte gesellschaftliche Klasse, die durch Ab- und Ausgrenzung von missliebigen »Unterschichten« ihren eigenen Status ängstlich zu erhalten suche. Dabei sei der Finanzpolitiker lediglich das letzte Glied in einer langen Kette von Untergangspropheten, die mindestens seit Beginn des 19. Jahrhunderts den »Volkstod« – nicht nur in Deutschland – etwa durch Überfremdung oder Verdummung immer wieder vorhergesagt haben.

Die Vertreter der amerikanischen Variante dieser Position pflegen die Einschränkung oder gar Abschaffung der sozialen Sicherungssysteme zu fordern, damit so die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Nation erhalten bleibe und

ANZEIGE

Forschung für unterwegs

Die neue **MaxPlanckApp** für Ihr iPhone mit Nachrichten, Videos, Podcasts



„Einfach und übersichtlich“ ★★★★★
(von eneme am 09.04.2012)

„Die App ist super und läuft stabil...
Nur zu empfehlen und vor allem kostenlos.
Also zugreifen.“ ★★★★★
(von Schnaggi27 am 22.03.2012)

„So habe ich die neuesten
Forschungsergebnisse immer parat.
Was will man mehr?!“ ★★★★★
(von Quayl am 20.03.2012)



einer degenerativen Bevölkerungsentwicklung Einhalt geboten werde. Auch dies propagiert Sarrazin. Empirisch lasse sich keines der Antisozialstaat-Argumente belegen. Im Gegenteil, je durchlässiger der Zugang zu Bildung und Wohlstand in einer Gesellschaft sei, desto gesünder, langlebiger und auch weniger gewalttätig werde sie, so Kessel.

Dass die Beiträge der einzelnen Autoren gelegentlich inhaltlich redundant

sind, ist zu verschmerzen. Immerhin sind es – entsprechend dem speziellen Forschungsschwerpunkt des jeweiligen Autors – verschiedene Blickwinkel, unter denen sie immer wieder zum selben Ergebnis kommen. Die Essays sind dabei auch für Laien gut verständlich geschrieben.

Von »Deutschland schafft sich ab« bleibt hier außer Druckerschwärze und Papier nicht viel übrig. Das konnte man

auf der Gefühlsebene schon vormals vermutet haben, hier findet man es wissenschaftlich fundiert von Vertretern verschiedener relevanter Fachbereiche bestätigt. Unbedingt lesenswert!

Arne Baudach

Der Rezensent hat Biologie in Gießen und Bangor (Wales) studiert und promoviert derzeit am Institut für Phytopathologie und Angewandte Zoologie der Universität Gießen.



Ernst Peter Fischer

GENial!

Was Klonschaf Dolly den Erbsen verdankt

Ein Streifzug durch die Genetik

Herbig, München 2012. 349 S., € 19,99

Rolf Knippers

Eine kurze Geschichte der Genetik

Springer Spektrum, Heidelberg 2012. 380 S., € 24,95



GENETIK

Der lange Weg von Gregor Mendel zu Craig Venter

Zwei Rundumschläge über die Geschichte der Genetik bedienen unterschiedliche Lesergruppen.

Die Geschichte der Genetik ist verhältnismäßig kurz – aber überaus ereignisreich und gesellschaftlich bedeutsam. In nur 150 Jahren hat sie eine dramatische Entwicklung durchlaufen: vom beschaulichen Klostergarten von Brünn, wo der Mönch Gregor Mendel seine Erbsen zählte, bis zu börsennotierten Unternehmen und bohrenden Fragen nach den Persönlichkeitsrechten von Menschen.

Zwei Autoren nähern sich von sehr verschiedenen Ausgangspunkten dem Ziel, ein und dieselbe Geschichte zu erzählen. Der Wissenschaftshistoriker Ernst Peter Fischer tut es stets unterhaltsam und teilweise spannend wie in einem Krimi. Der emeritierte Professor Rolf Knippers müht sich erkennbar mehr damit ab, das Material aus seinem Lehrbuch »Molekulare Genetik« einzudampfen, um zusätzlich Platz für Ge-

sichten von Forschern und ihren historischen Versuchen zu schaffen. Beide orientieren sich beim Aufbau im Großen und Ganzen an der Chronik bahnbrechender Erkenntnisse.

Mendels Versuche von 1865 gerieten zunächst in Vergessenheit. Doch schon bald nachdem Anfang des 20. Jahrhunderts mehrere Wissenschaftler deren Bedeutung erkannt hatten, gelang der nächste wichtige Schritt: Theodor Boveri (1862–1915) und Walter Sutton (1877–1916) identifizierten die Chromosomen als Träger der Gene. Dem »Fliegenpapst« Thomas Hunt Morgan (1866–1945) gelang es, aus dem Vererbungsmuster verschiedener Mutationen bei der Taufliege *Drosophila* die Position der zugehörigen Gene auf den Chromosomen zu erschließen.

Erst 1952 kamen Alfred Hershey (1908–1997) und Martha Chase (1927–

2003) zu der Einsicht, dass Gene nicht aus Proteinen aufgebaut sind, sondern aus DNA. Ein Jahr später folgte der bekannte Krimi um die Aufklärung ihrer Doppelhelix-Struktur mit den Protagonisten James Watson und Francis Crick. Im »schönsten Experiment der Biologie« zeigten 1958 Matthew Meselson und Franklin Stahl mit Hilfe schwerer Stickstoffisotope, dass jeder Einzelstrang der DNA sich beim Kopieren einen neuen Partner zulegt.

Nach der Entschlüsselung des genetischen Codes, bei der neben Francis Crick Marshall Nirenberg und Heinrich Matthaei Pionierarbeit geleistet hatten, läuteten zwei Entdeckungen die Geburtsstunde der Gentechnologie ein: Zum einen stieß eine Gruppe von Wissenschaftlern auf Enzyme, mit denen sich die DNA an charakteristischen Stellen zerschneiden lässt. Zum anderen kam Kary Mullis während einer nächtlichen Autofahrt eine Methode in den Sinn, ausgewählte DNA-Fragmente nahezu beliebig oft zu vermehren (Spektrum der Wissenschaft 6/1990, S. 60).

Schon bald nach den ersten gentechnischen Experimenten mit Modellorganismen wie *Drosophila* und dem Zebrafisch *Danio rerio* wagten sich die Forscher an große Herausforderungen. Das mündete Ende des letzten Jahrtausends in der Geburt von Klonschaf »Dolly« sowie in dem Wettrennen, wer das Genom eines Menschen am schnellsten und günstigsten sequenzieren kann.

Knippers streut in die chronologische Darstellung immer wieder Exkurse ein, in denen er Hintergründe erklärt oder Anwendungen aufführt. Einige

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Beispiele: Das Genom eines Bakteriums enthält im Gegensatz zu dem höherer Organismen keine »Introns« – das sind Abschnitte, die nach der Transkription aus der RNA herausgespleißt werden. Und mit molekularbiologischen Untersuchungen gelang es, die sterblichen Überreste der 1918 ermordeten russischen Zarenfamilie 75 Jahre später zu identifizieren. Darüber hinaus geht Knippers ausführlich auf ethische Fragen ein, die sich aus den wissenschaftlichen Fortschritten ergeben, wie zum Beispiel der Möglichkeit, das eigene Erbgut entschlüsseln zu lassen, oder der Verwendung von embryonalen Stammzellen.

Fischer erweitert die Erzählung in andere Richtungen: Er räumt den Le-

bensläufen maßgebender Wissenschaftler ähnlich viel Platz ein wie der Erklärung ihrer Forschungsergebnisse. Dabei spart er unrühmliche Details nicht aus wie den abstrusen Vorschlag des alten Francis Crick, das Zeugen von Kindern nur einer kleinen Elite zu gestatten.

Auch Fischer kommt auf die mit dem Klonen von Menschen verbundene ethische Problematik zu sprechen. Zu gesellschaftlich wirklich umstrittenen Fragen äußert er sich im Gegensatz zu Knippers leider nicht.

Eine erhebliche Anzahl von Fachbegriffen lässt sich bei dem komplexen Thema wohl nicht vermeiden. Fischer hilft dem Leser mit zahlreichen Abbildungen, einem Glossar und Infokästen, die zum Beispiel den aktuellen Stand der Forschung zur genetischen Komponente von Krebs darstellen. Nur an sehr wenigen Stellen, etwa wo es um den Zusammenbau von Antikörpern aus verschiedenen Einzelketten geht, werden Nichtbiologen wahrscheinlich doch ansteigen.

Auch Knippers verwendet viele Grafiken, die er teilweise aus seinem Lehrbuch, vielfach aber auch aus Originalveröffentlichungen entnommen hat. Laien dürfte er damit an vielen Stellen überfordern, zumal die zahlreichen Fachbegriffe in keinem Glossar erklärt werden.

Insgesamt ist es ihm gelungen, ein überaus umfangreiches Thema in all seinen Facetten so zu beleuchten, dass dabei ein einheitliches Ganzes entstanden ist. Leider werden wohl nur Leser mit naturwissenschaftlichem Hintergrund diese große Leistung in vollem Umfang würdigen können.

Fischers Werk dürfte dagegen ein größeres Publikum ansprechen, denn sein fundierter, detaillierter und aktualitätsbezogener Überblick eignet sich auch für Laien, ohne dass er Fachleute langweilen würde.

Maren Emmerich

Die Rezensentin ist promovierte Mikrobiologin und arbeitet derzeit bei der Max-Planck-Gesellschaft in München.

Aktuelles aus dem Lesershop



Kalender »Himmel und Erde 2013«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2013« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand



Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013

Wann und wo ist welcher Planet am Himmel zu sehen? Welche besonderen Ereignisse sind in der kommenden Nacht zu beobachten? »Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013« liefert alle wichtigen Informationen für das eigene Erkunden des Sternenhimmels. 212 Seiten mit zahlreichen, meist farbigen Fotografien und Grafiken. € 10,90 zzgl. Porto, als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand, ISBN: 978-3-943702-09-5

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

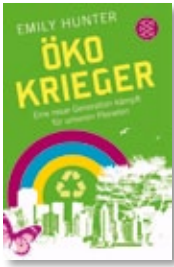
online: spektrum.de/lesershop

E-Mail: service@spektrum.com

Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg



Emily Hunter

Öko-Krieger

Eine neue Generation kämpft für unseren Planeten

Aus dem Englischen von Birgit Brandau. Fischer

Taschenbuch-Verlag, Frankfurt am Main 2012.

312 S., € 8,99

ÖKOLOGIE

Das Buch der Niederlagen

Die nächste Generation der Umweltaktivisten kämpft im Grunde noch die gleichen Schlachten wie ihre Eltern.

Für Emily Hunter, die Tochter des Greenpeace-Gründers Bob Hunter, befinden wir uns im Krieg: die Bewahrer der Natur gegen die Zerstörer der Natur. Dass wir uns im Alltag in dieser Schlacht auf beiden Seiten befinden, dass selbst Klimaschützer für eine Kampagne rund um den Globus fliegen, bleibt hier ausgeblendet.

»Öko-Krieger« stellt uns mit jedem Kapitel jemanden vor, der auf seine ganz eigene Art »für unseren Planeten kämpft«. In der Ichform beschreiben junge Menschen aus der ganzen Welt, wie sie sich für etwas einsetzen und wie sie dazu gekommen sind: die indiansche Umweltschützerin, die ihr Gebiet gegen einen Kohlekonzern verteidigt und nachhaltige Green Jobs für ihre Leute aufbauen möchte; der Aktivist, der vom Schlauchboot aus Walfangschiffe entert; die Frau, die im Kostüm einer Meerjungfrau mit Delfinen schwimmt und damit deren Abschachten in der japanischen Bucht Taiji verhindern will.

Es sind Abenteuergeschichten, die dann am stärksten wirken, wenn sie in aller Deutlichkeit erzählen, wie kaputt wir die Welt schon gemacht haben. Wie leer das Meer schon ist, wie vergiftet die Flüsse sind und wie sich zu unserem Zerstörungswerk die Auswirkungen des Klimawandels addieren.

Bleiben wir in der martialischen Diktion von Emily Hunter. Wenn es wirklich ein Krieg ist, dann in erster Linie einer um Aufmerksamkeit. In den Geschichten geht es um Kampagnen, Me-

dienpräsenz und Flashmobs. Aber allem Anschein nach hat die Partei der Autorin in diesem Krieg bisher nur Niederlagen eingesteckt.

Aufmerksamkeit ist anscheinend das Einzige, was Ökokrieger gewinnen können. Sie retten keinen Regenwald, verhindern keine zerstörerische Politik und bewegen keine Konsumenten dazu, ihr Handeln zu verändern. So haben die zwei globalen Kampagnen für den Klimaschutz, »350.org« und »Earth Hour«, unglaublich viele Teilnehmende auf der ganzen Welt, beeindruckende Bilder und weltweite Medienpräsenz vorzuweisen. Aber haben sie irgendetwas am globalen Energiehunger geändert?

Eigentlich wird ja schon seit über 30 Jahren von einem Umdenken gesprochen, und nach außen hin sind wir alle grün und umweltfreundlich. Aber warum gibt es in dem Buch dann kein Beispiel, bei dem der Umweltschutz gegen das wirtschaftliche Interesse gewinnt? Steht am Ende auch die zweite Generation der Ökokrieger genauso auf verlorenem Posten wie die erste? Und merkt es nicht vor lauter öffentlicher Aufmerksamkeit?

Moment, im fünften Kapitel werden tatsächlich Wale gerettet – unter Lebensgefahr. Aber auch das hatten wir doch schon mal.

Manchmal erzählen die Geschichten von kleinen Erfolgen einzelner Personen, doch im Großen und Ganzen dokumentieren sie, was den meisten Menschen Natur per se wert ist: nichts. Noch

immer schlachtet man Wale aus Tradition und vernichtet Urwälder, um Holzspäne zu gewinnen. Dass sich daran seit Beginn der Umweltbewegung nichts geändert hat, ist unendlich traurig. Während in vielen Teilen der Welt zumindest der Tierschutz eine zunehmende Rolle spielt, erzählt ein Kapitel davon, wie die wachsende gehobene Mittelschicht in China für eine drastische Reduktion der weltweiten Haibestände sorgt. Eine globale Mafia versorgt den Markt mit getrockneten Haifischflossen für die beliebte Suppe. Die Flossen werden den Haien abgeschnitten, die Tiere zum Sterben ins Meer zurückgeworfen.

Zu den alten Problemen sind neue dazugekommen, in erster Linie der Klimawandel. Die niedrigsten Inseln verschwinden bereits, dicht besiedelte Strandgebiete haben mit Sturmfluten und häufigeren Orkanen zu kämpfen. Eine Ökokriegerin von den Fidschis beschreibt die Klimaerwärmung nicht unpassend als langsamen Tsunami, der ihre Heimat bedroht.

Viele Geschichten aus dem Buch, auch ihre, treffen sich beim Kopenhagener Klimagipfel 2009. Dessen katastrophaler Verlauf passt zur düsteren Grundstimmung des Werks. Dort zeigte sich, wer Macht hat und dass für strukturelle Veränderungen keine Bereitschaft vorhanden ist. Aber bei aller Enttäuschung sieht die Ökokriegerin von den Fidschis, wie die anderen Autoren des Buchs, eine wachsende Bewegung.

Das hatte die Generation ihrer Eltern auch schon gesehen, und der Erfolg war ausgeblieben. Vielleicht kämpfen die Ökokrieger an den falschen Fronten, weil sie noch immer an die Macht des Graswurzelaktivismus glauben, und stehen deshalb heute vor den gleichen Problemen wie die erste Generation.

Viele der Geschichten machen je nach Gemüt zornig oder depressiv. Sie wecken damit den Wunsch, aktiv zu werden. Falls auch das eine Intention des Buchs war, funktioniert es ausgezeichnet.

Jörg Wipplinger

Der Rezensent hat Zoologie studiert; er ist Journalist und Videoblogger (<http://diewahrheit.at>) in Wien.

Was uns die Seele sagt. Und wie Sie am besten antworten.

Dezember | Januar 2012 | 2013

FOCUS

Welche Therapien **die Krankenkassen zahlen**

GESUNDHEIT

++ Ärzte & Kliniken | Selbst-Tests ++

FOCUS-GESUNDHEIT Die Psyche

**Das ICH
beschützen**

Job-Stress besiegen,
Lebenskrisen meistern,
aus Beziehungen
Kraft schöpfen

Die Psyche

Alles über Depression & Burnout, Zwang, Angst & Panik,
Borderline, Schizophrenie, Essstörungen und Sucht

In FOCUS-GESUNDHEIT
bündeln wir die Erfahrung
unserer Fachredaktion mit der
Kompetenz von Experten.

JETZT AM KIOSK.

FOCUS-GESUNDHEIT
gibt es auch unter:
Tel. 0180 5 480 1000*,
Fax 0180 5 480 1001
www.focus-gesundheit.de

*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz.
Aus dem Mobilnetz max. 0,42 €/Min.

Was läuft schief?

Psychische Erkrankungen machen durch typische Symptome auf sich aufmerksam. Erkennen Sie mit kurzen Selbst-Tests Depressionen, Zwänge und Angststörungen. Ein detaillierter Fragebogen hilft, Ihre persönlichen Stressfaktoren aufzudecken.

Was müssen Sie wissen?

Eine starke Psyche steckt Lebenskrisen besser weg. Wie Sie sich gegen Jobstress wappnen und aus Beziehungen, Sport und Entspannung Kraft schöpfen.
Plus: Die besten Kliniken und empfehlenswerte Spezialisten.

Was können Sie tun?

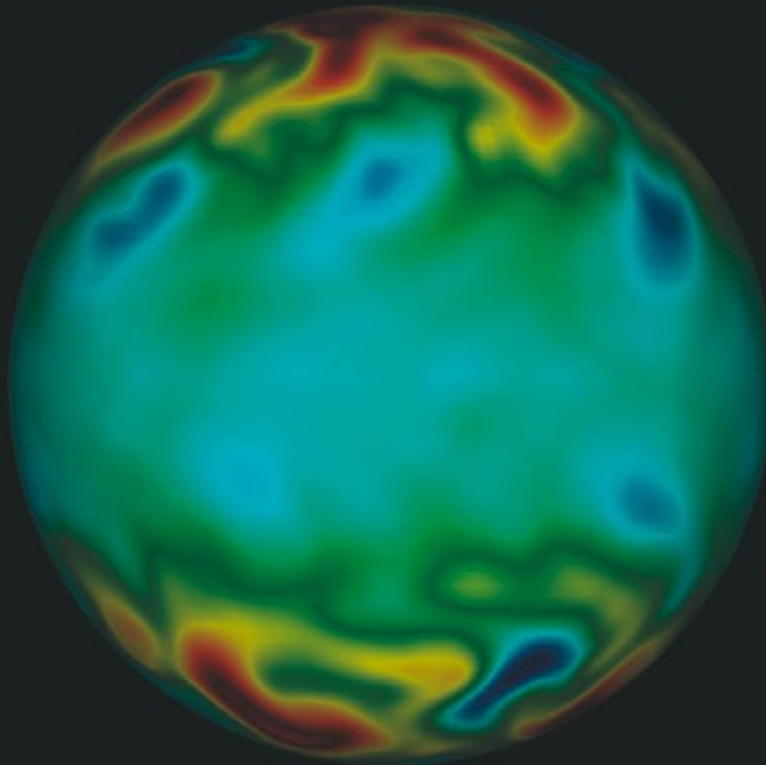
Das raten Deutschlands Top-Mediziner bei der Behandlung von: Depression und Burnout, Angsterkrankungen und Panikstörungen, Schizophrenie, Essstörungen und Suchterkrankungen.

FOCUS

Wissen, das hilft. GESUNDHEIT

Das Klima fremder Welten

Die Entdeckung von Planeten um andere Sterne ist fast schon alltäglich – nun wollen Astronomen mehr über deren Atmosphären wissen. Doch die Hürden sind hoch, schließlich müssen die Forscher sämtliche Informationen aus punktförmigen Lichtquellen am Himmel gewinnen.



KEVIN HENG

Jede Menge Murks

Viele Fachzeitschriften veröffentlichen fast nur Studien mit statistisch signifikanten Positivergebnissen. Etliche davon lassen sich nicht reproduzieren, vor allem solche aus der Psychologie. Laut Experten liegt das an schlechten Studienkonzepten – und an einer Bevorzugung »leicht abgedrehter« Resultate.

Das simulierte Schicksal der Menschheit

Zu Recht hat das Buch »Die Grenzen des Wachstums« vor 40 Jahren die Öffentlichkeit aufgerüttelt. Doch das zu Grunde liegende Computermodell steckte voller grober Vereinfachungen. Dementsprechend ist die Realität deutlich weniger düster als die Simulation von damals.



TIM O'BRIEN

Wer überleben darf

Die Menschheit wird unmöglich alle gefährdeten Arten schützen können. Doch welche Kriterien sollen für Hilfsprogramme gelten? Was zählt mehr: besonders auffallende Spezies, einmalige Organismen oder ungewöhnlich artenreiche Lebensräume?



DREAMSTIME / LUCHSCHEN

Spezial Biotechnologie

Von genetisch manipulierten Nutzpflanzen über den medizinischen Einsatz von Stammzellen bis hin zu den Visionen der synthetischen Biologie – unser Sonderteil stellt die aktuellen Entwicklungen der angewandten Biowissenschaften vor.

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

DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!



- 1** Zwölf Ausgaben zum Preis von nur € 84,- inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90
- 2** 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!
- 3** Kostenloser Zugriff auf das E-Paper-Archiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln
- 4** Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet
- 5** Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats



Produkt im Januar

Dampfmaschine
»Mini-Beam«

- 6** Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Das **Baumeisterspiel** fördert Kombinatorik, Denk- und räumliches Vorstellungsvermögen.



Das fadengeheftete **Din-A4-Spektrum-Notizbuch** bietet Ihnen auf 160 Seiten Platz für Ihre Aufzeichnungen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



Harald Lesch und Jörn Müller erklären in diesem 5-teiligen Hörbuch Merkwürdigkeiten und Rätsel der Astronomie. Laufzeit: 367 min.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

www.spektrum.de/abo

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



online: spektrum.de/abo



E-Mail: service@spektrum.com



Tel.: +49 6221 9126-743



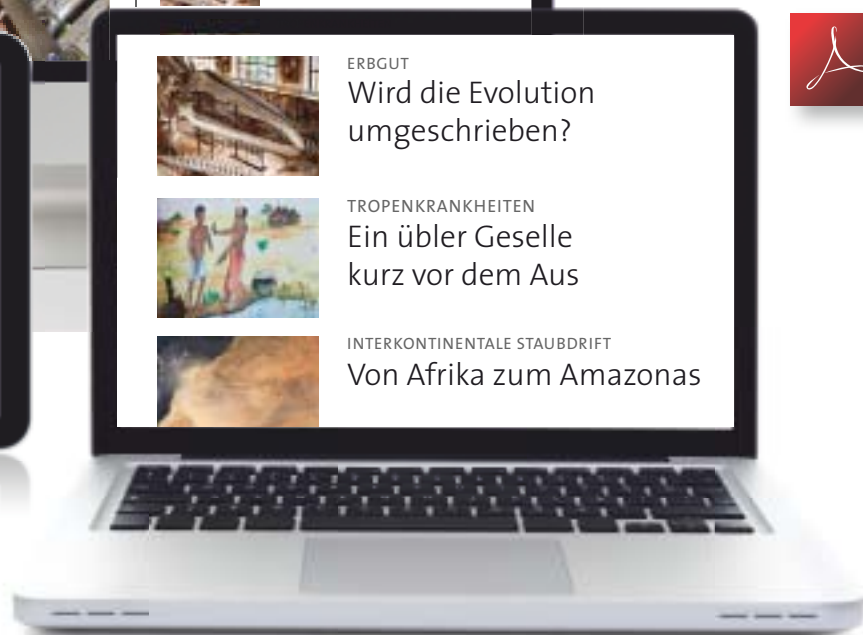
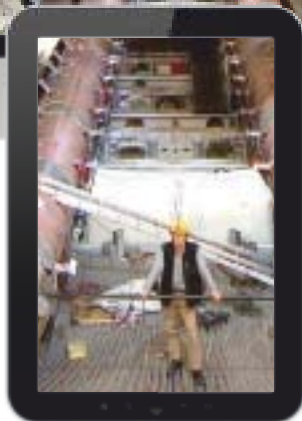
Fax: +49 6221 9126-751

Deutschlands erstes digitales, wöchentliches Wissenschaftsmagazin



Jetzt jeden Donnerstag

- mit mehr als 40 Seiten Hintergründen, News, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar



JETZT TESTEN:

www.spektrum.de/testwoche