

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

NOBEL-
PREISE
2012



DEZEMBER 2012

KERNFUSION

Der steinige Weg zur
Zähmung des Sonnenfeuers

HIRNFORSCHUNG

Was bei einem »Blackout«
im Kopf passiert

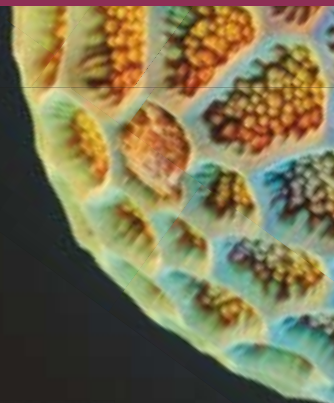
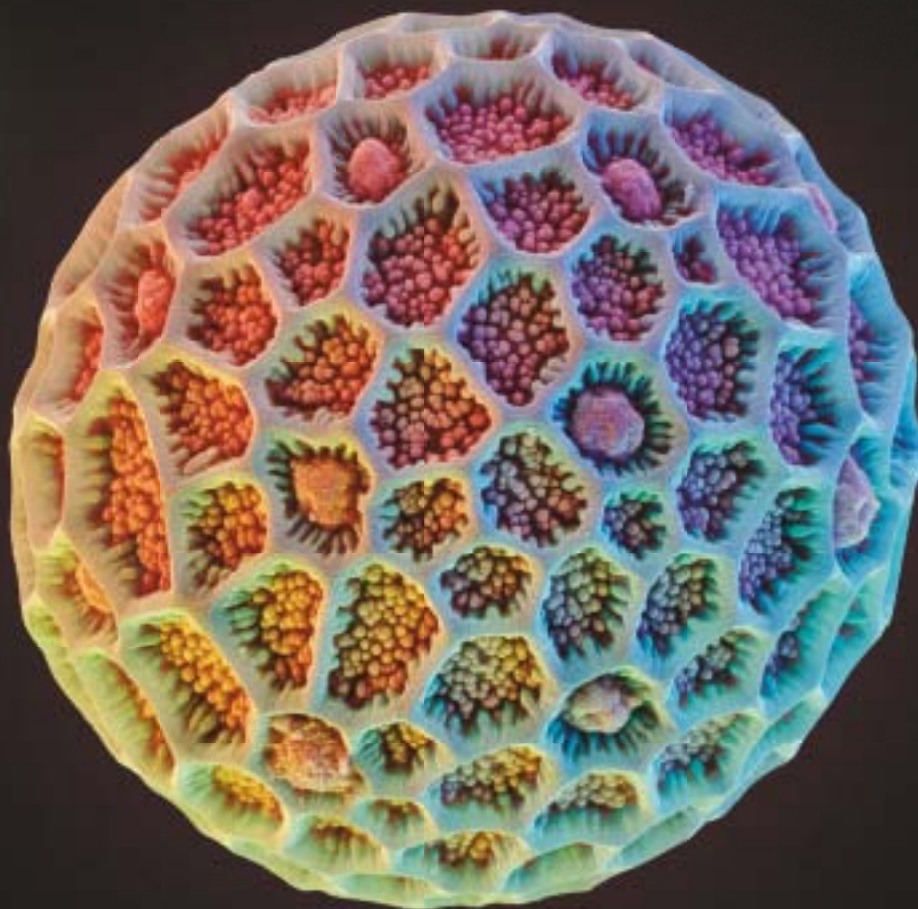
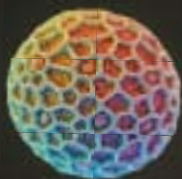
SIMULATION

Wie berechnet
man das Universum?

NEUE SERIE

Allergien

Die Geißel des 21. Jahrhunderts



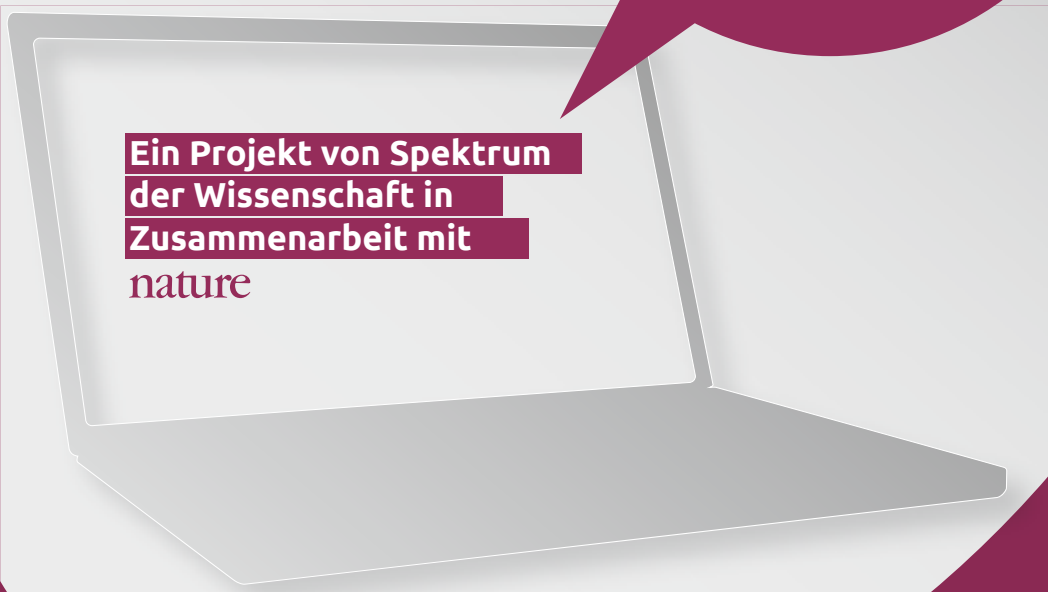
7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E





SciLogs

*Diskutieren Sie mit –
auf unserem Portal für
Wissenschaftsblogs!*



**Ein Projekt von Spektrum
der Wissenschaft in
Zusammenarbeit mit
nature**

*Jetzt auch
auf Englisch!*

**www.SciLogs.com
www.SciLogs.de**

Auf SciLogs bloggen mehr als 100 Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachgebieten sowie mehrere Wissenschaftsjournalisten. Ihr Anliegen ist der interdisziplinäre Dialog über Wissenschaft in all ihren Facetten: Forschung, Anwendung, Politik, Ethik, Werte.

Deutschlands erstes digitales, wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Jetzt
4 Ausgaben
GRATIS

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DIE WOCHE

Mit ausgewählten Inhalten aus
nature

NR

43

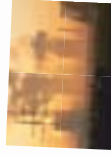
25.10.
2012

- > Geometrie im Sinn
- > Beluga imitiert menschliche Stimmen
- > Menschen lösten tödliches Beben aus

TITELTHEMA: EXOPLANETEN

Die Jagd nach Leben ist eröffnet

Ein neuer Exoplanet im Sternsystem Alpha Centauri stellt die Gretchenfrage der Astronomie: Gibt es eine zweite Erde? Und wenn ja: Wie kann man sie finden?



KLIMAZWIST

»Die Risiken wurden weichgespült«



Umwelt

Geoengineering auf eigene Faust



MEINUNG: »LAQUILA-BEBEN«

Bequeme Sündenböcke

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DIE WOCHE

www.spektrum.de/viermal

zen, also zur alle aus anorganisch dazu beispielsweise (U308, ein Urar Experimente zeit Die Genanaly wenige Genverä die Variante M. offenbar in Anp konzentrationer

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHEN

- in neuem Layout und optimiert für digitale Endgeräte
- jede Woche ausgewählte Analysen, Kommentare, Nachrichten und Bilder aus der Wissenschaft
- als PDF einfach über E-Mail oder per Link zu beziehen
- mit exklusiven Übersetzungen aus **nature**

öglichkeit, Jmbauten bedingun- Kernquali- :mophilen <

210904109,

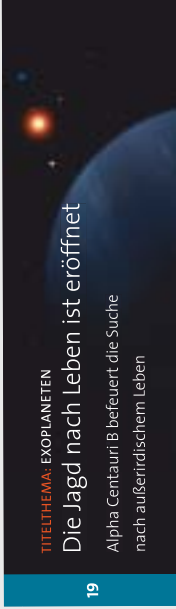
W

zelen Baueleer noch fast so lang Hwang von der t bana-Champaigi ben nun eine bi

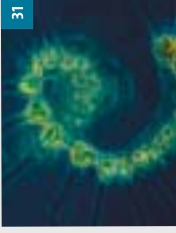
ignesium - Tagesdosis elektrische und Spu- n Element. oden oder haltung be- ber ultra- nige Was- , um die-

TITELTHEMA: EXOPLANETEN
Die Jagd nach Leben ist eröffnet
 Alpha Centauri B befeuert die Suche nach außerirdischem Leben

19



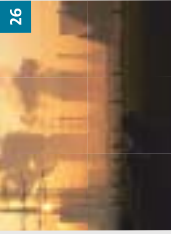
31



Umwelt
Geoengineering auf eigene Faust
 Ein privates Meeressäureexperiment im Pazifik ruft scharfe Kritik hervor


aus nature

26



Klimazwist
»Die Risiken wurden weichgespült«
 Ein neues offizielles Klimagutachten verursacht einen Eklat: Spektrum.de sprach mit Wolfgang Cramer über die Hintergründe

36



Zukunftsforschung
Der Klimakrieg fällt aus – voreerst
 Vorhersagen über die sozialen und politischen Auswirkungen der globalen Erwärmung bleiben schwierig

02 EDITORIAL/IMPRESSUM

04 BILD DER WOCHE
 Lebende Kabel

06 MEINUNG
 »Bequeme Sündenböcke«
 von Lars Fischer

43 REZENSION
 Joan L. Slonczewski, John W. Foster:
 Mikrobiologie

45 NATURE JOBS

SPEKTROGRAMM

08 PALÄOKLIMA
 Tödliche Hitze in der Trias

11 MIMIKRY
 Beluga imitiert menschliche Stimmen

12 MATHEMATIK
 Geometrie im Sinn

14 TEKTONIK
 Menschen lösten tödliches Beben aus

16 EVOLUTION
 Menschliche Blutgruppen sind uraltes Erbe

18 HYDRODYNAMIK
 Fisch jagt mit Spucke und Physik

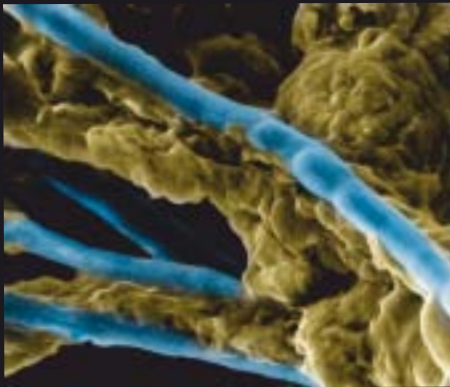
BILD DER WOCHE



Lebende Kabel

von Antje Findeklee

4



JIE SONG AND NILS RISGAARD-PETERSEN

Bakterienketten als natürliche Stromkabel? Das klingt für kurze Distanzen plausibel, aber kaum über größere Entfernungen. Doch Forscher um Nils Risgaard-Petersen und Lars Peter Nielsen von der Universität Aarhus liefern nun gute Argumente für genau dieses Szenario: bakterielle Stromkabel, die im Meeresboden zwischen aeroben und anaeroben Schichten vermitteln.

Im Jahr 2010 hatten Risgaard-Petersen und Nielsen berichtet, dass sie in Meeres-sedimenten einen Stromfluss beobachtet hatten, der biochemische Prozesse in den oberen, sauerstoffreichen Schichten mit denen in tiefer liegenden, sauerstofffreien Zonen koppelten. Bisher bekannte Transportmechanismen überbrücken jedoch nur Distanzen im Nano- bis Mikrometerbereich - hier handelte es sich aber um Abstände von Milli- bis Zentimetern. Wer oder was steckte dahinter?

Wie die Wissenschaftler im Labor er-kundeten, lässt sich diese Stromlieferung unterbrechen: Ein horizontal durchs Se-diment gezogener Draht oder eine für

Bakterien undurchlässige Membran ver-hinderten den Elektronentransport erfolg-reich. Und ein genauerer Blick auf die tiefe-ren, so genannten sulfidischen Schichten, offenbarte ein dichtes Netz aus Bakterien-filamenten, die jeweils aus unzähligen Zel-len bestanden und zum Teil Längen von bis zu 1,5 Zentimetern erreichten (hier in blau, nachträglich eingefärbte rasterelektronen-mikroskopische Aufnahme).

Die Mikroorganismen zählen zur Fami-lie der Desulfobulbaceae, die sowohl Schwefelwasserstoff produzieren als auch verar-beiten können. Dies tun sie im periplasma-tischen Raum zwischen der inneren und der äußeren Membran. Interessanterweise ist diese äußere Membran bei den Bakteri-enkabeln rillenartig, so dass auf der Ober-fläche der Mikroben regelrechte Röhren entstehen, die sich entlang aller Zellen der Filamente ziehen. Ihr Inhalt besteht aus überwiegend geladenen Molekülen: Hier könnte also der Elektronentransport statt-finden. Ob das auch stimmt, müssen weite-re Experimente jedoch erst klären. <

Nature 10.1038/nature11586, 2012

UMWELT

Geoengineering auf eigene Faust

von Jeff Tollefson

Ein privates Meerestäubungsversuch für vermeintlichen Klimaschutz und bessere Fischfängerträge im Pazifik ruft scharfe Kritik hervor. Die Beteiligten berufen sich auch auf dubiose deutsche Emissionszertifikate.

NOAA (PUBLIC DOMAIN)

31

Russ George handelte in bester Absicht – zumindest in seinen Augen –, als er im Juli von einem gecharterten Fischerboot aus 100 Tonnen Eisensulfat in den Pazifischen Ozean vor der kanadischen Westküste kippte. Das Ziel: das Meeresökosystem zu befruchten. Der Eisendünger sollte eine Algenblüte auslösen, die Lachsbestände fördern und Kohlenstoff klimawirksam in die Tiefsee verfrachten. Ob der Ozean wie gewünscht reagierte, weiß bislang keiner offiziell, doch das Experimente sorgt für hitzige Diskussionen an Land. Wissenschaftler reagierten verärgert, Angehörige eines Indianerdorfs an der Küste sehen sich bloßgestellt, und Gegner des so genannten Geoen지니어ings, des Klimaschutzes durch technische Eingriffe in die Umwelt, laufen erzürnt Sturm.

Die ersten Berichte in der britischen Tageszeitung »The Guardian« am 1. Oktober stellten das Projekt als quasianarchisches Geoen지니어ing-Vorhaben dar – das bislang größte seiner Art –, das unverhoh-

len internationale Übereinkommen verletze. Kritiker unterstellten dem US-amerikanischen Unternehmer Russ George, dass er Mitglieder des Haida-Stamms aus dem Dorf Old Massett auf den Königin-Charlotte-Inseln überredet habe, die Düngeung zu finanzieren. Im Gegenzug habe er ihnen in Aussicht gestellt, dass sie dafür Emissionszertifikate verkaufen dürften, weil die Algen entsprechend Kohlendioxid aufnehmen. Tatsächlich war der Ablauf jedoch noch viel komplexer. Der ganze Vorgang zeigt erneut, wie explosiv die Mischung aus Politik und halb garter Wissenschaft zur technischen Manipulation des Erdklimas werden kann.

Die Rolle des Haida-Stamms

Nachdem George von »Nature« kontaktiert wurde, keilte er gegen die Medien und »radikalen Umweltschützer« aus, die eine »rassistische« Geschichte über einen eigenbrötlerischen, selbst ernannten Geoen지니어er konstruierten, der naive Ureinwohner übervorteilt hätte. »Das war deren

Arbeit und deren Projekt«, fügt er an. »Es kam doch nicht deshalb dazu, weil sie irgendetwas zu dumm waren, um es besser zu wissen!«

Mittlerweile steht fest, dass Old Massett, ein indigenes Fischerdorf mit weniger als 1000 Einwohnern, das Projekt begeistert aufgenommen hatte: Die Bevölkerung erhoffte sich davon, dass wieder mehr Lachse aus dem Meer zu ihren Laichgründen in den Flüssen der Insel zurückkehren. Dazu sollte eine Algenblüte angestoßen werden, welche dann das gesamte ozeanische Nahrungsnetz bis hin zu den Fischen stärken könnte. Die Dorfbewohner stimmten im Februar 2011 dafür, einen Kredit in Höhe von etwa 2,5 Millionen US-Dollar an die Haida Salmon Restoration Corporation (HSRC) zu vergeben, damit diese den Ozean dünge, so John Disney, der Vorsitzende der Korporation aus Old Massett und Wirtschaftsbürgermeister des Dorfs.

George unterschrieb als Chefwissenschaftler, nachdem das HSRC auf ihn zugekommen war, so Disney – zuvor führte

Jetzt jeden Donnerstag!

- mit mehr als 40 Seiten Analysen, News, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar



Spektrum – Die Woche ist ein Magazin im PDF-Format für digitale Endgeräte.



Lesen Sie *Spektrum* –
Die Woche viermal gratis!

www.spektrum.de/viermal

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

DIE WOCHE

www.spektrum.de/viermal



Hartwig Hanser
Redaktionsleiter
hanser@spektrum.com

Kampf des Immunsystems gegen Windmühlen

Ich erinnere mich noch deutlich an meinen ersten Heuschnupfenanfall als Kind: Es war auf einer großen Gartenausstellung, als mir plötzlich die Augen tränten und ich heftig anfangen zu niesen. Was genau damals der Auslöser war, weiß ich bis heute nicht, aber seitdem haben die Monate April bis Juni für mich deutlich an Reiz verloren.

Dabei bin ich noch vergleichsweise glimpflich davongekommen: Einen Bekannten von mir bringen etwa schon kleinste Mengen von Nüssen im Essen in Lebensgefahr. Ein wenig tröstet auch, dass es wahrlich nicht an Leidensgenossen mangelt. Je nach Studie wird bis zu einem Viertel der Bevölkerung hier zu Lande von Heuschnupfen geplagt, im Fachjargon als saisonale allergische Rhinitis bezeichnet. Insgesamt dürfte sogar rund ein Drittel aller Mitteleuropäer irgendeine Allergie haben. Besonders auffällig sind die Zahlen beim atopischen Ekzem, besser bekannt unter der Bezeichnung Neurodermitis: Während inzwischen mindestens jedes zehnte Vorschulkind darunter leidet, sind bei Erwachsenen nur rund zwei bis drei Prozent betroffen – etwa der Anteil, der vor 50 Jahren für Kleinkinder galt.

Daran zeigt sich exemplarisch: Allergien haben in den letzten Jahrzehnten dramatisch zugenommen, vor allem in den westlichen Ländern. Und es sieht ganz danach aus, als würde sich dieser Trend fortsetzen. Die exakten Gründe für das explosionsartige Umsichgreifen der Überempfindlichkeitsreaktionen sind noch ungeklärt – Hypothesen gibt es viele, etwa jene, dass bessere Hygiene dabei ein entscheidender Faktor ist. Vielleicht kommt hier auch unser »Mikrobiom« ins Spiel, jene Abermilliarden von Mikroorganismen, die in und auf unserem Körper leben und dort wichtige Aufgaben erfüllen (siehe Titelthema im letzten Heft).

Dem komplexen Phänomen »Allergie« versuchen wir uns mit einer vierteiligen Serie zu nähern, die mit dieser Ausgabe beginnt und auf Artikeln beruht, die ursprünglich in »Nature« erschienen sind. Um einen möglichst vollständigen Überblick über das Fachgebiet zu ermöglichen, haben wir uns zu einer für uns eher ungewöhnlichen Darstellung entschlossen: Statt eines längeren Übersichtsartikels präsentieren wir Ihnen eine Zusammenstellung kürzerer Texte, die in jedem Serienteil mehrere verschiedene Aspekte beleuchten.

Ab S. 31 beschreibt Paige Brown eine typische – ihre eigene – Allergikerkarriere und berichtet von einem neu entdeckten Schlüsselprotein, auf das Mediziner große Hoffnungen als Ansatzpunkt für Therapien setzen. Den Ursachen für die Ausbreitung der Überempfindlichkeitsreaktionen und hier speziell der Hygienehypothese geht der Artikel ab S. 34 nach – und stellt fest, dass möglicherweise unsere gesamte moderne westliche Lebensart dem Übel zu Grunde liegt. Um neue Erfolge beim Kampf gegen Lebensmittelallergien geht es ab S. 38: In Studien bewährte es sich, Kleinkinder schon früh mit potenziell allergener Nahrung in kleinen Mengen vertraut zu machen. Und schließlich beschreibt Hywel Williams von den britischen Nottingham University Hospitals den derzeitigen Stand des Wissens zur Neurodermitis (ab S. 42).

Eine anregende Lektüre wünscht Ihr

Hartwig Hanser

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Drei Neuroforscherinnen von der Yale School of Medicine, **Amy Arnsten, Rajita Sinha** und **Carolyn Mazure** (von links nach rechts), beschreiben, was genau im Gehirn abläuft, wenn wir unter Stress einen Blackout erleben (S. 44).



Zusammen mit der Archäologin **Susanne Willer** (links) berichten die archäologischen Restauratoren **Kati Bott** und **Frank Willer** über die Erforschung überlebensgroßer Bronzestatuen am Limes. Besonders faszinieren sie die Vergoldungstechniken (S. 70).



Eine verbreitete These besagt, dass Menschen keineswegs zufriedener und glücklicher werden, wenn sie mehr Geld zur Verfügung haben. Neue Studien stellen das allerdings in Frage, so die Wirtschaftswissenschaftler **Joachim Weimann, Ronnie Schöb** und **Andreas Knabe** (von rechts nach links) ab S. 76.

11 Editorial

14 Leserbrief/Impressum

16 Spektrogramm

Maus wirft Fell ab • Wasser auf dem Mond
• Biologisch abbaubare Elektronik • Künstliche Schilddrüse • Schleimpilze weichen eigener Spur aus • Neue Erdplatten

19 Bild des Monats

Lebende Stromkabel

► 20 Forschung aktuell

Nobelpreis für Medizin
Revolution in der Stammzellforschung.

Nobelpreis für Physik
Verhalten von Quantensystemen.

Nobelpreis für Chemie
Struktur und Funktion des Adrenalinrezeptors.

Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften
Kooperative Spieltheorie und Marktdesign.

SPRINGER'S EINWÜRFE
Schuldig oder krank?
Vor Gericht sind Gehirn und Geist nicht das Gleiche.

44



58



70



..... BIOLOGIE & MEDIZIN

► 44 Biologie des Blackouts

Amy Arnsten, Rajita Sinha und Carolyn Mazure

Unter starkem Stress können Hirnregionen ausfallen, die uns zu rationalem Verhalten befähigen. Dann geben wir primitiven Impulsen nach.

..... PHYSIK & ASTRONOMIE

► 58 Der lange Weg zum künstlichen Sonnenfeuer

Gerhard Samulat

Die Kernfusion könnte in einigen Jahrzehnten einen beträchtlichen Teil des Energiebedarfs der Menschheit decken. Doch ob das klappt, ist ungewiss.

SCHLICHTING!

68 Weihnachtliche Reflexionen

H. Joachim Schlichting

In fraktalen Reflexionsmustern spiegelnder Glaskugeln erscheinen unendlich viele »Weihnachtsbäume«.

..... MENSCH & KULTUR

70 Goldene Zeiten am Limes

Kati Bott, Frank Willer und Susanne Willer

Bronzestatuen von Kaisern und Göttern signalisierten Roms Macht auch am Rand des Imperiums. Die eingesetzten Vergoldungstechniken überraschen Metallurgen.

76 Die Vermessung des Glücks

Joachim Weimann, Ronnie Schöb und Andreas Knabe

Höheres Einkommen verheißt mehr Glück. Doch fühlen wir uns auch glücklicher, wenn wir reicher werden?

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

82 Verkuppeln auf Mathematisch

Dominique Dumont

Stabile Ehen durch den Algorithmus von Gale und Shapley.

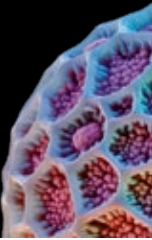
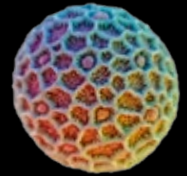


▶ 30
TITELTHEMA

Allergien – Geißel des 21. Jahrhunderts

Allergien nehmen dramatisch zu; 30 bis 40 Prozent der Weltbevölkerung sind inzwischen davon betroffen. Unsere neue Serie gibt einen Überblick über den aktuellen Wissensstand.

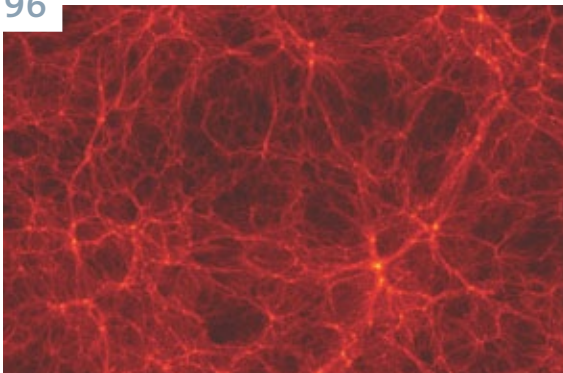
- 31 Der atopische Marsch
- 34 Ursachenforschung
- 38 Lebensmittelallergie
- 42 Neurodermitis



88



96



ERDE & UMWELT



88 Frühwarnsystem für bedrohte Welten

Carl Zimmer

Mit Hilfe von Simulationen wollen Forscher vorhersagen, ob überlastete Ökosysteme bald zusammenbrechen.

TECHNIK & COMPUTER

▶ 96 Das Universum in der Kiste

Brian Hayes

Das Programm »Bolshoi« bildet die Entwicklung des Kosmos über 14 Milliarden Jahre mit acht Milliarden Einzelmassen nach.

SONDERTEIL NACH SEITE 104

»Wissenschaft verstehen – Die Preisträger 2012«

»Erklärt uns eure Arbeit so, dass wir sie verstehen. Begeistert uns!«
Diesen Aufruf richteten das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig und »Spektrum der Wissenschaft« an junge Forscherinnen und Forscher, die sich mit umweltrelevanten Themen auseinandersetzen.



105 Rezensionen

Tim Flach: Ganz nah • *Charles Duhigg:* Die Macht der Gewohnheit • *Bernhard Kegel:* Ein tiefer Fall • *Hansjörg Küster:* Die Entdeckung der Landschaft • *Anna Frebel:* Auf der Suche nach den ältesten Sternen • *Andreas Heuer:* Der perfekte Tipp • *Thomas Martin et al. (Hg.):* Paläontologie

94 Wissenschaft im Rückblick

Vom Steinzeit-Brot zur Welternährung

110 Vorschau

Titelmotiv: Corbis / Science Faction / David Scharf [M]
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet.



Kein Fingerabdruck ist wie der andere. Genauso stimmen keine zwei Gehirne in Aufbau und Funktion völlig überein.

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

Gensprungaktivität und Vernetzungsdichte

Die Neurobiologen Fred H. Gage und Alysson R. Muotri sehen in so genannten springenden Genen, die auch noch im Erwachsenen Gehirn Mutationen hervorrufen, einen Grund für die Anpassungsfähigkeit unseres Denkkorgans. (»Was jedes Gehirn einzigartig macht«, Oktober 2012, S. 22)

Dieter Eichrodt, Glengarriff (Irland): Zwar enthält jede Nervenzelle, ebenso wie jede Zelle jedes anderen Gewebetyps, das vollständige Genom eines Organismus. Aber die Autoren weisen zu Recht darauf hin, dass es das Verschaltungsmuster der rund 100 Milliarden Nervenzellen ist und nicht das einzelne Neuron, das die Unterschiede zwischen Gehirnen ausmacht. Der Gensprungmechanismus, den die Autoren beschreiben, ist ein innerzellulärer Prozess, der in allen betroffenen Neuronen parallel, aber jeweils zufallsbedingt, also völlig unkoordiniert abläuft. Dann stellt sich die Frage, wie davon eine Nettowirkung auf den Phänotyp ausgehen kann. Auf welche Weise werden die innerzellu-

lären Gensprünge – wenn überhaupt – im Verschaltungsmuster der Nervenzellen wirksam? Andererseits deuten die Autoren an, dass die Gensprünge, zunächst ohne Einfluss auf das Verschaltungsmuster, einzelne Neurone hervorbringen können, »mit deren Hilfe das Gehirn ungewohnte Herausforderungen besonders gut bewältigen kann«. Könnte es im Gegensatz hierzu, aber im Einklang mit der Verschaltungshypothese, sein, dass eine insgesamt höhere Gensprungaktivität in einer bestimmten Gehirnregion dort zu einer korrelierten höheren Vernetzungsdichte der Neurone führt? Doch eine solche Außenwirkung des stets nur innerzellulären Gensprungmechanismus bedürfte noch der Erklärung.

Risiko Fehldiagnose

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

Dr. med. Josef Peter Kosek, Rietberg: Der hervorragende Beitrag von Marc B.

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 Findeklee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. 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
Redaktionsassistenz: Erika Eschwei
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
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: Dr. Markus Fischer, Andreas Nestke, Katharina Schulz
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) / \$Fr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. 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: © 2012 (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 Rechtmäßigkeit 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.



Garnick lässt sich noch wie folgt erweitern: Die Tastuntersuchung der Prostata erhöht ihrerseits das PSA im Blut. Zuerst tasten und anschließend, eventuell erst nach einer oder mehreren Stunden, eine Blutabnahme vorzunehmen, kann einen falsch erhöhten Blutwert des PSA zur Folge haben. Dies ist besonders dramatisch, wenn bereits ein Prostatakarzinom diagnostiziert ist. Der künstlich erhöhte PSA-Wert kann dann zu einer möglicherweise zu diesem Zeitpunkt nicht angebrachten Therapie führen. In diesen Fällen (kein Karzinom oder bereits bewiesenes Karzinom) läge ein Fehlergebnis mit konsekutiver Fehleinschätzung vor, und damit eine Fehldiagnose.

Stoßweises Ausatmen

Laut dem Physiologen Michael J. Parks scheint das Zwerchfell zu bestimmen, wie lange wir die Luft anhalten können. (*»Warum ist Luftanhalten so schwer?«, Oktober 2012, S. 36*)

Ernst Sauerwein, München: Der Autor dürfte mit seiner These richtig liegen. Denn wenn man die Luft eine Zeit lang angehalten hat, genügt schon ein klein wenig ausatmen, damit der Atemdrang sofort spürbar nachlässt, offenbar auf Grund der mit dem teilweisen Ausatmen verbundenen Zwerchfellbewegung. Das kann man leicht selbst ausprobieren.

In der Konsequenz lässt sich durch stoßweises Ausatmen kleiner Atemvolumina die Stoppuhr für den Atemzwang immer wieder auf null zurücksetzen, bis keine Luft zum Ausatmen mehr vorhanden ist. Ich glaube mich erinnern zu können, mit zusätzlichem vorherigem Hyperventilieren und mehrmaligem tiefem Ausatmen (um die verbrauchte Restluft vollständig aus der Lunge zu entfernen) in jungen Jahren auf zirka drei Minuten vom Luftanhalten über das Ausatmen bis zum nächsten Luftholen gekommen zu sein. Damals war ich im Glauben, dass diese drei Minuten unkritisch seien. Nach der Lektüre des Artikels ist mir jetzt klar geworden, dass man dabei körpereigene Kontrollme-

chanismen überlistet, wobei unter Umständen kritisch niedrige Sauerstoffwerte im Blut auftreten. Deswegen sei diese Methode auch nicht zur Nachahmung empfohlen, jedenfalls nicht ohne ärztliche Aufsicht!

Interessant wäre zu wissen, was die asiatischen Perlentaucher anstellen, um ihre langen Tauchzeiten zu erreichen. Durch die niedrige Temperatur und den Wasserdruck sind die Bedingungen natürlich andere.

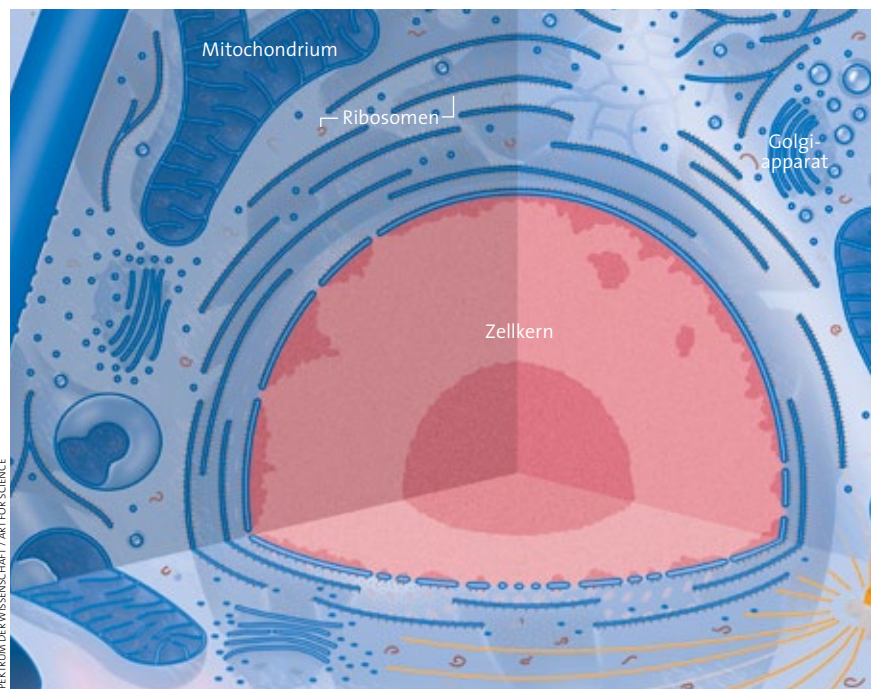
Errata

»Von der Schipiste in den abstrakten Wahrscheinlichkeitstraum«, November 2012, S. 82

Auf S. 85 heißt es, Stalin habe 1954 Andrei Kolmogorow und zwei anderen Mathematikern eine Reise ins Ausland erlaubt. Stalin ist jedoch schon 1953 gestorben. Nicht Stalin, sondern dessen Nachfolger Georgi Maximilianowitsch Malenkow (Vorsitzender des Ministerrats) genehmigte die Reise von Kolmogorow.

»Das geheimnisvolle Innenleben der Zellen«, November 2012, S. 42

In der Grafik auf S. 43 sind uns leider zwei Beschriftungsfehler unterlaufen. Hier die korrekte Darstellung.



FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET

facebook

www.spektrum.de/facebook

YouTube

www.spektrum.de/youtube

studivz

www.spektrum.de/studivz

twitter

www.spektrum.de/twitter

Eine typische Lehrbuchzeichnung des Zellinneren zeigt neben dem Kern (im Bild: rot) verschiedene Organellen, wie die Mitochondrien, den Golgiapparat und die Ribosomen (die Proteinfabriken; im Bild: orange Punkte). Doch inzwischen haben Biologen darüber hinaus noch viele weitere intrazelluläre Strukturen entdeckt – und laufend werden es mehr.

BIOLOGIE

Maus entkommt durch Fellabwurf

Um den Krallen oder Zähnen von Fressfeinden zu entchlüpfen, bedienen sich ostafrikanische Stachelmäuse eines radikalen Tricks: Sie werfen ganze Hautpartien ab. Das haben Forscher um Ashley Seifert von der University of Florida beobachtet. Bisher war die Fähigkeit, bei Gefahr einen Körperteil abzustoßen – die so genannte Autotomie –, vor allem von Eidechsen, Salamandern und Gliederfüßern bekannt.

Die untersuchten Stachelmäuse (*Acomys kempfi* und *Acomys percivali*) entledigen sich beim Versuch, Feinden zu entkommen, nicht nur ihrer Stachelborsten und Teile des Schwanzes, sondern auch größerer Hautstücke bis hin zu 60 Prozent des Rückenfalls. Dabei entstehen enorme Wunden. Jedoch erneuern sich die fehlenden Partien mitsamt Haaren binnen weniger Wochen und narbenfrei.

In der Regel sind Säuger nur als Embryos in der Lage, komplexe Gewebe von Grund auf neu wachsen zu lassen. Denn eine Voraussetzung dafür ist, dass die beteiligten Zellen intensiv miteinander kommunizieren. In der Haut von erwachsenen Tieren erschwert jedoch die kollagenhaltige Basalmembran den Informationsaustausch zwischen Oberhaut und tiefer gelegener Lederhaut.

Bei verletzten Stachelmäusen überzieht sich die Wunde extrem schnell mit einem Deckgewebe. Darunter vermehren sich undifferenzierte Vorläuferzellen stark, zunächst ohne dass die zerstörte Basalmembran regeneriert wird. Das ermöglicht die Bildung neuen Gewebes aus den Vorläuferzellen, und die Tiere können Haut, Haare, Knorpel und Fettzellen vollständig ersetzen. Die zu Grunde liegenden molekularen Prozesse



ASHLEY W. SEIFERT, UNIVERSITY OF FLORIDA

Stachelmäuse verdanken den Namen ihren Borstenhaaren auf dem Rücken.

wollen die Forscher nun genauer untersuchen, auch im Hinblick auf mögliche Anwendungen in der Medizin.

Nature 489, S. 561–565, 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Analysen und Spektrogramme!

Lesen Sie in **Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE**

- Exoplaneten: Die Jagd nach Leben ist eröffnet
- Umwelt: Geoengineering auf eigene Faust
- Klimazwist: »Die Risiken wurden weichgespült«

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

ASTRONOMIE

Wasser auf dem Mond – dank der Sonne

Die Wasservorkommen auf dem Mond stammen nicht nur von Meteoriten und Kometen, sondern sind zum Teil unter Mitwirkung des Sonnenwinds entstanden. Zu diesem Schluss kommen Forscher um Yang Liu von der University of Tennessee, USA. Die Wissenschaftler untersuchten glasähnliche Kügelchen aus geschmolzenem Staub von der Mondoberfläche, in denen winzige Mengen an Wasser eingeschlossen waren. Das Material war bei verschiedenen Apollomissionen zur Erde gebracht worden.

Mit spektroskopischen und spektrometrischen Verfahren bestimmten die Forscher das Verhältnis von Wasserstoff zu seinem schweren Isotop Deuterium in den Proben. Der gemessene Wert war deutlich höher als für Kometen und wasserhaltige Meteoriten typisch. Das spricht dafür, dass das

Wasser im Mondstaub mit Wasserstoffkernen (Protonen) aus dem Sonnenwind angereichert ist. Denn dieser enthält kaum Deuteriumkerne, da unser Zentralgestirn sie schon fast vollständig mit leichtem Wasserstoff zu Helium verschmolzen hat.

Zusammen mit anderen Befunden deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Wasserstoffkerne des Sonnenwinds mit sauerstoffhaltigen Verbindungen im Mondstaub reagieren, wobei unter anderem Wasser entsteht. Dies war früher von einigen Wissenschaftlern angezweifelt worden. Der Mechanismus bringe möglicherweise auch auf anderen atmosphärenlosen Himmelskörpern Wasser hervor, etwa auf dem Merkur oder dem Asteroiden Vesta, vermuten die Wissenschaftler.

Nature Geoscience
10.1038/ngeo1601, 2012

Bioverträgliche Elektronik löst sich im Körper auf

Ein internationales Forscherteam hat biologisch abbaubare elektronische Schaltungen entwickelt, die sich nach einer vorher bestimmten Zeit von selbst auflösen. Mögliche Einsatzgebiete seien medizinische Implantate, Umweltsensoren oder Bauteile für schnelllebige Mobilgeräte, schlagen Suk-Won Hwang von der University of Illinois in Urbana-Champaign (USA) und seine Kollegen vor.

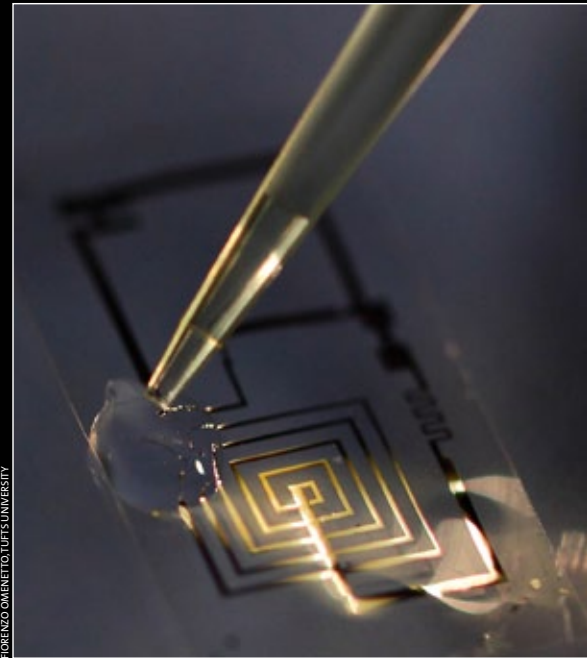
Als Trägermaterial für die Schaltungen dient Seide. Elektroden, Leiter, Widerstände und Spulen bestehen aus Magnesium. Dioden und Transistoren sind aus ultradünnen Siliziumschichten gefertigt. Schon geringe Mengen Wasser reichen aus, um solche Strukturen aufzulösen, berichten die Wissenschaftler.

Wie schnell sich die Elektronik zersetzt, hängt von der Dicke der Teile

ab und davon, ob die Schaltung mit Seide oder Magnesiumoxid umhüllt ist. Indem die Forscher verschiedene Materialstärken und Umhüllungen einsetzten, konnten sie die Verfallszeit auf Minuten, Stunden, Tage oder Wochen festlegen. Zudem entwickelten sie ein Computermodell, das den Auflösungsprozess präzise vorhersagt.

Zu Testzwecken stellten die Wissenschaftler biomedizinische Implantate her, die sie in Mäuse und Ratten einpflanzten. Nach je drei Wochen hatten sich die Implantate weitgehend aufgelöst oder waren vom Gewebe aufgenommen worden. Bei Menschen könnten solche Schaltungen etwa dazu dienen, vorübergehend Vitalfunktionen zu überwachen oder Medikamente kontrolliert in den Körper abzugeben.

Science 337, S. 1640–1644, 2012



FIORENZO OMENETTO/TUFTS UNIVERSITY

Spule und Leiterbahnen aus Magnesium, aufgebracht auf Seide. Bei Wasserkontakt lösen sich die Strukturen auf.

MEDIZIN

Künstliche Schilddrüse aus Stammzellen

Wissenschaftler um Sabine Costagliola von der Université Libre in Brüssel haben aus embryonalen Stammzellen der Maus schilddrüsenähnliches Gewebe erzeugt. Sie brachten die Stammzellen dazu, zwei Eiwei-

ße in außergewöhnlich hoher Menge herzustellen: NKX2-1 und PAX8. Beide Stoffe gehören zu den Transkriptionsfaktoren – Proteinen, die die Aktivität von Genen regeln. Daraufhin wandelten sich die Stammzellen in sogenannte Thyreozyten um. Das sind Zellen der Schilddrüse, die im intakten Organ normalerweise Hormone herstellen. Die anschließende Behandlung mit dem Hormon Thyreotropin bewirkte, dass sich die Zellen zu kleinen Bläschen anordneten, wie es dem

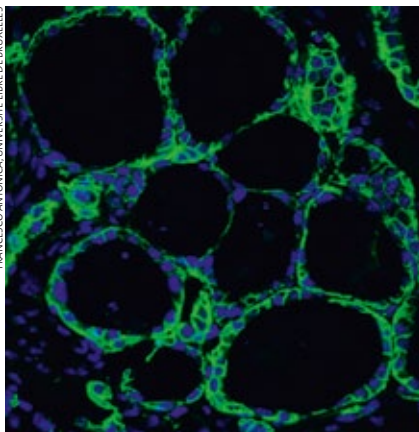
Künstlich erzeugte Schilddrüsenzellen haben sich hier nach hormoneller Behandlung zu kleinen Bläschen angeordnet. In Mäuse verpflanzt, gaben sie das Schilddrüsenhormon Thyroxin ins Blut ab.

natürlichen Aufbau des Organs entspricht.

Nun pflanzten die Wissenschaftler das Gewebe in Mäuse ein, wo es sich als funktionsfähig erwies: Es nahm Jodverbindungen auf und gab Schilddrüsenhormone ins Blut ab. Einige Zelltypen der Schilddrüse, etwa die Calcitonin produzierenden C-Zellen, seien bei der Behandlung jedoch nicht entstanden, räumen die Forscher ein.

Fehlfunktionen der Schilddrüse zählen zu den häufigsten angeborenen Krankheiten des Hormonsystems. Betroffen ist etwa 1 unter 2000 Kindern. Die neuen Versuchsergebnisse machten Hoffnung auf mögliche Stammzelltherapien, schreiben die Forscher.

Nature 10.1038/nature11525, 2012



FRANCESCO ANTONICA, UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES

BILOGIE

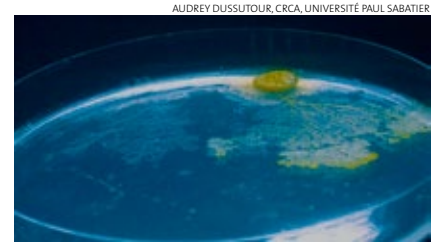
Schleimpilze orientieren sich an eigener Spur

Obwohl Schleimpilze kein räumliches Erinnerungsvermögen haben, vermeiden sie überflüssige Wege, indem sie ihrer eigenen Schleimspur ausweichen. Sie nutzen den Glykoproteinschleim damit gewissermaßen als ausgelagertes Gedächtnis.

Forscher der University of Sydney (Australien) testeten das Orientierungsvermögen des Schleimpilzes *Physarum polycephalum*, eines vielkernigen Einzellers. Sie setzten ihm eine Zuckerlösung vor, platzierten diese allerdings hinter einer u-förmigen Barriere. Somit konnte der Pilz die Nahrungsquelle nicht direkt erreichen, indem er dem Konzentrationsgradienten folgte, sondern er musste einen Weg um das Hindernis finden. 24

Exemplare durften sich auf normalen Nährböden vortasten. Weitere 24 Individuen mussten mit erschwerten Bedingungen zurechtkommen: Ihre Nährböden hatten die Forscher zuvor mit Pilzschleim benetzt, so dass die Einzeller ihre eigene Spur nicht mehr erkennen konnten.

Von den Schleimpilzen der ersten Gruppe erreichten innerhalb der Versuchsdauer von fünf Tagen alle außer einem das Ziel. In der zweiten Gruppe fanden dagegen nur acht den Weg. Weder das Zuckerkonzentrationsgefälle noch das Ausbreitungstempo der Pilze war durch die Benetzung des Untergrunds beeinflusst worden. Vielmehr hatten die Einzeller, die sich nicht an der eigenen Spur orientieren



Der Schleimpilz *Physarum polycephalum* breitet sich auf einem Nährboden aus, indem er verzweigte Ausläufer bildet. Das Geflecht bewegt sich auf Nahrungsquellen zu und kann dabei auch schwierige Hindernisse umgehen.

konnten, wesentlich mehr Zeit in bereits erkundeten Bereichen verschwendet. Demnach ermöglicht der Schleim den Pilzen ein effizienteres Navigieren durch eine komplexe Umgebung.

PNAS 109, S. 17490–17494, 2012

GEOLOGIE

Neue Erdplatten entstehen

Unter dem Indischen Ozean, westlich von Sumatra, zerbricht die Indisch-Australische Platte in mehrere Teile. Neue Belege dafür haben nun Forscher um Thorne Lay von der University of California Santa Cruz (USA) gefunden. Die Wissenschaftler analysierten Aufzeichnungen der seismischen Wellen eines schweren Erdbebens, das sich am 11. April 2012 westlich vor Nordsumatra ereignet

hatte. Demzufolge brach die Erdkruste damals entlang von vier Verwerfungslinien, was Erschütterungen der Stärke 8,7 auslöste. Zwei Stunden später folgte ein schweres Nachbeben der Stärke 8,2.

Noch liegen Australien und Indien auf derselben Erdplatte. Doch auf diese wirken beträchtliche Kräfte ein. Ganz im Norden drückt sie gegen die Eurasische Platte und faltet den Himalaja auf, was sie stark bremst. Weiter südlich

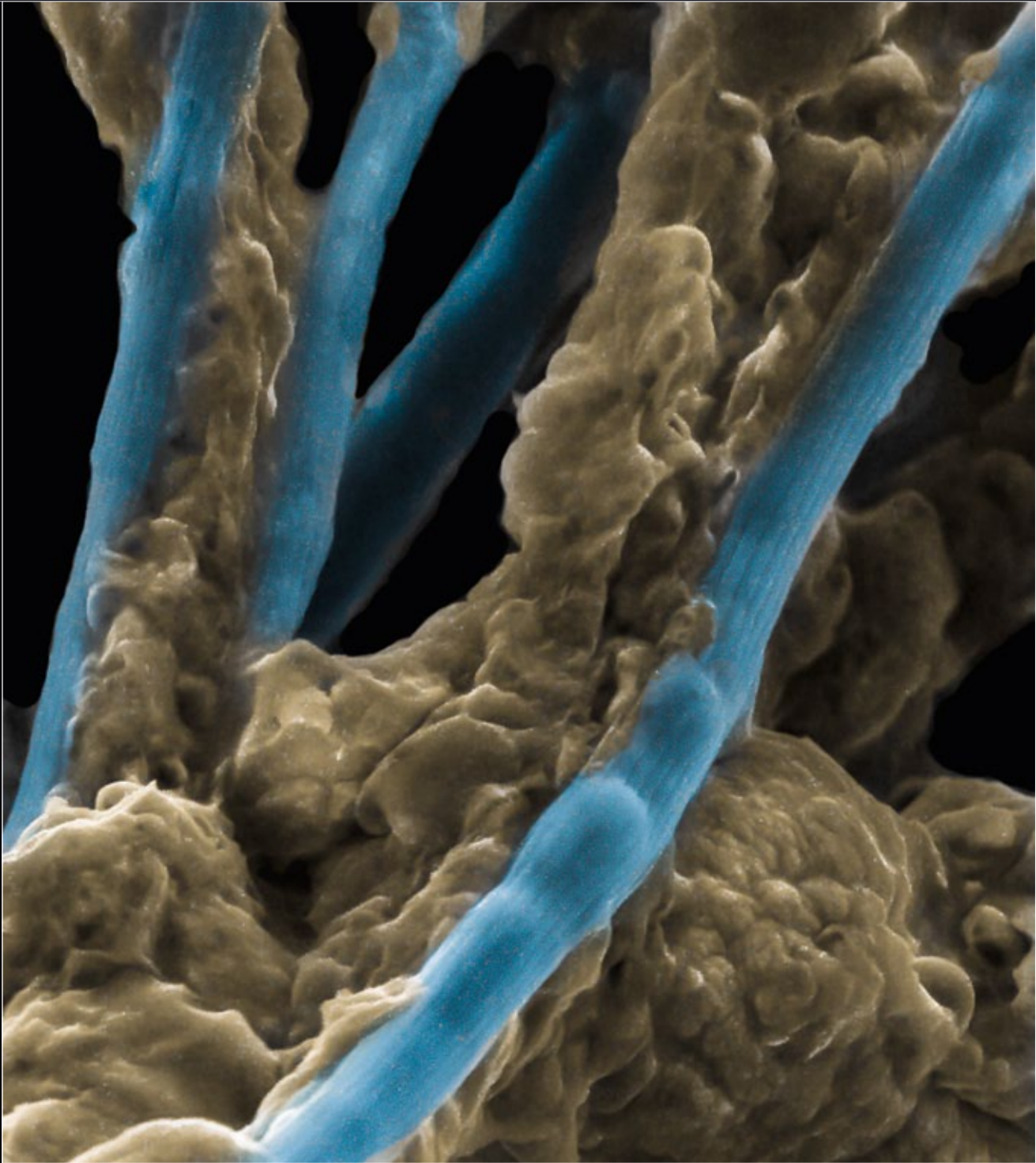
schiebt sie sich unter die Sundaplatte. Dadurch entstehen Spannungen in ihr, die zu Beben wie dem im April führen. Voraussichtlich in einigen Millionen Jahren wird die Indisch-Australische Platte endgültig zerbrochen sein. Wo die neuen Plattengrenzen einmal exakt verlaufen werden, lässt sich noch nicht absehen. Bis dahin finden wohl noch viele weitere Erdstöße statt, schätzen die Forscher.

Die Erschütterung im April verlief relativ glimpflich für die Menschen in der Region. Denn im Gegensatz zum katastrophalen Erdbeben im Dezember 2004, das mehr als 200 000 Todesopfer forderte, kam es hier zu keiner größeren vertikalen Bodenbewegung unter dem Ozean, so dass verheerende Tsunamis ausblieben. Stattdessen glitten Bereiche innerhalb der Platte horizontal aneinander entlang. Bei dieser so genannten Blattverschiebung entstanden nur vergleichsweise kleine Tsunamis.

Nature 490, S. 245–249, 2012



Verlauf von Erdplattengrenzen im Indopazifik. Die Indisch-Australische Platte schiebt sich langsam unter Sumatra. Daraus resultieren Spannungen in der Erdkruste, die irgendwann zum Zerbersten der Platte führen werden. In der Bruchregion ereignete sich vergangenen April ein schweres Erdbeben der Stärke 8,7, gefolgt von einem Nachbeben der Stärke 8,2.



JIE SONG UND NIS RISGAARD PETERSEN, AARHUS UNIVERSITET

LEBENDE STROMKABEL

Ketten von tausenden aneinandergereihten Meeresbakterien (blau) ziehen von sauerstoffreichen oberen Sedimentschichten zu sauerstofffreien Zonen darunter. Dadurch können die Mikroben auch in anaerober Umgebung mit Hilfe von Sauerstoff als Elektronenempfänger Energie aus Schwefelverbindungen gewinnen. Hierbei wandern Elektronen entlang der oft über einen Zentimeter langen Filamente nach oben – ein elektrischer Strom fließt. Die

nachträglich eingefärbte rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt die rippenartige Struktur der äußeren Bakterienmembran, die entlang der gesamten Filamente röhrenartige Kanäle bildet. Da dort viele geladene Teilchen vorkommen, könnten in ihnen die Elektronen aus der Tiefe an die Oberfläche gelangen – ähnlich wie in den einzelnen Drähten eines Kabels.

Nature 10.1038/nature11586, 2012

Keine Einbahnstraße

Die Entwicklung kann bei Organismen nicht nur von der Stammzelle zum spezialisierten Gewebe ablaufen, sondern – mit etwas Nachhilfe – auch umgekehrt. Mit der gezielten Reprogrammierung von bereits ausgereiften Zellen revolutionierten John Gurdon und Shinya Yamanaka die Stammzellforschung und wurden dafür mit dem Nobelpreis für Medizin oder Physiologie geehrt.

VON STEFANIE REINBERGER



Sir John B. Gurdon (links) bewies, dass ein normaler Zellkern die Informationen für den Bau aller Körperzellen enthält. **Shinya Yamanaka** reprogrammierte reife Zellen zu Stammzellen, aus denen sich eine ganze Maus entwickeln kann.

Mit Dogmen zu brechen, erfordert Mut sowie eine gehörige Portion Selbstbewusstsein – und es scheint eine gute Voraussetzung dafür zu sein, im Lauf einer wissenschaftlichen Karriere den Nobelpreis zu erhalten. Um nur zwei Beispiele von vielen zu nennen: Barbara McClintock, die den Preis 1983 bekam, hatte 1951 die Existenz springender Gene nachgewiesen, so genannter Transposonen, und damit an der Lehrmeinung gerüttelt, dass Gene grundsätzlich fest im Erbgut verankert seien. Die Preisträger von 1975 – Howard Temin, David Baltimore und Renato Dulbecco – brachten das lange Zeit gültige Dogma der Molekularbiologie zum Einsturz, genetische Information werde grundsätzlich nur von der DNA über die RNA zum Protein transportiert. Die Entdeckung des Enzyms reverse Transkriptase belegte, dass der Übersetzungsprozess ebenfalls umgekehrt funktioniert, nämlich von der RNA zur DNA.

Auch in diesem Jahr ging der Nobelpreis für Medizin oder Physiologie an zwei Forscher, die einen Glaubenssatz kippten – und so eine weitere vermeintliche biologische Einbahnstraße für den Gegenverkehr öffneten. Der Brite

John Gurdon und der Japaner Shinya Yamanaka erhielten die Auszeichnung für ihre Entdeckung, dass sich ausgereifte Körperzellen in ein Stadium zurückversetzen lassen, in dem sie sich wie embryonale Stammzellen verhalten und theoretisch alle Entwicklungswege einschlagen können. Fachleute sprechen von Reprogrammierung, die resultierenden Zellen nennen sie induzierte pluripotente Stammzellen (iPS). »Dass beide den Preis verdient haben, war allen im Feld klar«, sagt der Bonner Stammzellforscher Oliver Brüstle und spricht von einem großen Tag für sein Fachgebiet.

Quelle für Ersatzgewebe

Gurdon und Yamanaka widerlegten mit ihren Arbeiten nicht nur die lange Zeit gültige Ansicht, wonach sich Zellen grundsätzlich lediglich in eine Richtung entwickeln können – nämlich von der Stammzelle zur spezialisierten Körperzelle. Sie legten auch den Grundstein für die Medizin der Zukunft: Die iPS könnten eines Tages zur Quelle für Ersatzgewebe werden, um Organe gezielt zu reparieren.

Davon ahnte Gurdon freilich noch nichts, als er 1962 mit seinen Ergebnis-

sen an die Öffentlichkeit ging. In einem bahnbrechenden Experiment war es ihm gelungen, die Entwicklung bei Froschzellen umzukehren (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/1980, S. 60). Dazu hatte er die Zellkerne von Eizellen der Amphibien entfernt und durch solche aus Kaulquappen ersetzt. Tatsächlich war daraus neuer Froschnachwuchs entstanden. Auch wenn das Experiment bei Weitem nicht jedes Mal klappte, so gelang dem Forscher damit doch der Nachweis, dass der Kern einer reifen Körperzelle noch die genetische Information enthält, die zum Bau sämtlicher Zelltypen nötig ist. Und: Diese Information lässt sich auch abrufen.

Die Öffentlichkeit nahm allerdings in den 1960er Jahren noch relativ wenig Notiz von dem Experiment. »Zu diesem Zeitpunkt gab es nahezu keine Aussicht auf einen direkten therapeutischen Nutzen«, sagt Gurdon auf nobelprize.org. Genau das interessierte aber in der Regel am meisten. Außerdem sei es ein weiter Weg gewesen, bis seine Daten schließlich wirklich anerkannt wurden, erinnert sich der 79-Jährige, der nach eigenen Angaben noch heute selbst im Labor steht. Vom eigentlichen Experiment, das er bereits 1958 durchführte, bis zur Veröffentlichung verstrichen mehrere Jahre. Einer der Gründe ist sicherlich gewesen, dass die Erfinder der Technik des Kerntransfers, Robert William Briggs und Thomas Joseph King, bei ähnlichen Versuchen zum gegenteiligen Ergebnis gekommen waren. Warum sollte man da einem Jungforscher wie Gurdon Glauben schenken?

Das alles mag auch mit dazu beigetragen haben, dass zwischen Publikation und Preis ein halbes Jahrhundert

verstrich. »Ich habe zum Glück lange genug gelebt«, sagt der Forscher, der lachend berichtet, er habe zunächst geglaubt, jemand wolle einen Scherz mit ihm treiben, als ihn der Anruf aus Stockholm erreichte.

Dabei war schon einmal Gurdons Entdeckung schlagartig ins Rampenlicht geraten: 1997 schuf der britische Embryologe Ian Wilmut das Klonfleisch Dolly, und zwar im Wesentlichen nach Gurdons Methode. Allerdings blieb es lange Zeit schleierhaft, warum die Sache überhaupt funktionierte – und warum die Reprogrammierung nur manchmal klappte und dann wieder nicht. Eine Menge Fragen waren noch offen, als der zweite Preisträger, Shinya Yamanaka, die Bildfläche betrat. Der Japaner wurde übrigens 1962 geboren: im selben Jahr, in dem Gurdons Arbeit schließlich veröffentlicht wurde. Yamanaka fahndete ursprünglich nach Pro-

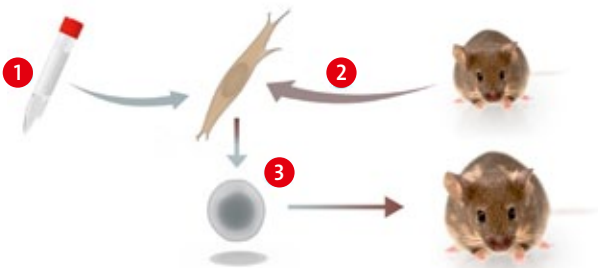
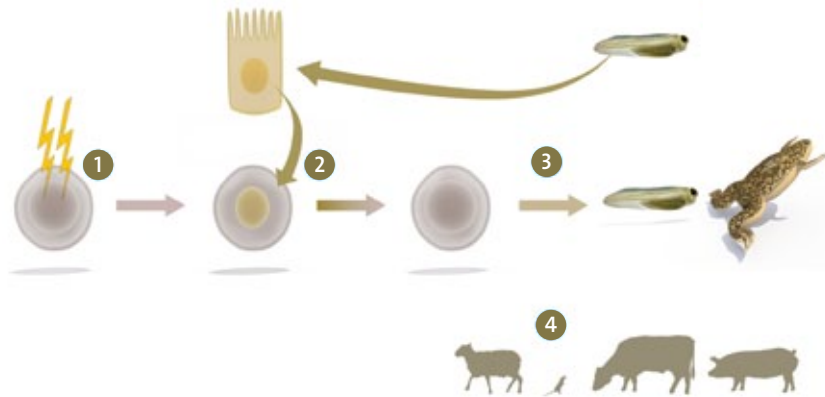
teinen, die dafür sorgen, dass eine embryonale Stammzelle in ihrem pluripotenten Zustand verbleibt. Dann stellte er sich die Frage, ob solche Moleküle nicht auch eine ausdifferenzierte Zelle in eine pluripotente Stammzelle zurückverwandeln könnten.

Yamanaka identifizierte schließlich vier Proteine – Myc, Oct3/4, Sox2 und Klf4 genannt –, die gemeinsam genau diese Fähigkeit besaßen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2007, S. 16). Es handelt sich dabei um so genannte Transkriptionsfaktoren, also Moleküle, die mithelfen, dass bestimmte Gene aktiviert werden. Mehr als diese vier braucht es demnach nicht, um das Entwicklungsstadium einer Zelle wieder auf Start zu stellen. Der Forscher brachte die Erbinformation für die Faktoren per Gentransfer in Fibroblasten von Mäusen ein. Auf diese Weise verwandelte er die ausdifferenzierten Nager-

zellen in induzierte pluripotente Zellen, aus denen letztlich wieder eine komplette Maus heranreifen konnte. Das Rezept für die gezielte Reprogrammierung war gefunden. Den Grundstein für seinen Erfolg habe aber Gurdon gelegt, betont Yamanaka. Daher fühle er sich besonders geehrt, nun gemeinsam mit dem älteren Kollegen ausgezeichnet zu werden.

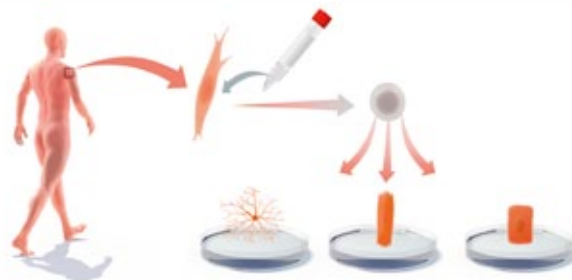
»Die Zellreprogrammierung erlaubt es, aus Zellen von Erwachsenen pluripotente Stammzellen herzustellen – Alleskönner, die sich in unbegrenzter Zahl in jeden Körperzelltyp ausreifen lassen«, erklärt Oliver Brüstle. Damit könnten sie zum idealen Ersatzteillager werden, um krankes Gewebe durch gesundes zu ersetzen. Egal ob Herz-, Gehirn- oder Pankreaszellen benötigt werden: Alles sollte sich aus den reprogrammierten Tausendsässen herstellen und einpflanzen lassen – und zwar ohne Absto-

John. B. Gurdon zerstörte den Kern einer Froscheizelle durch Bestrahlung (1) und ersetzte ihn durch den Kern einer ausdifferenzierten Kaulquappenzelle (2). Die meisten der so manipulierten Eier waren danach nicht lebensfähig – doch einige begannen sich zu teilen und wuchsen sogar zu gesunden Kaulquappen heran (3). Spätere Kerntransferexperimente brachten auch geklonte Säugetiere hervor; das erste war das Schaf »Dolly« (4).



Shinya Yamanaka brachte vier spezielle Transkriptionsfaktoren (1) in Hautzellen von Mäusen ein (2), die dadurch zu pluripotenten Stammzellen umprogrammiert wurden: Zellen, aus denen sich wieder alle möglichen Zelltypen einer Maus entwickeln können. Er nannte sie induzierte pluripotente Stammzellen (iPS; 3).

Heute lassen sich auch menschliche iPS-Zellen herstellen und zur Produktion von Nerven-, Herz- oder Leberzellen nutzen.



THE NOBEL COMMITTEE FOR PHYSIOLOGY OR MEDICINE / MATTIAS KARLEN

Bungsrisiko, da der Zellersatz schließlich vom Patienten selbst stammt.

So lautet zumindest die Theorie. In der Praxis könnte die Sache kompliziert werden. Bei einem Experiment mit Mäusen von 2011 erkannte das Immunsystem den zellulären Nachschub aus iPS doch als fremd und attackierte ihn (*Nature* 474, S. 212, 2011). Andere Wissenschaftler beobachteten eine genetische Instabilität der reprogrammierten Zellen. Das kann sie entarten lassen und zu Tumoren führen. Stammzellforscher werden also noch viel Arbeit leisten müssen, bis Gurdons und Yamanakas Erkenntnisse eines Tages Patienten zugutekommen können. Dafür, dass es ir-

gendwann so weit sein wird, setzt sich Yamanaka ein. »Ich will diese Technologie in die Klinik bringen«, sagt der japanische Forscher, der seine Laufbahn ursprünglich als Chirurg begann – als unbegabter, wie er zugibt, weshalb er in die Forschung gewechselt sei. Dennoch fühle er sich noch immer als Arzt.

Auch wenn kranke Menschen derzeit noch nicht direkt von der Reprogrammierung profitieren – die Technologie nutzt nicht allein der Grundlagenforschung. Vielmehr eröffne sie bereits jetzt ungeahnte Perspektiven für die Medizin, betont Stammzellforscher Brüstle: »Erkrankungen und Wirkstoffe lassen sich nun direkt und in vielen Fäl-

len erstmals an den jeweils betroffenen menschlichen Zellen studieren.« Dazu nämlich können sich Forscher nun den jeweils benötigten Zelltyp in der Kulturschale heranziehen – ohne auf die umstrittenen embryonalen Stammzellen zurückzugreifen, deren Gewinnung in Deutschland verboten ist. »Es steht außer Frage, dass die Arbeiten von Shinya Yamanaka und John Gurdon zur Zellreprogrammierung die Stammzellforschung revolutioniert haben«, lautet daher auch die Einschätzung des Bonner Experten.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

Auszeichnung für Quantendompteure

Zwei Forschern gelang es in unterschiedlichen Versuchsreihen, das Verhalten von Quantensystemen in ungeahnten Details zu analysieren. Sie bahnten damit auch den Weg zum Quantencomputer.

VON OLIVER MORSCH



David J. Wineland (links) schuf mit seinen Arbeiten die Voraussetzung für extrem genaue Uhren und Quantencomputer. **Serge Haroche** fing Photonen ein und nahm Messungen an ihnen vor, ohne sie dabei zu vernichten.

»Gibt es Quantensprünge?« Mit dieser Frage überschrieb der österreichische Physiker Erwin Schrödinger 1952 einen einflussreichen Fachaufsatz. Schrödinger (1887–1961) war einer der Väter der Quantenmechanik, der zufolge die möglichen Energiezustände eines physikalischen Systems nicht kontinuierlich verteilt, sondern gequantelt sind. Will das System seinen Energiezustand ändern, so muss es in einen anderen »springen«. Außerdem kann es un-

ter bestimmten Umständen in mehreren Zuständen gleichzeitig existieren, und erst eine experimentelle Beobachtung führt dann dazu, dass es sich für einen davon entscheidet.

In zahlreichen Experimenten haben Physiker seit den 1930er Jahren gezeigt, dass die Quantenmechanik auf dieser Grundlage sehr exakte Vorhersagen macht und Phänomene erklären kann, die mit der von Newton begründeten klassischen Mechanik nicht vereinbar

sind. Dennoch war es niemandem gelungen, Quantensystemen tatsächlich beim Springen zuzusehen. Dazu wäre es nötig gewesen, etwa einzelne Atome, die den Gesetzen der Quantenphysik unterliegen, einzufangen und genau zu beobachten. Und das, schrieb Schrödinger in besagtem Aufsatz, sei so unmöglich wie das Züchten eines Dinosauriers im Zoo. Die Nobelpreisträger für Physik 2012 wurden nun dafür geehrt, Schrödingers These widerlegt zu haben.

Im Prinzip gehorcht jeder Gegenstand – ob Atom, Sandkorn oder Kannonkugel – den Gesetzen der Quantenphysik. Doch je größer ein Objekt ist, desto mehr Atome und Moleküle enthält es und desto schneller gehen im Zusammenspiel der vielen Teilchen deren Quanteneigenschaften verloren. Physiker bezeichnen das als Dekohärenz. Um der Quantenmechanik live zuzusehen, muss man daher in die Dimensionen einzelner Quantenteilchen

vordringen, die nicht einmal mit den besten Mikroskopen zu beobachten sind. David Wineland vom National Institute of Standards and Technology in Boulder (Colorado) und Serge Haroche von der École Normale Supérieure in Paris haben in den letzten 30 Jahren Methoden entwickelt, mit denen das scheinbar Unmögliche gelingt: einzelne Quantenteilchen zu beobachten und gleichzeitig zu steuern.

Beide Forscher verwendeten für ihre Experimente Atome und Lichtquanten (Photonen), allerdings mit jeweils unterschiedlichen Rollen. Während im Labor von Wineland die Photonen dazu dienten, über den Zustand eines einzelnen Atoms Aufschluss zu geben, benutzte Haroche umgekehrt Atome, um die Eigenschaften von Lichtteilchen zu untersuchen.

Den Grundstock für seine Forschung legte Wineland bereits in den 1970er Jahren, als er gemeinsam mit Hans Dehmelt (Physiknobelpreis 1989) eine Methode vorschlug, um Ionen mit Laserlicht zu kühlen. Ionen sind Atome, die ein oder mehrere Elektronen zu viel oder zu wenig haben. Sie tragen also eine elektrische Ladung und lassen sich

deshalb mit elektrischen Feldern relativ leicht einfangen. Um sie für längere Zeit festzuhalten, muss man allerdings zunächst ihre Energie so weit verringern, dass sie den niedrigsten quantenmechanischen möglichen Energiezustand einnehmen.

Schon einige Jahre später gelang es Wineland, einzelne Ionen für mehrere Stunden zu fixieren und zu verfolgen, wie ihre Elektronen unter dem Einfluss eines Lasers zwischen verschiedenen Energieniveaus hin und her hüpfen. Die erste Beobachtung der berühmten Quantensprünge war damit geglückt.

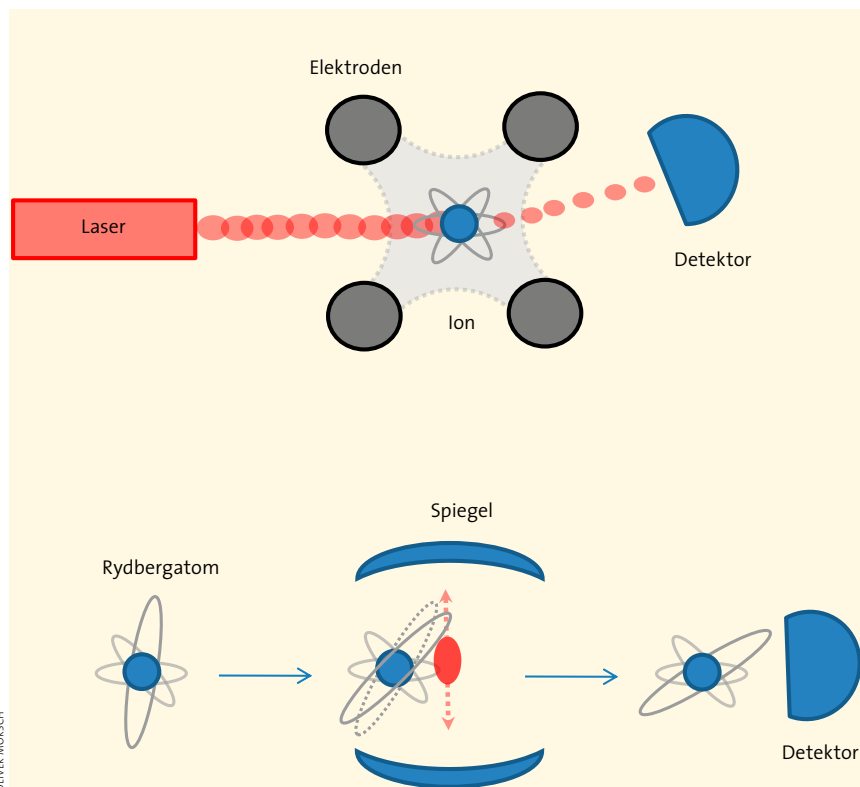
Photonen zerstörungsfrei untersuchen

Serge Haroche wählte einen anderen Weg, um den Geheimnissen der Quantenwelt auf die Spur zu kommen: Er untersuchte Photonen, also Lichtteilchen. Deren Handhabung ist äußerst schwierig, denn normalerweise bedeutet die Beobachtung eines Photons gleichzeitig sein Ende: In einem Photodetektor etwa wird ein Lichtquant in elektrischen Strom umgewandelt, der sich mit einem Messgerät nachweisen lässt. Allerdings ist das Photon danach ver-

schwunden. Haroche suchte nun ein behutsameres Nachweisverfahren, mit dem man ein Photon beobachten kann, ohne es zu zerstören.

Seine Methode beruht darauf, dass Atome Lichtquanten nicht nur aussenden und absorbieren, sondern mit ihnen auch auf viel subtilere Weise wechselwirken können. Vor allem so genannte Rydbergatome, deren Elektronen den Atomkern in sehr großem Abstand umkreisen, funktionieren wie extrem sensible Antennen, die auf das elektrische Feld einzelner Photonen reagieren. Anstatt das Photon zu »schlucken« und in einen anderen Energiezustand zu springen, ändert das Elektron seine Umlaufbahn nur minimal. Diese als Phase bezeichnete Änderung lässt sich messen, indem man das Atom nach der Wechselwirkung mit dem Photon einem Mikrowellenfeld aussetzt und beobachtet, ob es dabei seinen Energiezustand ändert.

Mit diesem Trick gelang es Haroche, einzelne Photonen nachzuweisen, die in einem Hohlraum zwischen zwei Spiegeln hin- und herflitzten. Da die Rydbergatome die Lichtquanten dabei nicht absorbierten, konnte die Mes-



Der diesjährige Physiknobelpreis würdigt bahnbrechende Experimente mit isolierten Quantenteilchen. In David Winelands Labor wurden einzelne Ionen – elektrisch geladene Atome – mit elektrischen Feldern eingefangen. Ihr Quantenzustand ließ sich dann mit Photonen exakt messen (oben). Serge Haroche beobachtete einzelne zwischen zwei Spiegeln eingefangene Lichtteilchen, ohne sie zu zerstören. Dazu schickte er Rydbergatome durch den Hohlraum zwischen den Spiegeln und maß, wie sich die Umlaufbahnen der Elektronen geringfügig änderten (unten).

sung mehrmals hintereinander erfolgen, ohne dass das Ergebnis davon beeinflusst wurde.

Die Experimente von Wineland und Haroche haben auf eindrucksvolle Weise gezeigt, dass sich einzelne Quantenteilchen tatsächlich beobachten und zugleich kontrollieren lassen. Vieles, was noch vor wenigen Jahren nur als Gedankenexperiment möglich schien, kann jetzt im Labor direkt verwirklicht werden. Das gilt insbesondere für jene berühmte Katze, mit der Schrödinger 1935 die Paradoxien der Quantenmechanik illustrieren wollte.

Das arme Gedankentier ist gleichzeitig tot und lebendig, denn im Käfig ist ein Giftfläschchen dazu bestimmt, von einem Mechanismus zerbrochen zu werden, der seinerseits von einem radioaktiv zerfallenden Atom betätigt

wird. Da der Zerfall nach quantenmechanischen Wahrscheinlichkeitsregeln erfolgt und erst feststeht, wenn man den Atomzustand beobachtet, schwebt auch die Katze zwischen Leben und Tod, bis man im Käfig nachsieht.

Anwendungsbeispiel Ionenuhr

David Wineland führte in seinen Experimenten eine ähnliche Situation herbei, indem er den Bewegungszustand eines in der Falle gefangenen Ions von seinem inneren Energiezustand – genauer: dem seiner Elektronen – abhängig machte. Physiker sprechen von quantenmechanischer Verschränkung zwischen beiden Zuständen. Bevor der eine mit Hilfe von Laserlicht gemessen wurde, blieb auch der andere – in Schrödingers Bild der Zustand der Katze – unbestimmt. Erst durch Beobachtung des

inneren Atomzustands nahm auch sein äußerer Bewegungszustand eine von zwei Möglichkeiten ein.

Praktische Anwendungen der Quantenmanipulation zeichnen sich bereits ab, selbst wenn Serge Haroche in ersten Interviews nach Bekanntgabe des Nobelpreises betont hat, dass er seine Experimente primär als Grundlagenforschung versteht. Winelands gefangene Ionen etwa werden schon in extrem genauen Uhren benutzt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Atomuhren, die auf Quantensprüngen im Mikrowellenbereich beruhen und gegenwärtig etwa zur Synchronisierung der GPS-Signale dienen, funktionieren die Ionenuhren mit sichtbarem Licht.

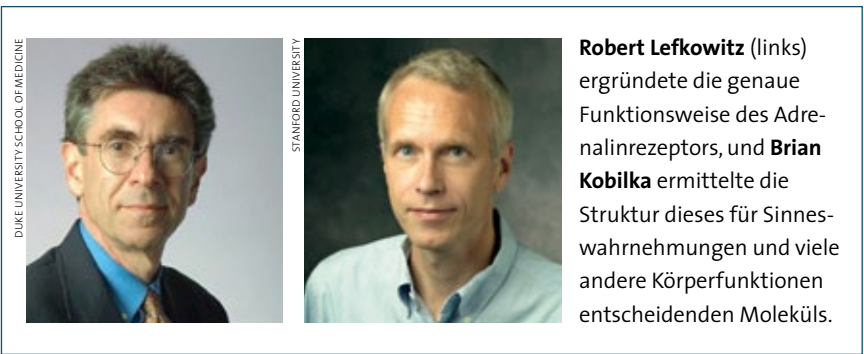
Dabei gehen sie 100-mal genauer. Wäre ein solcher Zeitmesser bei der Geburt des Universums vor knapp 14 Mil-

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Enthüllungen aus dem Reich der Sinne

Der Chemienobelpreis 2012 ging an die US-Forscher Robert Lefkowitz und Brian Kobilka. Sie entschlüsselten Struktur und Funktion des Adrenalinrezeptors, der die wichtigste Gruppe von Schaltstellen für die Kommunikation von Zellen mit ihrer Umwelt repräsentiert.

VON MICHAEL GROSS



Robert Lefkowitz (links) ergründete die genaue Funktionsweise des Adrenalinrezeptors, und **Brian Kobilka** ermittelte die Struktur dieses für Sinneswahrnehmungen und viele andere Körperfunktionen entscheidenden Moleküls.

Adrenalin ist ein enorm wichtiger Botenstoff in unserem Körper. Das Hormon wird bei Stress ausgeschüttet und versetzt verschiedene Organe und Zelltypen in Alarmbereitschaft. Damit dieses kleine Molekül überhaupt etwas bewirken kann, muss an seinem Zielort eine molekulare Antenne existieren,

die es erkennt und dann einen Schalter betätigt, der innerhalb der Zelle weitere Reaktionen in Gang setzt.

Als Robert Lefkowitz Ende der 1960-er Jahre begann, diesen »Rezeptor« für Adrenalin zu suchen, konnte er die Tragweite seiner Arbeit nicht ahnen. Sie löste nicht nur das Rätsel, auf welche

Weise viele Hormone ihre Wirkung ausüben, sondern enthüllte auch das Funktionsprinzip eines Großteils unserer Sinneswahrnehmungen – darunter Sehen, Riechen und Schmecken. Hätte Lefkowitz damals lediglich den Rezeptor für ein bestimmtes Hormon entdeckt, würde er dieses Jahr gewiss nicht in Stockholm geehrt werden. Sein Verdienst liegt vielmehr darin, die wichtigste Schaltstelle für die Kommunikation der Zellen mit ihrer Umwelt entdeckt und bis ins Kleinste charakterisiert zu haben. Erst im September 2011 setzte sein ehemaliger Assistent Brian Kobilka einen spektakulären Schlusspunkt hinter diese jahrzehntelangen Untersuchungen.

Schon in den 1940er Jahren hatte der amerikanische Pharmakologe Raymond

liarden Jahren in Gang gesetzt worden, so ginge er jetzt um nicht einmal fünf Sekunden falsch.

Das Nobelkomitee erwähnte noch eine mögliche Anwendung, die inzwischen die Fantasie der Forscher beflügelt: den Quantencomputer. Ein solcher Rechner beruht darauf, dass Quantensysteme in Überlagerungszuständen existieren. Bezeichnet man einen davon als 0 und den anderen als 1, so hat man damit ein Quantenbit oder »Qubit« geschaffen – also das Quantenäquivalent eines Bits, mit dem in klassischen Computern Informationen dargestellt und verarbeitet werden.

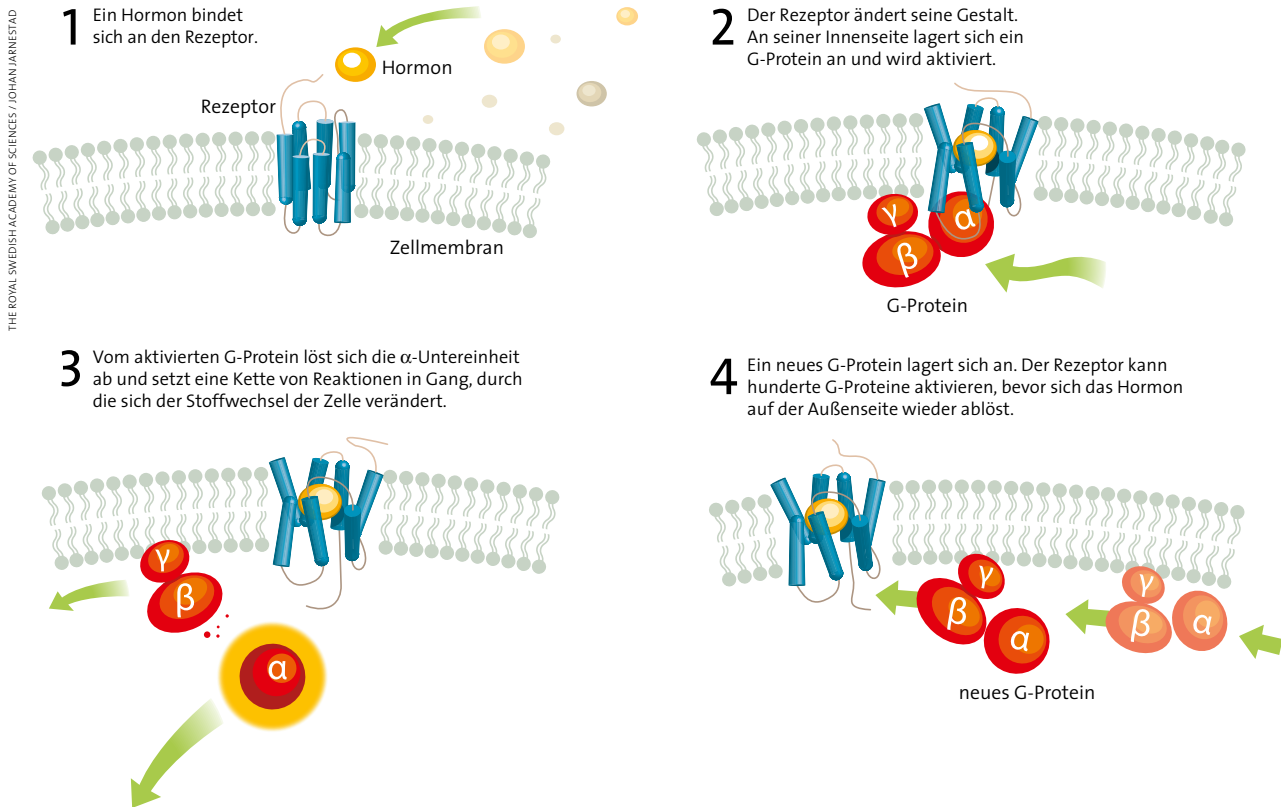
Der Clou eines Quantencomputers besteht nun darin, dass durch die Überlagerung der Zustände alle möglichen Werte eines Registers – für drei Qubits

beispielsweise $2 \times 2 \times 2 = 8$ Werte – gleichzeitig verarbeitet werden können. Schon in den 1990er Jahren wurden Algorithmen entwickelt, die diesen Quantenparallelismus nutzen und komplexe Berechnungen mit deutlich weniger Rechenschritten ausführen können als klassische Computer. Ein Beispiel dafür ist die Primfaktorzerlegung von großen Zahlen; mit einem Quantenalgorithmus des amerikanischen Informatikers Peter Shor sollte sie ungleich schneller gelingen als mit herkömmlichen Verfahren.

Zwar gibt es bis heute noch kein praktisch einsetzbares Gerät dieser Art, doch die Ergebnisse der diesjährigen Nobelpreisträger zeigen, dass so etwas im Prinzip machbar wäre. David Wineland und seine Kollegen haben mit gefangenen Ionen bereits rudimentäre

Quantenrechner gebaut, die Shors Algorithmus für die Primfaktorzerlegung mit kleinen Zahlen erfolgreich ausführen können (siehe seinen Beitrag in Spektrum der Wissenschaft 6/2009, S. 34). Auch mit anderen physikalischen Systemen, etwa mit Halbleiterelementen oder mit Fremdatomen in Diamanten, versuchen Forscher weltweit, Quantencomputer zu konstruieren. Ob ihnen das letztendlich gelingen wird oder nicht – Wineland und Haroche haben mit ihrer Forschung die Tür zu einer Welt aufgestoßen, in der viel mehr möglich ist, als die Väter der Quantenmechanik zu träumen wagten.

Oliver Morsch ist promovierter Physiker und forscht an der Universität Pisa und dem Istituto Nazionale di Ottica über ultrakalte Atome und Quantenkontrolle.

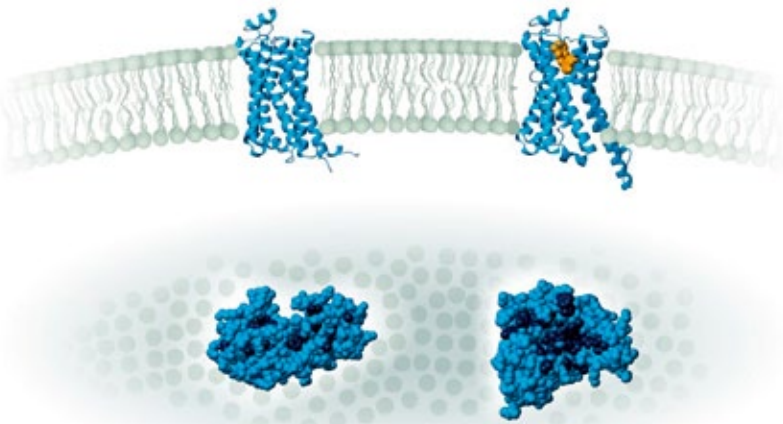


P. Ahlquist (1914–1983) herausgefunden, dass Adrenalin auf verschiedene Gewebe unterschiedliche Wirkungen ausübt, die sich grob in zwei Gruppen einteilen ließen. Folglich müsse es, so seine Hypothese, zwei Arten von Rezep-

toren geben. Er nannte sie α - und β -adrenerge Rezeptoren, ohne freilich die geringste Vorstellung über ihre Beschaffenheit oder Funktionsweise zu haben. Manche bezweifelten sogar, dass sie überhaupt existierten.

Wenn sich ein Hormon, Geschmacks- oder Duftstoff an einen G-Proteingekoppelten Rezeptor auf der Zelloberfläche anlagert, löst er die hier gezeigte Reaktion innerhalb der Zelle aus.

THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES / JOHAN JÄRNSTAD



Wie die Strukturanalysen der Arbeitsgruppe von Brian Kobilka zeigten, öffnet sich der die Zellmembran durchspannende β -adrenerge Rezeptor (blau) wie ein Blumenstrauß, wenn sich ein Hormon (orange) an seiner Außenseite anlagert. In der Aufsicht (unten) wird deutlich, dass sich dabei im Innern des Moleküls ein hydrophober (Wasser meidender) Spalt (dunkelblau) öffnet, der die gleichfalls hydrophobe α -Untereinheit des G-Proteins aufnehmen kann.

Der erste Durchbruch, den Lefkowitz und andere erzielten, war 1974 die Entwicklung von radioaktiv markierten Substanzen, die sich spezifisch an den β -adrenergen Rezeptor (oder auch: β -Adrenozeptor) binden. Das ermöglichte es, ihn zu isolieren und zu ergründen, wie er seine Aufgabe erfüllt. Bis 1980 erarbeiteten Lefkowitz und seine Mitarbeiter in groben Zügen das heute noch gültige Funktionsmodell.

Demnach erstreckt sich der Rezeptor quer durch die Zellmembran und ändert seine Gestalt, wenn das Hormon an der Außenseite andockt. Dadurch lagern sich auf der Innenseite so genannte G-Proteine an, deren zentrale Rolle Martin Rodbell (1925–1998) und Alfred G. Gilman von der University of Texas in Dallas ebenfalls in den 1970er Jahren entdeckten, wofür sie 1994 den Medizinnobelpreis erhielten (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/1992, S. 54, und 12/1994, S. 16). Die entscheidende Funktionseinheit für den Empfang von molekularen Signalen ist also der Dreierkomplex aus Botenstoff, Rezeptor und G-Protein. Deshalb spricht man auch von einem G-Protein-gekoppelten Rezeptor (in der englischen Fachliteratur als GPCR abgekürzt).

Kobilka kam Mitte der 1980er Jahre als Postdoktorand in Lefkowitzs Labor an der Duke University in Durham

(North Carolina). Sein Ziel war es, den β -adrenergen Rezeptor mit genetischen Methoden weiter zu charakterisieren. Als er die Sequenz des zugehörigen Gens vollständig ermittelt hatte, zeigte sich eine verblüffende Ähnlichkeit mit einem bereits lange vorher bekannten Signalprotein, das eine völlig andere Aufgabe erfüllt: dem als Lichtsensor in der Netzhaut dienenden Rhodopsin.

Gemeinsame Basis für Sehen, Riechen und Schmecken

Auch alle weiteren Struktur- und Funktionsuntersuchungen bestätigten die enge Verwandtschaft der beiden Moleküle. Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass Rhodopsin seinen molekularen Botenstoff, das Retinal, von vornherein in gebundener, aber inaktiver Form enthält. Für die Aktivierung sorgen einfallende Lichtquanten, indem sie die Struktur des Retinals verändern. Von da ab geht die Signalkette genauso weiter wie beim Adrenalin: Das aktivierte Botenmolekül verändert die Gestalt des Rezeptors, so dass dieser an der Innenseite ein G-Protein bindet, das hier Transducin heißt, und so die Botenschaft weiterleitet. Rhodopsin ist also ebenfalls ein GPCR.

Dasselbe gilt für fast alle anderen Membranrezeptoren, mit denen wir irgendetwas fühlen, riechen oder schme-

cken, wie sich in den letzten Jahrzehnten erwies. Allein im menschlichen Genom ließen sich mehr als 800 davon nachweisen. Ein prominentes Beispiel sind die Geruchsrezeptoren, für deren Untersuchung Linda B. Buck von der University of Washington in Seattle und Richard Axel von der Columbia University in New York 2004 den Medizinnobelpreis erhielten. Tierarten mit besserem Geruchssinn als wir Menschen haben meist auch mehr GPCR-Gene.

Die Rezeptoren für die Geschmacksnoten bitter, süß und umami, welche die Arbeitsgruppen von Charles S. Zuker von der Columbia University und Nicholas Ryba vom National Institute of Dental and Craniofacial Research in Bethesda (Maryland) zwischen 2000 und 2003 entdeckten, sind gleichfalls mit G-Proteinen gekoppelt. Nur das Geschmacksempfinden für sauer und salzig funktioniert anders.

Diese Erkenntnisse, die auf der Arbeit der diesjährigen Chemienobelpreisträger beruhen, sind von enormer medizinischer Bedeutung. So wirken etwa die Hälfte aller Arzneimittel auf G-Protein-gekoppelte Rezeptoren, darunter Betablocker, Antihistaminika und verschiedene Psychopharmaka.

In den letzten Jahren widmete sich Kobilka, der inzwischen an der Stanford University (Kalifornien) arbeitet, der räumlichen Gestalt des Rezeptors und ihrer Änderung beim Andocken von Adrenalin. Es gab ein Wettrennen um die Aufklärung der detaillierten dreidimensionalen Struktur des Dreierkomplexes, also der biologisch aktiven Form eines G-Protein-gekoppelten Rezeptors.

Anfang 2011 berichteten sowohl Kobilka als auch die Arbeitsgruppe von Christopher Tate vom Laboratory of Molecular Biology in Cambridge (England) über einen ersten Teilerfolg. Es war ihnen gelungen, alle drei Komponenten zusammen zu kristallisieren, wodurch sich per Röntgenbeugung die exakte Molekülstruktur dieses Verbunds ermitteln ließ. Der Rezeptor lag darin aber leider nur in der bereits bekannten inaktiven Form vor, in die er nach der Signalübergabe an das G-Protein zurückkehrt.

Mit einem Trick konnte ihn Kobilkas Team wenig später erstmals auch in aktiviertem Zustand röntgenographisch abbilden (*Nature* 469, S. 175, 2011). Dazu ersetzten die Forscher das G-Protein durch einen Miniatur-Antikörper, der sich von den so genannten Schwereketten-Antikörpern der Kamele ableitet (siehe Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 24). Dieser lagerte sich ebenfalls an den aktivierten Rezeptor an, verhinderte aber dessen Rückkehr in den inaktiven Zustand, weil er das Signal nicht übernehmen konnte.

Die Struktur des Komplexes mit einem Original-G-Protein und dem Rezeptor in aktiver Form konnte Kobilkas Arbeitsgruppe schließlich im September 2011 präsentieren. Auch hier waren wieder einige Kunstgriffe erforderlich. Diesmal hinderten die Forscher – erneut mit Hilfe eines Miniatur-Antikörpers – das G-Protein daran, das Signal anzunehmen. Außerdem verknüpften sie das Adrenalin fest mit dem Rezeptor und verringerten dessen Beweglichkeit, indem sie ein komplettes fremdes Protein in eine der Schlaufen einfügten,

welche die sieben quer durch die Zellmembran verlaufende Abschnitte verbinden (*Nature* 477, S. 549, 2011).

Trotz all dieser Manipulationen enthielt der Komplex die drei wesentlichen Bausteine dieser enorm wichtigen Relaisstation in ihrem natürlichen Zustand. Damit brachte Kobilka die Suche, die Lefkowitz mehr als 40 Jahre vorher begonnen hatte, zum krönenden Abschluss.

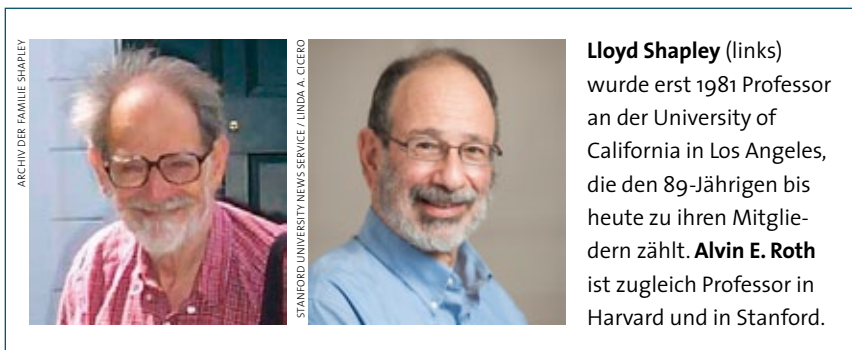
Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

Junge Ärzte und Eheglück

Lloyd S. Shapley und Alvin E. Roth erhalten den diesjährigen Wirtschaftsnobelpreis für ihre Arbeiten zur kooperativen Spieltheorie.

VON CHRISTOPH PÖPPE



Lloyd Shapley (links) wurde erst 1981 Professor an der University of California in Los Angeles, die den 89-Jährigen bis heute zu ihren Mitgliedern zählt. **Alvin E. Roth** ist zugleich Professor in Harvard und in Stanford.

Die beiden Preisträger haben auf ihrem Arbeitsgebiet eine so strikte Arbeitsteilung – hier der Theoretiker, da der Praktiker – praktiziert, dass sie nie ernsthaft zusammengearbeitet haben. Lloyd S. Shapley, Jahrgang 1923, verfasste Anfang der 1960er Jahre als Angehöriger der amerikanischen Denkfabrik RAND Corporation bahnbrechende theoretische Arbeiten zum Geschehen auf Märkten, die nicht durch Preise gesteuert werden. Zwei Jahrzehnte später erforschte der eine Generation jüngere Alvin E. Roth (geboren 1951) einen solchen nicht preisgesteuerten Markt, nämlich den Arbeitsmarkt

für amerikanische Mediziner nach dem Universitätsabschluss – und fand, dass sich mit Shapleys Theorie ein spezielles Vermittlungsverfahren nicht nur erklären, sondern sogar verbessern ließ. In der Folge konnte Roth Shapleys theoretische Erkenntnisse auf eine Vielzahl praktischer Probleme anwenden.

Das theoretische Fundament für Shapleys Werk ist die – weit gehend von ihm selbst geschaffene – kooperative Spieltheorie. Die geläufigere nicht-kooperative Spieltheorie handelt typischerweise von Akteuren mit gegensätzlichen Interessen, die vor allem keine Chance haben, verlässliche Ver-

einbarungen miteinander abzuschließen. Paradebeispiel ist das viel diskutierte Gefangenendilemma. In der kooperativen Spieltheorie dagegen sind die Akteure zu bindenden Verabredungen fähig und profitieren in der Regel von einer Zusammenarbeit. Gleichwohl will jeder von ihnen, wie in der Wirtschaftswissenschaft üblich, seinen persönlichen Nutzen maximieren. Das schafft ausreichend Raum für Konflikte und damit ein Betätigungsfeld für die Wissenschaftler.

Das mathematische Modell für solche Situationen umfasst Akteure – Einzelpersonen oder Firmen –, die entweder einzeln oder in Zusammenschlüssen («Koalitionen») ihr Geld verdienen können. Dabei sind die Einkünfte, die jede Koalition erzielen könnte, im Modell vorgegeben. Typischerweise sind sie größer als die Summe der Einkünfte ihrer Mitglieder; das sind die Vorteile des arbeitsteiligen Wirtschaftens.

Wie teilen die Mitglieder den so erzielten Überschuss unter sich auf? Damit die Koalition überhaupt zusammenbleibt, muss jeder von ihnen min-

destens so viel vom gemeinsamen Kuchen abkriegen, wie er allein erwirtschaften könnte; sonst hätte er einen Anreiz, auszuschneiden und sein eigenes Ding zu machen oder sich einer anderen Koalition anzuschließen, wo für ihn mehr zu holen ist. Dasselbe Argument gilt für jede Teilmenge der Koalition.

Man nennt eine Aufteilung der erwirtschafteten Gesamtsumme stabil, wenn sie keinem Akteur und keiner Teilgruppe von Akteuren einen derartigen Anreiz zum Aussteigen bietet, und eine Koalition stabil, wenn es für sie eine stabile Aufteilung der Einkünfte gibt. Nach dem Ende der Koalitionsverhandlungen haben sich typischerweise alle Akteure zu stabilen Koalitionen zusammengefunden. Dieser Gleichgewichtszustand hat zwei wesentliche Eigenschaften mit dem Nash-Gleichgewicht in der nicht-kooperativen Spieltheorie gemeinsam: Er ist nicht unbedingt optimal, aber es bewegt sich nichts, weil mindestens ein Beteiligter von einer Veränderung einen Nachteil hätte; und er ist nicht eindeutig bestimmt.

Immerhin: Für die Aufteilung der Einkünfte innerhalb einer Koalition hat Shapley eine Vorschrift gefunden, die allgemein als gerecht empfunden wird. Jeder Beteiligte bekommt einen geeignet definierten Mittelwert aus den Anteilen, die er als Mitglied jeder denkbaren Teilkoalition erwirtschaften würde. Dieser Wert, der »Shapley-Wert«, findet häufig Verwendung, wenn es um gerechte Aufteilungen geht.

Derselbe Formalismus ist auf Koalitionen anwendbar, die stets aus zwei Mitgliedern verschiedener Art zusammengesetzt sind. Das lässt sich am besten mit Männern und Frauen illustrieren, weswegen das zugehörige Problem unter dem Stichwort »stable marriage« (stabile Ehe) in die Literatur eingegangen ist. Ein Arrangement von Ehen zwischen n Männern und n Frauen ist stabil, wenn kein Mann und keine Frau sich zueinander mehr hingezogen fühlen als zu ihrem jeweiligen Ehegatten.

Im Gegensatz zu den Einkünften aus einer gewöhnlichen Koalition wird der Wert einer glücklichen Ehe in diesem Modell nicht quantifiziert. Vielmehr

führen alle Beteiligten Präferenzlisten, auf denen die denkbaren Partner in der Reihenfolge ihrer Begehrtheit notiert sind. Mit dieser Information findet ein Algorithmus, den Shapley 1962 gemeinsam mit seinem Fachkollegen David Gale (1921–2008) fand, stets ein stabiles Arrangement (siehe die »Mathematischen Unterhaltungen« ab S. 82).

Ein gemeinsamer Formalismus für Ehen und Arbeitsplätze

Weniger romantisch, aber im Prinzip gleichartig ist die oben angesprochene Aufgabe, die Wünsche der Jungärzte und die der einstellenden Krankenhäuser in Einklang zu bringen. Beide Seiten haben ihre Präferenzlisten. Man kann nicht erwarten, dass jedes Krankenhaus den Kandidaten seiner ersten Wahl und jeder frischgebackene Arzt den Arbeitsplatz seiner Träume bekommt, aber es sollte nicht passieren, dass Herr *X* lieber in die Pädiatrie gegangen wäre als in die Urologie, wo er eingestellt wurde, und zugleich die Pädiatrie lieber Herrn *X* gehabt hätte als Herrn *Y*, der jetzt die Stelle hat. Das ist die Stabilitätsbedingung.

Als in den 1940er Jahren die Medizinabsolventen knapp wurden, gingen die Krankenhäuser dazu über, den potenziellen Kandidaten bindende Verträge zu einem so frühen Zeitpunkt anzubieten, dass noch keine der Parteien eine brauchbare Präferenzliste haben konnte. Fehlzuweisungen waren wegen zu knapper Zeit nicht mehr korrigierbar. Als Reaktion darauf wurde eine zentrale Vermittlungsstelle, das National Resident Matching Program (NRMP), geschaffen. Beide Seiten reichten dort ihre Präferenzlisten ein und bekamen Zuweisungen zurück, mit denen sie gut leben konnten.

Alvin E. Roth zeigte 1984, dass das NRMP erfolgreich war und allgemein akzeptiert wurde, weil es im Wesentlichen den Algorithmus von Gale und Shapley praktizierte. Es gab sogar Gegenbeispiele: In Großbritannien wird dasselbe Problem durch regionale Vermittlungsstellen gelöst, und die Verfahren, die nicht der Shapley-Theorie entsprachen, wurden nach einer Weile aufgegeben und durch bessere ersetzt.

Anwendungen des Verfahrens auf andere Gebiete erforderten Erweiterungen der Theorie. So musste Roth das Verfahren für die Zuweisung von Schülern in Boston an weiterführende Schulen so modifizieren, dass die Schüler keinen Anreiz mehr hatten, ihre Präferenzen falsch zu deklarieren. In jüngerer Zeit bewarben sich zunehmend Jungmedizinerpaare am NRMP vorbei auf Stellen, weil beide in dieselbe Stadt kommen wollten – eine Präferenz, die nicht in den Formalismus des Gale-Shapley-Verfahrens passte. Aber auch an derlei Wünsche ließ sich der Algorithmus anpassen.

Neuere Forschungen Roths befassen sich mit einem sehr heiklen Thema: der Zuweisung von Nieren lebender Spender an Transplantationsbedürftige. Herr *A* ist bereit, seiner todkranken Frau eine Niere zu spenden, desgleichen Frau *B* ihrem Mann; aber immunologisch passen Spender und Empfänger nicht zusammen. Herrn *A*s Niere würde jedoch Herrn *B* gut bekommen und Frau *B*s Niere Frau *A*, so dass sich ein Tausch anbietet. Solche Gelegenheiten sind selten, könnten aber häufiger werden, wenn größere Anzahlen von Spender-Empfänger-Paaren und längere Tauschketten in das Verfahren einbezogen würden.

An dieser Stelle stellt Roth vorsichtig, aber deutlich das Prinzip in Frage, das bislang alle derartigen Zuteilungsmärkte beherrscht: Es darf kein Geld fließen. Eine Braut soll ebenso wenig käuflich sein wie ein Platz an einer renommierten Schule oder eine Spendernieren. Aber die Theorie und die bisherige Erfahrung lassen darauf schließen, dass es weit mehr Lebendtransplantationen – unbestritten die Therapie der Wahl für gewisse häufige Formen von Nierenversagen – geben könnte, wenn man den Spender für seine Niere bezahlte. Wie die Zahl an so geretteten Leben gegen die naheliegenden und vehement vorgetragenen ethischen Bedenken aufzuwiegen ist, bleibt eine Frage für die Zukunft.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Schuldig oder krank?

Vor Gericht sind Geist und Gehirn nicht das Gleiche.

Nach der Beweisaufnahme im Prozess gegen einen Serientäter hält der Staatsanwalt sein Schlussplädoyer. Darin legt er dar, warum in diesem Fall unbedingt eine drakonische Strafe zu verhängen ist. »Vor Ihnen steht ein unverbesserlicher Gewalttäter«, ruft er und zeigt theatralisch auf den Angeklagten. »Das folgt zweifelsfrei aus dem hier vorliegenden psychiatrischen Gutachten eines Sachverständigen, wonach der Angeklagte zu sozial angepasstem Verhalten von vornherein unfähig ist. Als typischer Psychopath wird er immer wieder alle Hemmungen verlieren und eine Gefahr für seine Mitmenschen sein. Darum fordere ich die für solche Verbrecher vorgesehene Höchststrafe.«

Dann ist der Verteidiger am Zug. »Hohes Gericht«, beginnt er, »der Angeklagte ist keineswegs der kaltblütige Psychopath, als den ihn mein werter Vorredner darstellt, sondern selbst ein wehrloses Opfer – jawohl, Sie haben ganz richtig gehört! Vor Ihnen steht das typische Opfer eines genetischen Defekts. Dieser verursacht, wie aus dem von mir vorgelegten neurobiologischen Gutachten ganz eindeutig hervorgeht, eine hirnorganische Störung, die den Angeklagten unweigerlich zu sozial unangepasstem Verhalten zwingt. Ich fordere das Gericht daher auf, meinen Mandanten freizusprechen oder seine biologische Erblast zumindest als mildernden Umstand zu werten.«

Das Szenario ist überspitzt, aber in der Tat scheinen neurobiologische, also genetisch und hirnanatomisch begründete Defekte eher strafmildernd zu wirken, während psychiatrisch diagnostizierte Asozialität das Strafmaß sogar hochtreiben kann. Diesen paradoxen Sachverhalt legt – zumindest für die USA – eine originelle Studie nahe, die ein Philosoph, eine Psychologin und eine Juristin an der University of Utah in Salt Lake City durchgeführt haben (*Science* 337, S. 846, 2012).

Die Forscher um den Philosophen James Tabery konfrontierten knapp 200 amerikanische Richter mit dem fiktiven Fall eines wiederholt rückfälligen Gewalttäters, der jemanden grundlos schwer verletzt haben sollte und laut psychiatrischem Gutachten an einer irreparablen psychischen Störung litt. Welches Strafmaß schien hier angebracht? Bei der Hälfte der Juroren fügten die Forscher zusätzlich ein neurobiologisches Gutachten bei, das dem Täter einen genetisch bedingten Hirnschaden bescheinigte.

Alle Richter hielten angesichts der Schwere der Tat und der schlechten Rehabilitationsprognose eine hohe Strafe für angebracht – doch bei denen, die außer dem psychiatrischen auch das neurologische Gutachten vorliegen hatten, fiel sie im Schnitt geringer aus: 13 statt 14 Jahre.

Warum wirkt ein genetisch-hirnorganischer Defekt strafmildernd, ein psychischer aber nicht? Kann der Straffällige weniger für ein »physisches« Handikap als für ein »psychisches«?

Ich vermute, viele Juristen sind intuitiv – ohne sich selbst darüber Rechenschaft abzulegen – Anhänger des psychophysischen Dualismus. Für sie wohnt unser Geist in einem separaten Körper, den er auf ganz ähnliche Weise im Rahmen der Gesetze durchs Leben zu steuern hat wie ein Autofahrer sein Gefährt durch den Straßenverkehr. Wenn der regelwidrige Umgang mit dem Wagen zu einem Unfall führt, ist selbstverständlich eine Sanktion fällig; stellt ein Gutachter jedoch einen technischen Mangel fest, beispielsweise defekte Bremsen, darf der Fahrer darauf hoffen, mit einer geringeren oder sogar ganz ohne Strafe davonzukommen.



Michael Springer



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!



Allergien – Geißel des 21. Jahrhunderts

Allergien nehmen dramatisch zu. 30 bis 40 Prozent der Weltbevölkerung sind laut dem jüngsten Weißbuch der World Allergy Organization inzwischen davon betroffen. Während es bei Seuchen wie Aids und Malaria oder Volkskrankheiten wie Diabetes klare Vorstellungen darüber gibt, wie sich ihnen begegnen lässt, liegt bei Allergien noch vieles im Dunkeln. Niemand weiß letztlich genau, was ihre tiefere Ursache ist und wie die optimalen Maßnahmen zur Prävention und Therapie aussehen. Und ebenso weiß niemand, warum ausgerechnet eine Verbesserung des Lebensstandards und der hygienischen Bedingungen das Auftreten von Asthma, Ekzemen und Heuschnupfen sowie anderen Überempfindlichkeitsreaktionen gegenüber Umweltreizen fördert.

Dabei schien das Problem schon vor vier Jahrzehnten auf dem besten Weg zu einer Lösung. Damals erkann-

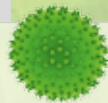
ten Forscher die Schlüsselrolle einer bestimmten Sorte von Antikörpermolekülen, den Immunglobulinen vom Typ E. Die haben eigentlich die Aufgabe, Parasiten zu bekämpfen. Bei Allergikern richten sie sich jedoch gegen allgegenwärtige Stoffe aus der Umwelt.

Der Grund dafür ist bis heute unklar. Immerhin haben neue Forschungen eine Fülle weiterer Faktoren aufgedeckt, die an der Entstehung von Allergien beteiligt sind, und damit auch Ansatzpunkte für Vorbeugungsmaßnahmen und Therapien geliefert. Die vorliegende Serie nähert sich dem Thema von allen Seiten und gibt mit Artikeln aus »Nature« und »Nature Medicine« einen umfassenden Überblick über den aktuellen Wissensstand, angefangen von der Grundlagenforschung bis hin zu den neuesten Erkenntnissen darüber, wie sich das Leiden verhüten oder lindern lässt.

DIE NEUE 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	▶ Welche Rolle spielt die Veranlagung? ▶ Die Bedeutung der Darmflora ▶ Ist zu viel Hygiene schädlich?	Januar 2013
Teil 3	▶ Die Haut als Eintrittspforte ▶ Asthma – unerwartet komplex ▶ Ansätze zur vorbeugenden Behandlung	Februar 2013
Teil 4	▶ Der Sinn allergischer Reaktionen ▶ Wohin geht die Forschung?	März 2013



DER ATOPISCHE MARSCH

Eine Allergikerkarriere

Allergien kommen selten allein. Neue Forschungsergebnisse könnten erklären, weshalb viele Kinder mit allergischen Ekzemen später auch noch Asthma, Heuschnupfen und Nahrungsmittelunverträglichkeiten entwickeln.

Von Paige Brown

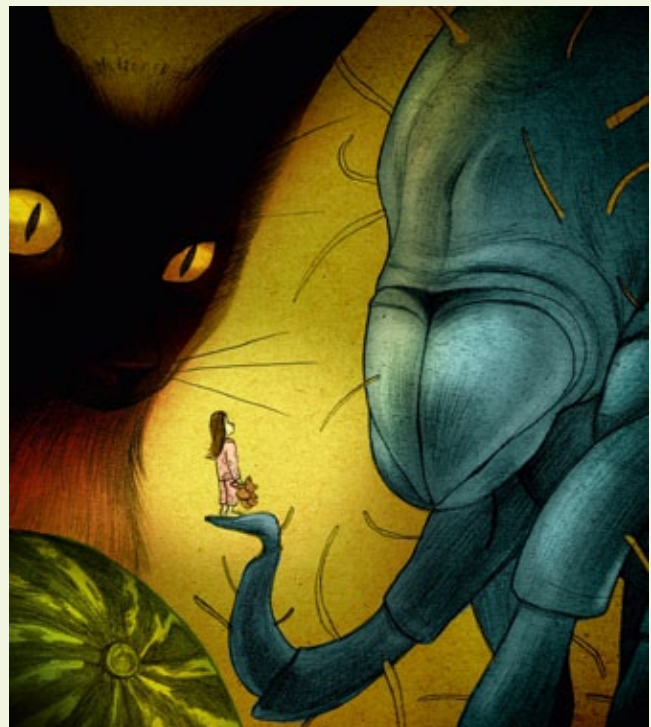
Meinen ersten schweren Asthmaanfall hatte ich als kleines Kind, als ich im Gästebett meiner Freundin übernachtete – zusammen mit ihrem Kätzchen. Ich war viel zu schüchtern, um mich über die Haare auf meinem Kissen zu beklagen. Stattdessen bemühte ich mich, flach zu atmen, um möglichst wenig von den feinen Partikeln in die Lunge zu bekommen, welche die Katze in der Zimmerluft und auf dem Bettzeug hinterlassen hatte. Erst gegen drei Uhr morgens – mein Gesicht war geschwollen und die Luftröhre so entzündet, dass ich kaum noch atmen konnte – brachte ich den Mut auf, die Eltern meiner Freundin zu wecken. Die Nacht endete in der Notaufnahme des Krankenhauses: Die Ärzte ließen mich ein bronchienerweiterndes Mittel inhalieren und verabreichten mir eine ordentliche Dosis Antihistaminika.

Der Vorfall war nur eine Episode in meinem lebenslangen Kampf mit allergischen Erkrankungen und einer schweren Überempfindlichkeit gegenüber Umweltreizen. Meine Mutter, die selbst zu Allergien neigt, erinnert sich gut an die entzündeten, juckenden Hautstellen, die mich schon in der frühen Kindheit quälten. Es waren die typischen Symptome des atopischen Ekzems, besser bekannt unter der alten Bezeichnung Neurodermitis (siehe den Beitrag ab S. 42). Damals zeigte ich auch, wie mein Vater erzählt, »eine eigenartige Reaktion«, sobald Tiere in der Nähe waren: Ich kratzte mich am Hals, meine Augen röteten sich und tränkten, die Lider schwellen an. Diese typischen Symptome der allergischen Rhinitis, gemeinhin als Heuschnupfen bezeichnet, sind die Reaktion des menschlichen Immunsystems auf allergieauslösende Proteine, die beispielsweise in Haaren oder Hautschuppen von Tieren vorkommen.

Ein anfälliges Kind wird in den ersten Lebensjahren wahrscheinlich gegenüber einer Reihe solcher Allergene sensibilisiert, wenn sein eigenes Immunsystem reift und allmählich Abwehrreaktionen gegen Fremdsubstanzen entwickelt. In den Körper gelangen die Allergieauslöser entweder über die

Schleimhäute der Atemwege oder über die Haut, sofern deren natürliche Barrierefunktion beeinträchtigt ist. Anfangs sind die Reaktionen meist örtlich begrenzt. Mit der Zeit können sie aber auch systemischen Charakter annehmen, das heißt den gesamten Körper erfassen. Ich selbst wurde vermutlich zunächst über die Haut gegen Kontaktallergene sensibilisiert, was später dazu führte, dass auch meine Lungen übermäßig auf eingeatmete Fremdstoffe reagierten.

Zur Sensibilisierung kommt es, wenn T-Helferzellen vom Typ 2 (Th2), die zu den weißen Blutkörperchen (Leukozyten) gehören, ein Allergen erkennen und daraufhin bestimmte Signalstoffe freisetzen. Diese so genannten Zytokine veranlassen dann B-Lymphozyten, einen weiteren Typ von weißen Blutkörperchen, bei Kontakt mit dem Allergen eine spezielle Sorte von Antikörpern gegen den Fremdstoff zu produzieren und auszuscheiden: Immunglobuline der Klasse E (IgE). Sie heften sich an die Oberfläche von wieder anderen Bestandteilen des Immunsystems: basophilen Granulozyten, die im



Ein allergiegefährdetes Kind kann durch viele Bestandteile seiner Umwelt sensibilisiert werden – von Katzenhaaren über Hausstaubmilben bis hin zu Wassermelonen.

BINDEGLIED ZWISCHEN ALLERGIEN

- 1 Allergien entwickeln sich oft in einer typischen Reihenfolge, die als **atopischer Marsch** bezeichnet wird.
- 2 Als Bindeglied zwischen den verschiedenen Allergiearten hat sich der **Botenstoff thymisches stromales Lymphopoietin (TSLP)** herausgestellt.
- 3 TSLP sorgt für die Vermehrung, Mobilisierung und Aktivierung von **Immunzellen** im gesamten Körper. Damit bietet es sich als Ansatzpunkt für neue Medikamente gegen Allergien an.

Blut zirkulieren, sowie den mit ihnen verwandten Mastzellen, die sich vorwiegend in den Schleimhäuten des Bindegewebes aufhalten.

Damit ist die Sensibilisierungsphase abgeschlossen. Wenn das Allergen nun das nächste Mal auf Bindegewebe trifft, wird es von den IgE-Antikörpern auf der Oberfläche der basophilen Granulozyten und Mastzellen gebunden. Diese schützen daraufhin das in den Granula (Bläschen) enthaltene Histamin aus, das innerhalb von Sekunden bis wenigen Minuten eine heftige Entzündungsreaktion auslöst. Dabei strömt vermehrt Blut an die betreffende Stelle, so dass sie sich rötet und anschwillt.

Ab der Pubertät plagte mich vor allem das allergische Asthma. Vielleicht noch frustrierender und belastender war jedoch, dass auch Allergien gegen viele Nahrungsmittel hinzukamen. Zudem litt ich weiter an chronischer Neurodermitis, die vielerlei Beschwerden, Schlafmangel durch den ständigen Juckreiz und Hautveränderungen verursachte. »Notieren Sie in der Krankenakte: Patientin zeigt charakteristische Symptome einer Atopie«, sagte meine Hautärztin Mary Dobson zu ihrer Helferin, als ich sie in ihrer Praxis in Baton Rouge (Louisiana) bei einem besonders schweren Schub aufsuchte.

Unter Atopie versteht man eine Überempfindlichkeit gegenüber Umweltallergenen von Pollen, Tieren und bestimmten Lebensmitteln, die auf einer genetischen Veranlagung zu besonders starken IgE-vermittelten Immunreaktionen beruht. Thomas Platts-Mills, Leiter der Abteilung für Asthma und allergische Erkrankungen an der University of Virginia in Charlottesville, beschreibt den Atopiker als Person, die sensibler als andere Menschen geringe Mengen von Fremdproteinen erkennt und darauf anspricht. »Allergien sind der Preis für unser hocheffektives Immunsystem, das uns vor den großen Seuchen der Vergangenheit geschützt hat«, erläutert er.

Manchmal komme ich mir vor wie die wandelnde Illustration des »atopischen Marsches«. Dieser Begriff umschreibt die Karriere eines Allergikers, dessen Krankheitsbild sich von der Kindheit bis ins Erwachsenenalter in charakteristischer Weise verändert und ausweitet. Dabei spielen viele Faktoren zusammen. Einige sind angeboren: Varianten oder Mutationen von Genen, die wichtige Funktionen des Immunsystems steuern oder die Eigenschaften der Haut beeinflussen. Andere beruhen auf Einwirkungen von außen: Kontakt mit Aller-

genen, Infektionen in frühen Lebensphasen, Umweltverschmutzung und chemische Reizstoffe, welche die Barrierefunktion der Haut beeinträchtigen und dadurch eine Sensibilisierung gegenüber Fremdstoffen begünstigen.

Heute sind bis zu 20 Prozent der Menschen in den Industrieländern Atopiker. Wer eine Allergie hat, bekommt mit höherer Wahrscheinlichkeit auch eine zweite oder dritte. Viele Betroffene leiden an der »atopischen Trias« aus Neurodermitis, Heuschnupfen und Asthma. Das belegt etwa eine Studie, die Forscher um Donald Leung von der Abteilung für pädiatrische Allergologie und Immunologie am National Jewish Health Center in Denver (Colorado) 2004 publizierten. Demnach erkrankten 75 Prozent der Patienten mit atopischem Ekzem auch an Heuschnupfen und 50 Prozent an Asthma.

Obwohl Nahrungsmittelallergien unabhängig von der atopischen Trias auftreten, dürften ihnen doch weitgehend dieselben Mechanismen zu Grunde liegen. Ich selbst reagiere stark allergisch auf verschiedene Früchte und Gemüse wie Äpfel, Kirschen, Kiwis, Bananen, Ananas, Karotten, Tomaten und sogar Wassermelonen. Bei eigenen Recherchen fand ich heraus, dass die Ursache vermutlich eine Kreuzreaktivität ist, die man als orales Allergiesyndrom bezeichnet.

Bestimmte Pollenproteine, zum Beispiel solche der Beifuß-Ambrosie und das Birkenpollenallergen Bet v1, rufen bei vielen Menschen Heuschnupfen und Asthma hervor. Oft führen sie zusätzlich zu einer Sensibilisierung gegenüber gewissen Früchten und Gemüsesorten, auf die Patienten mit oralem Allergiesyndrom dann mit der Bildung von IgE-Antikörpern reagieren – statt den sonst üblichen Immunglobulinen vom Typ G4, die eine Toleranz gegen Allergene vermitteln. Der Grund ist eine immunologische Kreuzreaktion zwischen den Pollenbestandteilen und bestimmten strukturell verwandten Proteinen in Nahrungsmitteln, zu denen etwa das in Äpfeln enthaltene Mad d1 zählt. Wenn gegen Pollen gerichtete IgE-Antikörper diese Proteine in Nahrungsmitteln erkennen, führt das an der Mundschleimhaut zu IgE-vermittelten Sofortreaktionen wie Rötung, Schwellung und Brennen sowie unter Mitwirkung von Th2-Zellen zu sich langsam entwickelnden Entzündungen wie der Neurodermitis.

Eingeschränkte Schutzfunktion der Haut

Aber nicht nur solche Kreuzreaktionen verknüpfen die diversen Allergieformen miteinander. Ein weiteres Bindeglied ist die Beschaffenheit der Haut. Normalerweise stellt sie die erste Verteidigungslinie gegen Infektionen dar. Schon länger vermuten Forscher, dass Störungen ihrer Barrierefunktion und mangelnde Feuchtigkeit die Sensibilisierung gegenüber Allergenen sowie Entzündungsreaktionen begünstigen. Die für Patienten mit Neurodermitis typische trockene, gerötete und rissige Haut fördert den Kontakt zwischen Umweltallergenen und Immunzellen, die Th2-vermittelte Reaktionen in Gang setzen und am Laufen halten.

Manchmal kommt es mir tatsächlich so vor, als sei meine Haut kein sonderlich wirksamer Schutzwall gegen die Außenwelt. Sie ist ungewöhnlich trocken, und selbst kleinste Verlet-

zungen an Beinen, Händen und Füßen können sich zu langwierigen Entzündungsherden entwickeln. Während schwere Neurodermitisschübe verschlimmern sich oft auch meine Nahrungsmittelallergien und mein Asthma. Doch welche molekularen Mechanismen stecken hinter diesem Zusammenhang?

»Die Gemeinsamkeiten zwischen den Erkrankungen der atopischen Trias sprechen klar dafür, dass sich die zu Grunde liegenden Mechanismen ähneln«, meint Steven Ziegler, Leiter der Abteilung für Immunologie am Benaroya-Forschungsinstitut in Seattle (Washington). Sein Team und andere Forschergruppen haben herausgefunden, dass erhöhte Konzentrationen eines Zytokins namens thymisches stromales Lymphopoietin (TSLP) im Blut ein gemeinsames Merkmal der drei Allergiearten sind. »Menschen mit der atopischen Trias bilden mehr TSLP – ein Befund, der sich übrigens auch im Mausmodell zeigt. Und die Blockade des TSLP kann verhindern, dass die Tiere erkranken«, erklärt der Forscher.

Die äußersten Zellschichten der Haut produzieren bei Neurodermitis große Mengen an TSLP, besonders in den chronisch betroffenen Arealen. Das fördert lokale Th2-vermittelte Entzündungsreaktionen. Laut einer Untersuchung von 2007 setzen menschliche Epithelzellen bei Infektionen oder Verletzungen TSLP frei. Das könnte erklären, warum sich selbst winzige Risse in meiner Haut zu Ekzemen auswachsen: Das TSLP-Protein, das als Folge der mechanischen Schädigung in großen Mengen entsteht, löst eine örtliche Entzündungsreaktion aus. Versuche mit Mäusen zeigten zudem einen Zusammenhang zwischen der TSLP-Produktion in den obersten Zellschichten von Haut, Darm oder Lunge und einer erhöhten Zahl von basophilen Leukozyten in Milz, Blut und Knochenmark auf. Dort vermitteln diese Immunzellen systemische allergische Reaktionen.

Vor einem Jahr berichteten Mark Siracusa, Immunologe an der University of Pennsylvania in Philadelphia, und seine Kollegen, dass eine durch TSLP gesteigerte Aktivität der basophilen Granulozyten bei Mäusen den IgE-Spiegel im gesamten Körper anhebt und allergische Entzündungsreaktionen verursacht. Wie die Forscher weiter feststellten, erhöhen die derart angeregten Granulozyten ganz allgemein die Bereitschaft zu Th2-vermittelten Reaktionen.

Insgesamt zeigen diese Befunde also: Die abnorme TSLP-Produktion an einer Grenzfläche zwischen Organismus und Umgebung fördert die Vermehrung, Mobilisierung und Aktivierung von Immunzellen, die Allergien im ganzen Körper auslösen. Das macht verständlich, warum beim Kontakt zwischen einem allergenen Nahrungsmittel (wie Wassermelonen) und meiner Darmschleimhaut (einer Grenzfläche zur von außen kommenden Nahrung) meine Ekzeme aufblühen oder ein Neurodermitisschub (an der Haut als Grenzfläche) mein Asthma verschlimmert.

Demnach bietet sich TSLP auch als neuer Ansatzpunkt für Medikamente an. Michishige Harada vom Laboratorium für Atemwegserkrankungen am Institut für Physikalische und Chemische Forschung in Kanagawa (Japan) und seine Kolle-

gen berichteten schon 2009, dass eine Variante von TSLP in Zellen der Bronchialschleimhaut die Proteinproduktion ankurbelt, wenn beispielsweise Viren die Atemwege befallen. 2011 publizierte die gleiche Arbeitsgruppe Untersuchungen, wonach Gene, die für besonders lange TSLP-Varianten kodieren, Asthma Vorschub leisten. Auf diese Befunde, die das thymische stromale Lymphopoietin als hauptverantwortlich für die Erweiterung des Allergiespektrums beim atopischen Marsch erscheinen lassen, stützen sich derzeit laufende klinische Studien der Phase II mit einem TSLP-Hemmer.

»Solange es keine Medikamente gibt, die das Asthma heilen, brauchen wir Wirkstoffe, die den atopischen Marsch stoppen«, betont Leung. TSLP-Hemmer hält er angesichts der aktuellen Forschungsergebnisse für besonders aussichtsreiche Kandidaten. Leider kommen die neuen Erkenntnisse zu spät, um mich vor den traumatischen Folgen meiner Übernachtung auf dem Katzenkissen zu bewahren. Die Eltern von Kindern mit ersten Anzeichen einer Atopie sollten jedoch sehr aufmerksam verfolgen, was es in nächster Zeit an Neuigkeiten über die TSLP-Hemmer gibt. ~

DIE AUTORIN



Paige Brown ist freie Wissenschaftsjournalistin und lebt in Baton Rouge (Louisiana).

QUELLEN

- Allakhverdi, Z. et al.:** Thymic Stromal Lymphopoietin Is Released by Human Epithelial Cells in Response to Microbes, Trauma, or Inflammation and Potently Activates Mast Cells. In: *Journal of Experimental Medicine* 204, S. 253–258, 2007
- Geroldinger-Simic, M. et al.:** Birch Pollen-Related Food Allergy: Clinical Aspects and the Role of Allergen-Specific IgE and IgG4 Antibodies. In: *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 127, S. 616–622, 2011
- Harada, M. et al.:** Thymic Stromal Lymphopoietin Gene Promoter Polymorphisms Are Associated with Susceptibility to Bronchial Asthma. In: *American Journal of Respiratory Cell and Molecular Biology* 44, S. 787–793, 2011
- Platts-Mills, T.A., Woodfolk, J.A.:** Allergens and their Role in the Allergic Immune Response. In: *Immunological Reviews* 242, S. 51–68, 2011
- Siracusa, M. C. et al.:** TSLP Promotes Interleukin-3-independent Basophil Haematopoiesis and Type 2 Inflammation. In: *Nature* 477, S. 229–233, 2011
- Zheng, T. et al.:** The Atopic March: Progression from Atopic Dermatitis to Allergic Rhinitis and Asthma. In: *Allergy Asthma Immunological Research* 3, S. 67–73, S. 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168622

© Nature Publishing Group
www.nature.com
Nature 479, S. 514–515

Allergien auf dem Vormarsch

Wir werden immer anfälliger für Überempfindlichkeitsreaktionen. Trägt nur verbesserte Hygiene die Schuld – oder gibt es noch andere Ursachen?

Von Duncan Graham-Rowe

Warum haben Asthma, Neurodermitis und Nahrungsmittelallergien in den letzten Jahrzehnten so stark zugenommen? Die Hygienehypothese erklärt dies so: Kinder hätten relativ wenig Kontakt mit Erregern – für ihr erst heranreifendes Immunsystem zu wenig. Aber lässt sich die Allergieexplosion wirklich so einfach erklären? Mittlerweile zeichnet sich ab, dass die Sache wohl doch erheblich komplizierter ist.

Zwar erhöht unsere moderne Lebensart anscheinend tatsächlich das Allergierisiko. Doch Forschungen zufolge liegt das nicht nur an übertriebener Sauberkeit und Hygiene. Denn wie sich anzudeuten scheint, nehmen die gesamten äußeren Umstände auf ein reifendes Immunsystem Einfluss: etwa der Ort, wo das Kind aufwächst, seine Ernährung und die Geschwisterzahl. Vermutlich geht es nämlich nicht nur darum, dass dem Immunsystem die Auseinandersetzung mit potenziellen Krankheitserregern und Allergenen fehlt, sondern auch um das empfindliche Gleichgewicht zwischen dem Körper und den vielen ihn besiedelnden Mikroorganismen (siehe »Tausend Billionen Freunde«, SdW 11/2012, S. 26). Unsere Evolution lief im Zusammenspiel mit diesen ab, und das Immunsystem hält sich durch sie in Balance.

Dass zu wenig Schmutz – genauer Kontakt mit Erregern – womöglich Allergien fördert, brachte 1989 der Epidemiologe David Strachan ins Gespräch, der heute an der St George's University of London arbeitet. Den Begriff »Hygienehypothese« verwendete Strachan damals nicht – wie er auch be-

tont, dass es ihm um eine viel engere Fragestellung ging. An sich war die Idee nicht neu. Der Mediziner wollte wie andere Forscher auch verstehen, warum zwar viele Krankheiten dank sauberen Wassers, verbesserter Sanitäreinrichtungen und Abwasserkanalisation, durch Impfungen und medizinische Fortschritte selten geworden waren, jedoch andererseits Allergien deutlich zunahmen. Und wieso betraf dies vornehmlich Industrieregionen und städtische Ballungsräume?

Tatsächlich treten Allergien in vielen westlich geprägten Ländern heute 20-mal öfter auf als noch Mitte des 20. Jahrhunderts – auch wenn sich der Häufigkeitsgrad durchaus unterscheidet. So leidet in einigen Gebieten Neuseelands, Australiens und der USA 40 Prozent der Bevölkerung an Asthma. Und die Neurodermitisrate ist in manchen Industrieländern dramatisch angestiegen. Inzwischen scheinen die Quoten in den westlich geprägten Staaten seit einiger Zeit nicht mehr stark zu wachsen. Dafür nehmen sie nun rapide in Schwellenländern zu, deren Lebensweisen und Hygienebedingungen sich westlichen Standards annähern.

Strachan brachte das Phänomen erstmals in Zusammenhang mit der immer geringeren Kinderzahl in Familien. Er hatte an über 17 000 britischen Kindern des Jahrgangs 1958, die alle in derselben Woche im März geboren waren, bis ins Erwachsenenalter erfasst, ob sie Heuschnupfen, Neurodermitis und dergleichen bekamen. Dabei entdeckte er, dass Heuschnupfen umso seltener auftrat, je mehr ältere Geschwister vorhanden waren. Seine Schlussfolgerung damals: Vielleicht wirkten frühe Infektionen vorbeugend, die sich das Kind direkt durch seine Geschwister zugezogen oder sogar schon im Mutterleib miterlebt hatte. Schließlich erhöht sich bei mehreren Kindern das Spektrum eingeschleppter Keime.

Noch gut erinnert sich Strachan daran, wie kritisch Immunologen die Botschaft zunächst aufnahmen. Damals galt, dass Infektionen Allergien eher den Weg bereiten, als dass sie ihr Auftreten verhindern. Der Widerstand wich erst nach 1992 mit der Entdeckung eines Immunmechanismus, der die neue Idee plausibel erscheinen ließ.

Im Kern geht es um eine gestörte Balance zwischen verschiedenen weißen Blutzellen, und zwar speziell um das Ver-

AUF EINEN BLICK

DER UMWELTBEITRAG

1 In den **Industrienationen** gibt es heute sehr viel mehr Allergiekinder als früher. Als mögliche Ursache ist schon seit Längerem die **verbesserte Hygiene** im Gespräch.

2 Neuere Untersuchungen sprechen dafür, dass diese Sichtweise zu eng ist. Demzufolge sind zusätzlich die geringere Kinderzahl in den Familien, die viele vor dem Fernseher verbrachte Zeit und auch falsche Vorsicht vor Nahrungsmitteln auslösende Faktoren – kurz: der **moderne westliche Lebensstil**.



DREAMSTIME / SEBASTIAN CZAPNIK

hältnis von zwei Sorten so genannter T-Helferzellen der Immunabwehr, die als Th1 und Th2 bezeichnet werden. Gegen Bakterien und Viren treten vornehmlich Th1-Zellen auf den Plan, die ein Freisetzen verschiedener Immunbotenstoffe veranlassen, was die Bekämpfung solcher Erreger anstachelt. Tierversuche zeigten allerdings auch, dass diese Immunantwort die Reaktivität der Th2-Helferzellen herabsetzt. Die aber steuern die Produktion von Immunglobulin E (IgE) – eine Antikörperklasse, die auf häufige Allergene anspricht.

Ost-West-Vergleich: Ungewollte Testbedingungen

Das passte zu Strachans Vermutung: Eine eher geringe Konfrontation mit Krankheitskeimen in der frühen Kindheit müsste bedeuten, dass die Th1-Reaktion wenig gefordert wird. Deswegen würde die Th2-Reaktion ungenügend gebremst und entsprechend überschießen.

Bald mehrten sich Hinweise auf einen solchen Zusammenhang mit Allergien, und binnen Kurzem etablierte sich dafür der Begriff »Hygienehypothese«. So zeigte ein Team um Anne Wright von der University of Arizona in Tucson, dass Kinder, die im ersten halben Jahr eine Tageskrippe besucht hatten, seltener Neurodermitis und Asthma bekamen. Forscher untersuchten nun auch, wieso ausgerechnet Bauernkinder weniger Allergien entwickelten (Kasten S. 36 oben). Und schließlich brachten sie die gleichen Immunvorgänge in Beziehung zu verschiedenen Autoimmunkrankheiten wie multipler Sklerose, entzündlichen Darmerkrankungen, Morbus Crohn und Typ-1-Diabetes.

Der Fall der innerdeutschen Grenze 1989 bot eine einmalige Gelegenheit, den Einfluss der verschiedenen Lebensverhältnisse in Ost und West zu vergleichen. In den 1990er

Schon in früher Kindheit, sogar bereits in der Schwangerschaft, wird Allergien der Weg gebahnt – eine Kehrseite modernen Lebens, mit Medienkonsum von der Wiege an.

Jahren führte die Kinderärztin und Allergologin Erika von Mutius von der LMU München hierzu eine Anzahl von Untersuchungen durch. Obwohl die Umweltverschmutzung im Osten viel höher gewesen war, litten Kinder dort deutlich seltener an Asthma oder Neurodermitis als Kinder in Westdeutschland. Ähnliches ergaben Vergleichsstudien mit Polen oder Estland auf der einen und Schweden auf der anderen Seite. Genetisch gesehen sind jene Bevölkerungen recht ähnlich, aber sie hatten vier Jahrzehnte lang unter völlig anderen ökonomischen und ökologischen Verhältnissen gelebt.

Im Zentrum solcher Forschungen stehen meist Asthma und Neurodermitis. Ob ein ähnlicher Zusammenhang für Nahrungsmittelallergien gilt, die ebenfalls zunehmen, ist vorerst unklar. Doch eine Verbindung zwischen den verschiedenen Allergiearten scheint es zu geben. Offensichtlich spielen bei Allergien gegen Nahrungsinhaltsstoffe genetische Veranlagungen mit, ebenfalls aber Umweltfaktoren wie die Ernährung, Antibiotika und Hygienestandards, erläutert Clare Mills vom Institute for Food Research in Norwich (Großbritannien). Denn Letztere nahmen Einfluss auf die Darmflora. Deren Zusammensetzung könne bei einer besonders sauberen Umwelt eine ganz andere sein, und das bereite Allergien unter Umständen den Weg.

Zur Häufigkeit von Nahrungsmittelallergien gibt es noch wenig Daten, gerade für Schwellenländer. Das Projekt Euro-Prevall – das Mills eine Zeit lang leitete –, befasst sich mit der

Geschützt auf dem Bauernhof

Landärzte hatten es schon lange bemerkt: Bauernkinder bekommen selten Heuschnupfen. 1999 untermauerte die Epidemiologin Charlotte Braun-Fahrlander von der Universität Basel dies mit einer Studie. Erika von Mutius von der Kinderklinik der LMU München zeigte dann, dass das Allergierisiko für ein Kind, das auf einem Bauernhof aufwächst, oft nur ein Drittel dessen von Stadtkindern und sogar von anderen Landkindern beträgt.

Eine mögliche Erklärung dafür fand Roger Lauener von der Universitäts-Kinderklinik Zürich zusammen mit von Mutius 2002: Immunzellen der Bauernkinder trugen mehr TLR2 genannte Rezeptoren (»toll-like«-Rezeptoren der Klasse 2). Das Oberflächenprotein bindet an Mikroorganismen und aktiviert das angeborene Immunsystem (siehe SdW 8/2005, S. 68 und Nobelpreis: »Wachposten des Immunsystems«, 12/2011, S. 15). Aber keines dieser Kinder zeigte Zeichen eines Infekts, auch war die Anzahl der weißen Blutzellen normal. Die Erklärung für das Paradox scheint auf genetischer Ebene zu liegen: Offenbar bewirken die Mikro-

organismen, dass Immunzellen jene Rezeptoren vermehrt erzeugen – auch ohne dass das Kind eine Infektion durchmacht.

Jener Schutz bildet sich laut von Mutius durch den Kontakt zu Tieren, aber auch durch Trinken von nicht pasteurisierter Milch. In mehreren Studien fand sich eine Wirkung von Rohmilch hinsichtlich Asthma, Neurodermitis, Heuschnupfen und Allergiesensibilisierung. Nach anderen Untersuchungen kann sich die Schutzwirkung sogar auf das Ungeborene übertragen, wenn die Schwangere mit Tieren umgeht oder nicht pasteurisierte Milch trinkt. Bei den Kindern hielt der Effekt mindestens zwei Jahre an.

Vermutlich kommt es dabei nicht auf bestimmte Mikroorganismen an, sondern auf deren Vielfalt. Nach von Mutius sind Kinder auf einem Bauernhof einem weit größeren Spektrum an Mikroben ausgesetzt als anderswo. Die Ärztin fand eine gegenläufige Korrelation zwischen der mikrobiellen Vielfalt und dem Asthmarisiko. Auch Molkeproteine – die bei Erhitzen zerstört werden – scheinen die Asthmagefahr zu vermindern.

Allergieproblematik in Europa, betrachtet dazu aber auch Indien und China. Die beteiligten Forscher untersuchen die Auswirkungen von sozioökonomischen Aspekten, der Ernährungsweise, dem Lebensstil und von geografischen Unterschieden auf das Allergierisiko. Mills hält die Ergebnisse

aus Asien für sehr aufschlussreich. Dort, und besonders in Indien, gäbe es praktisch keine Nahrungsmittelallergien. Die Ausnahme sei das hoch entwickelte Hongkong. Da glichen die Raten eher dem Westen, völlig anders als im übrigen China.

Langzeitforschungsprojekte in den Schwellenländern verzeichnen inzwischen Allergiezunahmen mit steigendem Wohlstand eines Landes oder Lebensraums. Beispielsweise leitete Emmanuel Addo-Yobo vom Komfo-Anokye-Lehrkrankenhaus in Kumasi (Ghana) eine Zehnjahresstudie, bei der Strachan und Adnan Custovic von der University of Manchester mitwirkten. An Kindern aus reicheren und armen Stadtgebieten sowie vom Land verglichen die Forscher die Neigung zu angeborenen Überempfindlichkeitsreaktionen – Atopien – und belastungsabhängigem Asthma. Tatsächlich traten in Ghana beide Allergieformen zusammen am häufigsten bei Stadtkindern der wohlhabenderen Mittelschicht auf.

Der Wurmfaktor

Schutz vor Allergien dank Parasiten klingt merkwürdig. Aber während die Menschen in wenig entwickelten Ländern oft noch unter Würmern und dergleichen leiden – etwa unter Filariose und Schistosomiasis –, gibt es solche Krankheiten in den Industrienationen kaum noch.

So sehr deren Verschwinden medizinisch gesehen zu begrüßen ist, scheint damit doch auch ein wichtiger Faktor gegen Allergien verloren gegangen zu sein. Einen Zusammenhang vermuteten Mediziner schon, bevor die Hygienehypothese aufkam. Denn Immunzellen bilden bei Bilharziose mehr Rezeptoren vom Typ TLR2, wie Maria Yazdanbakhsh von der Universität Leiden bei Studien in Ghana nachwies – ein ähnlicher Befund, wie man ihn in Europa bei Kindern von Bauernhöfen fand (siehe Kasten oben). Anscheinend stählen die Organismen, die unsere Evolution eng begleitet haben, unser Immunsystem.

Mit der Ausrottung von Wurmkrankheiten wächst die Neigung zu Neurodermitis. Das zeigten Untersuchungen in Gabun, Venezuela und Vietnam. Nach einer Erhebung von Harriet Mpairwe von der Uganda Research Unit on AIDS kann das auch Kinder betreffen, deren Mutter als Schwangere eine Wurmbehandlung erhielt. Anscheinend vermag sie den Schutzfaktor auf den Fötus zu übertragen.

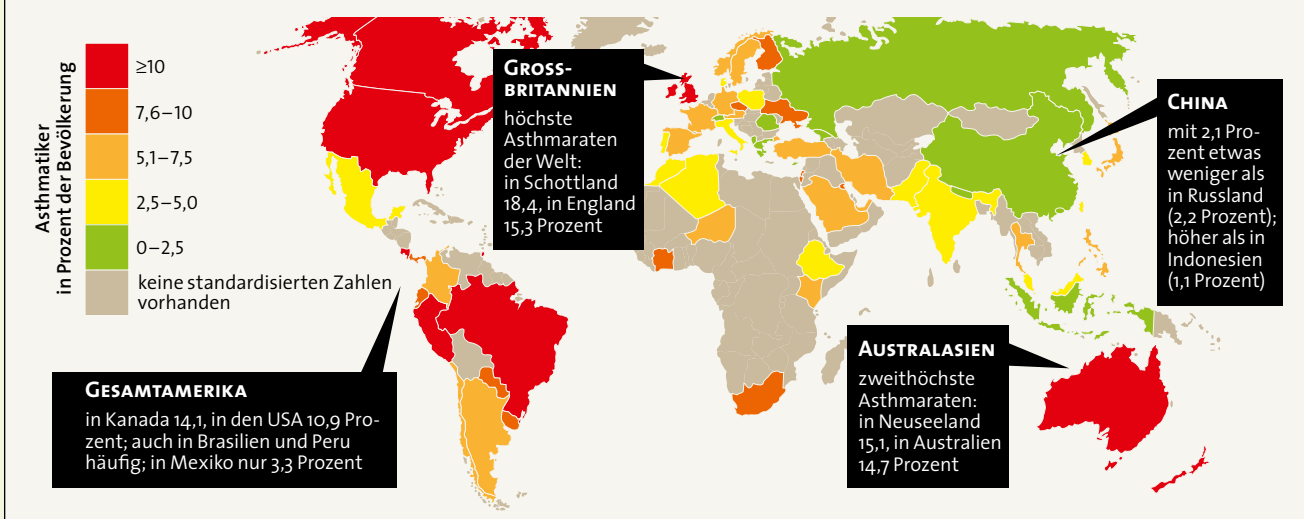
Konträre Befunde erweitern das Erklärungsschema

Aber nicht alle Ergebnisse solcher Studien fügen sich in die Hygienehypothese. Das stark urbanisierte Japan, das auf Sauberkeit und Ansteckungsschutz viel Wert legt, verzeichnet eine viel geringere Asthmarate als die Vereinigten Staaten oder Australien. Und in den USA steigt der Anteil von Asthmakindern gerade in Armenvierteln und bei dürftigen Wohnverhältnissen. Sehr oft tritt Asthma anscheinend auch auf der Karibikinsel Barbados bei Bevölkerungsgruppen auf, die an Hauptdurchgangsstraßen leben und deren Wohnungen hohe Konzentrationen bakterieller Toxine aufweisen.

Thomas Platts-Mills von der University of Virginia in Charlottesville zufolge verschleiert das Schlagwort Hygiene eher die Zusammenhänge, weil es zu einer zu engen Sichtweise verleitet. An sich hält der frühere Präsident der Ameri-

Asthma weltweit: Ungleiche Verteilung

Anscheinend fördert die westliche Lebensweise das Auftreten von Asthma.



can Academy of Allergy, Asthma and Immunology die Sauberkeitshypothese für plausibel. Doch unser Leben habe sich noch in anderer Hinsicht verändert. Es sei vermutlich kein Zufall, dass in den USA die Asthmafälle zu steigen begannen, seit das Fernsehen Kindersendungen bringt. Vor 1955 hätten Schulkinder nachmittags draußen gespielt und herumgetobt. Heutzutage würden sie viel mehr in der Wohnung bleiben und sich wenig bewegen. So viel Stillsitzen habe es bei Kindern früher nicht gegeben.

Das hält Platts-Mills insofern für bedeutsam, als seine Forschungsgruppe herausfand, dass Menschen beim Fernsehen seltener tiefe Atemzüge machen als selbst beim Lesen. Leider tue das der glatten Muskulatur der Bronchien nicht gut, denn die Lungen müssten regelmäßig gedehnt und kräftig beansprucht werden. Andernfalls würden unspezifische Bronchialreizungen auftreten. Wenn Kinder viel vor dem Fernseher hockten, wenig herumtollten – also ihre Lungen kaum trainierten – und noch dazu in Wohnungen mit Teppichböden lebten, die nun einmal von Hausstaubmilben wimmelten, sei Asthma schon fast programmiert.

Auf einen weiteren Aspekt der Lebensführung verweist der Kinderhauartz Carsten Flohr vom St Thomas' Hospital in London. Trotz Hinweisen, dass eine vielseitige Ernährung in der frühen Kindheit das Risiko für Nahrungsmittelallergien verringert, verhalten sich Eltern in Industrienationen damit sehr vorsichtig. Sie glauben, ihr Kind schützen zu können, wenn sie ihm bestimmte Lebensmittel zunächst vorenthalten. Gerade das könnte die Situation aber verschärfen.

Auch Strachan hält die Bezeichnung Hygienehypothese für überholt. Der Begriff würde den wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht mehr gerecht. Zwar ließe sich die Zunahme von Allergien nach wie vor am ehesten durch die mangelnde Konfrontation mit Erregern erklären. Ebenso hält

Strachan die Schlussfolgerungen zur Geschwisterzahl für stimmig. Aber seiner Ansicht nach sollte man die Allergieursachen dem westlichen Lebensstil überhaupt zuschreiben, also einem viel breiteren Spektrum an Einflussfaktoren.

Natürlich verlangt nun niemand von den Menschen der Industrieländer, allesamt aufs Land zu ziehen und Bauern zu werden. Genauso unsinnig wäre es, sich nur wegen eines besseren Allergieschutzes mehr Kinder zuzulegen. Dass unser moderner städtischer Lebensstil Allergien befördert, wird allerdings zunehmend deutlicher. ~

DER AUTOR



Duncan Graham-Rowe ist Wissenschaftsjournalist und lebt in Brighton, Großbritannien.

QUELLEN

Beasley, R. et al.: Worldwide Variation in Prevalence of Symptoms of Asthma, Allergic Rhinoconjunctivitis, and Atopic Eczema: ISAAC. In: Lancet 351, S. 1225–1232, 1998

Peat, J.K. et al.: Prevalence and Severity of Childhood Asthma and Allergic Sensitisation in Seven Climatic Regions of New South Wales. In: The Medical Journal of Australia 163, S. 22–26, 1995

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168623

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 479, S. 2–3, 24. November 2011

Wenn im Essen der Tod lauert

In klinischen Studien untersuchen Forscher, ob sich Allergiker vor potenziell tödlichen Immunreaktionen gegen Lebensmittel schützen lassen – indem sie behutsam daran gewöhnt werden.

Von Rebecca Kessler

Eine Frühlingsrolle können die meisten Menschen bedenkenlos essen; doch für Allergiker lauert zwischen ihren knusprigen goldenen Teigschichten unter Umständen der Tod. Bei ihnen kann Erdnussbutter, die manchmal zum Abdichten der mit Fleisch und Gemüse gefüllten Zwischenräume dient, einen anaphylaktischen Schock auslösen: Binnen Minuten zeigt sich ein Hautausschlag, Lippen, Zunge und Rachen beginnen zu jucken und schwellen an. Im schlimmsten Fall fällt der Blutdruck ab, der Betroffene bekommt keine Luft mehr, verliert das Bewusstsein und stirbt.

Die Häufigkeit von Nahrungsmittelallergien hat in den westlichen Industrieländern stark zugenommen. Wie eine im Juni 2011 veröffentlichte Studie der Northwestern University in Chicago (Illinois) ergab, reagieren inzwischen acht Prozent der Kinder in den USA auf mindestens ein Nahrungsmittel allergisch. Ähnliche Zahlen werden aus Kanada, Großbritannien, Frankreich und Norwegen berichtet. In Deutschland schätzen Experten den Anteil auf zwei bis sechs Prozent.

Doch nicht nur die Zahl der Allergiker steigt. Sie reagieren auch auf mehr Nahrungsmittel als noch vor wenigen Jahrzehnten. So bleiben Allergien gegen Milchprodukte und Eier, die früher fast nur bei Vorschulkindern vorkamen, heute oft bis ins Erwachsenenalter bestehen.

AUF EINEN BLICK

ALTE RATSCHLÄGE ÜBERHOLT

1 Anders als Mediziner lange dachten, lassen sich **Nahrungsmittelallergien** nicht dadurch verhüten, dass man Kinder schon im Embryonal- und Säuglingsstadium vor möglichen Auslösern schützt.

2 Mehr Erfolg scheint eine **orale Desensibilisierung** zu versprechen. Dabei nimmt das Kind ab dem zweiten Lebensjahr Nahrungsmittelallergene **in kontrollierten Dosen** mit dem Essen zu sich.

Nahrungsmittelunverträglichkeiten, die zu den häufigsten Auslösern anaphylaktischer Reaktionen zählen, verursachen auch beträchtliche ökonomische Schäden: Durch sie entstanden laut einer Studie der Virginia Commonwealth University in Richmond vom April 2011 im Jahr 2007 allein in den USA Kosten in Höhe von 510 Millionen Dollar für die medizinische Versorgung der Betroffenen und als Folge von Produktivitätseinbußen.

Konfrontieren besser als abschirmen

Leidet ein Säugling an Hautausschlägen oder anderen Erkrankungen, die mit Allergien zusammenhängen, oder ist ein Geschwister oder Elternteil Allergiker, wird er höchstwahrscheinlich auch eine Lebensmittelallergie entwickeln. Unter diesen Umständen hieß es bis vor Kurzem, die Mütter sollten während der Schwangerschaft und Stillzeit allergene Nahrungsmittel meiden, das Kind für vier bis sechs Monate ausschließlich stillen und ihm frühestens im Alter von zwei bis drei Jahren Lebensmittel zu essen geben, die möglicherweise Allergien hervorrufen. »Dahinter stand die Idee, das Kleinkind in eine Art immunologischen Kokon einzuspinnen und es allergieauslösenden Proteinen gar nicht erst auszusetzen«, erläutert Gideon Lack, Professor für pädiatrische Allergologie am King's College London.

Aktuelle Forschungsergebnisse wecken jedoch den Verdacht, dass dieses Vorgehen völlig falsch sein könnte. »Möglicherweise erreichen wir mit der Vermeidungsstrategie genau das Gegenteil von dem, was wir eigentlich anstreben«, sagt Lack. Das geht etwa aus einer 2008 publizierten Untersuchung hervor, an der er mitgewirkt hat. Demnach leiden Kinder in Israel zehnmal seltener an Erdnussallergien als in Großbritannien, obwohl sie sehr viel mehr erdnusshaltige Nahrungsmittel verzehren als ihre britischen Altersgenossen.

Auf Grund solcher Befunde änderte die American Academy of Pediatrics im Jahr 2008 ihre Ernährungsratschläge. Den überarbeiteten Leitlinien nach gibt es keine ausreichende wissenschaftliche Grundlage, um Einschränkungen bei



Allergien gegen Erdnüsse sind weit verbreitet. Sollten Mütter in allergiebelasteten Familien während der Schwangerschaft und Stillzeit vorsorglich auf sie verzichten, damit ihre Kinder nicht schon im Embryonal- oder Säuglingsstadium dagegen sensibilisiert werden? Nach neuen Erkenntnissen ist das unnötig – und vielleicht sogar falsch.

der Ernährung für schwangere und stillende Mütter oder mehr als ein halbes Jahr alte Kinder zu empfehlen. Das britische Gesundheitsministerium schloss sich 2009 dieser Auffassung an. Im gleichen Jahr hat auch in Deutschland das Aktionsbündnis Allergieprävention seine Ratschläge von 2004 umgearbeitet und empfiehlt nicht länger, Risikokinder in den ersten Lebensjahren möglichst keinen Nahrungsmittelallergenen auszusetzen – eine Position, die das Bundesamt für gesundheitliche Aufklärung heute ebenfalls vertritt.

»Manche Mütter eines Kindes mit Erdnussallergie sagen: ›Ich gebe meinem (nächsten) Kind lieber keine erdnusshaltigen Nahrungsmittel.‹ Tatsächlich existieren Untersuchungsbefunde, wonach dies die angemessene Vorgehensweise ist. Anderen Mütter erscheinen derlei Vorsichtsmaßnahmen dagegen übertrieben oder gar abträglich, und auch für diese

Auffassung lassen sich Studienergebnisse anführen«, erklärt Hugh Sampson, Direktor des Jaffe Food Allergy Institute an der Mount Sinai School of Medicine in New York und Spezialist für Allergien bei Kindern. »Wir müssen unbedingt vermeiden, dass sich die Mütter wegen ihrer Entscheidung schuldig fühlen, denn niemand weiß derzeit wirklich, was das Beste ist.«

Die nach wie vor offene Frage, ab wann und ob überhaupt Kleinkinder potenziellen Allergenen ausgesetzt werden können, sollen drei derzeit laufende große Studien klären. Lack leitet eine davon namens LEAP (Learning Early About Peanut Allergy). An ihr nehmen 640 Kleinkinder teil, von denen etwa die Hälfte ein hohes Allergierisiko hat. Ziel ist, herauszufinden, ob der Verzehr erdnusshaltiger Nahrungsmittel im Kleinkindalter die Entwicklung einer Allergie fördert. Die

Untersuchung hat 2006 begonnen, erste Ergebnisse werden nächstes Jahr erwartet.

Lack leitet zudem die Studie EAT (Enquiring About Tolerance), deren Abschluss für 2015 geplant ist. Hier vergleichen die Forscher Säuglinge, die bis zum Alter von sechs Monaten ausschließlich gestillt wurden, mit solchen, die ab dem vierten Lebensmonat zusätzlich sechs potenziell allergieauslösende Nahrungsmitteln zu essen bekamen.

Die dritte Studie soll aufzeigen, welche Rolle die Ernährung der werdenden Mutter während der Schwangerschaft spielt. Sie verfolgt den Gesundheitszustand von 500 Säuglingen, die allergisch gegen Milch oder Eier sind und damit ein hohes Risiko haben, auch eine Erdnussallergie zu entwickeln. 2010 publizierte Zwischenergebnisse scheinen die Kokon-Hypothese zu stützen, wonach der Kontakt mit Allergenen möglichst zu vermeiden ist: Bei Säuglingen, deren Mütter während der Schwangerschaft Erdnüsse aßen, fanden sich mehr Antikörper gegen deren Bestandteile im Blut. Es bleibt jedoch abzuwarten, wie viele dieser Kinder auch tatsächlich eine Allergie gegen Erdnüsse entwickeln werden, sagt Sampson, der die Studie leitet.

Probleme mit der Desensibilisierung per Spritze

Schon vor 100 Jahren versuchten Mediziner, Allergiker zu heilen, indem sie ihnen den Auslöser ihres Leidens in steigenden Dosen verabreichten. Die Injektion der Allergene von Hausstaubmilben, Pollen oder Katzenhaaren ist immer noch eine übliche Methode zur Desensibilisierung. Bei Nahrungsmittelallergien ist jedoch größte Vorsicht geboten, weil die Immunreaktion sehr heftig ausfallen kann. Im Jahr 1991 starb ein 15-jähriger Teilnehmer einer Studie zur Injektionstherapie der Erdnussallergie an einer anaphylaktischen Reaktion. Das war ein Schock für das gesamte Forschungsgebiet.

Sehr zum Leidwesen von John Oppenheimer von der University of Medicine and Dentistry of New Jersey in Newark, der die Unglücksstudie leitete, leben auch heute, über 20 Jahre danach, die Patienten immer noch »im Schatten einer Zeitbombe«, da ein einziger Bissen der falschen Nahrung ihren Tod bedeuten kann. Allerdings lassen ihn neue Forschungsergebnisse hoffnungsvoller in die Zukunft blicken. »Heute kann ich meinen jungen Patienten nur den dringenden Rat geben, Erdnüsse strikt zu meiden«, sagt er. »Doch tröste ich sie mit der Aussicht, dass ich ihnen, bis sie ins College kommen, etwas Besseres anzubieten habe.«

Wenn es zu gefährlich ist, Nahrungsmittelallergene zu injizieren, könnte man sie den Patienten dann vielleicht in winzigen Dosen unter kontrollierten Bedingungen mit der Nahrung verabreichen? Tatsächlich wurde diese naheliegende Vorgehensweise jüngst mehrfach erprobt – mit positiven Ergebnissen. So berichteten im März 2011 Forscher von der University of Cambridge (Großbritannien) über eine Studie zur oralen Immuntherapie der Erdnussallergie bei 22 Kin-

dern. Die Probanden hatten insgesamt 30 Wochen lang steigende Dosen von Erdnussmehl zu sich genommen. Das erhöhte ihre Toleranz gegenüber dem Allergen im Durchschnitt um das 1000-Fache – genug, damit der versehentliche Genuss von Erdnüssen keine Lebensgefahr mehr bedeutete. Nach Ende der Therapie tolerierten 14 der 22 Kinder selbst eine Allergenmenge, die 32 Erdnüssen entsprach. Weitere vier Kinder zeigte nur leichte bis mittelschwere Reaktionen.

Ebenfalls im März 2011 publizierten Forscher des Duke University Medical Center in Durham (North Carolina) unter Leitung von Wesley Burks erste Ergebnisse einer noch laufenden Studie zur oralen Immuntherapie einer Erdnussallergie.

Nach einem Jahr Behandlungsdauer tolerierten alle 16 teilnehmenden Kinder das Äquivalent von 20 Erdnüssen, wobei nur eines leicht, die anderen gar nicht allergisch reagierten. Hin-

gegen vertrugen fünf von neun Kindern, die zu Vergleichszwecken nur ein Placebo erhalten hatten, nach wie vor keine oder nur sehr wenige Erdnüsse – im Mittel eine einzige.

Im Mai 2011 veröffentlichte die Arbeitsgruppe von Sampson die Ergebnisse einer fünfjährigen Studie über eine ähnliche Desensibilisierungsmethode, die auch als natürliche Immuntherapie bezeichnet wird. Kinder mit Allergie gegen Milcheiweiß hatten dabei zunächst milchhaltige Muffins und Waffeln sowie später Käsepizza erhalten. Die Teigwaren wurden nach und nach bei immer geringeren Temperaturen gebacken. Am Ende vertrugen die Kinder ungekochte Milch 16-mal so gut wie die Teilnehmer der Kontrollgruppe.

Schließlich vermeldete im Juli dieses Jahres eine Gruppe um Burks, inzwischen an der University of North Carolina in Chapel Hill, den Erfolg einer oralen Immuntherapie für Hühnereiweiß. 40 dagegen allergische Kinder erhielten es in Pulverform über einen Zeitraum von 22 Monaten hinweg in stetig steigenden Dosen. Vier brachen den Versuch ab. Von den restlichen 36 tolerierten am Ende 30 eine Allergenmenge, die einem Hühnerei entsprach. Bei den 15 Kindern der Kontrollgruppe zeigte sich dagegen keinerlei Besserung.

Laut Sampson hat die orale Immuntherapie insgesamt bei etwa 80 Prozent der bislang damit behandelten Patienten funktioniert. Mit einer modifizierten Vorgehensweise lie-

»Die orale Immuntherapie bei Nahrungsmittelallergien wirkt in 80 Prozent der Fälle«



Auch Frühlingsrollen sind für manche Allergiker tabu.

DREAMTIME / CHRIS LEACHMAN

Häufigkeit von Nahrungsmittelallergien bei Kindern in Prozent		
	USA	Frankreich
Allergie gegen ein oder mehrere Nahrungsmittel	8,00	6,70
Allergie gegen: Erdnüsse	2,02	0,55
Milch	1,69	0,80
Meeresfrüchte	1,38	0,36

ße sich vielleicht auch den übrigen 20 Prozent helfen. In klinischen Studien beobachteten Sampson, Lack und andere Forscher nämlich, dass die orale Desensibilisierung sicherer und wirksamer ist, wenn sie mit der Gabe von Omalizumab einhergeht, einem monoklonalen Antikörper, der zur Behandlung des allergischen Asthmas entwickelt wurde. Sein breiter Einsatz zu diesem Zweck wäre freilich extrem teuer: Legt man durchschnittliche US-amerikanische Großhandelspreise zu Grunde, entstünden Kosten von etwa 20 000 Dollar (15 000 Euro) pro Jahr und Patient.

Wissenschaftler prüfen auch die Verabreichung von Allergenen als Tropfen unter der Zunge oder in Form von Hautpflastern. Beides scheint laut Sampson zu weniger unerwünschten Reaktionen zu führen.

Orale Immuntherapie, chinesische Kräuter oder Wurmeier?

Grundsätzlich leidet die Aussagekraft aller erwähnten Studien zur oralen Immuntherapie daran, dass sie an relativ kleinen Gruppen durchgeführt wurden. Oft gab es zudem gar keine oder nicht genügend Kontrollpersonen, und die Beobachtungsdauer war insgesamt zu kurz, um langfristige Effekte der Therapie zu erfassen. Überdies bleibt die höhere Toleranz gegenüber dem Allergen nach dem Stopp der regelmäßigen Gabe normalerweise nicht bestehen. Meist verschwinde die Wirkung nach einer Woche bis zwei Monaten, sagt Sampson. »Das verstehen die wenigsten Leute«, erklärt Burks. »Sie sehen den Effekt der Desensibilisierung und denken, die Allergie sei damit dauerhaft geheilt.«

Um die Entwicklung einer sicheren Therapie von Nahrungsmittelallergien zu beschleunigen, versammelte die gemeinnützige Food Allergy Initiative (FAI) mit Sitz in New York im April letzten Jahres 40 Allergologen, Gesundheitspolitiker, Repräsentanten von Patientenorganisationen und Vertreter der amerikanischen Arzneimittelzulassungsbehörde FDA (Food and Drug Administration) an der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts). Laut Mary Jane Marchisotto, Geschäftsführerin der FAI, bestand Einvernehmen darüber, dass die orale Immuntherapie bessere Erfolgsaussichten hat als diverse andere experimentelle Behandlungsformen – darunter ein Präparat aus chinesischen Kräutern, Eier eines parasitischen Wurms und bestimmte Impfstoffe. Deshalb startete die FAI eine Kampagne zur Organisation und Finanzierung einer Phase-III-Studie mit einigen hundert Patienten. Sie soll die wissenschaftlichen Grundlagen für die Zulassung der oralen Immuntherapie durch die FDA schaffen.

Sampson nahm an der Konferenz der FAI teil und erhält auch Forschungsmittel von der Organisation. Er schätzt, dass die genannte Studie binnen sieben Jahren zu einer arzneimittelrechtlich zugelassenen Therapie führen könnte. Seiner Ansicht nach ist das Präparat aus chinesischen Kräutern, das sein Team entwickelt, getestet und patentiert hat, jedoch ebenfalls eine viel versprechende Option und könnte vielleicht noch früher auf den Markt kommen. Seine Kollegen rekrutieren derzeit Probanden für Studien, in denen sie die Wirkung der Kräutermischung gegen eine Vielzahl von Nahrungsmittelallergien prüfen wollen. Im Erfolgsfall könnte das Präparat schon 2013 erhältlich sein. Denn da es sich formal um ein pflanzliches Nahrungsergänzungsmittel handelt, muss es nicht den langwierigen, strengen Zulassungsprozess der FDA durchlaufen, obwohl die Arbeitsgruppe längerfristig auch die FDA-Zulassung anstrebt.

So hoffnungsfroh die positiven Resultate der bisherigen Studien zur oralen Immuntherapie stimmen, ein Punkt macht Burks Sorgen: Ermutigt von den Erfolgsmeldungen, praktizieren einige Allergologen die orale Desensibilisierung inzwischen in Eigenregie. Ohne die sorgfältige Überwachung der Versuche an großen medizinischen Zentren sei das jedoch viel zu gefährlich. Besonders beunruhigt den Forscher der Gedanke, dass verzweifelte Eltern ihre allergiegeplagten Kinder gar zu Hause selbst behandeln. Er rät von solchen unkontrollierten Versuchen dringend ab, da es zu schweren allergischen Reaktionen kommen kann. »Derzeit sollte eine orale Immuntherapie ausschließlich unter Studienbedingungen durchgeführt werden«, mahnt er. »Das Verfahren ist noch nicht reif für die klinische Praxis.« ~

DIE AUTORIN



Rebecca Kessler ist freie Journalistin und lebt in Providence (Rhode Island).

QUELLEN

- Burks, A. W.:** Oral Immunotherapy for Treatment of Egg Allergy in Children. In: *New England Journal of Medicine* 367, S. 233–243, 2012
- Patel, D. A. et al.:** Estimating the Economic Burden of Food-Induced Allergic Reactions and Anaphylaxis in the United States. In: *The Journal of Allergy and Clinical Immunology* 128, S. 110–115, 2011
- Smarr, C. B. et al.:** Antigen-Fixed Leukocytes Tolerize Th2 Responses in Mouse Models of Allergy. In: *The Journal of Immunology* 187, S. 5090–5098, 2011

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168624

Was tun gegen Neurodermitis?

Entzündliche Hautausschläge bei Kleinkindern nehmen rapide zu. Oft bereiten sie den Weg für eine Allergikerkarriere – ein Grund, von Anfang an energisch dagegen vorzugehen.

Von Hywel Williams

Starkes Jucken und Hautrötungen – das sind die klassischen Anzeichen des so genannten atopischen Ekzems, besser bekannt unter der veralteten Bezeichnung Neurodermitis. An ihm leidet nach Daten der Internationalen Studie zu Asthma und Allergien im Kindesalter (ISAAC, International Study of Asthma and Allergies in Childhood) in den Städten inzwischen weltweit fast jedes fünfte Kind.

Der Ausdruck Neurodermitis unterstellt einen früher vermuteten, aber inzwischen widerlegten Zusammenhang

mit dem Nervensystem. Freilich ist die neue Bezeichnung »atopisches Ekzem« ebenfalls irreführend. Die Diagnose stützt sich nämlich allein auf den Juckreiz, die sichtbaren Entzündungszeichen in den Hautfalten und die familiäre Vorgeschichte. Tatsächlich hat der ISAAC-Studie zufolge rund die Hälfte der Patienten gar keine so genannte Atopie, neigt also nicht zu Überempfindlichkeitsreaktionen: In ihrem Blut finden sich keine erhöhten Mengen von IgE-Antikörpern gegen häufige Umweltallergene.

Nur die Kinder mit so schweren Ekzemen, dass sie im Krankenhaus behandelt werden müssen, sind meist wirklich Atopiker. Oft leiden sie zusätzlich unter allergischem Asthma oder Nahrungsmittelallergien – oder an beidem. Selbst wenn es in diesen Fällen gelingt, den Auslöser aufzuspüren und den Kontakt damit zu unterbinden, hilft das nur selten gegen den Ausschlag. Im Gegenteil: Ist ein Patient etwa allergisch gegen Katzenhaare oder Hausstaubmilben, kann der fortdauernde kontrollierte Kontakt mit dem Fremdstoff im Lauf der Zeit eine immunologische Toleranz erzeugen, durch die sich auch das Ekzem abschwächt. Übertriebene Sauberkeit oder nur gelegentliche Allergeneinwirkung scheint den Ausschlag dagegen eher zu verschlimmern – was auch erklärt, weshalb eine fremde Katze meist eine stärkere Reaktion hervorruft als die eigene. Großen Einfluss haben zudem Faktoren, die an sich gar keine Allergie auslösen: Temperaturextreme, trockene Winterluft, Klimaanlage, Seifen und Shampoos, Schwitzen, scheuernde Kleidungsstücke, Infektionen mit *Staphylococcus aureus*, psychischer Stress und dauerndes Kratzen.

Die trockene Haut, die mit dem atopischen Ekzem einhergeht, ist größtenteils genetisch bedingt. Möglicherweise erhöht sie die Empfindlichkeit gegenüber Allergenen oder Reizstoffen wie Seife. Beim Kontakt mit solchen Substanzen entzündet sich dann die Haut zunächst nur geringfügig. Das genügt, damit unter dem Einfluss weiterer Faktoren ein atopisches Ekzem entsteht. Dadurch wiederum kommt bei einem Teil der Patienten eine Kettenreaktion in Gang, in deren



MITTELD. GEN. VON HYWEL WILLIAMS

Fünfjähriger Junge mit atopischem Ekzem.

AUF EINEN BLICK

QUÄLENDE HAUTAUSCHLÄGE

1 Kinder mit Neurodermitis haben eine **ungewöhnlich trockene Haut**, die schon auf kleinste **Reizungen** – etwa durch Schweiß, Seife oder scheuernde Kleidung – mit **Entzündungen** reagiert.

2 Zur Vorbeugung helfen **Feuchtigkeitskremes**, welche die Barrierefunktion der Haut unterstützen, sowie die **Optimierung der Darmflora** mit Probiotika. Die Entzündung lässt sich mit **Kortikoidpräparaten** bekämpfen.

Verlauf schließlich auch Heuschnupfen und Asthma auftreten. Mit verantwortlich dafür scheint eine genetisch bedingte übermäßige Neigung zu entzündlichen Reaktionen zu sein.

Doch erbliche Faktoren erklären nicht, weshalb das atopische Ekzem gehäuft in besser gestellten, kleineren Familien vorkommt oder warum Kinder, die aus Ländern mit geringer in solche mit hoher Allergierate übersiedeln, plötzlich vermehrt an solchen Ausschlägen leiden. An den Genen kann es auch nicht liegen, dass atopische Ekzeme insgesamt rasant zunehmen, wie aus der ISAAC-Studie hervorgeht. Wahrscheinlich bestehen komplexe Wechselwirkungen zwischen Veranlagung und Umweltfaktoren. Ähnlich wie Glücksspielautomaten erst dann Münzen auswerfen, wenn alle angezeigten Symbole übereinstimmen, flammt das atopische Ekzem nur auf, wenn mehrere Faktoren wie erbliche Disposition, Allergene und geringe Luftfeuchtigkeit zusammenkommen. Deshalb sollten bei seiner Erforschung, Vorbeugung und Behandlung die Allergieauslöser nicht zu sehr im Vordergrund stehen.

Ein behandelbares Leiden

Eine wirksame Prävention scheint in der Tat möglich. Die frühen Lebensphasen vor und kurz nach der Geburt sind immunologisch gesehen ein kritischer Zeitraum. In ihm gilt es, die Toleranz gegenüber Allergenen zu fördern – etwa durch Optimierung der Darmflora mit Probiotika oder durch kontrollierten Allergenkontakt statt seiner strikten Vermeidung. Möglicherweise könnten auch Feuchtigkeitskremes, welche die Barrierefunktion der Haut unterstützen, ab der Neugeborenenphase helfen, allergische Erkrankungen und ihr Fortschreiten bei entsprechend veranlagten Kindern zu verhindern, zu verzögern oder abzumildern.

Die Therapie des atopischen Ekzems selbst bleibt schwierig. Zwar handelt es sich nicht um eine bedrohliche Erkrankung, doch zu sehen, wie sich ein betroffenes Kind die Haut blutig kratzt, ist herzerreißend – und sein andauerndes Geschrei raubt der gesamten Familie den Schlaf. Häufig ist die Lebensqualität von Ekzempatienten schlechter und die Behandlung teurer als bei Kindern mit anderen chronischen Erkrankungen wie etwa dem jugendlichen Diabetes mellitus. Weitere Komplikationen entstehen bei Infektionen betroffener Hautareale mit *Staphylococcus aureus* oder *Herpes simplex*-Viren. Außerdem entwickeln Patienten mit atopi-

schem Ekzem, wie erwähnt, mit der Zeit oft auch Asthma, Heuschnupfen und Nahrungsmittelallergien.

Das größte Problem besteht jedoch darin, dass die Erkrankung oft unzureichend behandelt wird – nicht etwa, weil es keine wirksamen Therapien gäbe, sondern weil die Eltern nichts davon wissen oder falsche Vorstellungen davon haben. Vielfach herrscht eine übertriebene Angst vor Nebenwirkungen der lokal angewandten Kortikoide. Solche Befürchtungen stammen aus den 1960er Jahren, als die Mittel noch zu hoch dosiert wurden. So wie der Asthmatiker Kortikoidpräparate inhaliert, um die entzündlichen Reaktionen der Bronchialschleimhaut zu dämpfen, sind steroidhaltige Cremes ein probates Mittel gegen die Entzündung der Haut.

Meist genügt es, lokal ein hochwirksames Kortikoidpräparat in Kombination mit Feuchtigkeitskremes aufzutragen, damit die Entzündung abklingt. In der Regel muss das zwei bis drei Wochen lang täglich geschehen, danach nur noch einmal in der Woche. Cremes und Salben mit den alternativen Immunmodulatoren Pimecrolimus oder Tacrolimus eignen sich besonders zur Behandlung empfindlicher Hautpartien, etwa im Gesicht.

Um bei Patienten mit schweren Ekzemen die Symptome zu lindern und das Fortschreiten der Erkrankung zu unterbinden, kann auch eine systemische Therapie nötig sein, also die Behandlung mit Arzneimitteln, die eingenommen oder gespritzt werden. Hier wären neue, zielgenauer wirkende Substanzen wertvoll, die weniger Nebenwirkungen aufweisen als die bisherigen Medikamente. ☺

DER AUTOR



Hywel Williams ist Leiter des Centre of Evidence-Based Dermatology an den Nottingham University Hospitals (Großbritannien) und Mitglied der Steuerungskommission der International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC).

QUELLEN

- Langan, S. et al.:** What Causes Flares of Eczema in Children? In: British Journal of Dermatology 161, S. 640–646, 2009
- Nankervis, H. et al.:** Mapping Randomized Controlled Trials of Treatments for Eczema – The GREAT Database. In: BMC Dermatology 11, Artikel Nr. 10, Mai 2011
- Odhiambo, J. et al.:** Global Variations in Prevalence of Eczema Symptoms in Children from ISAAC Phase Three. In: Journal of Allergy and Clinical Immunology 124, S. 1251–1258, 2009
- Williams, H. C.:** Atopic Dermatitis. In: New England Journal of Medicine 352, S. 2314–2324, 2005

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168625

HIRNFORSCHUNG

Biologie des Blackouts

Hirnregionen, die der Selbstkontrolle dienen, reagieren auf Stress mitunter hochempfindlich. Wenn sie ausfallen, bricht impulsives Verhalten durch, und Denkblockaden setzen ein.

Von Amy Arnsten, Rajita Sinha und Carolyn Mazure



DAN SZELINGER



In psychisch stark belastenden Situationen kann es vorkommen, dass der präfrontale Kortex versagt – ein Areal im Gehirn, das Impulse und Gefühle steuert. Dann bricht unsere Selbstbeherrschung zusammen, und wir verlieren die Kontrolle.

Wer sich an amerikanischen Graduierten-
schulen um einen Studienplatz für Medizin
bewirbt, hat eine große Hürde vor sich. Er
muss den Aufnahmetest bestehen: ein fünf-
stündiges Bombardement mit hunderten Fragen, die auch
gut vorbereitete Bewerber verwirren und entnerven. Der
enorme Prüfungsdruck führt bei einigen Teilnehmern dazu,
dass ihre Denkfähigkeit nachlässt oder vorübergehend sogar
ganz aussetzt. Es kommt bei ihnen zu einer geistigen Blo-
ckade, einem »Blackout«, »Filmriss« oder »Totalaussetzer«.

Diesen Zustand kennen freilich nicht nur angehende Me-
dizinstudenten. Wir alle haben ihn wohl schon einmal erlebt.
Er ereilt uns etwa, wenn wir eine Rede vor großem Publikum
vermasseln, mit einer Schreibblockade kämpfen oder im Be-
werbungsgespräch eine Frage partout nicht verstehen. Ganz
zu schweigen von extremen Stresssituationen, etwa wenn
Infanteristen an vorderster Front in ein Feuergefecht ver-
wickelt werden. Lange Zeit galt als weit gehend geklärt, was
dabei im Kopf vor sich geht. In den zurückliegenden Jahren
haben Forscher jedoch viele neue Erkenntnisse über die
physiologischen Folgen von Stressbelastungen gewonnen.
Demnach kann psychischer Druck die Hirnzentren, die in
Primaten am weitesten entwickelt sind, völlig lahmlegen –
und damit auch die dort sitzenden geistigen Fähigkeiten.

Der etablierten Lehrmeinung zufolge reagiert vor allem
der Hypothalamus, eine evolutionär alte Region im Zwi-
schenhirn, auf Stress. In stark belastenden Situationen, heißt
es, veranlasse er die Hypophyse (eine Hormondrüse im Kopf)
und die Nebennieren dazu, Hormone auszuschütten. Diese
Signalstoffe erhöhten dann die Herzfrequenz, steigerten den
Blutdruck und verminderten den Appetit.

Doch das ist offenkundig nicht die ganze Wahrheit. Jünge-
re Arbeiten haben gezeigt, dass auch der präfrontale Kortex
eine wichtige Rolle in der Stressreaktion spielt. Dieses Areal
an der Stirnseite der Großhirnrinde vermittelt unsere am
höchsten entwickelten kognitiven Fähigkeiten, darunter die
zur Konzentration, Planung, Analyse und Entscheidungs-

findung sowie das Urteilsvermögen und den Zugriff auf Ge-
dächtnisinhalte. Der präfrontale Kortex hat sich während der
Evolution vergleichsweise spät zu seiner jetzigen Form ent-
wickelt. Er reagiert äußerst empfindlich auf Störungen, sogar
auf alltägliche, vorübergehende Ängste und Sorgen.

Unter normalen Bedingungen arbeitet dieses Hirnareal
als Steuerzentrum, das unsere Emotionen und Impulse un-
ter Kontrolle hält. Akuter Stress hingegen löst verschiedene
biochemische Signale aus, die seinen Einfluss so weit schwä-
chen können, dass evolutionär ältere Hirnregionen die Ober-
hand gewinnen. Im Wesentlichen verlagert sich dabei die
übergeordnete Gedanken- und Gefühlskontrolle weg vom
präfrontalen Kortex hin zum Hypothalamus und anderen
»archaischen« Hirnstrukturen. Sobald diese älteren Areale
dominieren, können wir lähmende Angst spüren oder auch
Impulsen erliegen, die wir normalerweise im Zaum halten.
Die Folge sind etwa hemmungsloses Essen oder Trinken,
exzessiver Drogenkonsum oder zügelloses Einkaufen.

Wenn die Sicherungen durchbrennen

Die Erkenntnis, dass akuter psychischer Druck die Funktion
der höheren Kontrollsysteme im menschlichen Gehirn mas-
siv beeinträchtigen kann, hat zahlreiche Forschungsarbeiten
angestoßen. Das Ziel lautet, herauszufinden, was genau da-
bei im Kopf vor sich geht. Daraus entwickeln die Wissen-
schaftler neue verhaltenstherapeutische und medikamentö-
se Behandlungsansätze, die die Selbstbeherrschung verbes-
sern sollen.

Schon nach dem Zweiten Weltkrieg versuchten For-
scher zu ergründen, warum gut ausgebildete Piloten, die bei
Kampfbungen zu Höchstleistungen fähig waren, im Eifer
des Gefechts plötzlich an simplen Aufgaben scheiterten und
verhängnisvolle Fehler machten. Was dabei im Stirnhirn pas-
siert, konnten jedoch erst moderne bildgebende Verfahren
offenlegen. Die funktionelle Kernspintomografie erlaubt ei-
nen Einblick in die Aktivitäten der vorderen Großhirnrinde –
und zeigt, wie leicht sie zu irritieren ist.

Der präfrontale Kortex hat eine besondere Stellung inner-
halb des Denkorgans inne. Er macht beim Menschen ein
Drittel der gesamten Hirnrinde aus, mehr als bei anderen
Primaten. Er reift langsamer als alle anderen Hirnregionen
und ist erst nach der zweiten Lebensdekade voll entwickelt.
Zudem enthält er die neuronalen Netzwerke für abstraktes
Denken, ist Sitz des Arbeitsgedächtnisses und ermöglicht es,
dass wir uns konzentrieren und an einer Aufgabe dranblei-
ben. Als mentale Kontrollinstanz hemmt er konfliktrichtige
Gedanken und Handlungen.

Ein weit verzweigtes Netzwerk von vielfach verknüpften
Neuronen, so genannten Pyramidenzellen, übt die Funktio-
nen des präfrontalen Kortex aus. Sie weisen nicht nur unter-
einander Verbindungen auf, sondern auch zu entfernteren
Hirnarealen, die unsere Emotionen, Begierden und Routinen
kontrollieren. Sofern dieses Netzwerk nicht gestört wird,
sorgt es dafür, dass wir unseren Alltag erfolgreich bewälti-
gen. Das Arbeitsgedächtnis erinnert uns zum Beispiel daran,

AUF EINEN BLICK

NEURONALER AUSNAHMEZUSTAND

1 In Stresssituationen kann eine wichtige Steuerzentrale unseres
Gehirns, der **präfrontale Kortex**, ausfallen. Dies führt zu **Denk-
blockaden** und **Verhaltensstörungen**. Der Zustand geht in der Regel
vorüber, kann sich bei Dauerstress aber regelrecht einbrennen.

2 Normalerweise hält der präfrontale Kortex unsere Emotionen
unter Kontrolle, indem er dämpfende Signale an »archaische«
Hirnregionen sendet. Wenn er in stark belastenden Situationen
seine Arbeit einstellt, gewinnt die **Amygdala** – eine Hirnregion, die
Angstreaktionen steuert – die Oberhand, und es kommt zu **Panik**
und **verminderter Selbstbeherrschung**.

3 Forscher untersuchen die Mechanismen der Stressantwort und
entwickeln **verhaltenstechnische** und **medikamentöse Behand-
lungsansätze**, die dabei helfen sollen, unter starkem Druck nicht
die Kontrolle zu verlieren.

Das gestresste Hirn

Wie kommt es zum Kontrollverlust?

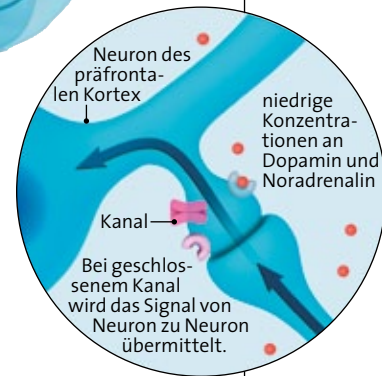
Der präfrontale Kortex ist eine Region in der vorderen Großhirnrinde, unmittelbar hinter der Stirn gelegen. Er ist das zentrale Steuerzentrum des Gehirns und dafür zuständig, Impulse unter Kontrolle zu halten. Allerdings erweist er sich als recht störanfällig: Selbst alltägliche Stressbelastungen können seine Funktion weit gehend außer Kraft setzen, so dass bei den Betroffenen emotionales und impulsives Verhalten durchbricht.

ENTSPANNT

Der präfrontale Kortex schickt Signale in tief liegende Hirnareale wie die Basalganglien, den Hypothalamus und die Amygdala. Damit reguliert er Gewohnheitsverhalten, grundlegende Begierden wie Hunger und Geschlechtstrieb sowie emotionale Reaktionen wie Furcht. Zudem steuert er die Stressreaktionen im Hirnstamm und kontrolliert die Aktivität von Neuronen, die die Botenstoffe Noradrenalin und Dopamin ausschütten. In niedrigen Konzentrationen beeinträchtigen diese Stoffe die Signalübertragung im präfrontalen Kortex nicht.

Noradrenalin und Dopamin produzierende Zellen

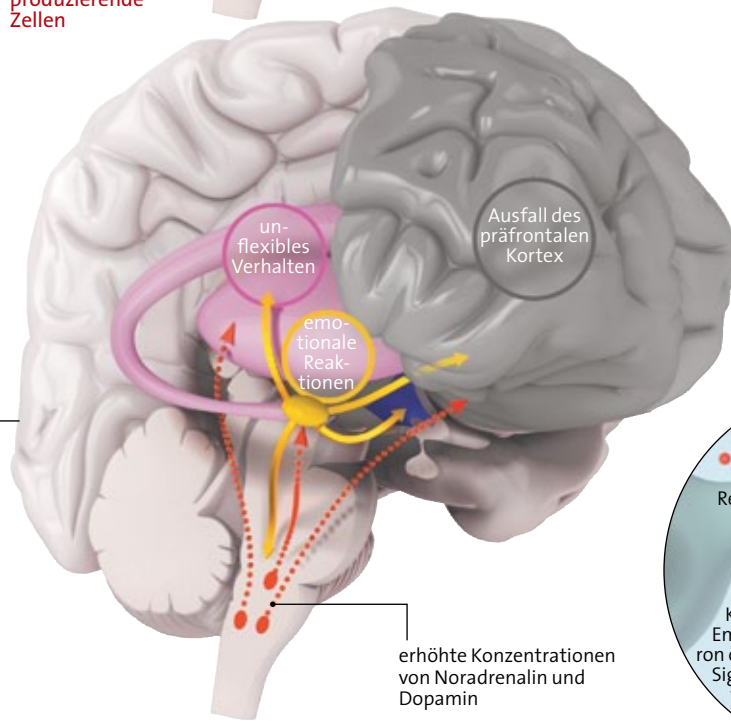
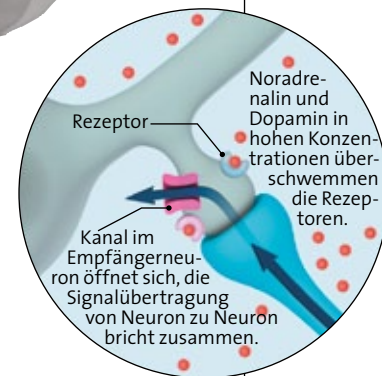
direkte Steuerung der Noradrenalin- und Dopaminausschüttung durch den präfrontalen Kortex



UNTER STRESS

Das »Angstzentrum«, die Amygdala, löst unter starker Stressbelastung eine überschießende Produktion von Noradrenalin und Dopamin im Hirnstamm aus. Die erhöhte Konzentration dieser Neurotransmitter hemmt die Arbeit des präfrontalen Kortex. Unmengen von Noradrenalin- und Dopaminmolekülen binden dort an Rezeptoren auf den Nervenzellen, worauf sich Kanäle in den Zellmembranen öffnen und die Signalübertragung zwischen den Neuronen beeinträchtigt wird.

erhöhte Konzentrationen von Noradrenalin und Dopamin



ANATOMICAL ANIMATION STUDIO NACH ANSTEN, A.L.E. STRESS-SIGNALING PATHWAYS THAT IMPAIR PREFRONTAL CORTEX STRUCTURE AND FUNCTION IN NATURAL REVERSIBLE STRESS. SCIENCE 303: 407-422, 2009

endlich mit dem Vorbereiten der Präsentation anzufangen, die nächste Woche fällig wird, derweil andere »Schaltkreise« zu verstehen geben, dass es jetzt wohl besser wäre, kein zweites Glas Wein zu trinken. Weitere Signale gehen an die Amygdala – eine tief im Gehirn gelegene Struktur, die Angstreaktionen kontrolliert – und teilen ihr mit, dass der hünenhafte Mensch, der uns auf dem Bürgersteig entgegenkommt, uns wohl nicht ins Gesicht schlagen wird.

In stark belastenden Situationen jedoch verändert sich das neurochemische Milieu in der vorderen Großhirnrinde,

was die Verbindungen der dortigen Neuronennetzwerke abrupt schwächen kann. Die Stressreaktion führt dazu, dass Neurone im Stammhirn, deren Ausläufer sich durch das gesamte Denkorgan ziehen, große Mengen von erregenden Neurotransmittern ausschütten – darunter Noradrenalin und Dopamin. Diese Botenstoffe hindern die Nervenzellen im präfrontalen Kortex am Feuern, unter anderem, indem sie deren Kontaktstellen, die Synapsen, zeitweilig »kurzschließen« (siehe Grafik oben). Der betroffene Mensch ist dann nur noch eingeschränkt in der Lage, sein Verhalten zu kontrol-



lieren. Verstärkt wird dieser Effekt noch, wenn die Nebennieren auf Signale vom Hypothalamus hin das Stresshormon Cortisol ausschütten, das anschließend über den Blutstrom ins Gehirn gelangt.

Eine von uns (Arnsten) arbeitete schon 1998 an Tierversuchen mit, bei denen sich erstmals zeigte, wie schnell neurochemische Veränderungen unter Stress zum funktionellen Versagen der vorderen Großhirnrinde führen. Seither wurde vielfach belegt, dass die Nervenzellen im präfrontalen Kortex kaum noch feuern und nur sehr eingeschränkt miteinander kommunizieren, wenn sie erregenden Neurotransmittern oder Stresshormonen in hoher Konzentration ausgesetzt werden. In dieser Situation gewinnen tief gelegene Hirnareale einen stärkeren Einfluss auf unser Verhalten. Zu ihnen gehören die Basalganglien, die Begierden steuern sowie emotionale und motorische Reaktionen regeln. Sie bestimmen etwa das Geschehen, wenn wir beim Radfahren das Gleichgewicht halten oder wenn wir suchtähnlichem Verlangen nachgeben.

Auch die Amygdala, eine andere evolutionär alte Hirnregion, tritt bei Stressbelastungen in Aktion. In Anwesenheit von Noradrenalin, Cortisol und Dopamin alarmiert sie das übrige Nervensystem, sich auf Gefahren einzustellen, und verstärkt Gedächtnisinhalte, die mit Angst und anderen Emotionen verbunden sind. Das haben Benno Roozendaal, heute an der Universität Groningen in den Niederlanden, James McGaugh von der University of California in Irvine (USA) und ihre Kollegen 2001 beobachtet.

Derzeit beginnen Forscher damit, zu überprüfen, ob sich die Erkenntnisse aus den Tierversuchen auf Menschen übertragen lassen. Erste Daten zeigen, dass manche Personen empfindlicher auf Stressbelastungen reagieren als andere – entweder weil sie andere genetische Voraussetzungen mitbringen oder weil sie von früheren Erlebnissen geprägt sind. Normalerweise bauen Enzyme die Botenstoffe Dopamin und Noradrenalin rasch ab, nachdem diese den präfrontalen Kortex inaktiviert haben, weshalb wir unsere höheren kognitiven Fähigkeiten recht bald wiedererlangen. So können wir

zur Tagesordnung zurückkehren, sobald der Stress nachlässt. Bestimmte Varianten im Erbgut bewirken jedoch, dass diese Enzyme nur eingeschränkt arbeiten, was die Stressanfälligkeit erhöht und in einigen Fällen zu psychiatrischen Erkrankungen führt. Auch Bleivergiftungen können teilweise zu den gleichen Symptomen führen wie die Stressreaktion und so die kognitive Leistungsfähigkeit beeinträchtigen.

Einige Wissenschaftler untersuchen, was geschieht, wenn außergewöhnliche Belastungen über Tage oder Wochen hinweg anhalten. Offenbar verstärken sich dann die Nervenverbindungen in evolutionär älteren Hirnregionen, die Emotionen und Triebe verarbeiten. Areale, die für komplexe Denkprozesse benötigt werden, beginnen dagegen zu schrumpfen. So wachsen unter chronischem Stress die verzweigten, signalempfangenden Dendriten in der Amygdala, während jene im präfrontalen Kortex verkümmern. Sobald die Dauerbelastung abklingt, können die Zellausläufer in der vorderen Großhirnrinde zwar wieder nachwachsen, wie Forscher um John Morrison von der Mount Sinai School of Medicine (New York) feststellten. Ist der Dauerstress jedoch zu extrem, verlieren die Dendriten diese Fähigkeit. Eine Vertreterin des Autorentrios (Sinha) hat Belege dafür an Menschen gefunden: Die graue Substanz im präfrontalen Kortex war umso stärker geschrumpft, je ausgeprägter die vorangegangenen Stressbelastungen gewesen waren.

Empfindlicher durch Östrogen?

Diese Mechanismen begünstigen wahrscheinlich die Entstehung von Depressionen, Suchtverhalten, Angststörungen und Posttraumatischen Belastungsstörungen. Eine wichtige Rolle dabei scheint das Geschlecht zu spielen, denn bei Frauen steigert das Hormon Östrogen offenbar die Stressanfälligkeit. Wie Mitautorin Carolyn Mazure mit ihrem Team zeigen konnte, erhöhen Stressbelastungen im Alltag das Depressionsrisiko bei Frauen stärker als bei Männern – und sie führen bei ihnen auch öfter zu potenziell suchterzeugenden Verhaltensweisen, etwa zum Rauchen.

Weitere Studien müssen detaillierter klären, wie Stress die Selbstkontrollfunktion des präfrontalen Kortex beeinträchtigt. Einige Forscher untersuchen zurzeit, welche Neurotransmitter neben den bereits bekannten die vordere Großhirnrinde noch beeinflussen. Trevor Robbins und Angela Roberts von der University of Cambridge gehen etwa der Frage nach, ob Serotonin, das eine wichtige Rolle bei Depressionen spielt,



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Hirnforschung«
finden Sie unter

www.spektrum.de/gehirn

Stress- und Angstreaktionen über seine Wirkungen im präfrontalen Kortex beeinflusst.

Solche Studien an Menschen durchzuführen, ist allerdings schwierig, denn die heutigen ethischen Standards verbieten es, Probanden einer extremen psychischen Belastung auszusetzen. Die Teilnehmer müssen den Versuch jederzeit abbrechen können und haben die Situation damit in einem Ausmaß unter Kontrolle, wie es bei echten Stresssituationen nicht gegeben ist. Verschiedenen Arbeitsgruppen ist es trotzdem gelungen, die Effekte von unkontrollierbarem Stress nachzuahmen, indem sie den Teilnehmern verstörende Filme zeigten oder – wie Sinha und ihr Team – die Probanden aufforderten, sich eigene belastende Erlebnisse zu vergegenwärtigen.

Doch warum ist das Gehirn überhaupt mit Mechanismen ausgestattet, die seine am höchsten entwickelten kognitiven Funktionen schwächen? Möglicherweise, weil das Auslösen primitiver Reaktionen einst Menschenleben rettete. Wenn wir im Wald unvermittelt einen umherstreifenden Bären bemerken, ist es für unser Überleben weit sinnvoller, unter Schock stehen zu bleiben, so dass das Tier uns möglichst nicht wahrnimmt, als uns an die Dramaturgie des Films »Bärenbrüder« zu erinnern.

Ohne den Einfluss der relativ langsamen Kontrollinstanz im vorderen Großhirn können die evolutionär alten, vergleichsweise primitiven neuronalen Netzwerke im Gehirn uns auf der Stelle erstarren lassen oder zur sofortigen Flucht antreiben. Diese Mechanismen nutzen uns auch in der heutigen Umwelt, etwa wenn ein rücksichtsloser Autofahrer uns die Vorfahrt nimmt und wir ohne nachzudenken auf die Bremse treten. Hält der Alarmzustand im Gehirn jedoch dauerhaft an, lässt die Funktionsfähigkeit des präfrontalen Kortex allmählich nach – ein erhebliches Handikap, falls wir komplexe Entscheidungen treffen müssen, etwa über den Zeitplan eines schwierigen Bauprojekts.

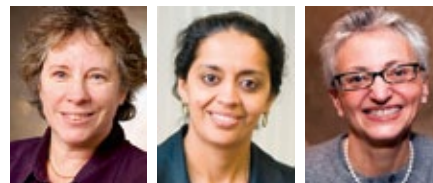
Je genauer wir die Mechanismen von Stressreaktionen verstehen, umso mehr Möglichkeiten haben wir, die Funktionen des präfrontalen Kortex auch unter außergewöhnlichen Belastungen aufrechtzuerhalten. Wenn wir die molekularen Vorgänge kennen, die das Gehirn von »rational« auf »impulsiv« umschalten, können wir stressbedingte Verhaltensfehler vielleicht effizienter vermeiden. Schon heute besteht das Training für Notfallsituationen und militärische Einsätze ganz wesentlich darin, den Hirnstrukturen, die für Automatismen zuständig sind – vor allem den Basalganglien –, instinktiv ablaufende überlebenswichtige Reaktionen beizubringen. Das Konzept des militärischen Drills entspricht den Ergebnissen von Tierversuchen, denen zufolge Jungtiere, die immer wieder gemäßigte Stressbelastungen bewältigen, im Erwachsenenalter besser mit psychischem Druck umgehen. Auch Studien an Menschen belegen, dass das erfolgreiche Überwinden von problematischen Situationen die Stresstoleranz erhöhen kann.

Zudem arbeiten viele Forscher an medikamentösen Therapien. Prazosin, ein Arzneistoff gegen hohen Blutdruck, der

die Wirkung von Adrenalin und Noradrenalin hemmt, wird zurzeit darauf geprüft, ob er bei Kriegsveteranen und Zivilisten die Symptome der Posttraumatischen Belastungsstörung lindern kann. Der Stoff dämpft offenbar auch das Verlangen nach Alkohol. In einer neueren Studie haben Sherry McKee von der Yale University (Connecticut, USA) und ihre Mitarbeiter die Wirkung von Guanfacin getestet, einem anderen Arzneistoff gegen Bluthochdruck. Den Ergebnissen zufolge kann er die Stressreaktion zügeln und neuronale Verbindungen im präfrontalen Kortex stärken. Damit hilft er Rauchern, in belastenden Situationen nicht zur Zigarette zu greifen. Andere Arbeitsgruppen haben belegt, dass Verhaltenstechniken wie bewusste Entspannung, tiefes Atmen und Meditation dazu beitragen können, die Stressreaktion abzumildern.

Möglicherweise verbessert sich unsere Selbstbeherrschung bereits dadurch, dass wir wissen, wie unser Denkorgan auf Stressbelastungen reagiert. Wenn Sie etwa bei der nächsten Prüfung einen gedanklichen Aussetzer haben oder während einer wichtigen Rede einen Blackout erleben, machen Sie sich klar, dass Ihr Gehirn damit lediglich versucht, Sie vor dem Bären zu retten. Dieser Gedanke könnte Ihnen zumindest ein heilsames Schmunzeln entlocken. ~

DIE AUTORINNEN



Amy Arnsten (links), **Rajita Sinha** (Mitte) und **Carolyn Mazure** arbeiten an der Yale School of Medicine (New Haven, Connecticut, USA). Arnsten ist dort Professorin für Neurobiologie und erforscht die molekularen Veränderungen im präfrontalen Kortex bei Stressbelastungen und Alterungsprozessen. Sinha ist Professorin für Psychiatrie und leitet das Yale Stress Center, dessen Mitarbeiter untersuchen, wie Stress auf das Verhalten wirkt. Mazure arbeitet als Professorin für Psychiatrie und Psychologie; sie leitet das interdisziplinäre Forschungszentrum für Frauengesundheit an der Yale University.

QUELLEN

- Arnsten, A.:** Prefrontal Cortical Network Connections: Key Site of Vulnerability in Stress and Schizophrenia. In: International Journal of Developmental Neuroscience 29, S. 215–223, 2011
- Arnsten, A.:** Stress Signalling Pathways that Impair Prefrontal Cortex Structure and Function. In: Nature Reviews Neuroscience 10, S. 410–422, 2009
- Beilock, S.:** Choke: What the Secrets of the Brain Reveal about Getting it Right when you Have to. Simon & Schuster, New York 2010
- Halpern, S.:** Can't Remember what I Forgot: Your Memory, your Mind, your Future. Three Rivers Press, New York 2009

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168626

Eine tolle Geschenkidee für das ganze Jahr!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie. 12 Ausgaben; € 84,- (ermäßigt € 69,90)



Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung. 10 Ausgaben; € 68,- (ermäßigt € 55,-)



Die Kompetenz in Sachen Astronomie und Weltraumforschung. 12 Ausgaben; € 85,20 (ermäßigt € 64,-)



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences. 4 Ausgaben; € 29,60 (ermäßigt € 25,60)



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung. 4 Ausgaben; € 29,60 (ermäßigt € 25,60)



Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin (PDF-Format; optimiert für alle digitalen Endgeräte) € 39,95 (ermäßigt € 30,-)

Bestellen Sie für sich oder als Geschenk:
www.spektrum.com/weihnachten

per E-Mail:
service@spektrum.com

telefonisch:
 06221 9126-743

per Fax:
 06221 9126-751

Die Vorteile eines Geschenkabonnements

- > Sie verschenken ein ganzes Jahr lang anspruchsvolle und topaktuelle Berichte aus der spannenden Welt der Wissenschaft.
- > Auf Wunsch erhält der Beschenkte pünktlich zum Fest das erste Heft mit einer schönen Grußkarte in Ihrem Namen.
- > Alle Ausgaben werden pünktlich frei Haus geliefert, keine Ausgabe wird verpasst.

> Ihr Geschenk zur Wahl

- 1 Kalender »Himmel und Erde 2013«
- 2 Tasche »Allrounder« von Reisetel
- 3 Audio-CD »Sternstunden des Universums«
- 4 Buch »Digitale Demenz«
- 5 DVD »Planet des Lebens«
- 6 Smartphonehülle »Babuschka«
- 7 Multifunktionsmesser No. 8 von Opinel
- 8 Spektrum-Notizbuch

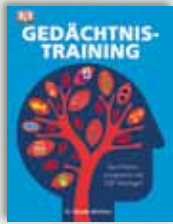




W. Engländer, H.-H. Bergmann
DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD
 220 Vögel, Filme und Stimmen
 2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box, INFO-Prgr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

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.



Pascale Michelon
GEDÄCHTNIS-TRAINING
 Das Fitnessprogramm mit 200 Übungen
 2012, 192 S. m. 300 Farbbabb., kart., Dorling Kindersley

Bestell-Nr. 3691
 € 16,95 (D), € 17,50 (A)

In jedem Kapitel werden zunächst nützliche Informationen über das Gehirn vermittelt sowie effektive Trainingsmethoden und Strategien erläutert. Diese kann der Leser in den nachfolgenden 200 Übungen anwenden. Tests führen den Status quo und die Fortschritte vor Augen.



Storm Dunlop, Wil Tirion
DER KOSMOS STERNFÜHRER
 Schritt für Schritt den Sternenhimmel entdecken
 2. Aufl. 2012, 256 S. m. 51 Fotos u. 62 Farbbabb. sowie 157 Sternkarten, in Kunststoffhülle, kart., Kosmos

Bestell-Nr. 3639 € 19,99 (D), € 20,60 (A)

Entdecken Sie in diesem Reiseführer die schönsten Objekte des Nachthimmels für die Beobachtung mit bloßem Auge, Fernglas und Fernrohr. Eine detaillierte Mondkarte, viele Zusatzinfos sowie ein ausführliches Glossar machen das Buch zum idealen Begleiter und Nachschlagewerk.



Dieter Willasch, Auke Slotegraaf
PERLEN DES SÜDHIMMELS
 Eine Reise zu exotischen Sternhaufen, Nebeln und Galaxien

2012, 176 S. m. zahlr. farb. Fotos, 21 x 30 cm, geb., Oculum

Bestell-Nr. 3747 € 39,90 (D), € 41,10 (A)

Der großformatige Bildband im Querformat fängt die Magie des Südhimmels ein. Insgesamt 71 Deep-Sky-Objekte von der Perlenketten-Galaxie bis zum Helix-Nebel werden auf je einer Doppelseite in Bild und Text vorgestellt. Omega Centauri, Kohlsack, Tarantel-Nebel... Stimmen Sie sich ein auf den Südhimmel!

Kurze Erläuterung zu den Angaben hinter den Preisen: (D) ist der Preis für Deutschland, (A) der Preis für Österreich

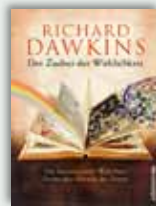


Udo Gansloßer, Kate Kitchenham
FORSCHUNG TRIFFT HUND
 Neue Erkenntnisse zu Sozialverhalten, geistigen Leistungen und Ökologie
 2012, 240 S. m. 250 Farbbabb., geb., Kosmos

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.



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.

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



Alexander Unzicker
AUF DEM HOLZWEG DURCHS UNIVERSUM
 Warum sich die Physik verlaufen hat
 2012, 304 S. m. Abb., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3719
 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Keine Disziplin treibt so seltsame Blüten wie die Physik: Spekulationen über Paralleluniversen etwa, die mit Wissenschaft nicht mehr viel zu tun haben. Gleichzeitig sind grundlegende Fragen der Physik noch immer unbeantwortet. Doch statt Lösungsansätze von Einstein oder Dirac aufzugreifen, verwendet man lieber Milliarden auf die Suche nach neuen Teilchen und mutmaßt über verborgene Dimensionen. Alexander Unzicker liest der Physik die Leviten – und weist ihr den Weg aus dem Labyrinth, in dem sie sich verlaufen hat.



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)

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.



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.



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.



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.

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



CHRISTBÄUMCHEN: FOTOLIA / PIXI



Jörg Resag
ZEITPFAD
Die Geschichte unseres Universums und unseres Planeten
 2012, 393 S. m. 177 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag
Bestell-Nr. 3644
€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Das durchgängig vierfarbige und reich illustrierte Buch des Physikers Jörg Resag stellt das moderne Gesamtbild der Naturgeschichte umfassend dar und lädt den Leser zu einer Zeitreise ein, die beim Urknall beginnt und bis in die Zukunft des Universums führt.



Stuart Clark
KOSMISCHE REISE
Von der Erde bis zum Rand des Universums
 2012, 240 S. m. 200 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag
Bestell-Nr. 3645
€ 39,95 (D), € 41,10 (A)

Begeben Sie sich auf eine intergalaktische Mission, die Sie durch einen Raum von Hunderten von Trilliarden Kilometern und durch eine Zeitspanne von über 13 Milliarden Jahren führt. Mehr als 300 spektakuläre astronomische Aufnahmen und informative Texte vermitteln nachhaltige Eindrücke von den 101 Stationen dieser großartigen kosmischen Reise.



Christian Hesse
CHRISTIAN HESSES MATHEMATISCHES SAMMELSURIM
1 : 0 = ∞
 2012, 236 S. m. 40 z. Tl. farb., kart., Beck
Bestell-Nr. 3721
€ 14,- (D), € 14,40 (A)

Unentbehrlich x Unermesslich x Unverbesserlich = Hesses mathematisches Sammelsurium. Und zwar für alle: vom manischen Mathematiker bis zum Zahlenangsthösen. Das Buch ist eine flammende Hommage an die Mathematik nach gut dreißigjähriger Beschäftigung mit ihr aus nächster Nähe.



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 beeindruckenden Schädelrekonstruktionen von den niederländischen Präparatoren und Künstlern Adrie und Alfons Kennis.



Anthony Kenny
GESCHICHTE DER ABENDLÄNDISCHEN PHILOSOPHIE, 4 BÄNDE
Antike – Mittelalter – Neuzeit – Moderne
 2012, 1408 S. m. zahlr. SW-Abb., geb., Primus
Bestell-Nr. 3654
Einführungspreis € 99,90 (D), € 102,70 (A)
gültig bis 01.02.2013, danach kostet das Werk € 149,-
Die 4 Bände sind zum Preis von je € 49,90 auch einzeln erhältlich. Sparen Sie mit der günstigen Gesamtausgabe!

Diese Philosophiegeschichte setzt neue Maßstäbe! Dem britischen Philosophen Anthony Kenny ist etwas gelungen, wonach man im deutschen Sprachraum vergeblich sucht: eine ohne Vorkenntnisse verständliche, ja sogar unterhaltsam geschriebene Philosophiegeschichte von den Anfängen bis zur Gegenwart. In seinem vierbändigen Werk erzählt Kenny die Philosophiegeschichte. Dabei verbindet er gekonnt die Darstellung der Ereignisgeschichte und einzelner Denker mit einer Erläuterungen der Problemgeschichte und philosophischen Argumentation.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



Jürgen Beetz
1+1=10: MATHEMATIK FÜR HÖHLENMENSCHEN
 2012, X, 340 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).



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)

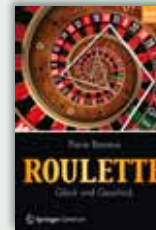
Humorvoll geschrieben und bestückt mit zahlreichen Beispielen bietet dieses heitere und zugleich lehrreiche Werk einen Überblick über die unterschiedlichen Bereiche der Gedächtnisforschung und Methoden zur Steigerung der Gedächtnisleistung.

Besuchen Sie uns im Internet unter: www.science-shop.de



Wolfgang W. Osterhage
STUDIUM GENERALE PHYSIK
Ein Rundflug von der klassischen bis zur modernen Physik
 2012, 288 S. m. 80 SW-Abb., 7 Tabellen., geb., Spektrum
Bestell-Nr. 3749
€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch nähert sich den großen Komplexen der Physik, ohne Spezialwissen 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 (nochmal) einen Überblick verschaffen wollen – mit vielen weiterführenden Literaturhinweisen und Gedanken zum Weiterdenken.



Pierre Basieux
ROULETTE – GLÜCK UND GESCHICK
 2012, 450 S. m. 143 SW-Abb., geb., Spektrum
Bestell-Nr. 3743
€ 69,95 (D), € 72,- (A)

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.



Gustave-Nicolas Fischer, Virginie Dodeler
WIE GEDANKEN UNSER WOHLBEFINDEN BEEINFLUSSEN
Auswirkungen der Psyche auf die Gesundheit
 2012, 288 S. m. 51 SW-Abb., kart., Spektrum
Bestell-Nr. 3726
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Was heißt eigentlich »gesund sein«? Wenn es der Seele gut geht, so hat dies auch positive Auswirkungen auf das körperliche Wohlbefinden. Gustave-Nicolas Fischer und Virginie Dodeler stellen die wichtigsten 100 Aha-Experimente auf diesem Gebiet kurzweilig und anschaulich dar. Durch die daraus resultierenden erstaunlichen Entdeckungen wird jeder Leser den Einfluss der Psyche auf die Gesundheit noch besser verstehen. Dazu gibt es praktische Lösungsansätze zur Begleitung auf dem Weg zum physischen Wohlbefinden.



LERNPAKET EXPERIMENTE MIT DEM STIRLINGMOTOR

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

Bestell-Nr. 3526 € 149,90

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.



FLEDERMAUSDETEKTOR ZUM SELBERBAUEN

Inhalt: Buch und alle Bauteile, zusätzlich benötigt werden: LötKolben 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.



STIRLING-AUTO A1 FERTIGMODELL

Schrauben aus Edelstahl, Seitenteile aus poliertem Edelstahl, Räder aus Vollmessing mit rundem

Gummi-belag, Gabel und Kühlergrill aus Aluminium, Maße: 13 x 16 x 8,7 cm, Gewicht: 1.200 Gramm, Böhms

Bestell-Nr. 3475 € 398,- (D), € 398,- (A)

Robert Stirling, der Erfinder des Stirlingmotors, und Carl Benz haben eines gemein: Sie erhielten Patente für außergewöhnlich revolutionäre Technik. Im Stirling-Auto A1 wurden die Ideen dieser beiden Entwickler zusammengeführt. Die feinen Messingspitzen erinnern an die Pickelhauben aus der Kaiserzeit und an die historischen Automobile aus der Zeit um 1885.

Weitere Infos: www.science-shop.de/artikel/1130551

Hier können Sie auch einen Film über das Auto sehen.



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



PIEPEI GOLD

Das perfekte Frühstücksei für jeden Feinschmecker

Mit echtem Gold veredelt, Brainstream

Bestell-Nr. 2700

€ 24,90

Einfacher und präziser können Frühstückseier nicht gekocht werden. Das Piepei misst die Wassertemperatur und berechnet daraus über eine Differenzialgleichung die Innentemperatur im Ei. Erreicht die Temperatur im Eigelb 62°C, so erklingt eine Melodie. Man kann den Kochvorgang auch mit kaltem Wasser starten.

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



POWERLUX – LEUCHTLUPE KALTWEISS

Linsengröße: Ø 58 mm, cera-tec®, Vergrößerung:

28 dpt / 7x (Doppellinse), punktgenaue Ausleuchtung, Abschaltautomatik nach 30 Min., Lichtfarbe: kaltweiß, ca. 8000 K, Hartschaumetui. Benötigt werden 3 Mignon Batterien, im Lieferumfang enthalten, made in Germany, Eschenbach

Bestell-Nr. 3476 € 99,- (D), € 99,- (A)

Die neue Generation der Leuchtlupe – in einer neuen geometrischen Gestaltung. Die einzigartige und vertraute Form der Computermaus hat sich millionenfach bewährt und sorgt für eine entspannte Handhaltung auch bei längerem Gebrauch.

- liegt sehr gut in der Hand
- sehr einfache, intuitive Führung auf dem Lesegut durch kompakte Bauform
- gleichmäßig helle und blendfreie Ausleuchtung durch zwei SMD-LED



CAZORLA 8x56 PREMIUM

Fernglas mit Tragetasche aus Nylon

Achtfache Vergrößerung, Öffnung: 56 mm, hohe Vergütung, Gewicht: 1150 g, Pentaflex

Bestell-Nr. 3665 € 189,-

Ein hochwertiges Allround-Fernglas für alle Naturfreunde: Für die Astronomie bis zur Tier- und Landschaftsbeobachtung geeignet. Dank rutschfester Gummiarmierung liegt es gut in der Hand und ist hervorragend gegen Feuchtigkeit geschützt.



MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL

Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas, Maße: 20x10x10 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 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

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

LERNEN WIR VON SISYPHOS

Sandsteinobjekt

Zinkfigur von Hand gebogen, Sandsteinsockel von Hand gegossen, Größe: 11 x 20 x 3,5 cm (H x B x T), Gewicht: 620 g, invocem



Bestell-Nr. 3662 € 39,90

Aufgaben, die trotz großer Mühen so gut wie nie erledigt werden, nennt man Sisyphosarbeit. Das Objekt ist eine Erinnerung, größere Projekte in abgrenzbaren Schritten zu erledigen und diese Schritte immer wieder abzusichern. Diese Absicherung symbolisiert der in den Sockel eingelassene Keil.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



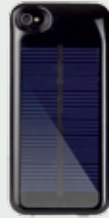
ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE aus Biskuitporzellan

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!



IPSOLO 4/4S SOLAR

Ladeschale mit eingebautem 2400-mAh-Lithium-Polymer-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.**



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 verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. 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.



NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

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

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.



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 wissenschaftlichen Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.



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.



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-Gehäuse lässt Ihr fertiges Radio fast wie ein original Grundgerät 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.

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 Rhombentriakontaeder. Sie können einen Rhombentriakontaeder 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.

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

L x B x H: 365 x 85 x 175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beiliegendes Ladegerät, Controller mit 6 x 1,5-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 Kreiselssystem (Gyro) und ist gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät. Indoorgeeignet – Outdoor nur bei Windstille. Einsteigermodell, ab 15 Jahren.



PEN ULTIMATE

Bestell-Nr. 1667 € 13,90

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.

Besuchen Sie uns im Internet unter: www.science-shop.de

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



STERNZEIT

Kalendarium dtsh.-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.



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 Weltraum. Das Kalendarium bietet zusätzlich Hinweise auf wichtige Himmelsereignisse im Jahr 2013.

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



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 detailge-

treuen Abbildungen befinden sich in diesem Kalender. Bleiben Sie ein Jahr lang der Natur auf der Spur!



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.



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.



STARKE TYPEN – WELT DER TIERE

Text dtsh.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 60 x 50 cm, Palazzi-Verlag

Bestell-Nr. 3362 € 39,80

Wie viel Kraft und Lebensfreude, wie viel Charme und Witz diese Bilder vermitteln! 12 Glanzlichter der Tier-Fotografie als idealer Begleiter durch das Jahr.



WALD

14 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3674 € 29,95

Ob mystischer Urwald oder herbstliche Baumkronen in voller Farbenpracht – in den Bildern dieses Kalenders offenbart sich die Vielfalt des Ökosystems Wald in seiner ganzen Pracht.



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, fotografiert, und anschließend die SW-Fotografien kunstvoll von Hand koloriert.



EULEN

Kalendarium dtsh.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2185 € 19,95

Diese scheuen Nachtvögel gehören von Anbeginn zum Kreis der Geschöpfe, die den Menschen von besonderer Bedeutung waren, ob als Symbol für Weisheit (bei den alten Griechen) oder Tod und Verderben (bei den Christen).



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!



SIMPLIFY YOUR DAY

Einfacher und glücklicher leben

320 Bl. m. Cartoons, 12,5 x 16 cm, Abreißkalender, Campus

Bestell-Nr. 2174 € 12,99

Schluß mit der Kompliziertheit des Lebens. Die Fülle praktischer und sofort umsetzbarer Tipps sowie die liebevollen Zeichnungen von Werner Tiki Küstenmacher sorgen für die tägliche Leichtigkeit des Seins.

Weitere Kalender finden Sie unter:
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



**BUCH & MODELL-SET
DINOSAURIER T-REX**
Einfach zusammenstecken –
ganz ohne Klebstoff
2012, Box mit Buch (32 S.) u. 81 Teilen
für ein T-Rex-Modell, Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3720
€ 19,95 (D), € 19,95 (A)

Ganz ohne Klebstoff entsteht aus 81 stabilen Papp-
teilen ein komplettes Tyrannosaurus-Rex-Skelett,
das etwa 30 cm hoch und ganze 80 cm lang ist.
Das Buch enthält eine verständliche Anleitung für
den Aufbau des Modells, die dabei zusätzliches
Wissen über Aussehen, Verhalten und Lebensraum
von Dinosauriern liefert. Ab 7 Jahren.



**DAS GRÖSSTE ORIGAMI-
BUCH ALLER ZEITEN**
2012, 24 S. m. zahlr. Farbbabb., 12 extra-
große Faltblätter inkl. kart., Frech
Bestell-Nr. 3746
€ 9,99 (D), € 10,30 (A)

Buch aufklappen und loslegen:
Alle Faltmodelle sind Schritt für Schritt erklärt und
illustriert. Plus: 12 gemusterte Faltblätter zum Heraus-
trennen und sofort Losfalten.



Jürgen Brater
**WAS MACHT DER
U-BAHN-FAHRER, WENN
ER AUF TOILETTE MUSS?**
66 blitzgescheite Fragen rund
um Alltag, Menschen und Tiere
2012, 159 S. m. zahlr. Farbfotos.,
ab 10 Jahren, geb., Beltz

Bestell-Nr. 3741 € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Was macht der U-Bahn-Fahrer, wenn er auf Toilette
muss? Vergiftet sich die Kobra, wenn sie auf ihre
Zunge beißt? Wie heißt Barbie mit Nachnamen? Ob
Naturwissenschaften, Alltag, Redewendungen oder
Comics – Jürgen Brater hat sich unter Kindern um-
gehört und die interessantesten Fragen gesammelt,
um sie verständlich, unterhaltsam und
fundiert zu beantworten.

Kurze Erläuterung zu den Angaben hinter den Preisen: (D) ist der Preis für Deutschland, (A) der Preis für Österreich



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 (D), € 29,95 (A)

Ob drinnen oder draußen, bei Tag oder Nacht, in
diesem Set aus Buch und Bauteilen finden Kinder ab
8 Jahren immer das richtige Elektronikabenteuer.

Das Einzigartige an diesem Bastelbuch: alle elektri-
schen 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.



Felix Homann
**ERNEUERBARE ENERGIEN
Sonne, Wind und Wasser**
1. Aufl. 2012, 64 S. m. zahlr. Farbbabb.,
ab 9 Jahren, geb., Kosmos
Bestell-Nr. 3736
€ 12,95 (D), € 13,40 (A)

Ob zum Kochen, Fernsehen oder
für PC-Spiele – wir benötigen Energiequellen, die umwelt-
freundlich und unendlich nutzbar sind, und neue Tech-
nologien, die es ermöglichen daraus Strom zu gewinnen.
Die wichtigsten – von Bioenergie bis zum Off-Shore
Windpark – werden in diesem Buch vorgestellt.



SPIONE
Agenten, Codes und
Überwachung
2012, 192 S., über 1000 Farbfotografien,
Zeichnungen und Grafiken, ab 10 Jahren,
geb., Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3739
€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Woran erkennt man einen Spion? Wie knackt man ver-
schlüsselte Nachrichten? Welche besonderen Fähig-
keiten braucht man als Agent und welche Tricks gibt es?
Dieses Buch enthüllt alles über Top-Spione und deckt
ihre verborgenen Überwachungsmethoden auf.



**SMARTPHONES,
GAMES & INTERNET**
So spannend ist die digitale Welt
2012, 144 S., über 500 Farbfotografien
und Grafiken., ab 10 Jahren, geb.,
Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3738
€ 16,95 (D), € 17,50 (A)

Eine Einführung in die Welt des Internets, der Com-
puter, Videospiele, Hightech-Geräte und Roboter.

Auf spannende Weise erfahren Kinder mehr über die
Entwicklung, Vielfalt und technischen Details moderner
Hightech-Geräte. Porträts bekannter Erfinder, interes-
sante Grafiken und Teilansichten elektronischer Geräte
vermitteln das Wissen einfach und leicht verständlich.

**Portofreie Lieferung nach
Deutschland und Österreich**



**KALENDER FÜR
CLEVERE KIDS**
Der Kinder Brockhaus
320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm,
ab 8 Jahren, Brockhaus
Bestell-Nr. 1309 € 10,99

Der tägliche Kick für schlaue
Kinder: Spannende Fakten, atemberaubende
Rekorde und witzige Anekdoten, Rezepte und
Experimente, knifflige Rätsel, exotische Tiere,
vom WWF vorgestellt.



WISSEN FÜR KIDS
320 vierfarb. Bl., 12,5 x 16 cm,
ab 10 Jahren, Harenberg
Bestell-Nr. 2870 € 12,99
Eine spannende Entdeckungs-
reise durch die Welt
des Wissens. Farbenfrohes,
kindgerechtes Layout.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



BESTELLCOUPON

Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden
und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680
D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname _____ Straße/Hausnummer _____
Datum/Unterschrift _____ E-Mail-Adresse _____

Zahlung per Bankeinzug

Geldinstitut/Ort _____
Konto-Nr. _____
BLZ _____
Datum/Unterschrift _____

Zahlung per Rechnung

PLZ/Wohnort _____
Kunden-Nr. (falls vorhanden) _____ XMAS12SDW

Der lange Weg zum künstlichen Sonnenfeuer

Auf der Kernfusion ruhen viele Hoffnungen. Sie könnte sich als verhältnismäßig saubere und nahezu unerschöpfliche Energiequelle erweisen und in einigen Jahrzehnten einen beträchtlichen Teil des Strombedarfs der Menschheit decken. Doch ob das klappt, ist ungewiss. Denn Fusionsreaktoren stellen ihre Entwickler laufend vor neue Herausforderungen.

Von Gerhard Samulat

N ahezu alle unsere Energiequellen verdanken wir letztlich dem unaufhörlichen Leuchten der Sonne. Sie nährt Mikroben und Pflanzen, deren verrottende Überreste sich über Jahrmillionen hinweg in die fossilen Energieträger Kohle, Erdöl und Erdgas verwandelt haben. Sie wärmt das Land, die Weltmeere und die Atmosphäre, so dass unsere Kraftwerke die entstehenden Winde und Wasserkreisläufe nutzen können. Ihr Licht fällt auf Solarzellen und lässt Biomasse auf Äckern wachsen. So-

gar die Kernkraft beruht letztlich auf der Aktivität zumindest von fernen Geschwistern der Sonne. Denn diese brüteten vor Äonen alle schweren chemischen Elemente aus – bis hinauf zum Uran, das wir heute in Kernreaktoren einsetzen. Da liegt es nahe, sich zur Energiegewinnung die Sonne zum Vorbild zu nehmen und zu versuchen, in einem Kraftwerk Wasserstoffatome zu Helium zu verschmelzen.

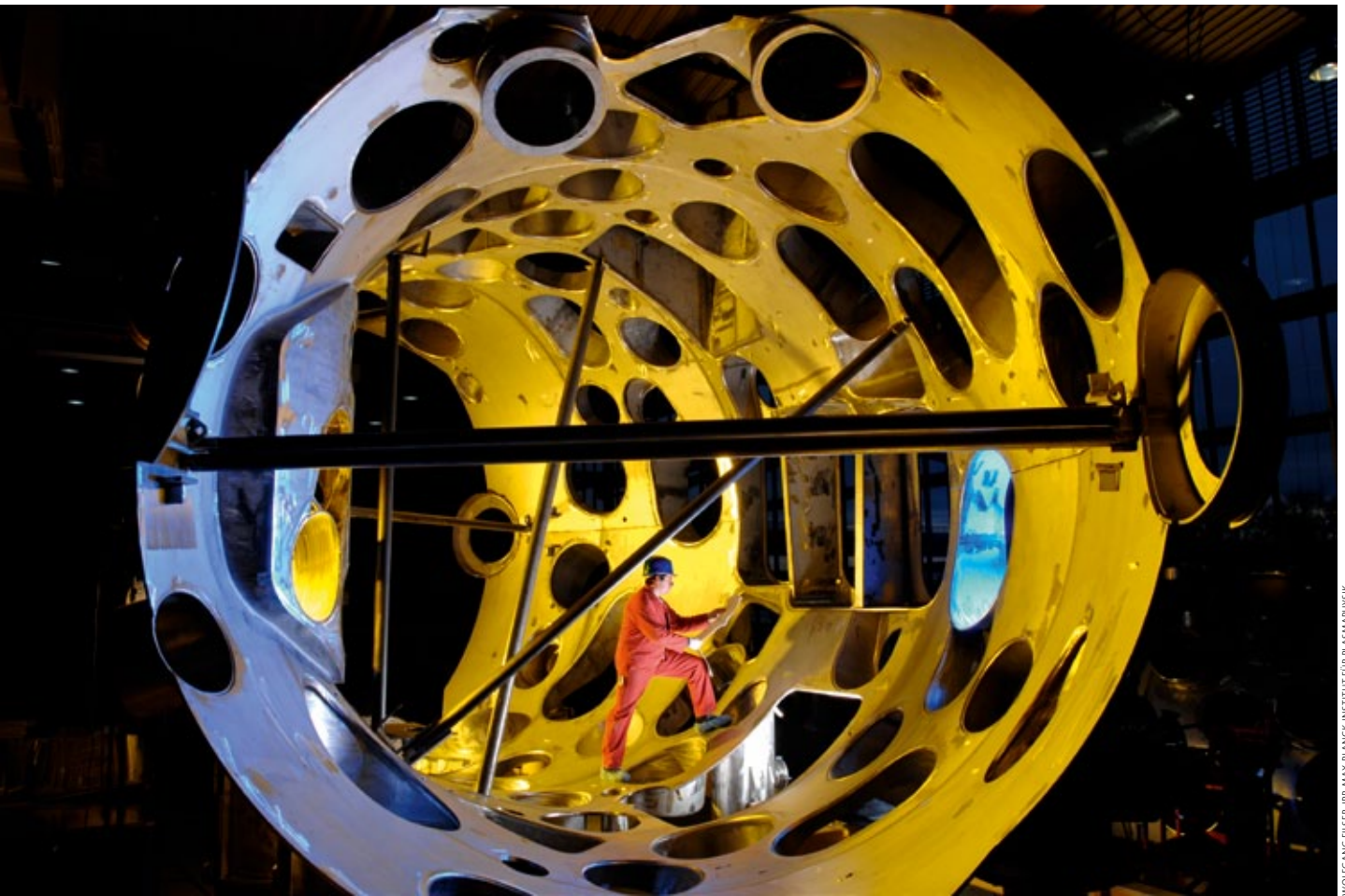
Der Gedanke ist faszinierend; die Umsetzung eine gewaltige technische Herausforderung. Das Vorbild lässt sich nicht einfach kopieren, herrschen im Schmelztiegel der Sonne doch Temperaturen von mehr als 15 Millionen Kelvin und unvorstellbar hohe Drücke von zum Teil über 20 Billionen Pascal – 200 Milliarden Mal so hoch wie der irdische Luftdruck. Solche Werte sind mit technischen Mitteln wohl auch in absehbarer Zukunft dauerhaft kaum zu erreichen. Trotzdem gelang es Menschen schon mehrfach, das Sternenfeuer auf Erden zu entfachen.

Zum ersten Mal vor ziemlich genau 60 Jahren: Am 1. November 1952 zündeten die Vereinigten Staaten auf einem kleinen Atoll der pazifischen Marshallinseln ihre erste Wasserstoffbombe. Der Sprengsatz mit der Bezeichnung »Ivy Mike« war fast 1000-mal stärker als die Atombombe von Hiroshima. Wo sich einst das Inselchen Elugelab aus dem Wasser erhob, klafft heute ein tiefer Unterwasserkrater. Einige

AUF EINEN BLICK

IN DER HEISSEN PHASE

- 1** Mit Hochdruck arbeiten Forscher an den **Kernfusionsreaktoren** ITER im südfranzösischen Kernforschungszentrum Cadarache und Wendelstein 7-X in Mecklenburg-Vorpommern.
- 2** Noch machen den Wissenschaftlern **viele technische Probleme** zu schaffen. Das heiße Plasma entweicht immer wieder, das Strukturmaterial wird brüchig oder radioaktiv, und das Brennstoffmaterial existiert noch nicht in ausreichender Menge.
- 3** Welcher Anlagentyp – ob der Tokamak ITER oder der Stellarator Wendelstein 7-X – das Rennen macht und ob überhaupt je ein **funktionsfähiges Kraftwerk** gebaut wird, ist nicht nur aus technischen, sondern auch aus wirtschaftlichen Gründen ungewiss.



WOLFGANG FELSNER, IPP, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Monate später brachte auch die UdSSR ihre erste Fusionsbombe zur Explosion.

Aber das Sternenfeuer bändigen, um in einem Kraftwerk Energie respektive Strom daraus zu gewinnen, können die Wissenschaftler bis heute nicht. Derzeit konzentrieren sich die Anstrengungen im Wesentlichen auf den International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) im südfranzösischen Kernforschungszentrum Cadarache sowie auf das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X in Greifswald, Mecklenburg-Vorpommern. Die beiden Anlagen sollen grundsätzlich zeigen, ob sich das Verschmelzen von Wasserstoffisotopen zur industriellen Stromgewinnung nutzen lässt.

Fusionsexperimente gibt es auch anderswo. Mehrere Labors – allen voran die National Ignition Facility des kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) – untersuchen etwa Trägheitsfusion, bei der winzig kleine Wasserstoffkügelchen durch Bestrahlen mit Lasern oder Schwerionen zur Explosion gebracht werden sollen (siehe »Wann kommt der Fusionsreaktor?«, SdW 5/2010, S. 88). Doch zielen diese Experimente vor allem auf die Simulation von Kernwaffenexplosionen. ITER und Wendelstein 7-X dienen dagegen ausschließlich der zivilen Nutzung. Noch befinden sich beide Anlagen im Bau. Der ITER – im Lateinischen bedeutet »iter« der Weg – soll 2026 fertig werden. Er ist ein so

Im Schmelztiegel der Sonne herrschen 15 Millionen Kelvin. Im Fusionsreaktor Wendelstein 7-X sollen es einmal 100 Millionen Kelvin sein. Das Bild zeigt ein Modul des Außengefäßes. Durch seine mehr als 200 Öffnungen werden später Rohre, Kabel und Datenleitungen für Wasser, Helium, Strom und Sensoren führen.

genannter Tokamak, dessen aus dem Russischen abgeleiteter Name etwa so viel wie »Toroidale Kammer in Magnetspulen« heißt. Kennzeichen des Tokamaks ist seine verhältnismäßig einfache Magnetstruktur, mit der sich das – Plasma genannte – heiße Gemisch aus geladenen Teilchen für einige Zeit einschließen und erhitzen lässt. Die Anlage arbeitet gepulst, muss also periodisch hoch- und wieder heruntergefahren werden.

Wendelstein 7-X dagegen ist ein so genannter Stellarator. In ihm erzeugen überaus komplex geformte Spulenkörper eine Art magnetischer Flasche, die das Fusionsplasma einsperrt. »Ob der Tokamak das Rennen macht oder der Stellarator, ist heute schwer zu sagen«, sagt Sibylle Günter, Wissenschaftliche Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) in Garching, das ebenso wie die Forschungszentren Jülich und Karlsruhe maßgeblich an beiden Experimenten beteiligt ist.

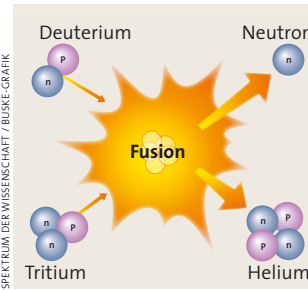
Wichtigste Voraussetzung für die Fusionsreaktion sind in jedem Reaktortyp hohe Temperaturen und Drücke. Nur dann überwinden die Atomkerne die elektrischen Kräfte, mit denen sie sich normalerweise gegenseitig abstoßen, und geraten in den Einflussbereich der kurzreichweitigen starken Kernkraft ihrer Fusionspartner, die sie miteinander verschmelzen lässt.

Die Erzeugung hoher Temperaturen fällt den Experimentatoren vergleichsweise leicht. Die für eine Fusion angepeilten 100 Millionen Kelvin – das ist mehr als das Fünffache der Temperatur im Inneren der Sonne – sind keine Herausforderung mehr. Das Problem ist der Druck. Damit ein heißes Plasma dauerhaft magnetisch eingeschlossen bleibt, darf er einige Bar nicht überschreiten. Dieser Wert ist bei einem 100 Millionen Kelvin heißen Plasma schnell erreicht. Deshalb können die Physiker das Wasserstoffgas nur sehr verdünnt in die Fusionskraftwerke einleiten: mit etwa einem 250 000stel des Atmosphärendrucks, was nach Alltagsmaßstäben schon ein Vakuum ist.

Ein Gramm Fusionsbrennstoff ersetzt elf Tonnen Kohle

Im Unterschied zur Sonne, die vorzugsweise mit normalem Wasserstoff arbeitet, planen die Wissenschaftler zudem, die beiden schwereren Isotope dieses leichtesten aller chemischen Elemente miteinander zu verschmelzen: Deuterium und Tritium. Während der Wasserstoffkern aus lediglich einem Proton besteht, enthalten Deuterium- und Tritiumkerne zusätzlich ein beziehungsweise zwei Neutronen. Diese elektrisch neutralen Kernbausteine unterliegen ebenso der starken Wechselwirkung, die für die Fusion ausschlaggebend ist, und erhöhen so die Wahrscheinlichkeit einer Verschmelzung.

Die Fusion von einem Gramm eines Deuterium-Tritium-Gemischs setzt eine Energiemenge von gut 26 000 Kilowatt-

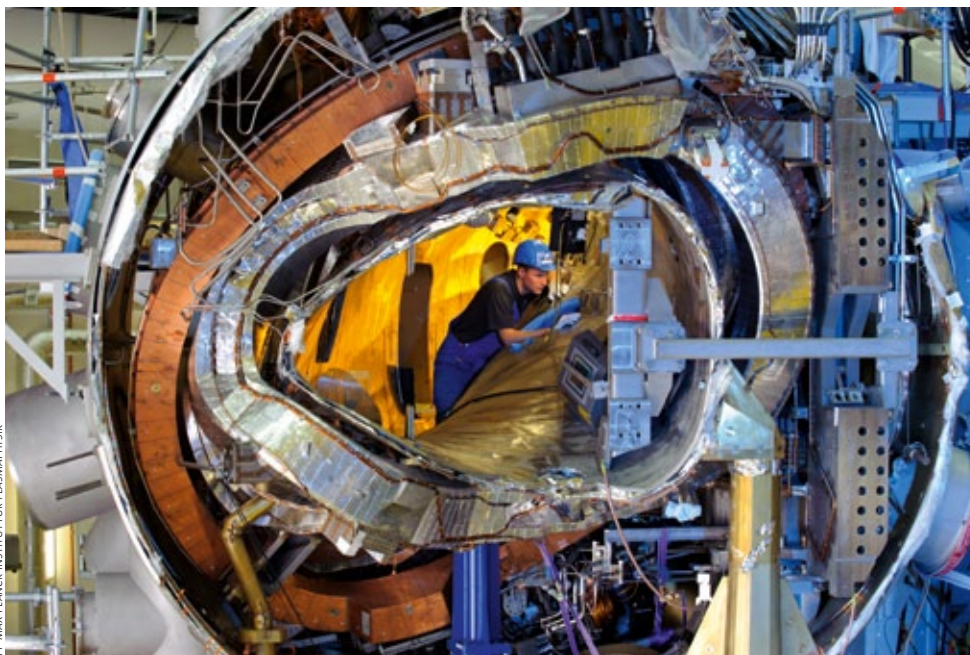


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

Wenn Deuterium und Tritium miteinander verschmelzen, entstehen ein Heliumatomkern sowie ein schnelles Neutron. Letzteres gibt seine Bewegungsenergie anschließend als Wärme ab, die sich zur Stromgewinnung nutzen lässt.

stunden frei. Das entspricht dem Energiegehalt von elf Tonnen Kohle. Damit lässt sich ein Durchschnittshaushalt gut ein Jahr lang mit Strom und Wärme versorgen.

Das Ganze funktioniert, weil einzelne Protonen und Neutronen in der Summe stets mehr Masse besitzen als der Atomkern, zu dem sie sich zusammenschließen. Die Massendifferenz wird gemäß Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ (E steht für Energie, m für Masse und c für die Lichtgeschwindigkeit) als Energie frei. Pro Reaktion eines Deuteriumkerns mit einem Tritiumkern sind das 17,6 Millionen Elektronvolt (MeV). Bei der Reaktion wird ein Neutron fortgeschleudert, das vier Fünftel der Energie aufnimmt. Ferner entsteht ein Heliumkern, der sich aus zwei Protonen und zwei Neutronen zusammensetzt und ein Fünftel der Energie mitbekommt. Durch Stöße mit benachbarten Deuterium- und Tritiumkernen geben die Heliumkerne ihre Energie wieder ab und erhalten so die Temperatur des Plasmas aufrecht. Die Neutronen treffen hingegen mit hoher Geschwindigkeit auf so genannte Blankets, die Teil der inneren Hülle des Plasmagefäßes sind. In diesem Material geben sie ihre Energie durch Stöße mit Lithiumatomen als Wärme ab. Diese wird dann über Wärmetauscher und Dampfturbinen in Elektrizität umgewandelt.



IPP, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Noch bis August 2014 dauern die Arbeiten an Wendelstein 7-X; dann geht der Stellarator in Betrieb. Im Inneren des Plasmagefäßes (Zentrum des Bilds) werden später Temperaturen um 100 Millionen Kelvin herrschen, während die umgebenden Magnetspulen (siehe auch das Bild auf S. 62) auf ultratiefe Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt abgekühlt sind.

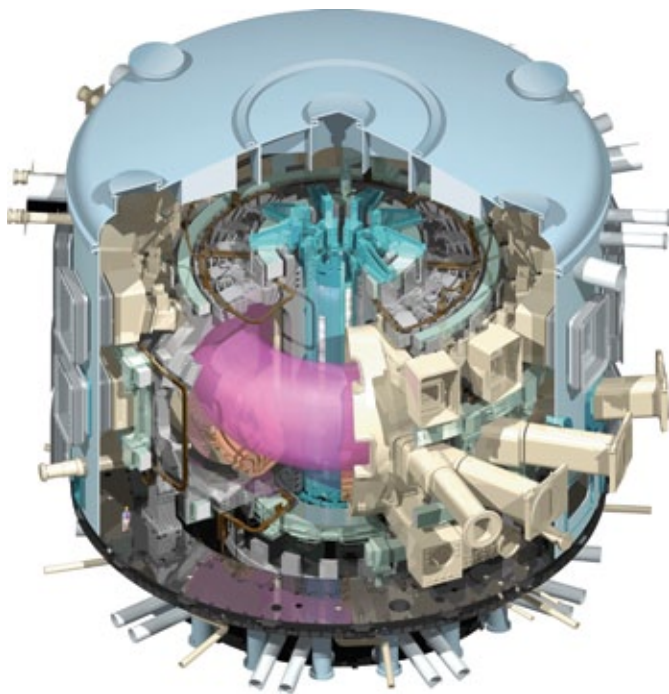
Sowohl ITER als auch Wendelstein 7-X sind das Ergebnis weltweiter Arbeitsteilung und haben viele »Väter«: Neben der europäischen Versuchsanlage Joint European Torus JET in Culham, Großbritannien, dem Textor in Jülich sowie der größten deutschen Fusionsanlage Asdex Upgrade in Garching und einigen weiteren Forschungsreaktoren in Europa gibt es beispielsweise ebenso in den Vereinigten Staaten, Japan, Südkorea, Indien und China neue oder entstehende Anlagen. Dabei handelt es sich zumeist um Tokamaks, deren Entwicklungsreife höher ist als die der Stellaratoren. Kraftwerksgröße besitzt jedoch noch keine von ihnen. Allerdings denkt die chinesische Regierung wohl mittlerweile darüber nach, ein eigenes Fusionskraftwerk von den Dimensionen eines ITER zu bauen. Offensichtlich geht ihnen der Bau in Cadarache, an dem sie ebenfalls beteiligt sind, zu langsam voran.

Ein richtiges Kraftwerk benötigt einen Durchmesser von 45 Metern

Im August 2014 soll Wendelstein 7-X im vorpommerschen Greifswald fertig sein. Noch geht es in der Werkshalle zu wie auf einer Werft. Ohrenbetäubendes Pfeifen und Dröhnen erfüllt den Raum, als würde irgendjemand kontinuierlich Druckluft ablassen. Ab und zu hört man das Kreischen eines Winkelschleifers oder Arbeiter, die sich etwas zurufen. Musik dröhnt aus einem Kofferradio: »Blue Bayou« und »La Paloma oh«. Die Arbeiten an dem rund eine Milliarde Euro teuren Gerät laufen im Zweischichtbetrieb an sechs Tagen pro Woche, manchmal das gesamte Wochenende durch. »Ein Erholungscamp ist das nicht«, sagt der wissenschaftliche Leiter des Projekts, Thomas Klinger.

Im Verlauf einiger Jahre sind die fünf je 120 Tonnen schweren Module der »Maschine«, wie Klinger das Metallungetüm liebevoll nennt, zusammengesetzt und auf einer Stahlkonstruktion zusammengesetzt worden. Der Stellarator gleicht nun einem überdimensionalen Donut mit einem Außendurchmesser von 16 Metern. Um wirtschaftlich zu arbeiten, müssen Fusionskraftwerke nach aktuellem Stand der Forschung aber deutlich größer ausfallen. »Ein richtiges Kraftwerk bräuchte wohl etwa 45 Meter Durchmesser und ein entsprechend größeres Volumen«, kalkuliert Klinger. »Bei jedem Schritt überlegen wir daher, ob er jeweils kraftwerksrelevant ist.« Alles, was hier erprobt wird, soll auch im industriellen Maßstab funktionieren.

Der Schlauch des Donuts – Experten sprechen von einem Torus – ist bis zu fünf Meter dick. Die äußere Gefäßwand besteht »quasi nur aus Löchern«, scherzt Klingers Kollege Lutz Wegener, der in Greifswald den Baufortschritt überwacht. Durch die über 200 Öffnungen werden später einmal Rohre, Kabel und Datenleitungen für Wasser, Helium, Strom und Sensoren führen (siehe das Bild auf S. 59). Der Torus enthält zudem den Kryostaten, der die supraleitenden Magnete umgibt. Ebenfalls in seinem Inneren verläuft die schlauchförmige Vakuumkammer, die künftig das Plasma aufnehmen soll.



IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

30 Meter hoch ist der Tokamak ITER, in dem ab 2020 erste Experimente mit Wasserstoff stattfinden sollen. Erst gegen Ende der 2020er Jahre wird ein Deuterium-Tritium-Gemisch verwendet, wie es für den Kraftwerksbetrieb nötig ist. Das Volumen des Energie liefernden Plasmas beträgt 837 Kubikmeter, bei einer Masse von gerade einmal 0,5 Gramm.

Die innerste oder »erste Wand«, die später dem Plasma am nächsten sein wird, ist der geschwungenen Form des Plasmaschlauchs nachempfunden. »In dieser Wand gibt es bohnenförmige und annähernd dreieckige Abschnitte, die zwischen eineinhalb und teilweise über drei Meter hoch sind«, erläutert Wegener. Auffallend gebogen ist auch die Form von 50 der insgesamt 70 Spulenkörper des Stellarators, die später den Magnetkäfig formen sollen. Obgleich ihnen eine ganz bestimmte Helixstruktur zu Grunde liegt, die in jahrelangen numerischen Berechnungen ermittelt wurde, sehen sie aus, als hätte Salvador Dalí persönlich Hand angelegt.

Die Spulen bestehen aus einer supraleitenden Niob-Titan-Legierung – dem gleichen Material, aus dem auch die Ablenkmagnete des Teilchenbeschleunigers LHC bei Genf gefertigt sind. Kühlt man sie mit flüssigem Helium auf vier Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt, transportieren sie Ströme von bis zu 18 000 Ampere verlustfrei. Sie erzeugen ein Bündel von Magnetfeldlinien, welches das nur wenige Milligramm schwere Plasma in Form und in der Schwebe hält. Durch die magnetischen Feldlinien ist es »versklavt«, wie die Fachleute sagen: Parallel zu den Feldlinien können sich die Ladungsträger – Elektronen ebenso wie Ionen – zwar frei bewegen, senkrecht dazu ist ihre Mobilität dagegen vollständig eingeschränkt. Damit nehmen die Forscher der Ladungswolke eine ganze Menge von ihrem chaotischen Charakter.

Ob das Magnetfeld hält, was es verspricht – nämlich das ultraheiße Plasma viele Minuten lang einzusperren –, soll

Wendelstein 7-X herausfinden. Die Ziele sind hochgesteckt: »Mit dem Stellarator wollen wir in erster Linie kraftwerksrelevante Temperaturen und Plasmadichten erzielen und sie an die Leistungsdaten eines Tokamaks heranführen«, sagt Klinger, »oder diese vielleicht sogar übertreffen.« Zudem wollen die Forscher bei 100 Millionen Kelvin Stöße zwischen Deuterium und Wasserstoff beobachten. Bei dieser Temperatur befindet sich in etwa das Maximum der Wirkungsquerschnittskurve, die angibt, wie hoch die Wahrscheinlichkeit für die Fusion zweier Kerne ist.

»Der Müll strahlt nach einigen hundert Jahren weniger als abgebrannte Kohle«

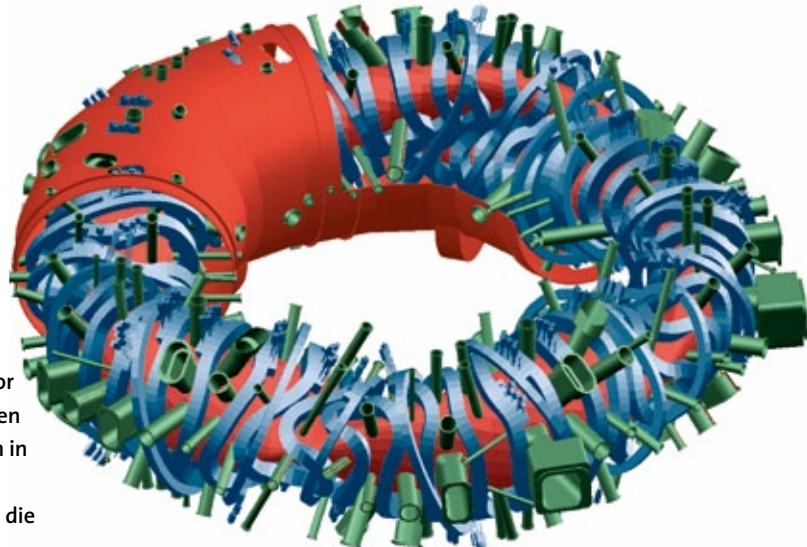
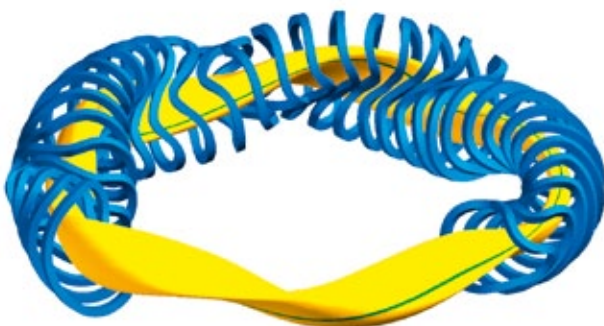
Experimente mit Tritium sind bei Wendelstein 7-X zunächst nicht vorgesehen; die Substanz ist leicht radioaktiv und schwierig zu handhaben. Allerdings können Atomkerne in den Magneten oder dem Reaktorgefäß umherfliegende Neutronen einfangen und dadurch radioaktiv werden. Geeignete Materialien sollen verhindern, dass dabei hochradioaktive Stoffe mit langen Halbwertszeiten entstehen. Die Entwickler planen beispielsweise, die klassischen Beimischungen von Stahllegierungen – Nickel, Niob und Molybdän – durch Titan, Wolfram oder Tantal zu ersetzen. Dann, so erwarten sie, entstehen weniger langlebige Radionuklide als in heutigen Kernkraftwerken, und das trotz beträchtlich größerer Neutronenflussdichte. Trotzdem müssen Wartungsarbeiten oder Reparaturen im inneren Bereich eines Fusionskraftwerks künftig ferngesteuert stattfinden. »Doch selbst wenn wir das bei der Fusion aktivierte Material hinzuzählen, strahlt der Müll nach einigen hundert Jahren weniger als abgebrannte Kohle«, sagt die Max-Planck-Physikerin Günter.

Die Wahl der Werkstoffe ist in vielerlei Hinsicht entscheidend. Neutronen aus einer Fusionsreaktion besitzen so viel Energie, dass sie selbst tief im Stahl sitzende Atome heraus schlagen können und ihn mit der Zeit brüchig werden lassen. Deswegen müssen die Betreiber das Innere der Kraftwerke sowie die tragenden Komponenten des Reaktors wohl alle

zwei bis drei Jahre austauschen. Auch sind die Materialien hohen thermischen Belastungen ausgesetzt. Ähnlich wie in einer gewöhnlichen Leuchtstoffröhre, in der das Plasma einige tausend Kelvin heiß werden kann und an der wir uns trotzdem nicht die Finger verbrennen, nimmt auch die Temperatur der Plasmawolke im Fusionsreaktor nach außen hin rasch ab. Dennoch entstehen Wärmeflüsse von bis zu 20 Megawatt pro Quadratmeter. Daher ist das Innere der Plasmagefäße oft mit kohlefaserverstärkten Graphitkacheln ausgekleidet – so wie die Unterseite der Spaceshuttles, die bei der Rückkehr in die Erdatmosphäre ähnliche Belastungen aushalten mussten. Allerdings hatten die Shuttles schon nach rund einer Minute das Schlimmste überstanden, während die Kacheln in den Stellaratoren oder Tokamaks der Gluthitze bis zu eine halbe Stunde widerstehen sollen. Darum werden sie gekühlt – in Wendelstein 7-X beispielsweise mit Wasser.

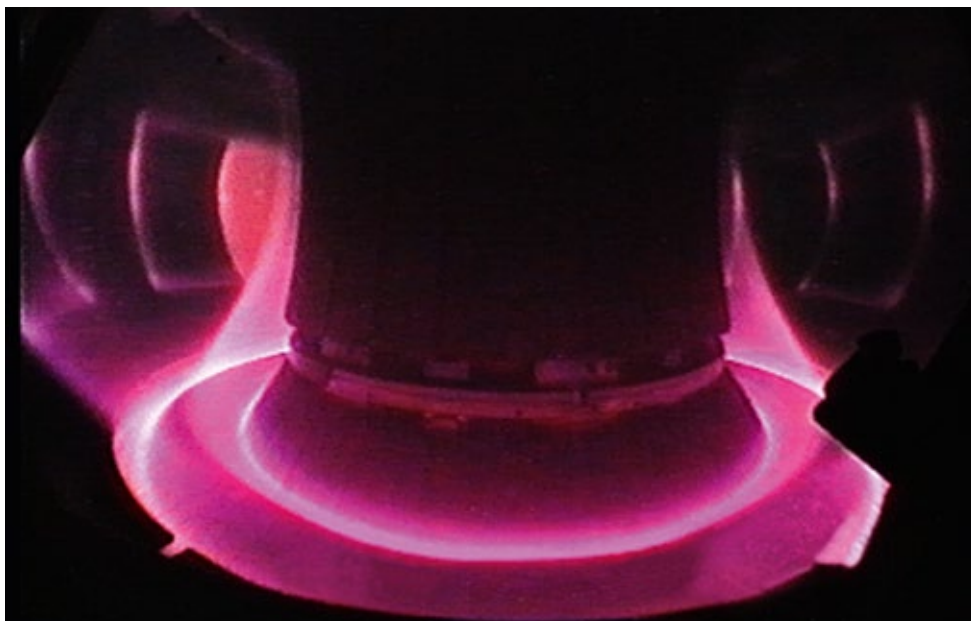
Beim ITER hingegen werden große Teile der innersten Wand voraussichtlich nicht aus Graphit bestehen. Denn der Kohlenstoff im Graphit neigt dazu, Wasserstoff respektive Tritium einzulagern. Verunreinigungen können dann von der Wand abflocken und in das empfindliche Plasma dringen. Radioaktiven Staub im Reaktor gilt es jedoch zu vermeiden.

Den optimalen Werkstoff suchen die Wissenschaftler aber immer noch. Auch Wolfram ist nicht ideal, denn Metalle mit hohen Kernladungszahlen sind stets problematisch. Wenn das ständige Bombardement mit schnellen Plasmateilchen solche Atome aus den Metallwänden herausschlägt, verlieren sie in der Plasmaglut rasch ihre äußeren Elektronen, was wiederum zu Umverteilungen zwischen den Orbitalen führt. Dabei wird Röntgenstrahlung frei, deren Energie mit der vierten Potenz der Kernladungszahl steigt. »Die Verunreinigungen leuchten dann wie ein Christbaum«, sagt Klinger. Die Partikel geben die Energie, die ihnen mühsam zugeführt wurde, so gleich wieder ab. Das kühlt die Ladungswolke und stoppt im schlimmsten Fall die Fusionsreaktion.



Der verwendete Plasmaschlauch (linke Grafik, gelb) im Reaktor Wendelstein 7-X wird von kompliziert geformten Magnetpulen (blau) in Form gehalten. Die gesamte Anordnung befindet sich in einem Kryostaten (rechte Grafik, rot, nur in Teilen dargestellt). Dank der darin herrschenden niedrigen Temperaturen werden die Spulen supraleitend.

BEIDE ABBILDUNGEN: IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK



IPP MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Schon seit 1991 ist am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik auch die mit fünf Meter Radius größte deutsche Kernfusionsanlage ASDEX Upgrade in Betrieb. Dieser Blick ins Innere des Tokamaks zeigt das 100 bis 200 Millionen Kelvin heiße Plasma.

Das Erdalkalimetall Beryllium besitzt die gewünschte niedrige Kernladungszahl und neigt überdies nicht zu chemischer Erosion. Teile der europäischen Versuchsanlage JET in Culham, an der es schon 1991 erstmals gelungen war, Energie freizusetzen, sind damit ausgekleidet. Beryllium kommt in der Natur jedoch zu selten vor, als dass man damit eine große Zahl von Fusionskraftwerken bauen könnte. Zudem ist es giftig und Krebs erregend. Auch Silizium-Karbid-Keramiken oder Legierungen auf Vanadiumbasis hätten ihren Reiz. Sie werden unter Neutronenbeschuss nur wenig radioaktiv, sind als Wandmaterial allerdings noch wenig getestet. Jüngst zeigten aber Ergebnisse vom JET-Experiment, dass die Kombination von Beryllium als Wandmaterial und Wolfram für den Boden des Gefäßes bessere Bedingungen für ein hochreines Plasma liefert.

Doch es müssen nicht nur die Wände vor den energiereichen Neutronen geschützt werden, sondern ebenso die supraleitenden Magnete, die das Plasma in Form halten. Denn die elektrisch neutralen Teilchen können die Magnetfelder ungehindert durchdringen. Gelingt das zu vielen von ihnen, kommt es zum so genannten Quench: Die Supraleitung bricht zusammen, und die Leitfähigkeit des Materials nimmt augenblicklich ihren normalen Wert an. Das erhitzt die Spulen rasch und bringt sie zum Schmelzen. »Deswegen haben wir im Keller große Nickelwiderstände aufgestellt, auf die wir den Strom blitzschnell übertragen können, um ihn dort kontrolliert in Wärme umzuwandeln«, erläutert Wegener. Wegen der erwarteten hohen Neutronenflut in einem Kraftwerk wird die Abschirmung zwischen Plasma und Magneten, die zum Teil aus den schon erwähnten Blankets besteht, etwa einen Meter dick sein müssen.

Die Blankets müssen eine weitere zentrale Funktion erfüllen: Fangen die Lithiumatome in ihnen energiereiche Neutronen ein, entsteht durch eine Kernreaktion neben Helium vor allem das als Brennstoff begehrte Tritium. Dieses

Gas soll gesammelt und dem Plasma wieder zugeführt werden. Für die beständige Eigenversorgung eines Reaktors müsste allerdings jedes Neutron aus der Fusion auf genau ein Lithiumatom treffen und mit diesem die Reaktionskaskade durchlaufen. Doch natürlich gehen Neutronen verloren. Das Blanket kann den umgebenden Raum nicht lückenlos abdecken, außerdem fliegen manche Neutronen einfach hindurch. Und schließlich zerfällt ein kleiner Teil des Tritiums, das nur eine Halbwertszeit von knapp über zwölf Jahren hat, noch bevor es zurück in die Brennkammer gelangt.

Deswegen planen die Experimentatoren, dem Lithium Blei oder Beryllium beizufügen. Diese Elemente wirken als Neutronenvervielfacher: Trifft ein Neutron auf diese Stoffe, kommt es zu Kernreaktionen, wobei zwei der neutralen Kernbausteine entstehen. Ob das funktioniert, müssen die Forscher zwar erst noch nachweisen. Aber mehr als »simple Neutronenphysik« sei das nicht, sagt Sibylle Günter (siehe das Interview ab S. 64).

Tokamaks und Stellaratoren stehen vor denselben Herausforderungen

Anfangs müssen aber wohl gewöhnliche Kernreaktoren die Tritiumversorgung übernehmen. Als Nebenprodukt fallen bei ihrem Betrieb jährlich pro Kraftwerk rund zwei Kilogramm dieses radioaktiven Stoffs an. Ein Fusionskraftwerk mit einer elektrischen Leistung von einem Gigawatt benötigt jedoch über ein Kilogramm Tritium pro Woche. Tritium könnte also zumindest in der Anlaufphase der kommerziellen Fusionsenergienutzung einen Engpass darstellen, während Deuterium etwa in Meerwasser ausreichend vorkommt.

Im Wesentlichen stehen Tokamaks und Stellaratoren vor denselben technischen Herausforderungen. Der Unterschied liegt vor allem in der Form und den Eigenschaften der Magnetfelder. Die Tokamakforscher in Cadarache, die auf ein

»Von Meilenstein zu Meilenstein«

Bis zum ersten Fusionskraftwerk ist es noch ein langer Weg. Lohnt es sich überhaupt, ihn zu gehen? »Spektrum der Wissenschaft« hat mit **Sibylle Günter** gesprochen, der Wissenschaftlichen Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik in Garching.

Spektrum der Wissenschaft: Frau Professor Günter, nach dem Willen der Bundesregierung soll der Anteil an erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2050 auf 80 Prozent steigen. Wie viel Raum bleibt da noch für die Kernfusion?

SIBYLLE GÜNTER: Nicht jedes Land wird seinen Energiebedarf in diesem Ausmaß aus erneuerbaren Energien decken können. Selbst in Deutschland fehlt dafür noch die nötige Infrastruktur wie beispielsweise kostengünstige Energiespeicher.

Wir müssen das Energieproblem aber vor allem global betrachten. Und die Prognosen lauten, dass sich der Strombedarf bis zum Jahr 2100 weltweit um den Faktor sechs erhöht. Spätestens um das Jahr 2050 werden aber die konventionellen Öl- und Gasreserven zur Neige gehen. Kohle reicht deutlich länger, verursacht aber natürlich weiterhin Klimaprobleme. Damit sich keine Energielücke öffnet, müssen wir uns also etwas einfallen lassen. Wir halten die Fusion für eine sinnvolle Möglichkeit. Sie könnte im Jahr 2100 einen Anteil von etwa 15 Prozent am Energiemix haben. Fusionskraftwerke sind zudem grundlastfähig. Wenn Sie eine Großstadt wie beispielsweise Schanghai mit Strom versorgen wollen, wird Ihnen das kaum mit Windenergie gelingen.

Wie viele Fusionsmeiler bräuchte man denn?

GÜNTER: Fusionskraftwerke sollten konventionelle Kraftwerke sowie Atommeiler ersetzen. Sie würden gut in die bestehende Infrastruktur passen und mit einem Gigawatt etwa so viel elektrische Leistung abgeben wie ein großes Kohlekraftwerk. Die Zahl der künftigen Fusionsmeiler ist aber auch eine Frage der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Billig ist Fusionsenergie ja nicht.

GÜNTER: Hoch sind die Anfangsinvestitionen. Sie liegen für einen Fusionsreaktor vermutlich in der Größenordnung, die auch für ein Spaltungskraftwerk anfallen. Der Brennstoff kostet dagegen fast nichts. Experten schätzen, dass Strom aus Fusionsenergie künftig etwa so viel kosten wird wie der aus Windenergie und wahrscheinlich deutlich billi-

ger sein wird als der Strom aus Fotovoltaik, wenn man alle Aufwendungen für die Speicher und die Infrastruktur jeweils mit hineinrechnet.

Woher wollen Sie den Brennstoff beziehen? Insbesondere Tritium kommt auf der Erde ja nur sehr selten vor.

GÜNTER: Die Erstausrüstung mit Tritium muss aus Kernreaktoren kommen. Mittelfristig will die Fusion aber unabhängig von der Spaltung werden. Deswegen planen wir, das Tritium künftig von den Fusionsreaktoren erbrüten zu lassen. Dazu kleiden wir deren Innenwände mit Elementen aus, die aus angereichertem Lithium-6 bestehen und zusätzlich Neutronenvervielfältiger aus Blei oder Beryllium enthalten. Das ist simple Neutronenphysik. Sicherzustellen, dass genug Tritium erbrütet wird, ist dann nur noch eine Frage der Ingenieurskunst.

Einige Reaktorkomponenten werden hohen thermischen Belastungen ausgesetzt sein, außerdem werden sie unablässig durch energiereiche Neutronen bombardiert. Welche Materialien sollen das auf Dauer aushalten?

GÜNTER: Die meisten Materialien, die ein erstes Demonstrationskraftwerk benötigt, existieren bereits. Was noch entwickelt werden muss, sind die Komponenten, die ganz dicht am Plasma dran sind und sehr hohe Wärme- und Neutronenbelastung aushalten müssen. Kupfer wäre für die Wärmeableitung am besten geeignet, wird aber durch Neutronenbeschuss stark radioaktiv. Der Divertor, der sozusagen die heißen Abgase aus der Fusionsreaktion abführen soll, wird voraussichtlich aus hitzebeständigem Wolfram bestehen. Und das Reaktorgefäß fertigen wir wohl aus oxiddispersionsgehärtetem, ferritisch-martensitischem Stahl, der thermisch sehr hoch belastbar ist und seine Eigenschaften selbst unter starkem Neutronenbeschuss kaum einbüßt. In der Fusionsforschung arbeiten wir aber auch an neuen Materialien, die durch Neutronenbeschuss kaum radioaktiv werden. Doch das ist noch Zukunftsmusik.



Sibylle Günter ist seit Februar 2011 Wissenschaftliche Direktorin des Max-Planck-Instituts für Plasma-physik. Schon seit 2000 leitet sie dort die Abteilung Tokamaktheorie. Die theoretische Physikerin lehrt zudem an den Universitäten Rostock und München.

Sie haben bereits angedeutet, dass die Fusion nicht frei von Radioaktivität ist. Wie groß ist das Problem?

GÜNTER: Bemerkenswerterweise ist die Furcht vor Radioaktivität besonders in Deutschland groß. Die Leute gehen trotzdem zum Röntgen oder zur Computertomografie, ohne sich darüber Gedanken zu machen, oder setzen sich beim Fliegen freiwillig der Höhenstrahlung aus.

Zunächst einmal haben wir bei der Fusion keine radioaktiven Endprodukte. Daher gibt es keine langlebigen radioaktiven Abfälle. Außerdem fehlt die von den kurzlebigen radioaktiven Endprodukten erzeugte Nachwärme, die etwa beim Kraftwerk in Fukushima zur Kernschmelze geführt hat. Während des Kraftwerksbetriebs kann es auch nicht zu unkontrollierbaren Leistungsanstiegen kommen. Im Gegenteil: Bei der kleinsten Störung erlischt das Plasma, und die Neutronenproduktion hört schlagartig auf.

Tritium selbst hat eine Halbwertszeit von nur etwas mehr als zehn Jahren. Auch die Halbwertszeit der aktivierten Materialien in einem Fusionskraftwerk ist viel geringer als die der Abfallprodukte in einem Spaltungskraftwerk. In wenigen hundert Jahren sind die Stoffe schwächer radioaktiv als beispielsweise die Asche von Kohle. Wir gehen davon aus, dass das anfallende radioaktive Material nur rund 100 Jahre lang auf dem Kraftwerksgelände verwahrt werden muss.

Der Weg zum ersten Fusionskraftwerk ist lang. Werden Sie nicht manchmal ungeduldig ob des zähen Fortschritts? Lässt sich so überhaupt der Forschernachwuchs begeistern?

GÜNTER: Selbstverständlich geht auch mir manches zu langsam. Aber als Wissenschaftler ziehen wir unsere Befriedigung daraus, immer etwas Neues verstanden und erreicht zu haben. Und Fortschritte sind in der Fusionsforschung durchaus messbar. Ähnlich wie sich in der Computerindustrie die Anzahl der Transistoren pro Chip alle zwei Jahre verdoppelt, verdoppelt sich bei uns ein Parameter, der

unseren Erfolg misst. Er ist das Produkt aus Temperatur, Teilchendichte und Energie-Einschlusszeit, Letztere ein Maß für die Wärmeisolation. Dieser Wert hat sich seit den 1960er Jahren um den Faktor 100 000 erhöht. Bis zu einem Energie liefernden Fusionskraftwerk fehlt jetzt noch etwa ein Faktor fünf bis zehn. Die erste Anlage vom Tokamaktyp erreichte eine Temperatur von knapp drei Millionen Kelvin. Heute liegen wir bei 400 Millionen Kelvin. Natürlich haben wir damit noch kein Fusionskraftwerk. Aber wir arbeiten uns von Meilenstein zu Meilenstein voran. Und wenn Sie für ein so ambitioniertes Projekt eine Planung aufstellen, dann stellen Sie fest, dass 40 Jahre gar nicht so lang sind.

Der ITER ist daher eine sehr spannende Sache, insbesondere für den Nachwuchs. Seit die Entscheidung für den Bau gefallen ist, haben wir wieder deutlich mehr Studenten in den Vorlesungen. Die stört es nicht, dass er erst in etwa zehn Jahren in Betrieb gehen wird. Sie sehen, dass es vorangeht. Und jemand, der jetzt anfängt, kann noch alles gut miterleben.

Die internationalen Anstrengungen scheinen sich ja auf den ITER zu konzentrieren, bei dem das Tokamak-konzept verfolgt wird. Warum bauen Sie mit Wendelstein 7-X in Greifswald dennoch einen Stellarator?

GÜNTER: Ob der Tokamak das Rennen macht oder der Stellarator, ist heute schwer zu sagen. Der Tokamak hat momentan einen großen Vorsprung. Doch das Stellaratorkonzept ist sehr viel versprechend. Die Erfahrungen mit Wendelstein 7-X werden wir nutzen, um auch den Stellarator zu einem Kraftwerk weiterzuentwickeln. Erst dann können wir entscheiden, welche Technik sich schlussendlich am besten für ein Kraftwerk eignet. Ich kann mir auch vorstellen, dass beide Varianten zum Zuge kommen. Für Autos gibt es ja ebenfalls sowohl Diesel- als auch Benzinmotoren. Die Zukunft wird zeigen, welcher Weg der beste ist. ~

Das Gespräch führte **Gerhard Samulat**.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Energie«
finden Sie unter

www.spektrum.de/energie

axialsymmetrisch geformtes Magnetfeld setzen, machen sich zu Nutze, dass Plasma anfänglich ein sehr guter elektrischer Leiter ist. Um die Ladungswolke aufzuheizen, erhöhen sie einfach die Stärke des äußeren Magnetfelds. Ähnlich wie bei einem modernen Induktionsherd in einer Küche ruft dieses dann einen Heizstrom im Plasma hervor. Doch ist ein Strom stets eine Quelle freier Energie, was zu Instabilitäten im Plasma führt: »In einem Tokamak können innerhalb von Millisekunden Stromänderungen von einigen Megaampere auftreten«, sagt Max-Planck-Forscher Klinger. Dann kollabiert das Plasma, »es verschwindet wie eine Illusion«. Auch der Träger des Stroms ist damit weg, diesem wird »quasi der Teppich unter den Füßen weggezogen«, so Klinger.

Der unkontrollierte Zusammenbruch des Plasmastroms kann Komponenten der ersten Wand überhitzen. Das verkürzt deren Lebensdauer. Darüber hinaus können solche »disruptiven Instabilitäten« extreme mechanische Kräfte freisetzen. »Kollegen erzählen mir, dass der JET in Culham dabei schon mal ein Zentimeterchen hüpfen kann, obwohl er einige tausend Tonnen wiegt«, berichtet Klinger. Immerhin lässt sich diese Art von Plasmainstabilität durch zeitnahes Einblasen von Heliumgas in die Ladungswolke oder durch gezielten Beschuss mit Mikrowellen mildern oder gar unterdrücken.

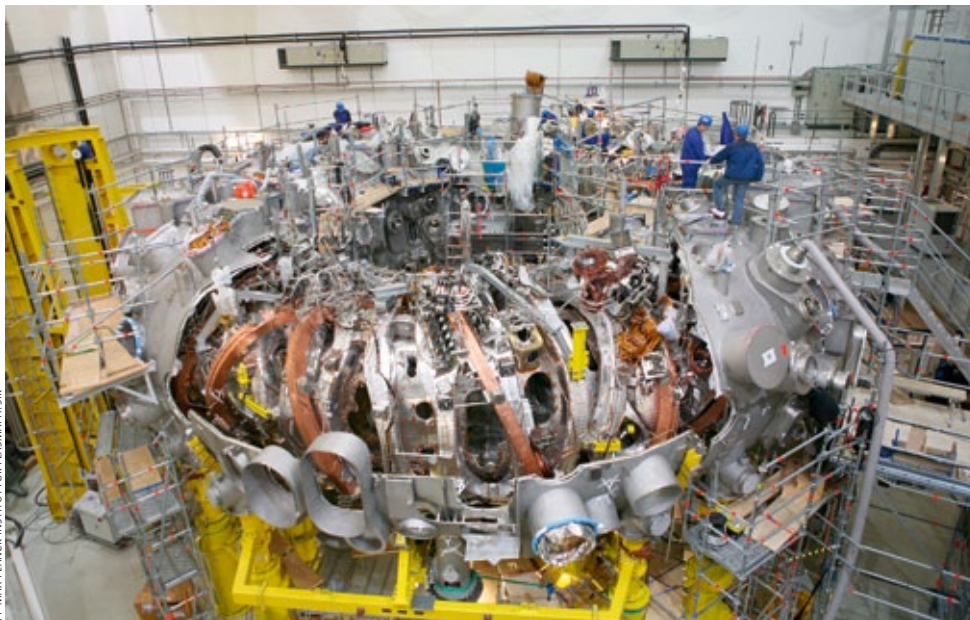
In Stellaratoren wird das Plasma dagegen ausschließlich durch Mikro- oder Radiowellen oder durch das Einschleusen

schneller neutraler Wasserstoffatome aufgeheizt. Dennoch sind auch hier Plasmainstabilitäten eine der größten Herausforderungen der Forscher. Die Ladungswolke verhält sich wie ein weicher Luftballon, den man versucht, mit den Händen zusammenzuquetschen: Je mehr man drückt, desto mehr sträubt sich das Plasma gegen den Einschluss. Es bildet Ausstülpungen, die immer wieder durch den Magnetkäfig schlüpfen und die inneren Komponenten des Plasmagefäßes stark belasten können.

Gewisse Turbulenzen sind jedoch sogar erwünscht, denn das Plasma kann dadurch Verunreinigungen auswerfen. Die Forscher versuchen die Wirbel so zu lenken, dass dies vorzugsweise an den Prallplatten der so genannten Divertoren geschieht, der hitzeresistenten »Mülltonnen« der Fusionskraftwerke. Da aber auch diese nicht zu heiß werden dürfen, horchen Mikrowellensensoren kontinuierlich ins Plasmagefäß, so wie ein Arzt seinen Patienten mit dem Stethoskop abhört. Aus den Signalen gewinnen die Experimentatoren ein Profil der Plasmadichte und können rasch reagieren, falls etwas aus dem Ruder zu laufen droht.

Einige der Instabilitäten lassen sich durch zusätzliche stromdurchflossene Spulen unterdrücken. Am Asdex-Upgrade-Reaktor in Garching sind kürzlich entsprechende Experimente durchgeführt worden. »Das funktioniert prächtig«, sagt Sibylle Günter, »die thermischen Belastungen der Platten haben messbar abgenommen.«

Es gibt aber noch ein weiteres Problem mit Tokamaks: Sie arbeiten gepulst. Das Plasma wird zunächst über ein ansteigendes, äußeres Magnetfeld erhitzt. Doch irgendwann ist der Maximalwert der Feldstärke erreicht. Nach einigen Minuten bis zu einer Stunde endet daher der Zyklus: Das Plasma erlischt, und alles beginnt von vorne. Die Dampferzeuger reagieren zwar ausreichend träge, um diesen Wechsel abzufangen. Die meisten Ingenieure sehen solch drastische Lastwechsel allerdings skeptisch, denn meist verkürzen sie



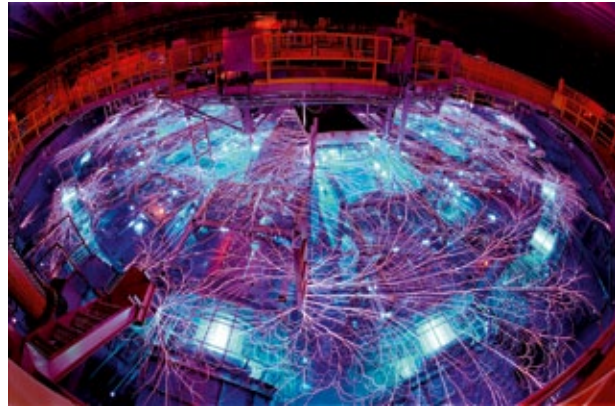
Allmählich nimmt Wendelstein 7-X seine endgültige Gestalt an. Dieses Foto lässt noch einen letzten Blick auf sein Inneres erhaschen. Im Dezember 2011 wurde dann das noch fehlende Stück der Außenhülle installiert.

IPP, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

Gibt es Alternativen?

Die ersten Entwürfe für Fusionsreaktoren entstanden Anfang der 1950er Jahre. Damals schätzte der amerikanische Physiker Lyman Spitzer von der Princeton University, sein »Stellarator« könnte 150 Megawatt Leistung aufbringen, genug für etwa 150 000 Haushalte. In der Sowjetunion entwarfen Andrej Sacharow und Igor Tamm 1952 dagegen den so genannten Tokamak.

Weitere Fusionskonzepte sind inzwischen hinzugekommen. An der National Ignition Facility (NIF), einer gigantischen Anlage in Kalifornien, wird ein Brennstoffkugelchen mit 192 Laserstrahlen beschossen. Darüber hinaus existieren neuere, weniger aufwändige Ansätze. In New Mexico arbeiten Forscher der Sandia National Laboratories am MagLIF-Konzept, bei dem ein von einer Röntgenquelle namens »Z Machine« (Foto rechts) erzeugter magnetischer Puls das Brennmateriale in einem kleinen Zylinder komprimiert und verschmilzt; schon 2013 hofft man auf den Break-Even-Point, will also mehr Energie freisetzen, als in die Zündung der Fusion gesteckt wird. Bei Helion Energy in Redmond, Washington, lässt man hingegen zwei extrem beschleunigte Plasmawolken miteinander kollidieren.



BRANDY MONTOWA, SANDIA NATIONAL LABORATORIES

Während ITER und Co. auf gut untersuchte Physik setzen, betreten diese Firmen allerdings wissenschaftliches Neuland; zudem ist ein gelungenes Fusionsexperiment noch lange kein Kraftwerk. Andererseits: Einem Durchbruch bei alternativen Konzepten hätten Tokamaks und Stellaratoren wenig entgegenzusetzen – jedenfalls nicht vor 2050.

die Lebensdauer einer thermisch arbeitenden Maschine beträchtlich. Sie hoffen deshalb, auch den Tokamak auf eine Art Dauerbetrieb umstellen zu können. Dazu könnten sie das Plasma, nachdem der Strom induktiv hochgefahren wurde, wie beim Stellarator durch elektromagnetische Wellen oder schnelle Teilchen erhitzen.

Weil die Fusionsforscher noch viele solcher Stolpersteine aus dem Weg räumen müssen, kann heute niemand sagen, ob und wann es gelingt, mit Kernfusion jemals wirtschaftlich Strom zu erzeugen. Die aktuellen Prognosen werden jedenfalls gern mit Häme überzogen. Vor gut 40 Jahren schätzten Fusionsforscher, dass sie die Sache in etwa 40 Jahren im Griff hätten. An der angepeilten Zeitspanne hat sich bis heute nichts geändert: Offensichtlich haben die Wissenschaftler ihr Können über- oder die zu bewältigenden Schwierigkeiten unterschätzt.

Überdies wird sich mit Macht die Kostenfrage stellen, auch wenn jegliche Kalkulation bislang mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Sicher scheint, dass Fusionsstrom teurer wird als Kohlestrom. Die Fusionskraftwerke werden technisch aufwändiger als Kernkraftwerke und unter Umständen doppelt so teuer. Allein der ITER kostet mit gut 15 Milliarden Euro etwa dreimal so viel wie ursprünglich geschätzt und wird selbst im Erfolgsfall noch keinen Strom ins Netz speisen. Bis es so weit ist, werden die beteiligten Länder noch mindestens 80 Milliarden Euro investieren müssen, wie das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag kalkuliert.

Welchen Anteil die Kernfusion im globalen Energiemix künftig für sich verbuchen kann, ist ebenso unklar. Fachleute beziffern ihn grob mit 10 bis 30 Prozent. Das ist etwa so viel,

wie heute die Kernkraft liefert. Ob sich Schwellen- oder Entwicklungsländer diese komplexe Technologie in absehbarer Zeit überhaupt leisten können, steht in den Sternen. Und in den Industrienationen ist in den kommenden Jahrzehnten nicht mit drastischen Steigerungsraten beim Energiebedarf zu rechnen. Angesichts dieser Perspektiven fragen sich deswegen mittlerweile viele, ob die Fusion überhaupt noch zeitgemäß ist. ~

DER AUTOR



Gerhard Samulat ist Diplomphysiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Wiesbaden. Für seinen Beitrag »Frische Brise« in SdW 2/2012 wurde er mit dem UMSICHT-Wissenschaftspreis des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik in der Kategorie »Journalismus« ausgezeichnet.

LITERATURTIPPS

Kernfusion – Stand und Perspektiven: Bericht des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik vom September 2011: www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/pdf/fusion_d.pdf
Nüchterne Übersicht mit interessanten Fakten
ITER – Jahresbericht 2011: www.iter.org/doc/all/content/com/Lists/depts_legacy/Attachments/13/annual%20report%202011.pdf
Detaillierte Hochglanzbroschüre

WEBLINKS

www.ipp.mpg.de/ippcms/de/externe_daten/panorama/
Interaktives 360-Grad-Panorama von ASDEX Upgrade

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168627

Weihnachtliche Reflexionen

Ordnet man spiegelnde Glaskugeln in Tetraederform an, tauchen in den fraktalen Reflexionsmustern unendlich viele »Weihnachtsbäume« auf.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Weihnachtsbäume sind nicht mehr das, was sie einmal waren. Wachs- und Stearinkerzen weichen zunehmend elektrischen Leuchten, Lametta aus schweren Stanniolstreifen ist weitgehend verschwunden, und sogar Baumschmuck aus Kunststoff trifft man an. Nur die guten alten Weihnachtskugeln aus Glas haben allen Trends widerstanden. Was macht den Reiz dieser zerbrechlichen Objekte aus?

Forschen wir ihm nach und stellen uns ein weihnachtlich geschmücktes Zimmer vor. Eine verspiegelte Kugel, so kann man sich leicht überlegen, bildet den gesamten Raum ab – bis auf den kleinen Bereich, den sie selbst verdeckt. In ihrem kleinen Volumen nimmt sie die vielen Lichtquellen im Raum auf und sendet ihr Licht sphärisch konzentriert wieder aus. Wenn es sich dann mit den Reflexionen der anderen Ku-

geln multipliziert, erwächst den Originallichtern ernsthafte Konkurrenz.

Überdies hat der »Rundumblick« der Kugeln eine fast philosophisch zu nennende Konsequenz: Man kann sie nicht betrachten, ohne sich gleichzeitig selbst zu sehen. Der Künstler Maurits Cornelis Escher (1898–1972), der ein ausgeprägtes Gespür für solche Überraschungen und scheinbaren Paradoxien des Alltags hatte, schuf auf diese Weise ein raffiniertes Selbstporträt (unten). Darauf hält er eine verspiegelte Kugel vor sich und betrachtet sein eigenes Kontertfei. Fast alles an dieser Lithografie wirkt wie ein Abbild der Wirklichkeit, etwa die sphärischen Verzerrungen des Raums und die gespreizten Finger, die an der Oberfläche der Kugel auf ihre Spiegelungen treffen. Doch was ist mit Escher selbst? Müsste der Künstler auf dieser so entschieden realistischen Darstellung nicht die Zeichenfeder in der Hand halten?

Die Merkwürdigkeit lässt sich noch steigern. Betrachten wir goldgelbe Weihnachtskugeln, die in einem Korb liegen und sich mit filigranen Girlanden zu schmücken scheinen (oben). Doch in Wirklichkeit handelt es sich um »nackte«, undekorierte Kugeln. Jede spiegelt das, was sie von den anderen Kugeln »sieht«, und zeigt es als sphärisch ge-

Fast alles an dieser Lithografie von Maurits Cornelis Escher wirkt wie ein genaues Abbild der Wirklichkeit. Doch wenn das Bild wirklich eine reale Situation darstellen würde, müsste der Künstler mit der Zeichenfeder in der Hand zu sehen sein.

Das Licht treibt sein lachendes Spiel an der Oberfläche der Dinge.

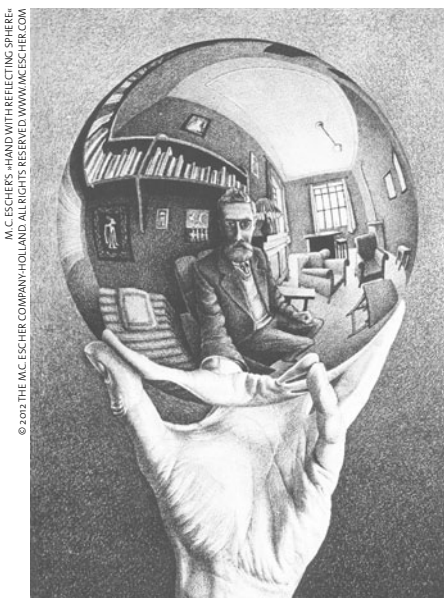
Gaston Bachelard (1884–1962)



Weihnachtskugeln mit Girlanden? Der Eindruck täuscht, tatsächlich sind die Kugeln »nackt«. Ihr vermeintlicher gelber Schmuck ist Folge vielfacher Lichtreflexionen, bei denen nichtgelbe Wellenlängen nach und nach absorbiert wurden.

krümmter Spiegel verkleinert. Da die gespiegelten Kugeln ihrerseits alle Kugeln in »Sichtweite« reflektieren und deren Bilder gewissermaßen in sich tragen, werden auch diese Reflexe mit reflektiert. Die Angelegenheit erweist sich als selbstbezüglich: Die Kugeln spiegeln ihre Spiegelbilder in den gespiegelten Kugeln, die ebenfalls die gespiegelten Kugeln mit Spiegelbildern spiegeln und so weiter ad infinitum. Solche selbstähnlichen Strukturen werden als Fraktale bezeichnet; in der Natur entdeckt man sie etwa in der Verästelung von Flüssen und ihren Einzugsgebieten oder im Verlauf von Küstenlinien.

Die Intensität des Girlandengelbs schwankt dabei von fast farblos bis zu einer kräftigen Tönung. Dort, wo sie keine anderen Kugeln spiegelt, erscheint die Oberfläche in der Farbe der hellen weißen Halogenlampe, die sie anleuchtet; ihre goldgelbe Pigment-



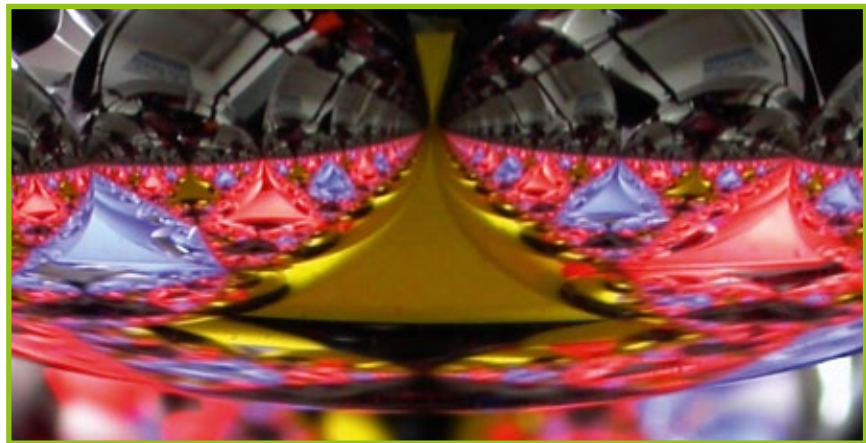
M.C. ESCHER'S "HAND WITH REFLECTING SPHERE".
© 2012 THE M.C. ESCHER COMPANY/HOLLAND. ALL RIGHTS RESERVED. WWW.MCESCHER.COM

farbe wird schlicht überstrahlt. Doch gelbe Pigmente zeichnen sich dadurch aus, dass sie alle anderen Farben in einem gewissen Maß absorbieren. Gelb ist die einzige Farbe, die auch nach vielen Hin- und Herspiegelungen nicht oder zumindest kaum geschluckt wird. Wo andere Kugeln in Sichtweite liegen, entsteht also letzten Endes ein fraktal abgestuftes Gelb, dessen Intensität der Zahl der vorangegangenen Reflexionen entspricht.

Verringern wir nun die Komplexität des Systems. Dazu ordnen wir vier Kugeln in dichtester Packung an und fixieren den entstandenen regelmäßigen Tetraeder mit Klebeband. Außerdem reduzieren wir die vielen Lichtquellen auf genau eine: einen Laserpointer (Vorsicht: nicht auf die Augen richten!). Nun können wir das Verhalten eines einzelnen Lichtstrahls verfolgen.

Diesen schicken wir in Richtung der Mitte einer uns zugewandten Kugel und lassen ihn dann allmählich seitwärts wandern. Anhand eines weißen Kartons, mit dem wir die reflektierten Strahlen auffangen, können wir überprüfen, dass dicht nebeneinander einfallende Strahlen auch nach ihrer Reflexion weiterhin benachbart verlaufen – ein Kennzeichen der linearen Physik, in der fast gleiche Anfangsbedingungen stets zu fast gleichen Endergebnissen führen. Je weiter der Strahl aber wandert, desto größer ist der Winkel, unter dem er auf die Kugel trifft, und desto weiter entfernt sich der reflektierte Strahl vom einfallenden – bis er schließlich nicht mehr zurückkehrt, sondern zur nächsten Kugel springt. Jetzt schlagen also auch eng benachbarte Strahlen völlig verschiedene Wege ein. Wenn dann noch die dritte oder vierte Kugel vom Hin und Her der Lichtstrahlen erfasst wird, können diese sehr vertrackt werden.

Im Normalfall wird unser Tetraeder allerdings von diffusem Licht beleuchtet; dann sehen wir lediglich ein komplexes Lichtmuster; in der nichtlinearen Physik wird es nach dem Japaner Takeo Wada als Wada-Bassin bezeichnet. Die Wege einzelner Lichtstrahlen darin scheinen unerforschlich – es sei



ALLE DREI FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Man setze vier Weihnachtsbaumkugeln zu einem pyramidenförmigen Tetraeder zusammen und begrenze drei seiner vier Seiten durch Kartons verschiedener Farbe (Bild rechts). Dann sieht man, wie jeder Karton die Lücke zwischen den drei ihm zugewandten Kugeln als »Weihnachtsbaum« (oben, Bildausschnitt) auf die jeweils vierte Kugel projiziert. Weitere Spiegelungen lassen ein fraktales Muster entstehen.



denn, wir bedecken drei der vier Begrenzungsflächen des Tetraeders mit unterschiedlich gefärbten Kartons. Dann fungiert jeder Karton als Lichtquelle, deren Farbe wir im Reflexionsmuster wiederentdecken können. Doch nicht nur das: Plötzlich zeigen sich auch »Weihnachtsbäume« in allen Farben und Größen (oben)!

Wie kommen sie zu Stande? Von jeder Farbfläche aus fällt Licht durch die Lücke zwischen den drei ihr zugewandten Kugeln. Dieses Licht bildet auf der jeweils vierten Kugel die dreieckige Grundstruktur der Weihnachtsbäume. Die drei größten Bäume entstehen, wenn das Licht danach ohne weitere Umwege ins Auge gelangt; Mehrfachreflexionen führen hingegen zu immer kleineren Bäumchen oder lassen größeren Bäumchen »Zweige« wachsen. Weil sich Umgebungslight in das Muster mischt, ist der Beobachter übrigens ebenfalls Teil des Geschehens, auch wenn das bereits nach zweifacher Reflexion nicht mehr zu erkennen ist.

In dieses fraktale Netzwerk von Weihnachtsbäumen könnten wir immer weiter hineinzoomen und bekämen jedes Mal ein ähnliches Bild zu sehen. In der

Praxis stoßen die Zooms allerdings schon nach wenigen Größenordnungen an eine Grenze, denn die Oberfläche der Kugeln ist nicht perfekt. Zum einen absorbieren sie bei jeder Reflexion eben doch einen winzigen Teil des Lichts. Zum anderen ist der Spiegel nicht vollkommen glatt, so dass er das reflektierte Licht nach einigen Reflexionen in unvorhersehbare Richtungen aussendet. In der Theorie jedoch entstehen dort, wo verspiegelte Kugeln aneinander grenzen, selbstähnliche Muster unendlicher Tiefe. ~

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.

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168628

Goldene Zeiten am Limes

Bronzestatuen von Kaisern und Göttern signalisierten Roms Macht auch am Rand des Imperiums. Die Überreste dieser Zeugnisse antiken Kunsthandwerks werden seit Kurzem untersucht. Dabei überrascht die Forscher vor allem die Vielfalt der eingesetzten Vergoldungstechniken.

Von Kati Bott, Frank Willer und Susanne Willer

»Der höchste Lohn des Kaisers sind die Lobpreisungen, sein überall vorhandener Ruf, die Anbetung, die ihm für seine Wohltaten zuteilwird; die Statuen und Tempel und heiligen Bezirke, die er bekommt, sind sein Lohn für seine Sorge und seine Voraussicht.«
(Lukian, Apologie 13)

Wo Rom herrschte, waren weder seine Kaiser noch seine Gottheiten fern: Auf den Foren der Städte wie in den Militärlagern zeigten bronzene Statuen des Herrschers und seiner Familie eindrucksvoll, wer im Reich das Sagen hatte. Zahlreiche Götterbildnisse schmückten die Tempel und Heiligtümer, manche als Kultbild errichtet, andere als Votivgaben gestiftet – zu Ehren der Gottheit und als Dank für erbetene Hilfe.

Auch die Kastelle und zivilen Siedlungen nördlich der Alpen machten da offenbar keine Ausnahme. Mehr als 4000 bronzene Fragmente legen davon ein beredtes Zeugnis ab, ausgegraben in einem Gebiet, das von der Schweiz über Deutschland bis in die Niederlande reicht (siehe Karte S. 72).

AUF EINEN BLICK

EIN PUZZLE AUS 4000 TEILEN

1 Die **Kunst des Bronzegusses** war im Römischen Reich hoch entwickelt. Lebens- bis überlebensgroße Kaiserstandbilder und Götterstatuen wurden sogar in Serie gefertigt – doch nur wenige Exemplare haben die Zeiten überdauert.

2 Mehr als 4000 Fragmente solcher Großbronzen vom Limes beziehungsweise dem Limeshinterland werden derzeit systematisch erfasst und untersucht. Neben kulturgeschichtlichen Fragen gehen die Forscher auch **Fragen der Herstellungstechnik** nach.

3 Einige Statuen waren vergoldet. Neben der **Blattvergoldung** lässt sich in Einzelfällen der Einsatz von **Feuer-** oder **Diffusionsvergoldung** nachweisen, obwohl die verwendeten Bronzelegierungen dafür nicht geeignet waren. Doch bereits mit damaligen Mitteln ließ sich das Problem lösen, wie Experimente zeigen.

Oft wenig ansehnlich, lagerten sie unbeachtet in gut 90 Museen und Archiven: die Überbleibsel kunstvoller Großbronzen. Als marodierende Germanen im 3. Jahrhundert die Nordwestprovinzen Roms heimsuchten, wurden viele Bronzen erbeutet und zerschlagen, andere von Römern selbst als Altmetall wiederverwertet. Mitunter galt es aber auch, die »damnatio memoriae« umzusetzen, die der römische Senat über einen in Ungnade gefallenen Kaiser verhängt hatte: Inschriften, die an ihn erinnerten, wurden getilgt und seine Bildnisse zerstört – ein heute noch praktiziertes Verfahren, um das Gedenken an einen verhassten Machthaber auszulöschen. Zu den römischen »Opfern« dieser Praxis zählten unter anderen Caligula, Nero oder auch Alexander Severus.

Seit 2010 untersuchen Archäologen, Restauratoren und Naturwissenschaftler »Römische Großbronzen am UNESCO-Welterbe Limes«, so der Name des Projekts. Es weist weit über sein Untersuchungsgebiet hinaus, denn auch andernorts haben Großbronzen die Antike nur selten überdauert – zu wertvoll war das Metall. Das Reiterstandbild des Kaisers Marc Aurel (siehe Bild rechts) ist ein seltener Glücksfall: Es galt im Mittelalter als Abbild Konstantins des Großen, des Förderers christlicher Religion, und entging dem Einschmelzen.

Sämtliche Teilstücke aus dem Limesgebiet und seinem Hinterland werden nun dokumentiert und in einer Online-datenbank erfasst. Sie stammen von mehr als 120 Fundplätzen. Etwa 150 Fragmente ließen sich bislang Götterbildnissen zuordnen, der große Rest gehört mutmaßlich zu Kaiserdarstellungen. Neben der Rekonstruktion der Statuen sollen auch deren Aufstellungsorte, Funktionen und Auftraggeber ermittelt werden. Außerdem wollen die Forscher neue Einsichten in die antiken Fertigungstechniken bis hin zur Lokalisierung und Organisation der Werkstätten gewinnen. Dazu kooperieren das Archäologische Landesmuseum Baden-Württemberg (ALM), das Institut für Archäologische Wissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt und das LVR-LandesMuseum Bonn, unterstützt durch eine große Anzahl von Projektpartnern an Museen, Universitäten und spezialisierten Forschungsinstituten.

Reste bronzenener Kaiserbilder konnten in beinahe jedem Limeskastell nachgewiesen werden. Noch erhaltene Sockel verraten: Diese Bildnisse standen in den Höfen der Stabsgebäude, nicht in Tempeln. Sie sollten ihn demnach ehren, hatten also keine Funktion im Kaiserkult und entsprachen damit den von der Bevölkerung gestifteten Kaiserstatuen auf den Foren der Städte. Ehrenstatuen in den Militärlagern gaben die jeweiligen Einheiten beziehungsweise deren Offiziere in Auftrag. Sie symbolisierten Treue und Loyalität gegenüber dem Herrscher als Oberbefehlshaber der Armee. Möglicher Anlass einer Errichtung konnte ein Festtag sein wie die Erneuerung des Treueeids an den Kaiser an jedem 3. Januar, aber auch ein Besuch des Herrschers. Als Caracalla im Jahr 213 die Heerlager am Limes inspizierte, wurden wohl nicht nur Straßen erneuert und Ehrenbögen gebaut, wie es überliefert ist – auch Bronzegießer hatten vermutlich alle Hände voll zu tun.

Deren Geschick äußerte sich nicht allein in der Gestaltung und Formung der lebensgroßen, manchmal noch größeren Figuren, die aus Einzelteilen aufgebaut wurden; daher sind die eingesetzten Guss- und Fügeverfahren ebenfalls ein Thema des Forschungsprojekts. Zudem erwiesen sich die Handwerker am Rand der römischen Welt auch in der Vergoldung als Meister ihrer Kunst.

Die ältesten bekannten Zeugnisse derart aufgewerteter Statuen stammen aus dem Rom des 2. Jahrhunderts v. Chr. Gold galt in der Antike als Symbol der Unsterblichkeit und unterstrich damit, dass der Dargestellte nicht der menschlichen Sphäre angehörte. Zudem war eine Vergoldung – ebenso wie Einlagen verschiedenfarbiger Metalle – ein künstlerisches Mittel, um ein Standbild lebendiger wirken zu lassen.

Das galt auch am Limes: Gut 500 der mehr als 4000 untersuchten Frag-

Dieses Reiterstandbild wurde Marc Aurel (hier die Kopie auf dem Kapitolsplatz in Rom) vielleicht 166 n. Chr. anlässlich seines Sieges über die Parther gestiftet. Es gehört zu den wenigen vollständig erhaltenen Großbronzen.



MARIE-LAN NGUYEN / PUBLIC DOMAIN [M]

mente weisen Reste einer Vergoldung auf. Einige davon lassen sich sehr genau nach Form und Bildsprache den Körperpartien bestimmter Statuentypen zuordnen. Weil in keinem Fall Übergänge vom Gold zu unvergoldeten Partien zu erkennen sind, gehen die Forscher von einer vollständigen Vergoldung aus.

An einer Auswahl von 22 Stücken erlaubten die Eigentümer die Entnahme von Proben. Diese wurde jeweils angeschliffen und am Curt-Engelhorn-Zentrum für Archäometrie in Mannheim mit einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Bei 17 Stücken hatten sich die Bronzehandwerker offenbar der Blattvergoldung bedient, einer noch heute gebräuchlichen und besonders einfachen Vorgehensweise: Ein Anstrich mit Öl, Harz, Wachs oder Eiweiß lässt eine hauchdünne Goldfolie allein auf Grund der Adhäsionskräfte haften und verklebt sie zudem mit der Oberfläche. Anschließend wird sie poliert, um Falten und Übergänge zwischen den einzelnen Goldblättern auszugleichen. So entsteht nach und nach eine geschlossene Schicht. Deren Dauerhaftigkeit hängt von der akkuraten Ausführung und der Klebekraft des Anlegemittels ab. Damals wie heute gilt: Unachtsame Handhabung einer so vergoldeten Statue haben leicht Kratzer und Abrieb zur Folge.

Das gilt auch für die Or-haché-Technik (nach französisch: »or« für Gold und »hacher« für hacken), die antike Schriftquellen für römische Provinzen nördlich der Alpen erwäh-

nen. Diese Technik basiert auf einer rein mechanischen Verbindung ohne Klebemittel. Dazu wurde die Bronze aufgeraut und auf mindestens 70 Grad Celsius erhitzt, was sie auf Grund von Oxidationsprozessen farbig anlaufen ließ. Anschließend wurde Blattgold regelrecht in die raue Oberfläche hineinpoliert, und das weiche Edelmetall verzahnte sich mit der Bronze. Der Anlauffton aber schimmerte durch, was die Statue natürlicher wirken ließ. Leider lässt sich diese Technik heute kaum nachweisen, denn im mikroskopischen Anschliffbild sieht eine Jahrhunderte im Boden gelagerte, korrodierte Bronze nicht anders aus als eine, die durch Hitze oxidiert ist. An einem Fragment einer Jupiterstatue aus Mainz ist es kürzlich gelungen: Die Riefen der aufgerauten Bronze hatten sich in der Folie durchgedrückt. Ein Beispiel für ein mutmaßlich im Or-haché-Verfahren vergoldetes Reiterstandbild ist die des Kaisers Marc Aurel.

Problematische Feuervergoldung

Die dritte in der Antike gut bekannte Technik war die Feuervergoldung. Mit einem Pinsel trug der Handwerker zunächst eine breiige Legierung aus Gold und Quecksilber auf. Danach erhitzte er das Stück, allerdings nicht über offenem Feuer, wie der Name suggeriert, sondern vermutlich über glühender Holzkohle. Das Quecksilber verdampfte nun weitgehend, diffundierte aber auch teilweise in die Bronze hinein



Wo Rom seine Herrschaft errichtet hatte, durften die Symbole von Macht und Reichtum nicht fehlen. Mehr als 4000 bronzene Statuenfragmente von gut 120 Fundplätzen von der Schweiz bis zu den Niederlanden geben davon Zeugnis.

Kaiser oder Gott? Aus Tausenden von Teilen die ursprünglichen Standbilder zumindest annähernd wieder zusammzusetzen, dürfte selbst Puzzlemeister überfordern (im Bild eine Auswahl der über 1000 Fragmente, die im Kastell Aalen ausgegraben wurden).



ARCHAEOLOGISCHES LANDESMUSEUM BADEN-WÜRTTEMBERG

und nahm dabei sozusagen Goldatome mit. Anschließend wurde die noch raue Beschichtung auf Hochglanz poliert. Tatsächlich lässt sich diese Methode anhand von Quecksilberspuren an einem Armfragment aus dem Bestand des Akademischen Kunstmuseums Bonn (siehe Bild S. 74 oben) sowie einem Statuenfragment aus Dorsten analytisch nachweisen. Das Rasterelektronenmikroskop zeigt im Anschliffbild nun nicht mehr getrennte Metallschichten wie bei der Blattvergoldung und dem Or-haché-Verfahren, sondern eine diffuse Übergangszone (siehe Bilder S. 75).

Zwar verbrauchte die Feuervergoldung mehr Edelmetall, doch die resultierende Oberfläche vertrug Reibung oder Stößen dank der festeren Verbindung der Metalle weit besser. Für große Statuen war sie aber dennoch kaum gebräuchlich, und das aus gutem Grund: Etwa ab dem 1. Jahrhundert v. Chr. gaben römische Bronze gießer der Legierung im Lauf der Zeit bis zu 30 Prozent Blei zu. Das erlaubte den Guss dünnwandiger Statuen, sparte damit teures Kupfer und Zinn und ermöglichte die Herstellung von Serien. Zudem waren bleihaltige Bronzen weniger zäh, Verzerrungen ließen sich daher am erkalteten Metall leichter herausmeißeln. Für die Feuervergoldung aber taugte das Material nicht, weil dabei eine fleckige, graue Oberfläche entstand. Der Schmelzpunkt von Blei liegt nämlich weit unter dem einer Kupfer-Zinn-Legierung – das Schwermetall reagiert deshalb als Erstes mit der Goldlegierung. Eine Blattgoldreparatur bei dem erwähnten Oberarmfragment (siehe Bild S. 75, Mitte) sollte möglicherweise eine solche hässliche Stelle kaschieren.

Eine Überraschung bot ein großes Fragment aus dem Rücken einer männlichen Statue, deren offenkundige Nacktheit dafür spricht, dass es sich um eine Gottheit wie Jupiter, Mars oder Merkur gehandelt haben dürfte. Das Stück war gemeinsam mit anderen in einer alamannischen Siedlung aus dem 3. bis 5. Jahrhundert vergraben worden; eventuell sollte auf

diese Weise Raubgut aus römischen Militärlagern vor dem Zugriff Dritter geschützt werden. 1998 kam dieses Metalldepot bei Ausgrabungen des Hessischen Landesamts für Denkmalpflege in der Nähe von Groß-Gerau zum Vorschein.

Das Rasterelektronenmikroskop enthüllte eine verwachsen wirkende Übergangszone der Vergoldungsschicht mit der Bronze, wie sie typisch für eine Verbindung ist, die durch Diffusion der verschiedenen Metalle in das jeweils andere Metallgitter entsteht. Tatsächlich ist eine solche Technik aus römischer Zeit bekannt, doch nach bisherigem Wissen diente sie vorwiegend der Veredelung von Silberoberflächen. Wie bei dieser wurde dabei das Grundmetall zunächst leicht angeschliffen, dann eine Goldfolie mit einem Stein daraufpoliert und so eine erste mechanische Verbindung erzielt. Daran schloss sich eine Phase der Erwärmung an, um den Austausch von Metallatomen zu fördern.

Antike Vergoldungstechniken im Experiment

Wie beim Silber, so funktionierte diese Technik wohl auch bei Bronzelegierungen. Dabei entstanden neben diffusen Zonen, in denen Gold in die Bronze und Kupfer aus der Bronze in das Gold wanderten, regelrechte Diffusionsfinger: Das Rasterelektronenmikroskop zeigt Goldzonen, die fingerartig weit in das Gefüge des Grundmetalls hineinragen. Gegenüber der Blattvergoldung und der Or-haché-Technik ergab sich also nicht nur eine physikalisch-mechanische, sondern zudem eine chemische Verbindung.

Dass diese Diffusionsvergoldung auch bei Bronzen eingesetzt wurde, überrascht dennoch. Denn zum einen neigt der Legierungsbestandteil Kupfer oberhalb von etwa 70 Grad Celsius zur Oxidation. Da Kupferoxid sich nicht wie ein Metall verhält, steht es zum anderen für den gewünschten Austausch mit dem Gold nicht mehr zur Verfügung. Am



Spuren von Quecksilber an diesem Oberarmfragment verraten, dass diese Statue feuervergoldet wurde. Das Anschliffbild (rechte Seite, mittleres Bild) offenbart zudem eine Blattgoldreparatur.

LVR-LandesMuseum Bonn wurden deshalb die Möglichkeiten der antiken Handwerker Schritt für Schritt an eigens nach damaliger Zusammensetzung hergestellten Bronzeplättchen überprüft. Es zeigte sich, dass es möglich war, mit einer Schicht aus Holzkohlepulver und Olivenöl die Zufuhr von Luftsauerstoff und somit die Oxidation während der Wärmephase zu unterbinden. Danach folgte ein weiteres Polieren der Goldschicht. Diese Kombination von Temperatur unter reduzierenden Bedingungen mit anschließender Druckpolitur lieferte im Anschliff Ergebnisse, die mit dem Originalbefund aus Groß-Gerau vergleichbar sind.

Ein Rätsel aber blieb: Es fehlten die von der Feuervergoldung bekannten – und unerwünschten – Zeichen einer Reaktion mit dem Blei, obwohl das im Inneren des Bruchstücks nachgewiesen wurde. Für die Limesregion im 2. bis 3. Jahrhundert n. Chr. wurde daher im Rahmen des Projekts die Zusammensetzung von 200 Proben bestimmt; weitere 300 sol-

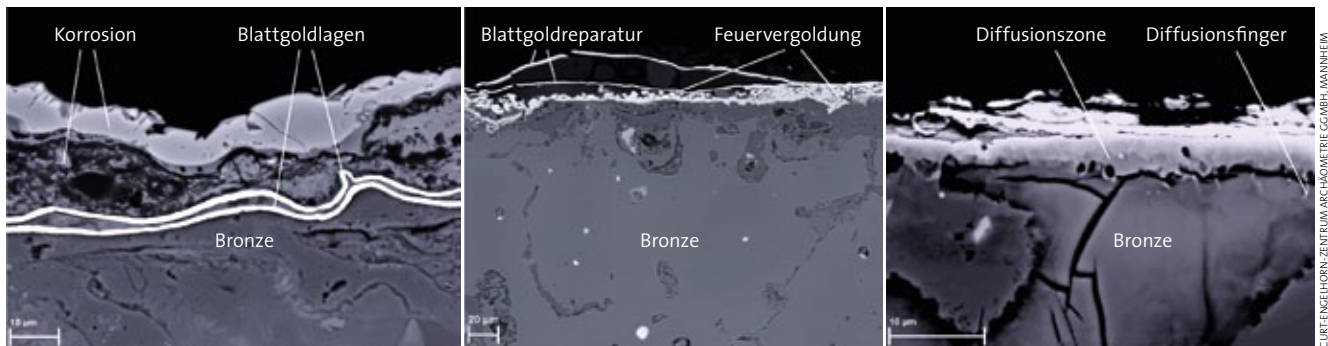
len folgen. Im Durchschnitt enthielt die Bronze demnach 22 Prozent Blei, abweichende Rezepturen wurden ebenfalls getestet. Entsprechend dem Originalfund erfolgte der Auftrag einer Goldfolie von drei Mikrometer Stärke mit einem Polierstein (zum Vergleich: Heutiges Blattgold ist 0,125 Mikrometer dick). Geschah das auf einer glatten Oberfläche, haftete sie kaum, auf aufgerautem Grund hingegen ergab sich die erwartete mikroskopisch feine, mechanische Verzahnung. Die Proben wurden in mehrere Einheiten geteilt, bei unterschiedlichen Temperaturen von 100 bis 450 Grad Celsius, unter oxidierenden sowie unter reduzierenden Bedingungen erhitzt und dann in heißem Zustand erneut poliert.

Das der Legierung zugegebene Blei wird nicht in das Metallgitter eingebaut, sondern bildet feine, gleichmäßig verteilte Tröpfchen. Bereits oberhalb von 150 bis 200 Grad Celsius beginnen sich diese mit dem Gold zu verbinden, und an der Oberfläche entstand daher der unerwünschte silbergraue Schleier. Je höher die Temperatur war und je mehr Luftsauerstoff an das Material gelangte, desto eher neigte das Kupfer zur Oxidation. Nur an Proben mit geringen Bleigehalten und bei Erhitzen unter Sauerstoffabschluss zeigte das Rasterelektronenmikroskop schließlich Übergangszonen mit Diffusionsfingern.

Weitere Versuche ergaben, dass Diffusion an bleihaltiger Bronze durchaus möglich ist, weil das störende Metall nicht direkt in das Legierungsgitter eingebaut ist, sondern in Form winziger Einschlüsse vorliegt. Gelingt es, solche Tröpfchen nahe der Oberfläche – also in ein bis fünf Mikrometer Tiefe – zu entfernen, kann der unschöne Schleier nicht entstehen. Eher zufällig kam heraus, dass es genügt, die Bronze zu erhitzen und in Wasser abzulöschen. Dann oxidiert ein Teil des oberflächennahen Bleis, und die Einschlüsse lassen sich mit Bimsstein und Wasser abreiben. Restliche Tröpfchen können



Alamannen hatten vor mehr als 1500 Jahren Metallstücke aus römischen Statuen beim heutigen Groß-Gerau versteckt. Restauratoren befreiten die Teile im Labor des LVR-LandesMuseums Bonn von den Korrosionsschichten (unten). Besonders die Vergoldung des großen Rückenfragments (links außen) gibt Rätsel auf.



Das Rasterelektronenmikroskop bringt es ans Licht: Im Anschliff der Metallproben können Experten die verschiedenen Vergoldungstechniken unterscheiden. So bleibt nur aufpoliertes Blattgold sauber von der Bronze getrennt (links), während bei der Feuer- und der Diffusionsvergoldung (Mitte und rechts) Übergangszonen entstehen.

mit Zitronensäure ebenfalls oxidiert und dann mechanisch entfernt werden, anschließend wird die Säure mit Wasser neutralisiert und abgespült, dann erneut gebürstet. Ob die römischen Handwerker diese Technik kannten, müssen weitere Untersuchungen ergeben. Zwar zeigt das Mikroskopbild tatsächlich leere Kavernen an Stelle der Bleitropfchen, doch die könnten auch beim Anschleifen der Probestücke entstanden sein.

Der hohe Aufwand hätte sich jedenfalls gelohnt: Eine Diffusionsvergoldung wäre wesentlich haltbarer als eine Blattvergoldung gewesen, was die Folgekosten einer Pflege verringert hätte. Darüber hinaus gab es sicher gestalterische Gründe. Griechische wie römische Kunsthandwerker veredelten ihre Werke durch künstlich erzeugte Patina. Diese »stabile Korrosion« versiegelte das Metall. Überdies versuchten sie, durch Einlegearbeiten aus andersfarbigen Metallen bestimmte Farbwirkungen zu erzielen oder Kontraste zu unterstreichen. Mit der Diffusionsvergoldung am Originalbefund ließ sich ein rötlich brauner Farbton erreichen, der in der Rückenpartie eines unbedeckten, athletisch anmutenden Oberkörpers naturalistisch wirken mochte – und gleichzeitig beständiger war, als es die Blattvergoldung oder eventuell eine Or-haché-Technik vermochte. Zudem erlaubt die Diffusionsvergoldung eine präzisere Wiedergabe von Oberflächenstrukturen, da im Gegensatz zur Blattvergoldung keine organischen Anlegemittel als Zwischenschicht erforderlich sind.

Andere Fragmente aus dem Metalldepot von Groß-Gerau waren mit hellgelbem Blattgold belegt. Falls sie vom gleichen Beutezug stammten, könnten an dem Ort des Überfalls Statuen gestanden haben, die durch unterschiedliche Vergoldungstechniken verschieden gestaltet worden waren.

Dass das Rückenfragment kein Einzelfall war, darauf deuten inzwischen auch Beispiele aus einem römischen Heiligtum bei Kalkar am Niederrhein und dem spätrömischen Reiterkastell bei Isny im Allgäu hin, die möglicherweise Diffusionszonen in den Anschliffen zeigen – die genaue Untersuchung steht noch aus. Entstand also nördlich der Alpen eine innovative Vergoldungstechnik, die sich aber nicht weiter im Reich verbreitet hat? Das erscheint wenig überzeu-

gend, denn ein Kennzeichen römischer Ökonomie war es, dass lokal oder regional produzierte Waren und Techniken im gesamten Imperium verbreitet wurden. Lässt sich die Diffusionsvergoldung also vielleicht auch an Statuen aus anderen Provinzen beziehungsweise aus dem italischen Kernland nachweisen? Wenn die Ergebnisse des Projekts ab März 2014 in einer Ausstellung im LVR-LandesMuseum Bonn vorgestellt werden, hoffen die Forscher, auch diese Frage beantworten zu können. ~

DIE AUTOREN



Kati Bott (links) ist als archäologische Restauratorin im Landesamt für Denkmalpflege in Stuttgart tätig; sie hat im

Rahmen ihrer Diplomarbeit am Projekt mitgearbeitet. **Frank Willer** (Mitte) ist archäologischer Restaurator am LVR-LandesMuseum Bonn. Er leitet die archäometrischen und herstellungstechnischen Untersuchungen innerhalb des Forschungsprojekts. Die promovierte Archäologin **Susanne Willer** ist wissenschaftliche Referentin für Provinzialrömische Archäologie im LVR-LandesMuseum Bonn und Mitglied der Projektleitung. »Römische Großbronzen am UNESCO-Welterbe Limes« wird im Rahmen der Förderinitiative »Forschung in Museen« von der VolkswagenStiftung finanziert.

QUELLEN

Drayman-Weisser, T. (Hg.): Gilded Metals, History, Technology and Conservation. Archetype Publications, London 2000
Kemkes, M., Sarge, C.: Gesichter der Macht. Kaiserbilder in Rom und am Limes. Konrad Theiss, Stuttgart 2009
Lahusen, G., Formigli, E.: Römische Bildnisse aus Bronze-Kunst und Technik. Hirmer, München 2001
Lahusen, G.: Römische Bildnisse. Auftraggeber. Funktion. Standorte. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2010

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168630

Die Vermessung des Glücks

Ökonomen suchen nach einem neuen Verständnis von Lebensqualität und Wohlstand. Sie überraschen dabei mit neuen Einsichten, die aber mit Vorsicht interpretiert werden sollten.

Von Joachim Weimann, Ronnie Schöb und Andreas Knabe

Ökonomen haben eine ganz spezielle Sicht auf den Menschen. Sie unterstellen, dass wir uns in allererster Linie um uns selbst sowie unsere nahen Verwandten kümmern, dass wir dabei überwiegend rational vorgehen und fast ausschließlich an einer möglichst guten Versorgung mit materiellen Gütern interessiert sind. In der radikalsten Variante entsteht so als Produkt mathematischer Idealisierung der Homo oeconomicus – ein seelenloser Geselle, der konsequent rational und rücksichtslos nur sein eigenes materielles Wohlergehen im Auge hat.

Auf Menschen dieses Typus beruhen mindestens 90 Prozent aller wirtschaftswissenschaftlichen Modelle. Ökonomen benutzen sie weltweit, um Märkte zu analysieren oder der Frage nachzugehen, wie Gesellschaften zu gestalten sind, um ihre knappen Ressourcen effizienter zu nutzen. Trotz der Idealisierung sind diese Modelle gleichwohl hilfreich. Immerhin können sie viele reale Phänomene erstaunlich gut erklären; zudem zeigt sich, dass die Annahme, Menschen verhielten sich vor allem eigennützig, doch relativ weit trägt.

Dennoch ist das ökonomische Verhaltensmodell (fachlich: »Rationalmodell«) aus zwei Richtungen unter Beschuss geraten. Zum einen fand die experimentelle Verhaltensökonomie heraus, dass sich Menschen im Labor oft nur eingeschränkt rational verhalten:

- Sie lassen sich nicht nur vom Eigennutz leiten, sondern auch von altruistischen Motiven.
- Sie zeigen Sinn für Fairness, agieren gerne reziprok, also gemäß dem Motto »Wie du mir, so ich dir«.
- Sie versuchen meist, allzu große Ungleichheiten zu vermeiden.

Doch wie stark sind die altruistischen Motive wirklich, die Probanden im Labor immer wieder an den Tag legen? In jüngster Zeit häuften sich Berichte von Experimenten, die zeigen, dass Menschen zwar selbstloses Verhalten praktizieren, jedoch offenbar nur in relativ engen Grenzen. Bei wiederholten Interaktionen weicht es schon bald eigennützigem Handeln.

So bekamen in einem simplen, aber aufschlussreichen Versuch Probanden zweimal an einem Tag Geld ausgehändigt, das sie entweder behalten oder einer wohlthätigen Organisation spenden konnten. Das Resultat: Hatten die Versuchsteilnehmer vormittags noch mehr als die Hälfte der Mittel gestiftet, war ihre Freigebigkeit nachmittags auf ein Viertel gesunken.

Die zweite Kritik am Rationalmodell erfolgte aus einer ganz anderen Richtung, der Glücksforschung. Bekanntlich entfaltet das Streben aus Eigennutz im Wettbewerb eine massive Dynamik. Das führt dazu, dass sich marktwirtschaftliche Systeme rascher entwickeln als andere Wirtschaftssysteme. In der Folge steigt das Nationaleinkommen genauso wie der Verdienst jedes Einzelnen. Ökonomen sind gewohnt, genau das als Erfolg der Marktwirtschaft anzusehen, denn schließlich verheißen höhere Einkommen mehr Wohlstand, größere Sicherheit sowie steigende Lebensqualität. 1974 erschien jedoch eine empirische Studie von Richard Easterlin, in der sich der 1926 geborene US-Wirtschaftswissenschaftler mit dem Zusammenhang von Geld und Glück befasste. Seine Resultate sollten die marktwirtschaftliche Standardvorstellung auf den Kopf stellen.

Easterlin wertete Interviews aus, in denen die Befragten von ihrer subjektiven Lebenszufriedenheit berichteten. Insbesondere wollte er von ihnen wissen, ob und wie sich diese im Lauf der Zeit verändert hatte. Überwiegend zeigte sich dabei zwar, dass es reicheren Menschen tatsächlich besser geht als ärmeren. Aber der Forscher stellte auch fest, dass dies jeweils nur zu einem bestimmten Zeitpunkt gilt. Die durch-

AUF EINEN BLICK

WIE ZUFRIEDEN SIND WIR?

1 Höhere Einkommen verheißen mehr **Wohlstand und Glück**. Doch fühlen sich Menschen auch zufriedener und glücklicher, wenn sie reicher werden?

2 Die **ökonomische Glücksforschung** hat die These aufgestellt, dass Geld und Glück keineswegs miteinander wachsen. Vielmehr postulierte der US-Ökonom Richard Easterlin, dass wir zwar immer reicher, aber nicht entsprechend glücklicher werden.

3 Neuere Studien stellen Easterlins These in Frage. So zeigt sich, dass die Vergleiche zwischen unterschiedlichen Zeitpunkten kaum möglich sind, weil sich die **Bezugspunkte** verschieben, an denen wir uns orientieren.

schnittliche Lebenszufriedenheit veränderte sich dagegen innerhalb der untersuchten Zeitspanne nicht – trotz permanent steigender Einkommen. Offenbar gilt: Wir werden also zwar immer reicher, fühlen uns aber deshalb nicht besser.

Dieser Befund ist als das »Easterlin-Paradoxon« in die Literatur eingegangen. Lange kümmerten sich die Wissenschaftler kaum um diesen Befund, doch in den letzten 15 Jahren entwickelte sich darum ein regelrechter Boom. Die Forscher erfassen dabei die subjektive Lebenszufriedenheit ausgewählter Personen in Interviews. Darin bitten sie die Befragten, ihr Leben einzuschätzen, und zwar auf einer Skala von 0 (»vollkommen unzufrieden«) bis 10 (»vollkommen zufrieden«). In Deutschland geschieht dies im Rahmen des Sozio-oekonomischen Panels (SOEP), bei dem jedes Jahr die gleichen mehr als 20 000 Haushalte befragt werden.

Falls das Easterlin-Paradoxon tatsächlich zuträfe, könnte es eigentlich nur eine mögliche Erklärung dafür geben: Für unser Wohlbefinden spielt nicht das absolute Einkommen eine Rolle (das in den letzten 150 Jahren durchweg gestiegen ist), sondern unsere relative Position auf der Einkommensskala.

Diese Positionen verschieben sich aber im Schnitt kaum: Steigt jemand in der Hierarchie auf, muss dafür ein anderer absteigen. So wie es beim 100-Meter-Lauf nicht möglich ist, dass sich jemand verbessert (zum Beispiel von Platz 3 auf 2), ohne dass ein anderer sich verschlechtert (von Platz 2 auf 3), kann es auch in der Einkommenshierarchie nicht nur Gewinner geben. Um sich das zu verdeutlichen, versetzen Sie sich in

folgende Situation: Ihr Chef ruft Sie zu sich und eröffnet Ihnen, dass Sie ab jetzt fünf Prozent mehr Gehalt bekommen, weil Sie so hervorragende Arbeit geleistet haben. Wie wird es Ihnen danach gehen? Vermutlich werden Sie bestens gelaunt und mit Ihrem Leben zufrieden aus dem Büro des Chefs kommen. Doch zufällig begegnen Sie kurz darauf im Flur einem Kollegen. Der sieht Sie strahlen und fragt freundlich: »Na, auch beim Chef gewesen? Bekommst du jetzt gleichfalls zehn Prozent mehr?« Was wäre dann mit Ihrer Lebenszufriedenheit?

Befreiung aus dem hedonistischen Hamsterrad?

Wenn aber ein anstrengender und Ressourcen verzehrender Wettbewerb für die Gruppe als Ganzes keinen oder nur geringen Gewinn bringen kann, drängt sich der Schluss auf, es wäre sinnvoll, diesen Wettbewerb drastisch einzudämmen. Sollte das Easterlin-Paradoxon unsere gesellschaftliche Realität zutreffend beschreiben, hätte das demnach weit reichende Folgen. Beispielsweise sollte dann der Staat die Erträge des Wettbewerbs um relativ bessere Positionen hoch besteuern – also unser Einkommen. Das sollte uns dann die Lust an dem »sinnlosen Streben« nehmen und uns aus dem hedonistischen Hamsterrad befreien, in das wir durch unser Eigenutzstreben geraten sind.

Fast alles, was Ökonomen positiv bewerten und befürworten, würde das Easterlin-Paradoxon ins Gegenteil verwandeln: Wettbewerb wäre schädlich, Wirtschaftswachstum sinnlos, staatliche Eingriffe in die private Lebensführung wä-

SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / CLAUDIUS SCHÄFER



Kleines Glück: Wenn jemand auf einem Kopierer eine vergessene Münze findet (und einsteckt), kann dies bereits seine Lebenszufriedenheit erhöhen – so zeigen es Tests in Bibliotheken.

ren notwendig und gerechtfertigt. Denn schließlich wären Menschen allein gar nicht in der Lage, ein Leben zu führen, das sie glücklich macht. Jedem liberal gesinnten Menschen und fast allen Ökonomen dürfte bei dieser Vorstellung ein kalter Schauer über den Rücken laufen.

Es ist das unbestrittene Verdienst der frühen Glücksforschung um Easterlin, darauf hingewiesen zu haben, wie bedeutsam relative soziale und ökonomische Positionen in der Gesellschaft sind. Aber gilt das Easterlin-Paradoxon wirklich – ist immer nur der Vergleich mit anderen relevant? Lassen sich allein auf Basis der bisher erhobenen Lebenszufriedenheitsdaten solch weit reichende Schlussfolgerungen ableiten? Möglicherweise nicht! Denn in den letzten fünf Jahren sind mehrere neue Studien erschienen, die das Easterlin-Paradoxon nachhaltig in Frage stellen.

Glückserleben nur innerhalb enger Schranken

Unbestreitbar ist für die Lebenszufriedenheit die relative Position, in der wir uns befinden, von hoher Bedeutung. Dafür gibt es auch eine durchaus überzeugende Erklärung: Die US-Wirtschaftsforscher Luis Rayo und Gary S. Becker wiesen 2007 in viel beachteten Arbeiten darauf hin, dass wir schon aus physiologischen Gründen gar keine andere Wahl haben, als uns an Referenzpunkten zu orientieren, die sich in räumlicher oder zeitlicher Nähe befinden. Im Kern sind es laut Rayo und Becker zwei Eigenschaften unseres Nervensystems, die uns dazu nötigen. Einerseits sind wir nur eingeschränkt wahrnehmungsfähig, das heißt, wir können kleine Zuwächse an »Glück« gar nicht registrieren. Andererseits sind unsere Empfindungsmöglichkeiten nach oben beschränkt. Wir können also »Glück« überhaupt nur bis zu einer bestimmten Schwelle fühlen und erleben.

Beides zusammen führt dazu, dass wir gar nicht in der Lage sind, uns beliebig auf einer nach oben und unten offenen Gefühlsskala zu bewegen, wenn wir unser Glück oder unsere Lebenszufriedenheit benennen. Stattdessen orientieren wir uns an Referenzpunkten, mit denen wir einigermaßen einschätzen können, wie gut es uns tatsächlich geht. Das könnte das Einkommen von Nachbarn oder Kollegen sein, aber auch das eigene vom letzten Jahr. Rayo und Becker argu-

mentieren, dass es im Lauf der Evolution stets wichtig war, die eigene Leistung und ihre relative Position richtig einzuschätzen. Ein Jäger, der immer schlechter als seine Kollegen abschneidet, leistet sich vermutlich systematische Fehler. Um das zu erkennen, muss er seinen Jagderfolg im Verhältnis zu dem von anderen einordnen.

Aber das bedeutet nicht unbedingt, dass für unser Glück ausschließlich relative Positionen ausschlaggebend sind. Unsere Augen stellen etwa ihre Empfindlichkeit auf die Lichtverhältnisse ein. Wenn wir in einem dämmrigen Raum sind, arbeitet das Sehsystem in einem anderen Größenordnungsbereich als im gleißenden Sonnenlicht. Dennoch können wir in beiden Fällen sagen, wie viel Licht uns umgibt, denn auch die absolute Helligkeit fließt in die Berechnung ein. Warum sollte es mit unserem Empfinden von Glück anders sein?

Was also ist von dem Easterlin-Paradoxon zu halten? Was spricht dagegen, dass es in der strengen Form gilt, in der viele es gegenwärtig noch vertreten? Ein erster und naheliegender Zweifel: Repräsentieren die Daten zur subjektiven Lebenszufriedenheit – immerhin Grundlage der gesamten Glücksforschung – hinreichend gut die tatsächliche Lebenszufriedenheit der Menschen? Offenbar nicht. Tatsächlich scheinen die Angaben, die Menschen machen, wenn man sie bittet, ihr Leben auf einer Skala von 0 bis 10 zu bewerten, nicht besonders zuverlässig zu sein. So haben Forscher überprüft, ob eine zweite Befragung der gleichen Probanden im Abstand von Stunden oder Tagen abermals zu den gleichen Resultaten führt. Zwar waren die Antworten bei beiden Befragungen noch signifikant miteinander korreliert. Doch lag der Korrelationskoeffizient gerade mal bei 0,5 – weit entfernt also von dem Wert 1, den man bei identischen Antworten erhalten müsste.

Außerdem stellte sich heraus, dass Angaben zur Lebenszufriedenheit durch Dinge beeinflusst wurden, die in dem Kontext eigentlich keine Rolle spielen dürften. Zum Beispiel durch das Wetter. Bei Sonnenschein sind Menschen häufig besser gelaunt als bei Regen; und so scheint die momentane Stimmung ein gewichtiger Faktor zu sein, wenn es darum geht, die Zufriedenheit einzuschätzen. Sichtbar machte diesen Effekt etwa ein Experiment, das der deutsche Sozialpsychologe Norbert Schwarz an der University of Michigan 1987 durchgeführt hat. Die Versuchsanordnung: In einer Universitätsbibliothek wurde auf dem Kopierer eine Münze (10 US-Cent) platziert, so als ob der letzte Nutzer des Kopierers diese aus Versehen dort liegen gelassen hätte.

Alle Studenten, die sie fanden, steckten die Münze ohne zu zögern ein. Beim Verlassen der Bibliothek wurden sie angesprochen, ob sie an einer Befragung teilnehmen möchten. Darin wurde auch die subjektive Lebenszufriedenheit ermittelt. Resultat: Die Studenten, die das Geld gefunden und an sich genommen hatten, gaben eine signifikant höhere Werte zu Protokoll als die Kontrollgruppe jener, bei denen keine Münze auf dem Kopierer platziert worden war. Es genügen offenbar 10 Cent, um einen Menschen in eine Laune zu versetzen, in der er mit seinem Leben insgesamt deutlich zufriede-



MITTEL: GEN. VON RICHARD A. EASTERLIN

Der US-Wirtschaftsforscher Richard A. Easterlin untersuchte in den 1970er Jahren den Zusammenhang zwischen Geld und Glück. Seine bis heute kontroverse These: Wir werden zwar immer reicher, fühlen uns aber deshalb nicht besser.



CONFERENCES INSTITUTE UNIVERSITY OF CHICAGO (CIUC)

Der amerikanische Ökonom Gary S. Becker sowie sein Kollege Luis Rayo machten klar, dass wir unsere Zufriedenheit zumeist an Personen, Dingen und Umständen orientieren, die uns dauernd umgeben.

dener ist als zuvor. Vor diesem Hintergrund wird klar, warum der Kabarettist Eckart von Hirschhausen dazu aufruft, in der Fußgängerzone ab und zu 10 oder 20 Cent fallen zu lassen, um Menschen zu beglücken.

Bedeutet das nun, dass wir uns überhaupt nicht auf die erhobenen Daten zur Lebenszufriedenheit stützen können? Nicht unbedingt. Zweifellos spielen zufällige Einflüsse eine wichtige Rolle. Aber gerade weil sie zufällig sind, können wir auch davon ausgehen, dass es zu keinen systematischen Verzerrungen der Basisbefunde kommt. Außerdem erwarten wir, dass sich in einer großen Zahl der Befragungen zufällig verteilte Einflüsse herausmitteln. Studien, die auf sorgfältig und in großer Zahl durchgeführten Befragungen (wie etwa dem SOEP) beruhen, sind damit gegen diesen Einwand gefeit. Eine ganz andere Frage ist, ob es eigentlich genügt, den Testpersonen zu ihrem Glücksempfinden nur eine einzige Frage zu stellen. Können wir unsere Lebenszufriedenheit auf nur eine Zahl reduzieren? Gehen da nicht wesentliche Informationen verloren? Zumindest zwei zentrale Aspekte geraten dabei aus dem Blickfeld – zum einen der zeitliche Aspekt, zum anderen die unterschiedlichen Dimensionen von Glücksempfinden.

Variable Zufriedenheit zu verschiedenen Zeiten

Daten zur Lebenszufriedenheit werden zu einem bestimmten Zeitpunkt erhoben. Man muss sie sich aber als einen stetigen Strom von Empfindungen vorstellen, nicht nur als Momentaufnahme. So wird klar, dass die Lebensdauer eines Menschen seine Antworten beeinflusst.

Nun begründen manche zwar mit dem Easterlin-Paradoxon, warum Wirtschaftswachstum und Streben nach höheren Einkommen nutzlose Unterfangen sind. Unbestreitbar war aber der permanente Anstieg der Lebenserwartung in den entwickelten Industrienationen nur durch Wachstum möglich. Es stellte Ressourcen bereit zur Verbesserung etwa der medizinischen Forschung, des Gesundheitssystems, der Ernährung oder der allgemeinen Hygiene.

So trifft die Formel »Mehr Einkommen gleich mehr Gesundheit« sowohl innerhalb einer Gesellschaft als auch im Vergleich verschiedener Gesellschaften zu. Selbst wenn wirtschaftliches Wachstum sonst keinerlei positive Effekte hätte –

allein seine lebensverlängernde Wirkung würde die Menschen länger glücklich machen. Das setzt natürlich voraus, dass die hinzugewonnene Lebenszeit ähnlich glücklich verbracht wird wie der vorherige Teil des Lebens. Genau das lässt sich aber auch aus den Daten herauslesen, die beispielsweise der Soziologe Ruut Veenhoven (Erasmus-Universität Rotterdam) und der Ökonom Michael Hagerty (University of California in Davis) 2006 zu den »Happy Life Years« erhoben haben.

Ein weiteres Argument gegen das Easterlin-Paradoxon: Vergleiche der Lebenszufriedenheit zu unterschiedlichen Zeiten sind höchst problematisch, auch wenn sie bei ein und derselben Person vorgenommen werden. Denn die Bedeutung der Skala, mit der gemessen wird, verändert sich mit der Zeit. Laut der oben erwähnten Theorie von Rayo und Becker müssen wir uns an lokalen Referenzgrößen orientieren. Genau diese verschieben sich aber allmählich – beispielsweise, weil unser Einkommen steigt.

Angenommen ein junger Mensch wird danach gefragt, wie zufrieden er mit sich ist. Um dies sinnvoll beantworten zu können, wird er sich vorstellen, wie denn sein Leben aussehen müsste, damit er »vollkommen zufrieden« wäre, er also eine 10 vergeben könnte. Wenn nun der gleiche Mensch zehn Jahre später wieder befragt wird und er inzwischen genau jenen angestrebten Zustand erreicht hat, ist es wahrscheinlich, dass er diesen jetzt keineswegs mehr als den Endpunkt der Skala ansieht. Sein Referenzpunkt hat sich inzwischen längst verschoben. Daraus ergibt sich, dass wir nicht sicher sein können, was es bedeutet, wenn ein Mensch bei beiden Befragungen etwa eine 7 angekreuzt hat.

Der zweite Aspekt, der in den früheren Studien unbeachtet blieb: Die Glücksforschung konzentrierte sich nur auf eine Zahl, was die unterschiedlichen Dimensionen von Glücksempfindungen ignorierte. Mit der Standardfrage nach der Selbsteinschätzung der Lebenszufriedenheit werden die Befragten letztlich aufgefordert, eine eher kognitive Bewertung ihres Lebens vorzunehmen. Um eine Antwort auf der Skala von 0 bis 10 zu geben, müssen sie verschiedene Lebensaspekte bewerten und gewichten: Wie gut ist mein Job? Wie geht es in der Familie, in der Partnerschaft? Wie zufrieden bin ich mit meiner Gesundheit?

Es bedarf einer erheblichen geistigen Anstrengung, um diese Fragen zu beantworten und nach entsprechender Gewichtung zu einem Gesamturteil zu kommen. Die so gewonnene kognitive Lebenszufriedenheit unterscheidet sich jedoch grundlegend von einem affektiv empfundenen Glück. Dieses ist eine rein emotionale Angelegenheit, die sich unserer bewussten Steuerung weit gehend entzieht. Das schöne Gefühl, das wir haben, wenn wir unsere Kinder in den Arm nehmen oder wenn jemand, den wir mögen, uns ein Lächeln schenkt, hat wenig mit der abstrakten Gesamtbewertung unseres Lebens zu tun.

Affektives Empfinden von Glück und Unglück kann man genauso messen wie kognitive Lebenszufriedenheit. Zwei Befunde sind in diesem Zusammenhang bedeutsam. Zum einen zeigt sich, dass kognitive und affektive Zufriedenheit

keineswegs gleichgerichtet sein müssen. Das belegt eine Studie, die wir 2010 zusammen mit einem Magdeburger Kollegen durchführten. Darin untersuchten wir die Lebenszufriedenheit sowie den so genannten Nettoeffekt von Arbeitslosen und Beschäftigten. Der Nettoeffekt gibt die durchschnittliche Stärke der positiven und negativen Emotionen an, die Menschen in jeder Einzelaktivität eines Tages erlebt hatten.

Arbeitslos – aber dennoch zufrieden?

Hinsichtlich der kognitiven Lebenszufriedenheit zeigte sich das gleiche, wenig überraschende Ergebnis wie schon in zahlreichen Untersuchungen zuvor: Sie ist bei Arbeitslosen deutlich geringer als bei Menschen, die Arbeit haben. Dennoch gab es eine Überraschung: Der Befund gilt nicht für den Nettoeffekt! Emotional gesehen kommen Arbeitslose offenbar genauso gut durch den Tag wie Beschäftigte. Noch frappierender ist eine weitere Studie, die wir 2012 abgeschlossen haben. Dort zeigte sich, dass Männer, die verheiratet waren und deren Frauen arbeiteten, unter ihrer Arbeitslosigkeit am stärksten litten – jedenfalls wenn man ihre kognitive Lebenszufriedenheit betrachtet. Gleichzeitig ist es aber diese Gruppe, die den höchsten Nettoeffekt aufweist, also die positivsten Emotionen!

Neuere Daten, die sowohl kognitive Zufriedenheit als auch Emotionen messen, zeigen einen starken Zusammenhang zwischen Einkommen und kognitiver Lebenszufriedenheit. Sie belegen aber auch, dass dieser beim affektiven Glück weniger stark ausgeprägt ist. Gilt das Easterlin-Paradoxon also wenigstens für diese Dimension des Glücks? Und lassen sich damit die politischen Forderungen, die aus dem Paradoxon abgeleitet wurden, vielleicht doch noch aufrechterhalten? Das wäre in jedem Fall problematisch, wenn man sich an die unterschiedlichen Auswirkungen der Arbeitslosigkeit erinnert. Traut man dem affektiven Glück zu, eine Richtschnur für politische Entscheidungen zu liefern, bräuchten wir uns über Arbeitslosigkeit keine Gedanken mehr zu machen. Das wäre aber verantwortungslos. Bloß weil Menschen auch unter sehr schlechten Bedingungen positive Gefühle haben können, rechtfertigt das nicht die schlechten Bedingungen.

Ein weiteres Argument gegen die Gültigkeit des Easterlin-Paradoxons: Die Daten des World Value Surveys, aus denen dieses Paradoxon ursprünglich abgeleitet wurde, gelten inzwischen wegen methodischer Schwächen als ungeeignet. In einzelnen Ländern wurden die Daten unterschiedlich erhoben und mit verschiedenen Methoden ausgewertet, so dass die Resultate kaum miteinander vergleichbar sind. Die jüngere Glücksforschung verwendet deshalb inzwischen vor allem den so genannten Gallup World Poll, der in seinen Verfahren als wesentlich homogener und konsistenter gilt.

Die US-Ökonomen Betsey Stevenson und Justin Wolfers haben 2008 die Daten der wichtigsten Länder intensiv bearbeitet und die schlimmsten Verfahrensfehler der Vergangenheit korrigiert. Verwendet man die überarbeiteten Daten, verschwindet das Easterlin-Paradoxon fast in allen Ländern.

Stattdessen tritt ein deutlicher Zusammenhang zwischen absolutem Einkommen und durchschnittlicher Lebenszufriedenheit zu Tage. Eine prominente Ausnahme bilden übrigens die USA. Ausgerechnet dort sind reichere Menschen nicht unbedingt zufriedener. Das könnte sich dadurch erklären, dass in diesem Land zwar der Durchschnittsverdienst gestiegen ist, gleichzeitig aber auch die Ungleichheit in den Einkommen stark zugenommen hat. Insoweit relative Positionen eine Rolle spielen, könnte der negative Effekt der zunehmenden Ungleichheit den positiven Effekt des höheren Gehalts überdecken. Die konstante durchschnittliche Zufriedenheit in den USA kann somit auch nicht als Beweis angeführt werden, dass Geld nicht glücklich macht.

Alles in allem zeigt sich: Die Glücksforschung ist nicht wirklich geeignet, eine verlässliche Richtschnur für politische Entscheidungen zu liefern. Das bedeutet aber nicht, dass ihre Ergebnisse bedeutungslos sind – im Gegenteil. Sie bereichern unser Bild von der Lebenszufriedenheit und dem Glück der Menschen. Ein Ersatz für alles, was man bisher über die Wirkung von Wohlstand und Einkommen zu wissen glaubte, sind sie aber nicht. ☺

DIE AUTOREN



Joachim Weimann (von rechts nach links) ist Professor für Wirtschaftspolitik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Vorsitzender der

Gesellschaft für experimentelle Wirtschaftsforschung. Seine Forschungsinteressen liegen in der Umweltökonomik, der Arbeitsmarktpolitik und der experimentellen Wirtschaftsforschung.

Ronnie Schöb ist Professor für Finanzwissenschaft an der Freien Universität Berlin. Er studierte Volkswirtschaftslehre an der Universität München, wo er auch promovierte und habilitierte.

Andreas Knabe hat den Lehrstuhl für Finanzwissenschaft an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg inne. Er promovierte dort in Volkswirtschaftslehre. Danach war er als Juniorprofessor für Arbeitsmarkt- und Sozialpolitik an der Freien Universität Berlin tätig.

QUELLEN

Easterlin, R. A.: Does Economic Growth Improve the Human Lot? Some Empirical Evidence. In: David, P.A., Reder, M.W. (Hg.): Nations and Households in Economic Growth. Stanford University Press, Palo Alto 1974, S. 90–125

Frey, B. S., Frey Marti, C.: Glück, die Sicht der Ökonomie. Zürich, Rüegger 2010

Knabe, A. et al.: Dissatisfied with Life, but Having a Good Day: Time-Use and Well-Being of the Unemployed. In: The Economic Journal 120, S. 867–889, 2010

Weimann, J. et al.: Geld macht doch glücklich. Wo die ökonomische Glücksforschung irrt. Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168631

LEBENSQUALITÄT LÄSST SICH EINRICHTEN.



**JETZT AM
KIOSK.**

Altersgerechtes Wohnen und Leben hat viele Facetten:

Mit Freunden zusammen leben, betreut wohnen oder altersgerecht umbauen – nie gab es so viele Möglichkeiten für die Generation 60plus, das Leben zu gestalten.

Das neue FOCUS-SPEZIAL stellt alle wichtigen Wohnkonzepte vor und sagt, für wen sie geeignet sind.

Extra: Die 869 besten Pflegeheime in Deutschland – was sie bieten, wie viel sie kosten.

FOCUS-SPEZIAL gibt es auch unter:
Tel. 0180 5480 1000*, Fax 0180 5480 1001*,
www.focus-spezial.de

*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz.
Mobil max. 0,42 €/Min.

**ALLES ZU EINEM THEMA.
IN EINEM HEFT.**

**FOCUS
SPEZIAL**

Verkuppeln auf Mathematisch

Kombinatorische Optimierung verhilft vielleicht nicht zu ewigem Eheglück, aber doch zu einer geringeren Scheidungsrate.

VON DOMINIQUE DUMONT

Meine Großmutter ist eine kluge und überaus liebenswerte Frau; aber meine Tante Kunigunde ... ach du liebe Güte! Sie saß schon da, als ich der Großmutter meinen Sonntagsbesuch abstattete, verbreitete ausgiebig den Dorfklatsch und kam alsbald auf ihr Lieblingsthema: wer denn wohl demnächst wen heiraten würde. Dazu hatte sie stets sehr dezidierte Meinungen, die sie jedem verkündete, der sie hören wollte oder auch nicht. Aber diesmal war sie in echter Verlegenheit.

»Die kleine Tanja Baumann, du weißt schon, die Dunkelhaarige mit der extravaganten Brille: Stefan Pawlitzki hat es auf sie abgesehen! Und du wirst es nicht glauben, aber Roland Schumacher, der Sohn vom Fischhändler aus der Rathausgasse, der fährt auch auf sie ab. Die Kleine ist ja so was von niedlich! Aber sie steht mehr auf unseren kleinen Martin. Und der hat nur Augen für Kathrin Huber. Ach, es ist schrecklich kompliziert!«

Die Tante begrüßte mich flüchtig, nur um ohne Pause weiterzureden. Am liebsten hätte sie das ganze Dorf verkuppelt, aber jedes ihrer Arrangements hätte so viele gebrochene Herzen hinterlassen, dass sie auf der Stelle ein weiteres austüftelte – das dann nicht weniger Seelenschmerz erzeugt hätte.

Irgendwann hielt ich das Geschratel nicht mehr aus: »Teure Tante, deine Lebenserfahrung in allen Ehren, und wir wissen, dass es in Liebesdingen unvereinbare Präferenzen gibt; aber versuch doch, das Problem mathematisch anzugehen. So können wir das ganze Dorf unter die Haube bringen.«

»Lieber Junge, was bist du naiv! Du kannst doch nicht Tanja mit Stefan und Roland zugleich verheiraten!«

»Nein, aber stabile Ehen stiften. Nicht dass ich jedem und jeder seinen oder ihren Traumpartner verschaffen könnte; aber wir finden immerhin eine zufrieden stellende Lösung.«

»Willst du mich ins Grab bringen? Was hätte ich dann noch zu tun, wenn alle Paare vereint und glücklich wären?«

»Ach – die Mathematik bietet noch ganz andere Freuden ...«

»Das bezweifle ich!« Tante Kunigunde lehnte sich mit erhobener Nase in ihrem Sessel zurück, aber Großmutter stellte ihr Hörgerät lauter. Ich fuhr fort:

»Jeder Mann schreibt die Frauen der Reihe nach in eine Liste: zuerst diejenige, die ihm am liebsten wäre, dann seine zweite Wahl und so weiter. Die Frauen tun dasselbe mit den Männern. Hier ein Beispiel« (Bild rechts oben).

Stabile Ehen

»Wenn man nun die Männer und Frauen irgendwie verkuppelt, dann kann es passieren, dass ein Mann seiner eigenen Frau die eines anderen vorzieht – und die ihm tatsächlich in die Arme fällt, weil er ihr besser gefällt als der eigene Mann. Eine solche Lösung nennen wir instabil, denn sie geht nicht lange gut« (Bild S. 84, a).

Die Tante hörte auf einmal wieder zu. Das klang nach Schicksal, Herzschmerz ... »Klingt interessant, aber wie willst du so etwas vermeiden?«

»Die stabilen Lösungen«, fuhr ich fort, »sind die, wo ein Mann vielleicht seiner Frau eine andere vorzieht, die aber lieber bei ihrem Mann bleibt.«

»Oder umgekehrt«, ergänzte Großmutter.

»Ja sicher. Nehmen wir an, in unserem Beispiel wären die Paare Stefan

und Kathrin, Roland und Christine, Martin und Tanja« (Bild S. 84, b). »Eigentlich wären sowohl Stefan als auch Roland lieber mit Tanja zusammen als mit der jeweils eigenen Frau, aber das nützt nichts: Tanja bleibt bei Martin. Der würde ihr zwar am liebsten davonlaufen, aber weder Christine noch Kathrin würden sein Werben erwidern.«

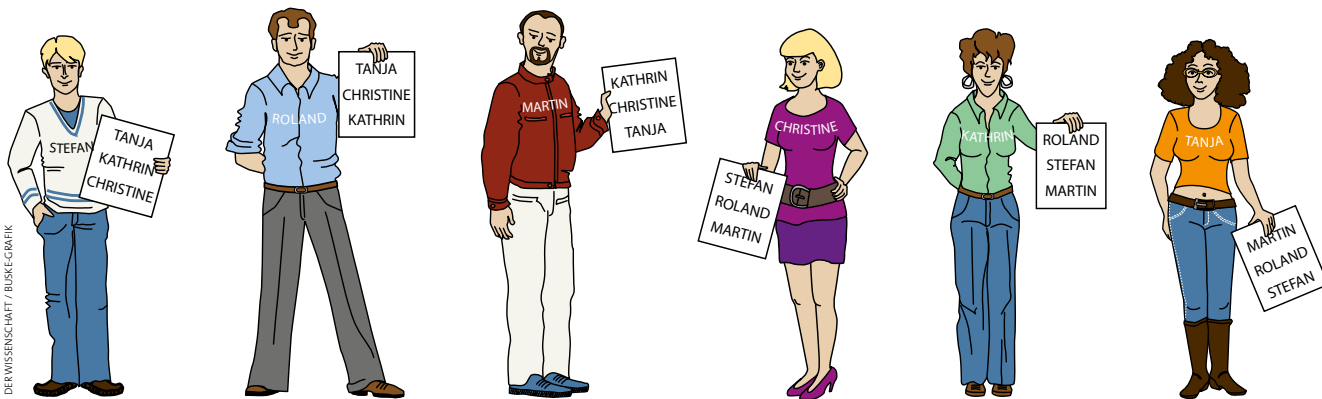
»Aber wie behältst du in der Verwirrung der Gefühle den Überblick?«

»Ganz einfach – mit Mathematik. Es gibt immer eine stabile Lösung und sogar ein Verfahren, sie zu finden. Die Amerikaner David Gale und Lloyd Shapley haben es 1962 veröffentlicht. Ich nenne es »Algorithmus mit Herrenwahl«; du wirst gleich sehen, warum.

Die Damen sitzen in einem Raum; die Herren betreten ihn einer nach dem anderen in irgendeiner Reihenfolge und bitten die Dame ihrer ersten Wahl um ihre Hand. Wenn diese noch frei ist, legt sie ihn an die Leine – vorläufig, als Anwärter. Hat sie schon einen Anwärter, so kommt derjenige unter den beiden, der ihr lieber ist, an die Leine – wo er vielleicht schon war –, und den anderen schickt sie weg. Jeder Abgewiesene kommt später wieder, bittet die nächste Dame in seiner persönlichen Rangliste, und so weiter. Sowie jede Dame einen Anwärter an der Leine hat, machen sich die Paare auf zum Standesamt.«

»Da haben diese Amerikaner aber nichts Neues erfunden«, warf meine Tante ein. »Das haben wir beim Abschlussball in der Tanzstunde ganz ähnlich gemacht.«

»Das mag sein; aber Gale und Shapley haben als Erste das Verfahren korrekt beschrieben und bewiesen, dass es stets zu einer stabilen Lösung führt.«



Die Ausgangssituation: Stefan wäre am liebsten mit Tanja zusammen, Kathrin wäre ihm auch recht, und zur Not würde er mit Christine vorliebnehmen. Entsprechend sind die anderen Präferenzlisten zu verstehen. Die Beteiligten zeigen ihre Listen nicht öffentlich vor. Es genügt, wenn jeder seine im Kopf hat.

erwiderte ich. »Erstens findet das Bäumchen-wechsel-dich-Spiel irgendwann ein Ende. Kein Herr kann zweimal dieselbe Dame fragen. Wenn es n Damen und n Herren gibt, muss also jeder Herr höchstens n -mal den Raum betreten, und nach höchstens n^2 Anträgen sind alle unter der Haube.«

»Und wieso ist diese Lösung stabil?«

Greifen wir irgendeinen Mann und irgendeine Frau heraus, die nicht miteinander verheiratet sind. Dann hat entweder er ihr nie einen Antrag gestellt, weil sie in seiner Liste erst nach den Frauen kommt, die er gefragt hat, also auch nach seiner jetzigen Ehefrau; oder er hat sie gefragt, aber sie hat ihn weggeschickt, weil es (nach ihrer Liste) Bessere gab, die sie gefragt haben, darunter ihren jetzigen Ehemann. In keinem Fall kann es vorkommen, dass beide sich mehr zueinander hingezogen fühlen als zu ihrem eigenen Gatten. Also gibt es keine Instabilität.«

»Das klingt so einfach, wenn du das erzählst«, sagte meine Großmutter. »Lass mich das mal durchprobieren.«

»Hast du noch Plätzchen?«, fragte die Tante hastig. Großmutter schüttete aus ihrem Vorrat auf den Teller nach, bevor sie zu Papier und Bleistift griff, um den Algorithmus der Herrenwahl nachzuvollziehen (Bild S. 85). Kaum hatte ich mich ihr zugewandt, war der Plätzchenteller schon wieder leer, und ich verstand, warum manche Leute in jeder Präferenzliste ganz unten landen.

»Da kommt aber etwas anderes heraus, als du vorgeschlagen hast«, bemerkte die Tante mit vollem Mund.

»Richtig, und zwar kommen die Herren dabei besser weg, zumindest Roland und Martin. Die Damen sind dagegen weniger glücklich.«

»Könnten man nicht die Rollen von Damen und Herren vertauschen?«, fragte Großmutter.

»Sicher. Beim Algorithmus mit Damenwahl sind die Ehepaare Stefan und Christine, Roland und Kathrin, Martin und Tanja. Optimal für die Damen, aber für die Herren das Schlimmste, was ihnen passieren konnte.«

»Opfer müssen gebracht werden«, sagte die Tante im Brustton ihrer langen Erfahrung.

Ein Nein ist für immer

Ich fuhr fort: »Beim Problem der stabilen Ehen kommt es nicht so sehr darauf an, eine stabile Lösung zu finden, sondern eine unter mehreren stabilen Lösungen auszuwählen. Vorab muss man sich eine wichtige Eigenschaft der Lösung klarmachen, die durch Herrenwahl zu Stande kommt: Wenn eine Frau F einen Mann M abweist (weil ihr ein besserer zur Verfügung steht), dann ist F für M unerreichbar, das heißt, er wird sie nicht nur nicht heiraten, sondern es gibt überhaupt keine stabile Konstellation, in der M und F verheiratet sind.

Um das einzusehen, betrachten wir eine Antragsrunde nach der anderen.

Wenn F bei der ersten Gelegenheit, bei der sie überhaupt die Auswahl hat, M zu Gunsten eines anderen Mannes abweist – nennen wir ihn M' –, dann ist sie unerreichbar für M . Eine Ehe M – F wäre nämlich eine Quelle der Instabilität, denn M' ist für F attraktiver als M (deswegen hat sie M ja weggeschickt), und F ist für M' attraktiver als seine Frau, denn F ist seine Favoritin, sonst hätte er sie nicht als Erste gefragt.

Wenn F bei der zweiten Gelegenheit M abweist – nennen wir den siegreichen Konkurrenten wieder M' –, dann wäre eine Ehe M – F nur haltbar, wenn M' eine Frau heiratet, die er F vorzieht. Das könnte aber nur die Frau F' sein, die ihm in der ersten Runde einen Korb gegeben hat (die Präferenzliste von M' beginnt also mit F' und F); die ist für M' unerreichbar aus demselben Grund, den wir soeben für F und M in der ersten Runde dargelegt haben. Und wieder wird es nichts mit F und M .

So führt man das Argument von Runde zu Runde fort, mit dem Ergebnis, dass ein Mann einen Korb bitter ernst nehmen sollte. Die Frau, die ihn weggeschickt, hätte er unter keinen Umständen haben können, auch mit einem anderen Auswahlverfahren nicht; sie ist für ihn unerreichbar – jedenfalls in einer stabilen Konstellation.

Am Ende heiratet beim Herrenwahl-Algorithmus M die (nach seiner Liste) beste unter denen, die ihn nicht abgewiesen haben. Nach dem obigen Argument ist das die beste, die er überhaupt kriegen konnte, denn alle anderen sind unerreichbar. Im Nachhinein können wir schließen, dass das Ergebnis bei der Herrenwahl nicht von der Reihenfolge abhängt, in der die Männer antreten,

und für die Männer optimal ist. Jede Lösung, die einem von ihnen besser gefallen würde, ist instabil.«

»Ist ja gut«, insistierte Tante Kuni- gunde, »aber welchen Grund gibt es, die Männer so zu bevorzugen?«

»Du hast völlig Recht, liebe Tante. Wir müssen einen stabilen Kompromiss finden, der Männern wie Frauen gerecht wird. Zunächst werden wir sehen, dass es eine konfliktfreie Lösung nur gibt, wenn jeder und jede mit der Nummer eins auf seiner oder ihrer Liste verheira- tet ist, wenn also nur eine einzige stabile Lösung existiert. Sowie es mehrere gibt,

hat in jedem Paar einer der Partner ein- en Grund, unzufrieden zu sein. Mehr noch: Die optimale Lösung für die Her- ren ist nicht nur anders als die optimale Lösung für die Frauen, sondern sogar so verschieden wie nur möglich.«

»Das hätte ich jetzt nicht gedacht«, musste die Tante zugestehen, »bei all meiner Erfahrung.«

»Nehmen wir zwei verschiedene sta- bile Lösungen *A* und *B* zum selben Satz an Präferenzlisten. Es gibt also zwei fik- tive Welten, in denen dieselben Leute unterschiedlich verpaart sind. Wir kön- nen sie in drei Gruppen unterteilen: die

»*A*-Fans«, die lieber in *A* leben, weil sie ihren *A*-Partner höher schätzen als ihren *B*-Partner; die »*B*-Fans«, denen es umgekehrt geht; und die, denen es nicht darauf ankommt, weil sie in bei- den Welten mit derselben Person ver- heiratet sind. Nehmen wir weiter an, *M* und *F* sind in *A* verheiratet, nicht aber in *B*. Dann finden sie sich unver- meidlich in verschiedenen Fanklubs wieder. Denn wenn *M* zum Beispiel *A* bevorzugt, kann *F* nicht auch *A* bevor- zugen, denn sonst würden sie einander attraktiver finden als ihre jeweiligen *B*- Ehegatten und wären damit in *B* eine Quelle der Instabilität, was der Voraus- setzung »*B* ist stabil« widerspricht.

Im Endeffekt sind in beiden Welten alle *A*-Fans mit *B*-Fans verheiratet. In je- dem Paar und in jeder Welt gibt es also einen Partner, der lieber in der jeweils anderen Welt leben würde – abgesehen von jenen, denen es sowieso egal ist.«

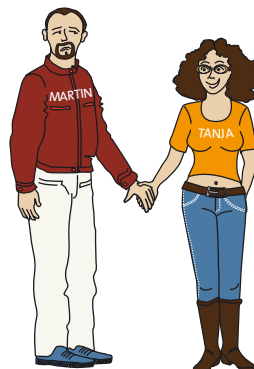
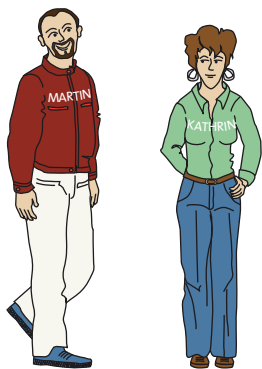
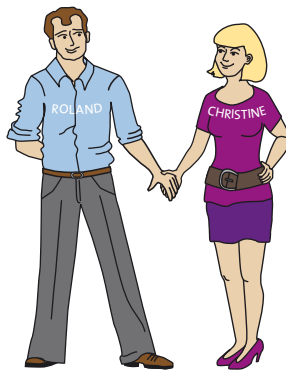
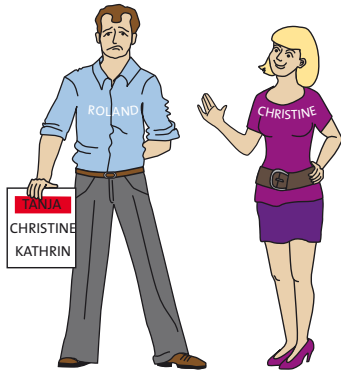
»Aber Junge«, sagte Großmutter erschrocken, »bist du da nicht ein biss- chen arg pessimistisch?«

»Schau dir doch unseren Bekannten- kreis an ...«

a



b



Die Paarung *a* ist instabil, denn Roland und Tanja wären miteinander glücklicher als mit dem jeweils eigenen Ehegatten. Das kann bei der stabilen Paarung *b* nicht passieren. Nur bekommt diesmal lediglich eine Person (Tanja) ihre erste Wahl, während es bei Lösung *a* zwei sind (Stefan und Martin).

Struktur der Lösungsmenge

Der berühmte Mathematiker John Con- way hat gezeigt, wie man aus den zwei Welten sehr einfach eine neue, noch bessere basteln kann – besser im Sinn des männlichen Geschlechts. In dieser Welt bekommt jeder Mann seine *A*-Frau oder seine *B*-Frau, je nachdem, welche er bevorzugt. Das ergibt eine neue Welt *C*, und auch sie ist stabil.

»Wie kann das gehen?«, fragte die Tante, stieren Blicks über dem leeren Plätzchenteller meditierend.

»Ganz einfach. Zunächst muss man sich klarmachen, dass auf diese Weise überhaupt eine Lösung zu Stande kommt, dass also nicht zwei Herren auf dieselbe Dame zugreifen möchten. Dier- ser Fall könnte nämlich nur eintreten, wenn der eine Herr ein *A*-Fan und der andere ein *B*-Fan ist. Dann wäre die doppelt begehrte Frau die *A*-Frau des *A*-Fans und zugleich die *B*-Frau des *B*-Fans. In der ersten Eigenschaft müsste sie dann ein *B*-Fan sein, in der zweiten aber ein *A*-Fan, was unmöglich ist.

Warum ist die Welt C stabil? Nun, selbst dort kann es vorkommen, dass auch ein Mann M sich eine bessere Frau F vorstellen könnte als seine C -Ehefrau; er würde also F sowohl seiner A -Frau als auch seiner B -Frau vorziehen. Aber F wird seine Zuneigung nicht erwidern; denn ihr A -Mann gefiel ihr schon besser als M , sonst wäre A nicht stabil; für ihren B -Mann gilt derselbe Grund, und einer von beiden ist ihr C -Mann. Gegen den hat M also bei F keine Chance.«

Man bezeichnet diese Lösung C mit $\text{sup}(A, B)$ («Supremum von A und B »), weil sie – vom Standpunkt der Männer, wohlgernekt – sowohl A als auch B überlegen ist. Eine Frau dagegen hat wenig Anlass, über C zu jubeln, denn dort bekommt sie von beiden möglichen Männern den schlechteren zugewiesen. Sie würde sich die Welt $D = \text{inf}(A, B)$ («Infimum von A und B ») wünschen, bei der sie sich von ihren beiden Männern den besseren aussuchen darf.

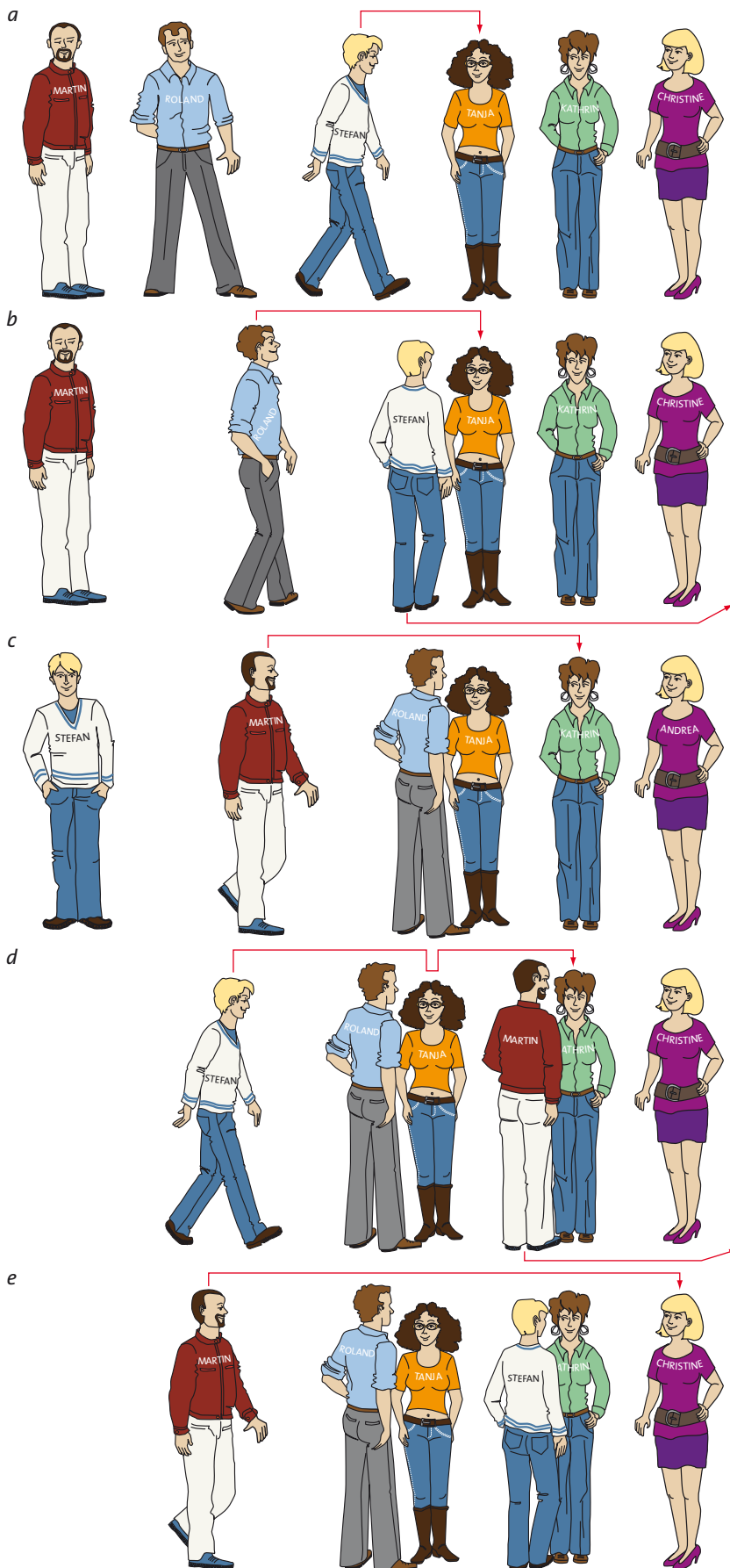
»Was ist das für ein merkwürdiges Zeug? Was hat das noch mit Romantik, roten Rosen und einem sorgsam ausgehandelten Ehevertrag zu tun?«

»Ach liebe Tante! Conways Formalismus verschafft uns einen Überblick und gibt der Menge der möglichen Lösungen eine Struktur. Zu zwei beliebigen stabilen Lösungen finden wir immer ein Supremum, das die Männer begünstigt, und ein Infimum, das die Frauen begünstigt. Das gibt ein ganzes Geflecht von Lösungen, an deren Endpunkten die Lösung mit Herrenwahl und die mit Damenwahl stehen.«

»Das ist ja schön«, sagte meine Großmutter, »aber wäre es nicht viel wichtiger, eine mittlere Lösung zu finden, die für alle Beteiligten am wenigstens schlecht ist?«

»Schon; aber das ist nicht einfach. Zuerst definiert man die Schlechtigkeit einer Welt als Zahlenwert und sucht dann die Welt mit der geringsten Schlechtigkeit. So propagieren es die Utilitaristen« (Spektrum der Wissenschaft 1/2005, S. 102).

»Man definiert zunächst«, fuhr ich fort, »den persönlichen Frust jedes Menschen als die Nummer seines Ehepartners auf seiner Präferenzliste mi-



Der Algorithmus der Herrenwahl am Beispiel der Präferenzen von S. 83: Stefan fragt Tanja, die ihn akzeptiert (a); Roland fragt Tanja, die verstößt daraufhin Stefan (b); Martin fragt Kathrin und wird von ihr akzeptiert (c); aber Stefan kommt wieder, fragt Kathrin und schlägt Martin aus dem Feld (d); Martin fragt Christine und wird akzeptiert (e).

STEFAN	1 Christine 2 Kathrin 3 Tanja	ROLAND	1 Kathrin 2 Christine 3 Tanja	MARTIN	1 Kathrin 2 Tanja 3 Christine
CHRISTINE	1 Roland 2 Stefan 3 Martin	KATHRIN	1 Stefan 2 Roland 3 Martin	TANJA	1 Martin 2 Stefan 3 Roland

Indem Kathrin an die Stelle ihrer eigenen Präferenzen fiktive setzt (rotes Schild), kann sie das Endergebnis zu ihren Gunsten beeinflussen.

nus eins. Wer also die Frau seiner Träume errungen hat, ist wunschlos glücklich mit Frust null, wer mit seiner dritten Wahl vorliebnehmen musste, lebt mit einem Frust von zwei. Die Schlechtigkeit einer Welt ist dann die Summe aller persönlichen Fruste.«

»So ungefähr habe ich das gemeint«, sagte Großmutter. »Aber so formal klingt das furchtbar unromantisch.«

»Es hilft auch leider nicht viel. Bei den drei Arrangements unserer sechs jungen Leute, die wir uns angesehen haben, kommt jedes Mal eine Frustsumme von sechs heraus. So finden wir also keine ›gerechte‹ Lösung.«

»Aber gibt es denn wenigstens eine, die eine Ausgewogenheit unter den Geschlechtern herstellt?«

»Das sieht schlecht aus. Die Menge aller stabilen Lösungen hat zwar eine reichhaltige mathematische Struktur mit den beiden extremen Elementen ›Damenwahl‹ und ›Herrenwahl‹. Aber ›mittlere Elemente‹ gibt es sehr viele, und man hat kein gutes Kriterium, um eines davon für optimal zu erklären.«

»Außerdem«, fiel die Tante ein, »ist das alles sowieso viel zu theoretisch. Heiraten ist Politik! Da wird gelogen und manipuliert, was das Zeug hält.«

»Ein guter Punkt, Tante. Unterstellen wir, dass die Damen, warum auch immer, es hinnehmen, dass der traditionelle Algorithmus der Herrenwahl praktiziert wird. Nehmen wir weiter an, dass sich einer der Beteiligten durch eine ebenso diskrete wie erschöpfende Recherche Kenntnis von allen Präferenzlisten verschafft hat, während jeder andere nur seine eigene Liste kennt.«

»Nichts leichter als das«, sagte die Tante. »Dazu genügt es, mit mir befreundet zu sein.«

»Umso besser. Der so Privilegierte kann den Ausgang der Geschichte bestimmen, indem er über seine eigenen Präferenzen lügt, ohne dass jemand Verdacht schöpft.«

Vom Nutzen der Lüge

Nehmen wir an, die Gefühlslage der Beteiligten wäre eine völlig andere, und Kathrin wäre vollständig darüber informiert (Bild oben). Dann kann sie sich ausrechnen, wie die Herrenwahl ablaufen wird: Stefan fragt Christine, Roland Kathrin, Martin ebenfalls Kathrin. Den weist sie ab, woraufhin Martin vor Tanja auf die Knie fällt. Das ergibt die Paare Stefan und Christine, Roland und Kathrin, Martin und Tanja.

Aber Kathrin will eigentlich Stefan. Also handelt sie gegen ihre wahren Gefühle so, als wäre ihr Martin lieber als Roland. Als die beiden bei ihr zur Auswahl stehen, schickt sie Roland weg. Der geht zu Christine und verdrängt dort Stefan. Der geht daraufhin zu Kathrin, die ihn jubelnd in die Arme schließt.«

»Raffiniertes Miststück, diese Kathrin«, sagte die Tante mit allen Zeichen der Anerkennung. »Das kommt mir irgendwie bekannt vor.«

»Das Endergebnis ist in diesem Fall Stefan und Kathrin, Roland und Christine, Martin und Tanja. Genau das wäre bei Damenwahl herausgekommen.«

Man könnte denken, dass ein Mann in der entsprechenden Situation – er allein kennt alle Präferenzen – den Ausgang zu seinem Vorteil manipulieren könnte. Aber das stimmt nicht. Lester Dubins und David Freedman haben gezeigt, dass unter der Herrenwahl ein Mann durch Lügen sein Schicksal nicht verbessern kann. Allenfalls hilft das einem seiner Mitbewerber.«

Unterstellen wir, Kathrins vorgebliche Präferenzen im Bild links wären ihre echten; dann führt der Algorithmus der Herrenwahl auf die Paare Stefan und Kathrin, Roland und Christine, Martin und Tanja. Wenn Stefan – in Kenntnis aller Präferenzlisten – so tut, als hätte er lieber Tanja als Kathrin, dann endet die Sache mit den Paaren Stefan und Tanja, Roland und Christine, Martin und Kathrin. Martin hat sich verbessert, Roland geht es mit seiner Christine so gut wie zuvor, und Stefan erhält die gerechte Strafe für seine Lüge: Er gerät an Tanja, die er gefragt hat, obgleich er sie eigentlich nicht wollte. Zu allem Überfluss ist die Lösung instabil, denn Stefan und Kathrin haben allen Anlass, miteinander durchzubrennen und einen Scherbenhaufen zu hinterlassen.

»Das habe ich schon immer gesagt«, wusste Tante Kunigunde zu bemerken. »Wenn Männer lügen, ist das allenfalls wirkungslos und im schlimmsten Fall gefährlich; in diesem Punkt sind ihnen die Frauen weit überlegen.«

»Na ja«, sagte Großmutter. »Das stimmt – in einer Welt, in der die Männer behaupten, sie hätten die Wahl und würden entscheiden, und die Frauen die Dinge dann regeln.«

DER AUTOR



Dominique Dumont war Dozent für Mathematik an der Universität de Strasbourg. Seit seiner Pensionierung lebt er auf Madagaskar.

QUELLEN

Dubins, L. E., Freedman, D. A.: Machiavelli and the Gale-Shapley Algorithm. In: The American Mathematical Monthly 88, S. 485–494, 1981
Gale, D., Shapley, L.: College Admissions and the Stability of Marriage. In: The American Mathematical Monthly 69, S. 9–15, 1962

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168632

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.



Der Einfluss von Sprache auf das Denken



Wenn Unternehmer für die Forschung stiften



Dossier: Synthetische Biologie



Tiere in der deutschen Wildnis



**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)





Frühwarnsystem für bedrohte Welten

Mitunter brechen komplexe Ökosysteme scheinbar überraschend zusammen. Doch solche Desaster kündigen sich an und wären oft noch abwendbar, würde man die Vorboten erkennen. Dafür nutzen Forscher zunehmend mathematische Modellierungen.

Von Carl Zimmer

Der Peter Lake, ein winziger See im Norden der USA, liegt tief im Ahornwald von Wisconsin nahe der Grenze zu Michigan. Hier setzten Ökologen im Juli 2008 zwölf Forellenbarsche aus. Gleichzeitig platzierten sie im See Sensoren, die viele Monate lang im Fünfminutentakt die Wasserklarheit und somit auch das Algenaufkommen messen sollten. Im folgenden Jahr ließen die Forscher um Stephen Carpenter von der University of Wisconsin in Madison dort noch zweimal je 15 der großen Raubfische frei, die fast einen Meter lang werden können.

Zunächst tat sich äußerlich nicht viel. Doch im Sommer 2010 veränderte der See plötzlich seine Farbe: Vorher war er grün und voller Algen gewesen, nun wurde das Wasser klar. Denn darin tummelten sich jetzt Unmengen von Wasserflöhen und anderen Organismen, die Algen fraßen. Zwei Jahre zuvor hatten vielerlei kleine Raubfische, darunter Elritzen und kleine Sonnenbarsche, die Winzlinge dezimiert. Aber diese Fische, die hier noch vor Kurzem die Nahrungskette dominiert hatten, standen nun nicht mehr länger an der Spitze. Die Neankömmlinge hatten unter ihnen tüchtig aufgeräumt.



DAVID LIITTSCHWAGER

Der neue Zustand ist bis heute so geblieben. Was war geschehen? Das stabile frühere Nahrungsnetz – also die Nahrungsbeziehungen zwischen den verschiedenen Bewohnern des Sees – war kollabiert, und ein neues hatte sich aufgebaut. Den Umschwung hatten die Wissenschaftler in diesem Fall absichtlich provoziert. Und zwar reiht sich die Studie in experimentelle Forschungen ein, mit denen sie Faktoren aufspüren möchten, die im Zusammenhang mit Fressen und Gefressenwerden dauerhafte Veränderungen der Arten-dichten bewirken.

Gerade in den letzten Jahrzehnten beobachten Ökologen vielerorts, und oft unerwartet, Umbrüche ganzer Nahrungsnetze – meist in viel größerem Ausmaß als bei dem geschilderten Experiment. Vor Namibia etwa nehmen Quallen überhand, in den Marschen vor North Carolina Schnecken und Pilze. Im Nordwestatlantik sind die Kabeljau-(Dorsch-)Bestände kollabiert, während die Hummer prächtig gedeihen.

Ob im Einzelfall Überfischung daran schuld ist, die Schaffung neuer Agrarflächen, städtische Bebauung oder die Erd erwärmung – fest steht: Die Menschheit setzt gegenwärtig viele der großen Ökosysteme einem enormen Stress aus. Fachleute rechnen damit, dass in den kommenden Jahren noch so manche eingespielte Lebensgemeinschaft kippen wird. Solch ein Ereignis vorherzusagen, um es vielleicht noch abzuwenden, ist jedoch alles andere als einfach, denn Nahrungsnetze sind dazu oft viel zu komplex aufgebaut.

Der Peter Lake ist schon seit 30 Jahren ökologisches Forschungsobjekt. Anhand des reichen Datenmaterials entwickelten Carpenter und seine Mitarbeiter mathematische Modelle für das Verhalten von Nahrungsnetzen. Von daher konnten sie bei ihrem Experiment bereits 15 Monate im Voraus erste Warnzeichen für das baldige Umschlagen des Sees erkennen. Denn die Rechenmodelle haben inzwischen, zumindest ansatzweise, einige der Gesetzmäßigkeiten aufgezeigt, die darüber bestimmen, ob ein Nahrungsnetz stabil bleiben wird oder ob es demnächst an seine Grenzen zu stoßen und dann zu kollabieren droht.

Die Forscher möchten mit diesen Modellen den Stabilitätsgrad von Nahrungsnetzen erfassen und die gefährdeten

unter ihnen identifizieren. Idealerweise hätte man damit ein Frühwarnsystem zur Hand, das etwa anzeigt, wann bestimmte menschliche Eingriffe dringend aufhören müssen. Vielleicht ließe sich manche fatale Entwicklung auf die Weise sogar noch rechtzeitig umkehren. Ist ein Ökosystem nämlich einmal gekippt, gelingt eine Rückkehr zum früheren Zustand nach aller Erfahrung wenn überhaupt, dann höchst mühsam. Vorsorge ist in jedem Fall die wesentlich bessere Option.

Mathematische Modelle für komplexe Ökgefüge

Seit rund 100 Jahren befassen sich Forscher mit den Regeln der Artenzusammensetzung von ökologischen Systemen. Sie möchten die Populationsgrößen der einzelnen Spezies verstehen – warum etwa in einem untersuchten Gebiet Fliegen in großer Anzahl auftreten und Wölfe in sehr geringer; oder warum es in manchen Jahren besonders viele Fliegen gibt und in anderen deutlich weniger. Zur Veranschaulichung der inneren Beziehungen des Systems pflegten sie die entdeckten Räuber-Beute-Muster in Netzdiagrammen darzustellen. In solchen Bildern markiert die Dicke der Verbindungen die gefressenen Mengen. Allerdings können zu einem Nahrungsnetz mehrere Dutzend, vielleicht auch einige hundert oder sogar tausende verschiedene Arten gehören. Da stößt die grafische Darstellung rasch an ihre Grenzen.

Derart komplexe Netze lassen sich nur mathematisch fassen. In solchen Modellen übersetzt man das Verhalten einer Art in eine Gleichung, die ihre Wachstums- (sprich Vermehrungs-)Rate auf verschiedene Faktoren wie das verfügbare Futter bezieht und zugleich darauf, wie oft diese Art selbst zur Beute wird. Jedoch sind sämtliche Einflüsse Variablen – was die Berechnungen der Gleichungen selbst für einfachste Nahrungsnetze erheblich erschwert. Heute stehen zum Glück leistungsstarke Computer zur Verfügung. Mit ihnen konnten Forscher in letzter Zeit das Verhalten ganz verschiedener Ökosysteme durchspielen.

In den komplexen Modellierungen stecken eine Reihe von – teils hochvariablen – Eigenschaften sowohl der Individuen als auch der Populationen: unter anderem die Dichte sowie die Alters- und Geschlechtszusammensetzung der

Forellenbarsche wurden in einem kleinen nordamerikanischen See ausgesetzt, um dort die Rolle der obersten Räuber einzunehmen. Die dramatischen Folgen geben Einblick in die Funktionsweise von Nahrungsnetzen.



AUF EINEN BLICK

WANN REISSEN NAHRUNGSNETZE?

1 Mathematische Modelle simulieren das Verhalten der **Nahrungsbeziehungen in Ökosystemen**. Sie zeigen, welche Verbindungen einen Kollaps des ganzen Netzes auslösen könnten.

2 Ist ein System gekippt – sind also völlig **neue Verhältnisse** entstanden –, dann stellen sich die alten äußerst selten von selbst wieder ein. Auch mit **menschlichem Eingreifen** gelingt das, wenn überhaupt, nur mühsam.

3 Auf Simulationen gestützte **Frühwarnsysteme** erkennen einen **drohenden Zusammenbruch** an kleinen Anzeichen. Oft ist es dann zur **Rettung** des Ökosystems noch nicht zu spät.



einzelnen Arten, deren Mobilität und spezielle Ernährungsstrategien. Hinzu kommen Faktoren wie die Begegnungshäufigkeit zwischen einer Räuber- und einer Beuteart und der Schutz, den ein Habitat bietet. Auch physikalische Faktoren beeinflussen das Wachstum von Populationen, etwa jahreszeitliche Schwankungen. Beim Peter Lake berücksichtigt Carpenters Team insbesondere auch den Lichteinfall, weil der das Algenwachstum und damit die Nahrungsgrundlagen wesentlich mitbestimmt.

Einige Schlüsselprinzipien natürlicher Nahrungsnetze haben die Modelle wie gesagt schon aufgezeigt. So erwies sich, dass in den meisten Systemen keineswegs ein paar wenige kräftige Räuber-Beute-Verbindungen – in der bildlichen Darstellung breite Bahnen – vorherrschen, wie man früher dachte. Viel eher bestimmen eine Menge schwach ausgeprägte Beziehungen, also zahlreiche dünne Fäden, das Bild. Im ersten Fall wären einzelne Räuber überwiegend auf jeweils eine Beuteart fixiert, und diese hätte einen Hauptfeind. Tatsächlich frisst ein Räuber meist etliche verschiedene Tiere, wie auch die einzelnen Beutearten es mit vielerlei Fressfeinden zu tun haben.

Nahrungsnetze, in denen zahlreiche Verbindungen vorherrschen, sind auf Dauer stabiler und wohl deswegen viel häufiger anzutreffen als solche mit dominierenden Räuber-Beute-Präferenzen. Denn im ersten Fall kann es ein Raubtier leichter verkraften und sich anders orientieren, sollte eine der bevorzugten Beutearten rar werden. Auch vermag sich eine stark dezimierte Beutepopulation nicht selten sogar wieder zu erholen, weil ihre Hauptfressfeinde sie nun erst einmal in Ruhe lassen, da ihnen andere Tiere eher unterkommen. Folglich sind Arten unter solchen Bedingungen nicht so leicht von Ausrottung bedroht.

Zudem lassen die mathematischen Modelle verwundbare Stellen in Nahrungsnetzen erkennen: Bereiche, an denen kleine, zunächst wenig spektakuläre Veränderungen letztlich gesamte Ökosysteme treffen können. Lange hatten Forscher

angenommen, dass diese hauptsächlich von der Basis her beherrscht werden, also von den Pflanzen und kleinen Tieren, die den größeren Tieren Nahrung liefern. Doch in den 1960er Jahren stellten Theoretiker Berechnungen an, denen zufolge Raubtiere an der Spitze eines Ökosystems erheblichen Einfluss auf andere Spezies nehmen können. Sie würden demnach unter Umständen indirekt sogar die Populationsdichte von Arten kontrollieren, die sie selbst überhaupt nicht fressen. In Fachkreisen stieß diese neue These einer Kontrolle »von oben nach unten« zunächst auf erhebliche Skepsis. War es wirklich möglich, dass ein geringer Anteil der Tiere eines Nahrungsnetzes, die wenigen Topräuber, so viel Macht ausübt?

Hierfür sprechen nicht zuletzt auch die Folgen von menschlichen Eingriffen in die Natur besonders in den letzten Jahrzehnten. Die Meere sind inzwischen von manchen großen Raubfischen wie dem Kabeljau ziemlich leer gefischt. Wölfe oder Luchse gibt es in weiten Regionen gar nicht mehr. Umgekehrt brachte der Mensch zum Beispiel neue Arten wie Ratten auf Inseln, wo sie keine Konkurrenten hatten und die Natur mitunter völlig veränderten.

Gesunde Natur mit Wölfen

Wie stark ein Topräuber die Verhältnisse bestimmen kann, lässt sich derzeit gut im Yellowstone-Nationalpark in Nordamerika beobachten (siehe SdW 8/2004, S. 24). Die ehemals letzten Wölfe wurden dort um 1930 abgeschossen. Daraufhin vermehrten sich insbesondere die Wapitis, die amerikanischen Rothirsche, übermäßig. Sie aber ließen nun bei den Bäumen kaum noch Jungwuchs aufkommen. Die Landschaft wandelte sich völlig, was auch vielen anderen Tieren zu schaffen machte, etwa den Bibern. Erst seit man Mitte der 1990er Jahre Wölfe neu ansiedelte, scheint sich die Natur langsam wieder zu fangen (siehe Kasten S. 92/93).

Ähnlich schwer wiegend wirkt sich mittlerweile vor der Ostküste der USA die Massenabschlachtung großer Haie durch die Fischindustrie auf das gesamte dortige Nahrungsnetz aus (siehe Kasten rechts). Die Vorkommen von Austern und Kammuscheln sind zusammengebrochen. Denn die großen Haie erbeuteten kleinere Raubfische, wie Rochen und kleinere Haie, die sich nun stark vermehren. Beispielsweise explodierten die Bestände der Kuhnaseurochen geradezu. Diese ernähren sich von Muscheln und anderen Schalentieren und haben deren Populationen extrem dezimiert.

In vielen solchen Fällen hatten Ökologen nicht rechtzeitig erkannt, dass sich eine Katastrophe anbahnte. Ihr früh genug entgegenzusteuern ist aber oft entscheidend. Wie schwierig es sein kann, wieder die alten Verhältnisse herzustellen, zeigen beispielsweise die Kabeljauvorkommen im nordwestlichen Atlantik.

Die über mehrere Jahrzehnte völlig überfischten Bestände dieser recht gefräßigen Raubfische waren Anfang der 1990er Jahre völlig zusammengebrochen. Streng limitierte Fangquoten für Kabeljau, teils auch Fangverbote, sollten der Population wieder aufhelfen. Nach den mathematischen



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de

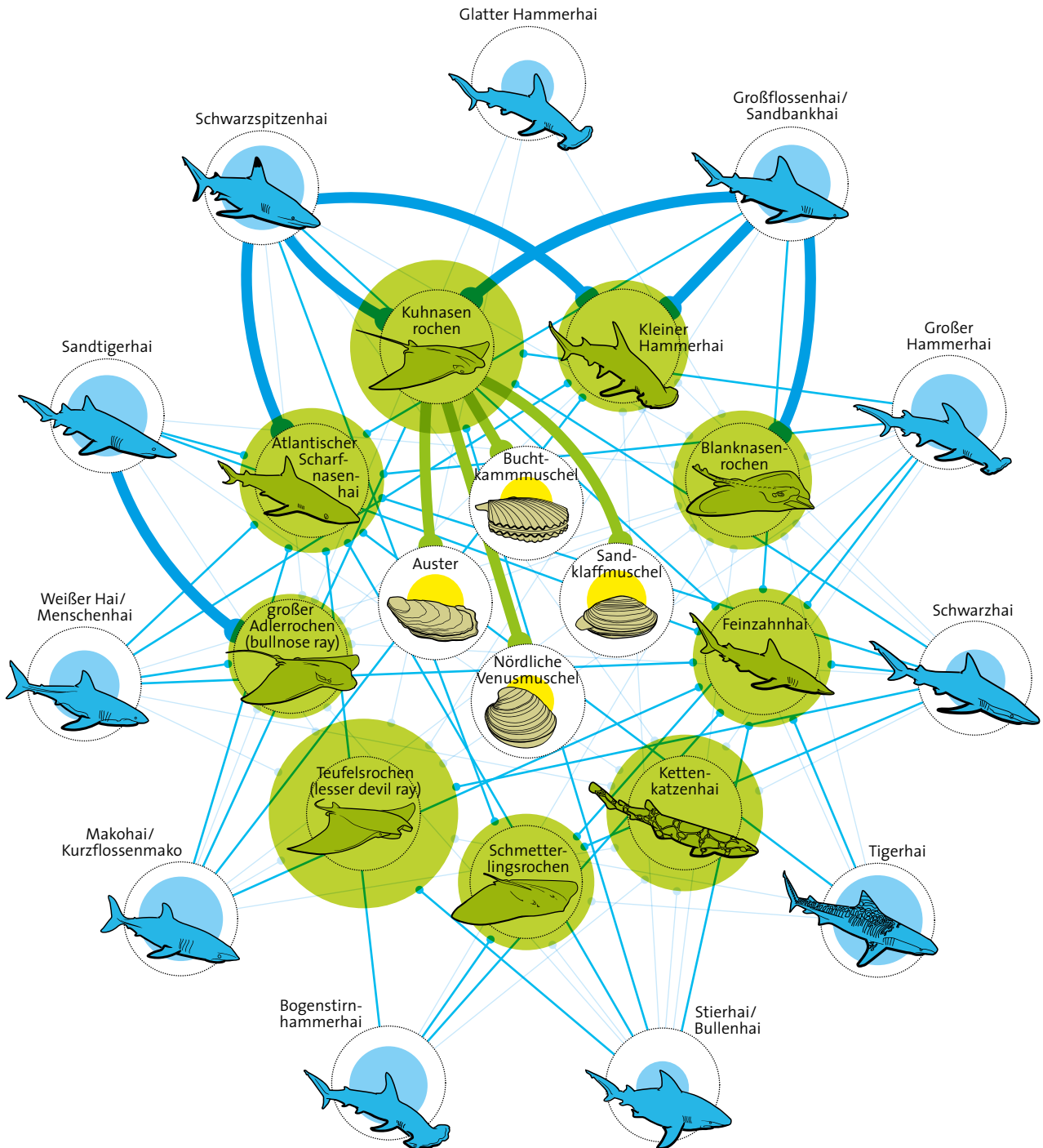


Unser Online-Dossier »Artenvielfalt und Artensterben« finden Sie unter
www.spektrum.de/artenvielfalt

Nahrungsnetz aus der Balance

Lange Jahre galt, dass vor allem die Basis eines Nahrungsnetzes, also Pflanzen und kleinere Tiere, dessen Schicksal bestimmt. Doch auch die dominierenden Raubtiere können für die anderen Arten extrem wichtig sein, sogar indirekt. Ein Beispiel hierfür liefert eine Studie von Julia Baum, jetzt an der University of Victoria (British Columbia, Kanada), und ihren Kollegen. Weil vor der US-Atlantikküste zu viele große Haie (blau) abgeschlachtet wurden, gedeihen dort kleinere Raubfische (grün), insbesondere Kuhnassenrochen, übermäßig. Unter ihnen leiden nun die Bestände mancher Schalentiere (gelb), vor allem die der Bucht-kammuschel.

- große Haie = oberste Räuber
- kleinere Haie, Rochen = mittelgroße Räuber
- Schalentiere von kommerziellem Interesse
- frühere Populationsgröße
- ◐ kleinere Population nach 35 Jahren
- ◑ größere Population nach 35 Jahren
- starke Bejagung
- ▒ mäßige Bejagung
- schwache Bejagung



ILLUSTRATIONEN: NORTIA SLOAN ROLLINGS; GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN; MACH: BAUM, J.K. ET AL., "CASCADING TOP-DOWN EFFECTS OF CHANGING OCEANIC PREDATOR ABUNDANCES" IN: J. ANIM. ECOL. 78, S. 699-714, 2009; UND: MYERS, R.A. ET AL., "CASCADING EFFECTS OF THE LOSS OF APEX PREDATORY SHARKS FROM A COASTAL OCEAN" IN: SCIENCE 315, S. 1846-1850, 2007

Modellen, an denen sich die Verantwortlichen damals orientierten, hätte sich die geschonte Population eigentlich in fünf bis sechs Jahren wieder weit gehend erholen müssen. Doch die Vorhersagen trafen nicht ein. Noch nach sechs Jahren betrug die Populationsgröße nur wenige Prozent der früheren, und es gab lange keine Anzeichen für eine Regeneration.

Den Grund hierfür haben Kenneth Frank vom Bedford Institute of Oceanography in Darmouth (Nova Scotia, Kanada) und seine Mitarbeiter aufgedeckt. In die Rechnungen war nur eingeflossen, wie rasch sich der Kabeljau im Prinzip vermehren kann. Mögliche Wechselwirkungen im Nahrungsnetz hatte man nicht berücksichtigt. Jedoch haben sich seine diversen Beutearten, darunter Sprotten, Lodden, Hummer und Eismeergarnelen, nach dem Zusammenbruch der Kabeljaupopulation enorm vermehren können. Diese fressen tierisches Plankton und somit auch Laich und Larven ihrer Räuber. Früher hatte der Kabeljau die Bestände jener Arten niedrig gehalten. Nun aber war das System gekippt: Trotz des Fangverbots wuchs kaum noch Kabeljau nach.

Erst in den letzten Jahren finden Frank und seine Mitarbeiter Anzeichen für eine langsame Erholung des Kabeljaubestands. Der entspricht heute immerhin wieder etwa einem Drittel von dem vor wenigen Jahrzehnten. Der Grund dafür: Die Beutearten vom Kabeljau wuchsen dermaßen an, dass sie schließlich ihre eigenen Nahrungsgründe praktisch leer fraßen und nun selbst nicht mehr genug Futter finden. Daher beginnen ihre Populationen jetzt ihrerseits zusammenzubrechen – und die Kabeljaupopulation erhält eine neue Chance, dass mehr Tiere das Erwachsenenstadium erreichen und sich fortpflanzen. Noch ist nicht sicher, ob seine Bestände eines Tages wieder die alte Größe erreichen und dann die Beutetierpopulationen wie früher klein halten. Laut Frank scheinen sie auf dem Weg dahin zu sein. Der Forscher betont aber, dass man bei so komplexen Wechselspielen jederzeit auf unliebsame Überraschungen gefasst sein muss.

Vieles kann ein etabliertes Nahrungsnetz bedrohen. Manchmal ist es eine fremde Art, die sich breitmacht. Zum Beispiel richten seit einigen Jahren Rotfeuerfische in den Korallenriffen der Karibik und an der US-Ostküste zunehmend großen Schaden an. Die attraktiven Tiere mit den langen, giftigen Flossenstrahlen, die über 30 Zentimeter groß werden, sind im Pazifik heimisch. So mancher Aquarianer, der ihrer überdrüssig wurde, hat sie offenbar in den Atlantik »entsorgt« – und die bizarren, rot-weißen Raubfische gedeihen

W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema
»Ökosystem Wiese« kostenfrei herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/oekosystem

Maßgeblich: Große Raubtiere

Die Funktionsweise eines Ökosystems hängt oft eindeutig auch von den Arten an der Spitze der Nahrungsketten ab. Im Yellowstone-Nationalpark etwa hielten früher Wölfe die Zahl der Wapitis (amerikanische Rothirsche) niedrig. Als die Wölfe ausgerottet waren, vermehrten sich die Hirsche stark – und ließen keine jungen Bäume mehr hochkommen. Damit schwand der Lebensraum vieler anderer Tiere. Seit nun wieder Wölfe ausgesetzt wurden, beginnt sich die Natur zu regenerieren.

dort bestens. Sie fressen ein breites Spektrum kleiner Tiere, weswegen Ökologen schwere Auswirkungen auf die heimischen Raubfische befürchten. Sogar Haie könnten von diesen Neuankömmlingen verdrängt werden.

Wie kündigen sich Ökokatastrophen an?

Ebenso hat der Klimawandel unter Umständen schwerwiegende Folgen für Nahrungsnetze, etwa wenn sich die Verbreitungsgebiete – oder Zeitspannen ihres Auftretens – von Raub- oder Beutetieren in unterschiedlicher Weise verlagern. Mancherorts beobachten Ökologen schon dergleichen (siehe »Wenn der Frühling zu früh kommt«, SdW 4/2004, S. 56).

Dass es erheblich aufwändiger ist, ein bereits zusammengebrochenes Ökosystem wiederherzustellen, als es kurz vor dem Umkippen noch zu retten, ist Forschern längst klar. Doch die wenigsten vermochten sich bisher vorzustellen, woran sie eine nahende Katastrophe erkennen sollten. Ebenso wussten sie nicht, an welcher Stelle eines Nahrungsnetzes im Vorhinein am besten einzugreifen wäre. Auch hierbei sollen die mathematischen Modelle helfen. Wie echte Ökosysteme können simulierte plötzlich kollabieren. Und wer genau hinschaut, bemerkt dafür in der Simulation lange vorher zwar nur leichte, aber eindeutige Anzeichen – ähnlich dem fernen Grollen vor einem Gewittersturm.

So erholt sich beispielsweise ein virtuelles, bereits »lädierendes« Ökosystem nach einer Störung langsamer als ein noch gesundes. Übertragen auf natürliche Bedingungen heißt das: Wird das angeschlagene System etwa von einem Temperatursturz oder einer Seuche heimgesucht, schwingt es nicht so bald in den alten Zustand zurück wie ein gesundes. Je näher es dem Umschlagpunkt komme, desto länger benötige es nach solch einem Zwischenfall zur Erholung, stellt Marten Scheffer von der Universität Wageningen (Niederlande) fest, der an den Frühwarnsystemen mitarbeitet.

Die Forscher prüfen ihre Modelle in verschiedenster Weise an Organismen, zunächst unter streng kontrollierten Bedingungen im Labor. Am Peter Lake haben sie das Frühwarnsystem erstmals in der Natur ausprobiert. Nachdem sie die Forellenbarsche in den See gesetzt hatten, maßen sie täglich die



PHOTO RESEARCHERS / HANS REINHARD



GETTY IMAGES / GERRY ELLIS



MINDEN PICTURES / DAVID SUCSY

Fischbestände sowie das Zoo- und das Phytoplankton. Zum Vergleich diene ihnen der direkt daneben gelegene, etwa gleich große Paul Lake, dessen Nahrungsnetz nicht manipuliert wurde. Wie eingangs erwähnt, änderten sich die Verhältnisse im Peter Lake erst zwei Jahre nach Versuchsbeginn drastisch. Doch schon im Sommer ein Jahr vor dem Wechsel fielen rasche Schwankungen des Chlorophyllgehalts – somit der Lichtverhältnisse – auf, die im Paul Lake nicht auftraten.

Jene starken Schwankungen erinnerten an das Verhalten von Simulationen kurz vor dem Kippen. Deswegen möchte Carpenters Team anhand der Modelle nun für verschiedenste Ökosysteme – Wälder, Feuchtgebiete, Meere – Beobachtungsinstrumente entwickeln, die auf solche Vorgänge ansprechen. Eigentliches Ziel der Messungen ist es natürlich, ökologische Desaster zu verhindern – sprich zu erkennen, wann es höchste Zeit wird, ein malträtiertes Ökosystem zu schonen oder sogar gezielt Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

Inwiefern dieser Ansatz funktioniert, soll wiederum zu erst am Peter Lake geprüft werden. Diesmal wird der See gedüngt, was nach einiger Zeit eine Algenblüte hervorrufen dürfte. Das Wasser würde dann trüb, nur noch wenig Licht dränge in die Tiefe. Dadurch träte Sauerstoffmangel auf, der dem gesamten Ökofüge zusetzen würde. Bei fortgesetzter Düngung wäre schließlich ein vermehrtes Sterben etlicher der großen Fische, auch der eingesetzten Forellenbarsche, zu erwarten. Carpenter vermutet, dass diese fortan über eine ganz geringe Dichte nicht mehr hinauskämen.

Allerdings rechnet er mit leichten Anzeichen für den kommenden Umschlag einige Monate im Voraus, die sich zum Beispiel als Schwankungen der Chlorophyllkonzentration bemerkbar machen könnten. Sobald dergleichen auftritt, wird er mit der Düngung aufhören. Dann, so die Prognose, sollte sich das ganze System wieder fangen: Der Algenwuchs ginge zurück, und der frühere Zustand würde sich wieder einpegeln. Der Paul Lake wird zu Vergleichszwecken weiterhin in Ruhe gelassen. Aber in den nahe gelegenen Tuesday Lake leiten die Forscher ebenfalls Nährstoffe ein, und bei diesem See werden sie trotz Alarmzeichen mit dem Düngen fortfahren und die Entwicklung verfolgen.

Bei allem Optimismus, dass derartige Frühwarnsysteme auch in anderen Situationen funktionieren und damit manchen Kollaps abwenden helfen, bleibt Carpenter realistisch. Zwar erscheinen die Modelle wegen der gleichartigen Organisationsprinzipien ökologischer Netze übertragbar. Doch wie die Simulationen zeigen, ist eine heftige Störung mitunter auch zu tief greifend und erfolgt zu rasch, als dass Ökologen sie rechtzeitig registrieren können. Das Fazit des Forschers: Es wird weiterhin böse Überraschungen geben – aber zumindest einige davon kann man mit dem Frühwarnsystem abwenden. ~

DER AUTOR



Carl Zimmer ist Wissenschaftsjournalist und Sachbuchautor. Er schreibt für renommierte amerikanische Zeitungen und Magazine, oft auch für »Scientific American«. Bei »Spektrum der Wissenschaft« erschienen bereits etliche seiner Artikel.

QUELLEN

- Carpenter, S.R. et al.:** Leading Indicators of Trophic Cascades. In: Ecology Letters 11, S. 128–138, 2008
McCann, K.S.: Food Webs. Princeton University Press, 2011
Strong, D.R., Frank, K.T.: Human Involvement in Food Webs. In: Annual Review of Environment and Resources 35, S. 1–23, 2010
Terborgh, J., Estes, J.A. (Hg.): Trophic Cascades: Predators, Prey, and the Changing Dynamics of Nature. Island Press, Washington 2010

LITERATURTIPP

Crist, D.T. et al.: Schatzkammer Ozean. Volkszählung in den Weltmeeren. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010
Reich *bebilderte Darstellung zu einem langjährigen internationalen Forschungsprojekt*

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168633

Verrückter Stoffwechsel

»Die Annahme, daß manche Psychosen auf Anomalien des Stoffwechsels zurückgehen, hat in jüngster Zeit Stützung erfahren, und zwar durch Untersuchungen im Institut für Psychiatrie der Universität von Kalifornien an 50 akut

Geisteskranken. Bei einem Vergleich der Eiweißkörper des Blutserums mit denen von Gesunden zeigten sich Abweichungen. Da das Gehirn die Proteinsynthese regelt, können diese als Auswirkungen eines gestörten Hirnstoffwechsels aufgefaßt werden.« *Kosmos* 12, 1962, S. 512

Satt in die Zukunft

»Der Nationalökonom T. R. Malthus nahm an, daß die Vermehrung der Menschheit geometrisch verlaufe, während die Nahrungsmittelproduktion nur arithmetisch zunehme. Tatsächlich vermehrt sich die Weltbevölkerung rascher, so daß eine Verdoppelung in rund 50 Jahren erwartet wird. Diese Zahlen werden, zumindest in der westlichen Welt, jedoch durch die Nahrungsmittelproduktion übertroffen, zumal die Vermehrungsrate mit steigendem Lebensstandard abzunehmen pflegt.« *Naturwissenschaftliche Rundschau* 12, 1962, S. 485

Milch von glücklichen Pflanzen

»Britische Wissenschaftler haben ein Verfahren zur Herstellung von Milch ohne Mitwirkung der Kuh entdeckt. Hauptzutat des Getränks, das sowohl in flüssiger als auch in fester Form auf den Markt kommen soll, ist grünes Gewächs vieler Arten: Erbsenhülsen, Gemüsekohlblätter, Unkraut, Nesseln und anderes. Den Herstellern ist es schon gelungen, die grüne Farbe aus ihrer Milch zu entfernen. Gegenwärtig versuchen sie, dem Getränk noch einen gewissen Gemüsegeschmack zu nehmen.« *Neuheiten und Erfindungen* 325, 1962, S. 224–225



Dr. Frank Wokes, der Direktor des vegetarischen Forschungszentrums in Watford, nimmt einen Schluck Grasmilch.



Altbackenes Brot

»In einem Männergrab der Wikingerzeit (800–1050 n. Chr.) fand sich ein Brot, das aus einer verkohlten Masse bestand und die Form einer flachen Scheibe von 6 cm Durchmesser hatte. H. V. Rosendahl hat festge-

stellt, daß dieses Brot aus grobgemahlener Ackererbsen- und Fichtenrinde gebacken war und Silikatkörner enthielt, die wahrscheinlich von den Mahlsteinen herrühren. Dieser Fund ist der älteste Beleg der Erbsenkultur in Schweden, die aber bei den germanischen Völkern schon weit früher geübt worden ist.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik* 51, 1912, S. 1087

Dick und dumm

»Daß unter den Säugtieren, die sich während der Miozänperiode über die Erde ausbreiteten, neben den kleinsten Formen die riesigsten Ungetüme vertreten waren, ist zur unumstößlichen Gewißheit geworden. Einen solchen miozänen Dickhäuter zeigt un-

sere Abbildung nach einem Aquarell, zu dem ein im »Amerikanischen Nationalmuseum« zu New York aufgestelltes Titanotherium-Skelett als Vorwurf gedient hat. Diese ungeschlachten, nashornähnlichen



Masse statt Klasse?

Dickhäuter tummelten sich hauptsächlich in den miozänen Laubwäldern Nordamerikas, haben aber auch bei uns gelebt. Durch besondere Intelligenz scheinen sich diese plumpen Huftiere nicht gerade ausgezeichnet zu haben, da die Gehirnhöhle sehr klein ist.« *Kosmos* 12., 1912, S. 480



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. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2013 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

www.spektrum.com/kalender2013

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. Der Kalender präsentiert Tag für Tag die bedeutendsten astronomischen Ereignisse. Sternkarten für jeden Monat, Beschreibungen der Himmelsobjekte und viele Astroatfahmen erleichtern Ihnen die Orientierung am Nachthimmel. Für Einsteiger und fortgeschrittene Sternfreunde ist der »Ahnert« das unentbehrliche Standardwerk.

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

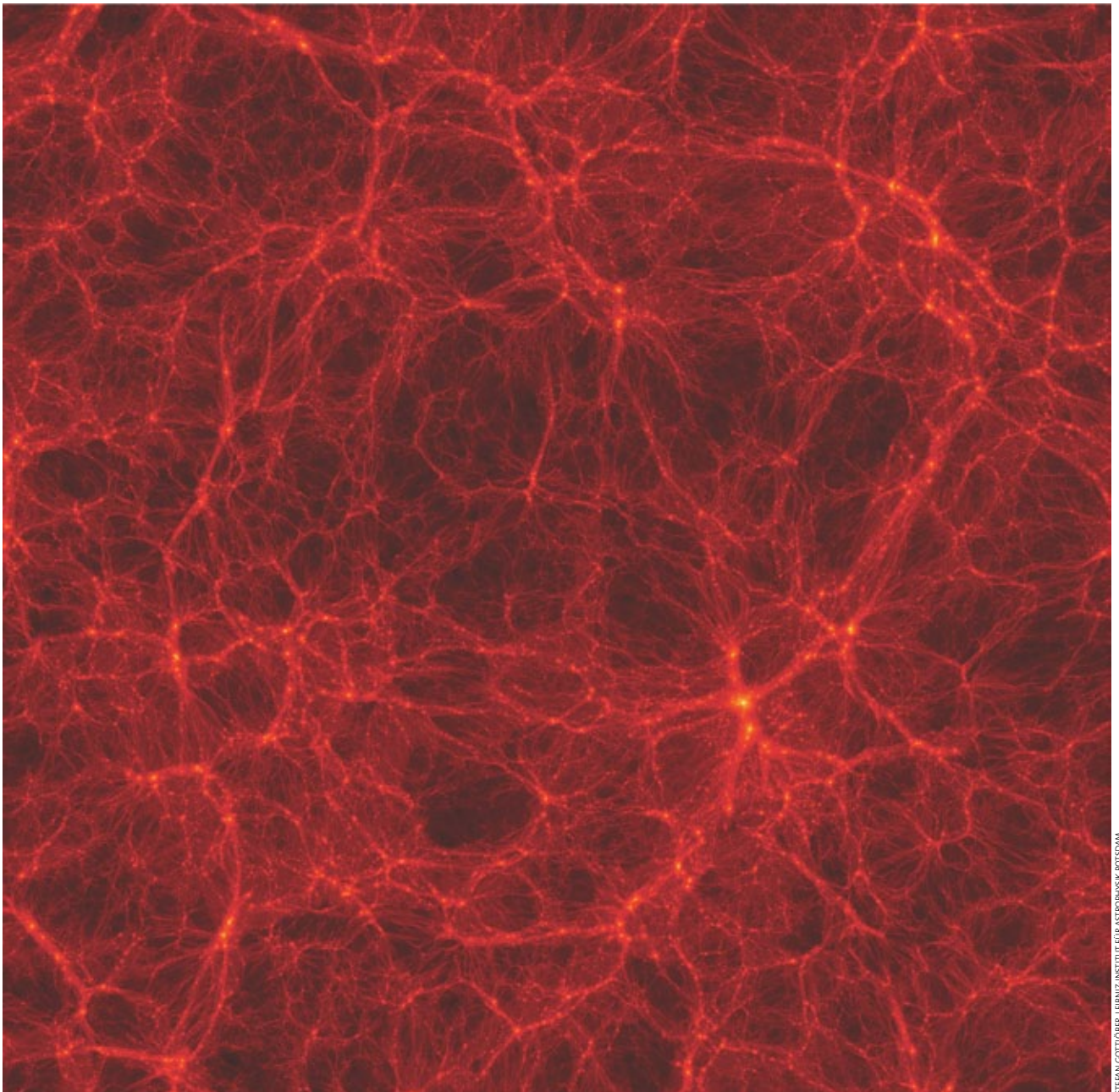
www.spektrum.com/ahnert



Das Universum in der Kiste

Das Programm »Bolshoi« simuliert das Weltall als Würfel mit einer Milliarde Lichtjahre Kantenlänge – viel kleiner als das echte. Dabei müssen acht Milliarden gedachte Massenpunkte jeweils 200 Millionen Sonnenmassen vertreten. Und doch kommt der Endzustand des nachgemachten Universums der heutigen Gestalt des echten überraschend nahe!

Von Brian Hayes



STEFAN GOTTLIEB, LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ASTROPHYSIK POTSDAM

Wie übersichtlich und aufgeräumt war das Universum noch zu den Zeiten von Isaac Newton (1643–1727)! Um die Sonne kreisen sechs Planeten und um diese eine Hand voll Monde, gelegentlich fliegt ein Komet vorbei, und im Hintergrund leuchten die Fixsterne. Newton selbst hat den entscheidenden Beitrag dazu geleistet, die Welt aufzuräumen: Er schuf die mathematischen Hilfsmittel, mit deren Hilfe sich die Bewegung jedes dieser Himmelskörper berechnen lässt.

Sind Position und Geschwindigkeit für alle Körper zu einem bestimmten Zeitpunkt bekannt, dann ergibt sich aus Newtons universellem Gravitationsgesetz die Kraft, die auf jeden einzelnen von ihnen wirkt. Diese bestimmt (»Kraft ist Masse mal Beschleunigung«) die Änderung seiner Geschwindigkeit; daraus wiederum lassen sich seine Geschwindigkeit und damit seine Position zu einem geringfügig späteren Zeitpunkt berechnen. Mit den so gewonnenen Werten kann man anschließend auf gleiche Weise den Systemzustand noch ein wenig später bestimmen, und so weiter. Dieses numerische Verfahren löst das so genannte n -Körper-Problem: Welche Bahnen durchlaufen n Körper unter dem Einfluss ihrer gegenseitigen Gravitationsanziehung?

Genau genommen gelten die Gleichungen für die Änderung des Orts und der Geschwindigkeit nur ungefähr für kleine Zeiträume und exakt erst im Grenzwert verschwindend kurzer Zeiten. Aber die schwierige Frage, was das genau bedeutet, hatte Newton vorab geklärt, indem er die Differenzial- und Integralrechnung erfand. Mit Hilfe dieser theoretischen Werkzeuge kann man den Fehler abschätzen, der durch die Verwendung endlicher Zeitschritte (»Diskretisierung«) entsteht, und mit geeigneten Mitteln in Grenzen halten.

Newton hätte sich gewiss schon selbst an der Lösung des n -Körper-Problems versucht, wenn er geeignetes Rechengerät zur Verfügung gehabt hätte. Heute setzen wir dafür Computer ein; allerdings ist das Universum inzwischen auch erheblich umfangreicher geworden – und sehr viel unübersichtlicher als zu Newtons Zeiten. Wir wissen heute, dass unser Sonnensystem nur ein kleiner Fleck in der Milchstraße ist, einer Spiralgalaxie mit mehreren hundert Milliarden Sternen. Diese wiederum treibt inmitten von Milliarden anderer Milchstraßensysteme, die sich zu so genannten Clustern, Superclustern und einer ganzen Hierarchie weiterer

Dies ist nur ein dünnes Scheibchen des simulierten Universums: 35 Millionen Lichtjahre dick, während die Kantenlänge des Bilds immerhin einer Milliarde Lichtjahre entspricht. Ein dunkelroter Punkt enthält ungefähr eine Galaxie, einer der größeren hellen Flecken einen Haufen aus Hunderten oder Tausenden von Galaxien. Das spitzendeckchenartige Muster entsteht – in der Simulation wie in der Realität – spontan dadurch, dass Materie unter dem Einfluss ihrer eigenen Anziehungskräfte kollabiert. Stefan Gottlöber vom Leibniz-Institut für Astrophysik in Potsdam hat Ergebnisse der Simulation »Bolshoi« zu diesem Bild verarbeitet.

AUF EINEN BLICK

GROSSES THEATER

- 1** Bolshoi ist ein Computermodell des Universums. Es arbeitet mit acht Milliarden Einzelmassen.
- 2** Die Berechnung der gegenseitigen Anziehungskräfte gelingt nur durch **raffinierte Approximationen** in akzeptabler Zeit.
- 3** Erste Vergleiche zeigen, dass die **simulierten Häufigkeiten** verschiedener Galaxientypen mit den beobachteten gut übereinstimmen.

Strukturen zusammengepackt haben. Sie erstrecken sich, so weit das Auge – und vor allem das Teleskop – reicht.

Alle diese kosmischen Objekte streben beständig auseinander, weil sich das Universum ausdehnt; und diese Ausdehnung nimmt auch noch an Geschwindigkeit zu. Am erstaunlichsten ist jedoch, dass die gesamte leuchtende Materie aller Galaxien – also alles, was am Nachthimmel zu sehen ist – nicht mehr als ein halbes Prozent des Universums ausmacht. Der erdrückend große Rest besteht aus unsichtbaren Substanzen, die man mangels besseren Wissens schlicht als »Dunkle Materie« und »Dunkle Energie« bezeichnet.

Eine Geschichte der Geschichte des Universums

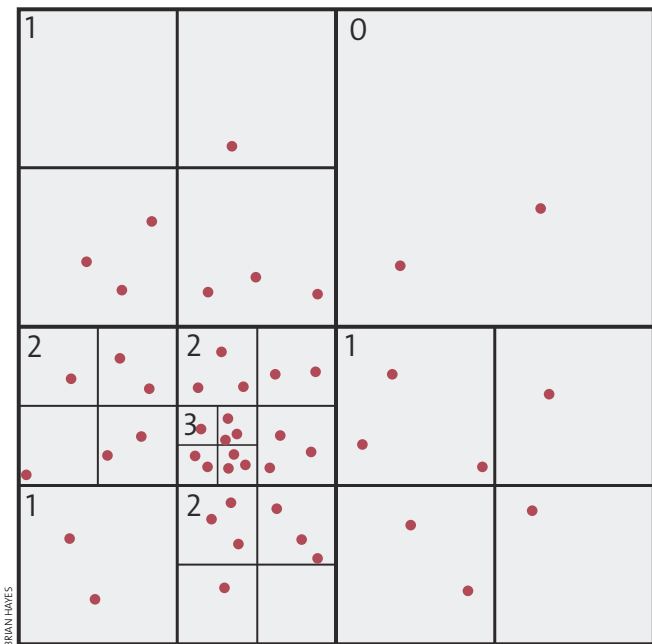
Im Weltall bewegt sich also ungeheuer viel mehr, als Newton je ahnen konnte. Aber erstaunlicherweise brauchen wir trotzdem keine neuen Gleichungen! Wenn wir diese Bewegungen nachrechnen wollen, müssen wir nur ein n -Körper-Problem lösen. Newtons Grundprinzipien der Mechanik beschreiben die Planetenbewegungen vor unserer Haustür ebenso wie die jahrmilliardenlangen Prozesse, in deren Verlauf sich Tausende von Galaxien in Fäden von hunderten Millionen Lichtjahren Länge angeordnet haben.

Seit einiger Zeit modellieren mehrere Arbeitsgruppen in umfassenden Simulationen die Entwicklung des ganzen Universums. Hier soll von einem Projekt namens »Bolshoi« die Rede sein; die Projektleiter sind Anatoly Klypin von der New Mexico State University und Joel Primack von der University of California in Santa Cruz.

»Bolshoi« ist das russische Wort für »groß« oder »gewaltig«, und der Name ist wahrhaft treffend gewählt: Das Vorhaben verbraucht sechs Millionen Rechnerstunden und produziert Daten im Umfang von 100 Terabyte. Dennoch ist das so simulierte Universum unvorstellbar winzig verglichen mit dem Original. Es grenzt sogar an ein Wunder, dass so viel Universum in einer so kleinen Kiste Platz hat.

Unser Bild vom Universum – und von unserem Platz darin – hat sich in den letzten 100 Jahren noch weit radikaler gewandelt als mit der kopernikanischen Revolution im 16. Jahrhundert.

Es begann in den 1920er Jahren mit der Erkenntnis, dass »Spiralnebel« nicht die Windrädchen aus Staub sind, für die man sie bis dahin gehalten und irgendwo zwischen den uns



Der Algorithmus »adaptive refinement tree« zerlegt den Rechenraum in würfelförmige Zellen, jede von ihnen in kleinere Tochterzellen (in diesem zweidimensionalen Schema vier Stück, im Original acht) und so weiter, bis in jeder von ihnen noch höchstens eine festgelegte Maximalzahl von Massen sitzt (in diesem Beispiel 3); außerdem dürfen sich benachbarte Zellen um nicht mehr als eine Größenklasse (Nummern in den Zellen) unterscheiden. Wenn Kräfte über große Entfernungen zu berechnen sind, werden alle Massen einer Zelle zu einer Ersatzmasse zusammengefasst und möglicherweise die Ersatzmassen mehrerer Zellen zu einer für die gemeinsame Mutterzelle.

benachbarten Sternen lokalisiert hatte. Vielmehr bestehen sie wie die Milchstraße (»Galaxis«), zu der unser Sonnensystem gehört, aus Milliarden von Sternen und sind sehr, sehr weit entfernt. Heute heißen sie »Galaxien«.

Wenige Jahre später fand Edwin P. Hubble, dass die Spektren fast aller Sterne zu längeren Wellenlängen hin verschoben sind. Diese »Rotverschiebung« deutete er als Beleg dafür, dass sich die Galaxien von uns entfernen. Hubble erkannte außerdem, dass die Geschwindigkeit dieser »Fluchtbewegung« proportional zu ihrer Entfernung ist: Das gesamte Universum dehnt sich aus.

Verfolgt man diese Expansion rechnerisch zurück, dann beginnt alles in einem einzigen gemeinsamen Ausgangspunkt, dem »Urknall« (Big Bang). Das Universum hat also ein Alter, und zwar nach heutiger Schätzung von etwa 13,7 Milliarden Jahren. Den überzeugendsten Beleg für das Urknallmodell lieferte 1965 die Entdeckung der kosmischen Hintergrundstrahlung. Vom frühen, heißen Universum ist ein Rest von Strahlung mit Spitzenwerten im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums übrig geblieben, was einer kosmischen Durchschnittstemperatur von 2,7 Kelvin entspricht.

In den 1970er Jahren galt das Urknallmodell als weitgehend gesichert. Einige Dinge blieben allerdings noch ungeklärt, so vor allem die Isotropie des Universums. Wenn wir uns umschaun, dann erscheint das Material im Kosmos überall sehr gleichmäßig verteilt, wie in einem gut verrührten Brei. Aber da kann niemand und nichts gerührt haben, weil dafür die Zeit nicht ausreichte. Es gibt Regionen im Universum, die niemals miteinander kommunizieren konnten, denn selbst das Licht hätte von der einen zur anderen länger gebraucht, als das Universum alt ist. Insbesondere kann kein Temperatúrausgleich stattgefunden haben. Aber wieso haben dann selbst so weit voneinander entfernte Regionen dieselbe Temperatur?

Zur Erklärung musste die Geschichte des frühen Universums abermals radikal umgeschrieben werden: Inzwischen geht man davon aus, dass sich das Universum für Bruchteile von Sekunden explosionsartig ausgedehnt hat. Diese Episode »kosmischer Inflation« verlief derart rasant, dass sich ein winziger (und deshalb fast gleichförmiger) Raumausschnitt bis zu dem ausdehnen konnte, was heute unser gesamtes beobachtbares Universum ausmacht.

Ein weiteres ungelöstes Rätsel ist das der fehlenden Masse. Die Rotationsgeschwindigkeiten der Sterne in einer Galaxie hängen von ihrer Gesamtmasse und deren Verteilung ab. Ähnliches gilt auch in größerem Maßstab: Die Gesamtmasse eines Galaxienclusters beeinflusst die Bewegungen seiner Komponenten. Aus Messungen dieser Geschwindigkeiten erschließt sich für alle Galaxien eine weit größere Masse, als wir beobachten. Allem Anschein nach ist jede Galaxie eingehüllt in eine gewaltige Wolke, einen »Halo«, aus »Dunkler Materie« – einem Stoff, der unsichtbar ist, weil er elektromagnetische Strahlung weder aussendet noch absorbiert. Über seine Beschaffenheit wissen wir faktisch nichts – nur dass er offenbar 80 Prozent der Gesamtmaterie des Universums ausmacht.

Vor kaum mehr als zehn Jahren gab es die nächste große Überraschung. Zwei Gruppen von Astronomen hatten untersucht, wie sich die Geschwindigkeit der kosmischen Expansion im Lauf der Geschichte verändert hat. Eigentlich müsste die Gravitationsanziehung der allgemeinen Ausdehnung des Universums entgegenwirken, bis hin zu deren Umkehrung und dem finalen Kollaps, dem »Big Crunch« (Spektrum der Wissenschaft 5/2011, S. 36). Die Messungen zeigen dagegen, dass die Expansion nicht nur nicht nachlässt, sondern sich sogar beschleunigt. Irgendetwas muss den Raum auseinandertreiben. Dieses Etwas bekam den Namen »Dunkle Energie«; sie scheint sogar der Hauptbestandteil des Universums zu sein.

Alle diese Ideen gehören zu einem heute allgemein akzeptierten Modell der Kosmologie namens » Λ CDM«. Der griechische Buchstabe Λ (Lambda) ist das von Einstein benutzte Symbol für die von ihm eingeführte »kosmologische Konstante«, die heute eine Möglichkeit für das Verständnis der Dunklen Energie bietet. CDM steht für »kalte Dunkle Materie« (cold dark matter), »kalt« deswegen, weil ihre Partikel

sich im Gegensatz zu den Teilchen in einem heißen Gas nur mit geringer Geschwindigkeit bewegen.

Im Λ CDM-Modell macht die Dunkle Energie 73 Prozent der Substanz des Universums aus und die Dunkle Materie 23 Prozent. (Wegen $E=mc^2$ gibt es eine gemeinsame Maßeinheit für Masse und Energie.) Demnach besteht das Universum zu mehr als 95 Prozent aus Stoff, von dessen Existenz vor 30 Jahren noch niemand etwas ahnte. Nur 4,6 Prozent entfallen auf die uns geläufige Materie. Man nennt sie »baryonisch«, weil die Teilchen, die den größten Teil ihrer Masse ausmachen, nämlich Protonen und Neutronen, zur Klasse der Baryonen gehören. Sie besteht zum weit überwiegenden Teil aus Wasserstoffgas im intergalaktischen Raum; die Sterne in den Galaxien tragen gerade einmal 0,4 Prozent zur baryonischen Masse bei.

Beobachtung, Theorie, Simulation

Das klingt zwar alles wie eine Abfolge verrückter Ideen; aber jede einzelne von ihnen ist durch Beobachtungen gestützt, von einer physikalischen Theorie getragen und mittels Modellrechnungen (»Simulationen«) bestätigt, die Theorie und Beobachtung miteinander verknüpfen.

In den vergangenen 20 Jahren ist die Astronomie sogar zu einer statistischen Disziplin mit einem Überfluss an Daten geworden. So wurden in einer systematischen Himmelsdurchmusterung, dem »Sloan Digital Sky Survey«, 500 Millionen Objekte katalogisiert und beinahe zwei Millionen Spektren aufgezeichnet. Letztere gestatten die Messung der Rotverschiebung des Objekts und dadurch die Berechnung seiner Entfernung. Diese Daten ergeben eine dreidimensionale Karte, die ungefähr ein Drittel des Himmels überdeckt und mehr als eine Milliarde Jahre zurückreicht.

Ein anderes Forschungsvorhaben zielt darauf ab, den ältesten Photonen des Universums Informationen zu entlocken. Ein Satellit namens »Wilkinson Microwave Anisotropy Probe« (WMAP) zeichnet winzigste räumliche Schwankungen in der oben erwähnten Mikrowellen-Hintergrundstrahlung auf. Aus ihnen gewinnen wir ein – wenn auch sehr unscharfes – Bild von der Verteilung von Masse und Energie in einer frühen Phase des Weltalls: dem Anfangszustand des sichtbaren Universums.

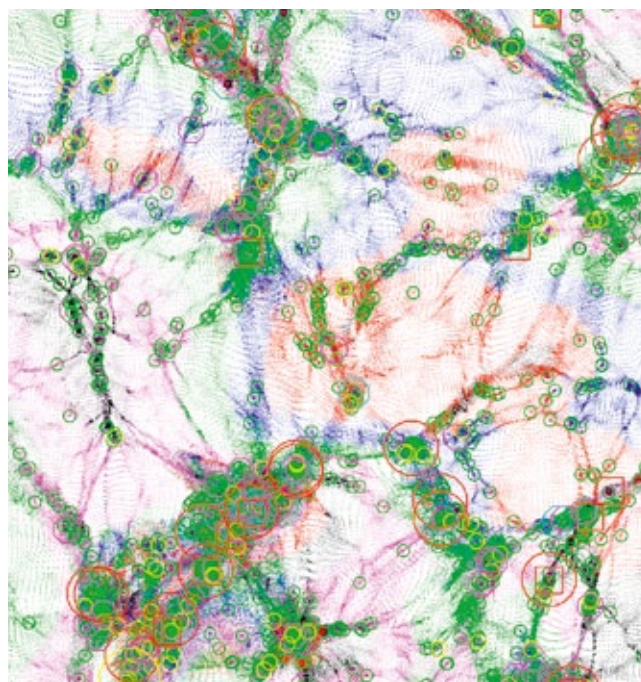
Zur Beschreibung der Wechselwirkungen von Masse, Energie, Raum und Zeit im expandierenden Universum steht Einsteins allgemeine Relativitätstheorie zur Verfügung. Auch die Quantenmechanik spielt eine gewisse Rolle, etwa zur Erklärung von Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund. Aber aus diesen theoretischen Grundlagen ergeben sich nicht ohne Weiteres Gestalt, Größe und andere Eigenschaften der Strukturen, die sich im Verlauf der Entwicklung des Universums herausgebildet haben. Diese findet man am besten mit Computersimulationen. Beginnend mit plausiblen Anfangsbedingungen berechnet man unter Anwendung der bekannten physikalischen Gesetze Ergebnisse, die dann mit den astronomischen Daten verglichen werden können. Die Abfolge verschiedener Zwischenstände die-

ser Berechnungen bietet uns nebenbei noch einen Einblick in die Geschichte des Universums: Wir können seine Entwicklung wie in einem Film verfolgen.

Bereits 1941 modellierte der schwedische Astronom Erik Homborg mit einem bemerkenswerten Analogrechner, den er aus Glühlampen und Fotozellen zusammengesetzt hatte, wie sich Galaxien zu Clustern zusammenballen. In den frühen 1960er Jahren untersuchte Sverre J. Aarseth von der University of Cambridge mit Hilfe digitaler Rechner, die damals gerade die analogen von der Bildfläche verdrängten, Cluster aus 25 bis 100 Galaxien.

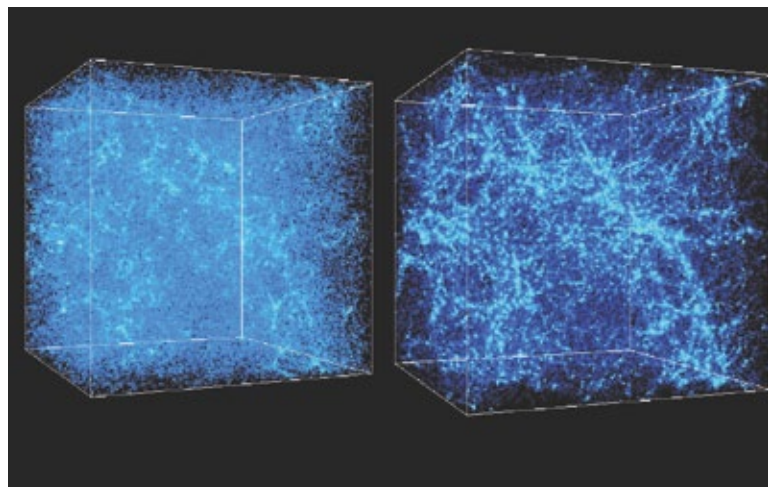
Heute bewältigt die moderne Rechentechnik erheblich größere Modelle. Um die Jahrtausendwende konnten die Forscher schon die Bewegungen von einer Milliarde Objekte im Computer nachbilden (Spektrum der Wissenschaft 9/1999, S. 49). Im Jahr 2005 veröffentlichte Volker Springel vom Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching zusammen mit 16 Kollegen die Ergebnisse einer bahnbrechenden Simulation namens »Millennium Run« (Spektrum der Wissenschaft 11/2010, S. 34, und 12/2011 Extra, S. 10). Sie beruht auf dem Λ CDM-Modell und verfolgt mehr als zehn Milliarden Teilchen Dunkler Materie, die sich in einem Würfel mit einer Kantenlänge von mehr als zwei Milliarden Lichtjahren bewegen. Die Berechnungen überspannen den Zeitraum von zwölf Millionen Jahren nach dem Urknall bis zur Gegenwart.

In diesem dünnen Schnitt durch den Endzustand der Bolshoi-Simulation sind Anhäufungen von Teilchen, die durch Anziehungskräfte aneinander gebunden sind, durch Kreise und Quadrate gekennzeichnet. Diese »Halos« neigen dazu, sich ihrerseits zu größeren Strukturen zusammenzuballen. Sichtbare Galaxien kommen in dieser Simulation, die nur Dunkle Materie beschreibt, gar nicht vor; sie umfassen jeweils nur einen kleinen Teil eines Halos.



ANATOLY KIVPIN, NEW MEXICO STATE UNIVERSITY

In einem simulierten Universum entstehen aus einem fast homogenen Anfangszustand (links, etwa 100 Millionen Jahre nach dem Urknall) durch die gegenseitige Anziehung der Teilchen allmählich großräumige, fadenförmige Strukturen. Einige von ihnen durchziehen das gesamte Volumen (rechts der Endzustand, welcher der Gegenwart entspricht). Die Simulationsdaten haben Anatoly Klypin, einer der Leiter des Projekts Bolshoi, und sein Kollege Andrey V. Kravtsov mit einer Vorgängerversion von Bolshoi berechnet.



Leider basierten einige Daten für die Anfangsbedingungen auf frühen Resultaten des Satelliten WMAP, die später erheblich korrigiert werden mussten. Die Simulation Bolshoi ist etwas kleiner als Millennium Run, berechnet aber Positionen, Massen und Kräfte genauer. Außerdem verwendet sie aktuellere WMAP-Werte.

Die allgemeine Relativitätstheorie ist zwar die Grundlage der modernen Kosmologie; aber weder Millennium noch Bolshoi machen Gebrauch von ihr. Gravitation wird nicht als Verzerrung oder Krümmung der Raumzeit aufgefasst, sondern wie bei Newton schlicht als Kraft zwischen den Massen. Wie kann eine derart veraltete Physik akzeptable Ergebnisse liefern? Relativistische Methoden wären unverzichtbar, falls die Geschwindigkeiten der betrachteten Objekte der des Lichts nahekämen. Galaxien sind aber langsam. Sie erreichen nur wenige hundert Kilometer pro Sekunde, und dafür reichen die klassischen Gleichungen völlig aus.

Newton selbst hat bereits das Zweikörperproblem gelöst: Für den Fall, dass die Positionen, Geschwindigkeiten und

Massen zweier punktförmiger Körper zu einem gewissen Zeitpunkt gegeben sind und die gegenseitige Gravitationsanziehung die einzige Kraft ist, die auf sie wirkt, konnte er ihre Bahnen für alle Zeiten berechnen, sowohl in der Vergangenheit als auch in der Zukunft. Das Dreikörperproblem dagegen überstieg bereits Newtons Möglichkeiten. Für das n -Körper-Problem mit $n > 3$ vermutete er, dass »die Bestimmung dieser Bewegungen durch exakte Gesetze, die ihre bequeme Berechnung gestatten, ... die Kräfte des gesamten menschlichen Intellekts übersteigt«.

Zwei, drei, ..., n Körper

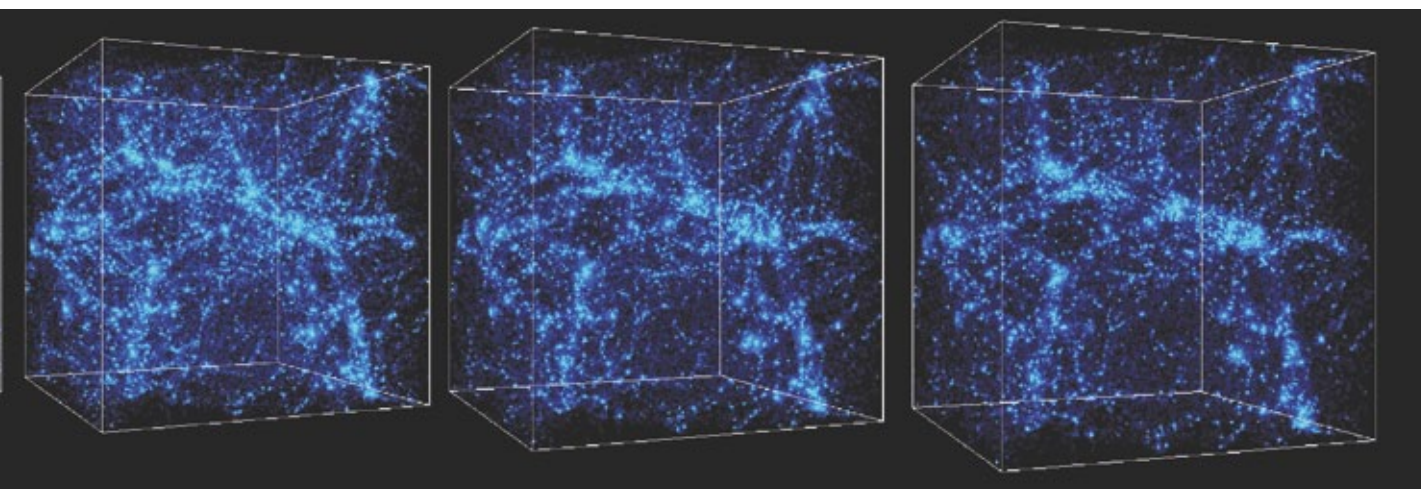
Mit dieser Einschätzung lag Newton richtig. Eine geschlossene mathematische Formel, welche die Positionen und Geschwindigkeiten aller n Punktmassen für alle Zeiten angäbe, ist schlicht undenkbar. Was man – mit genügend Rechenkapazität – finden kann, ist eine »fortschreitende« Lösung: Von einem gegebenen Anfangszustand aus lässt man alle Massenpunkte für eine kurze Zeit ihre Bahn entlangwandern und findet so den Zustand einen Augenblick später. Dabei hat man, um überhaupt rechnen zu können, zum Beispiel unterstellt, dass die Kräfte sich während dieser kurzen Zeitspanne nicht ändern. Wegen dieses Fehlers stimmt das Ergebnis nur näherungsweise; wenn man aber die Zeitabschnitte hinreichend kurz wählt, kommt man der richtigen Lösung erstaunlich nahe.

Wie berechnet man einen solchen Zeitschritt? Ausgangsdaten sind die Massen aller n Körper (die sich nicht ändern) sowie ihre räumlichen Koordinaten und Geschwindigkeiten zu einem Anfangszeitpunkt t_0 . Auf jeden Körper wirken die Anziehungskräfte aller übrigen. Für die Körper mit den Nummern i und j ist der Betrag ihrer gegenseitigen Anziehungskraft nach Newton $F_{ij} = G m_i m_j / r^2$; dabei sind m_i und m_j die Massen beider Körper und r ihr Abstand. (Die allgemeine Gravitationskonstante G erscheint nicht explizit in den Berechnungen; man wählt die Einheiten von Masse und Länge so, dass $G = 1$ ist.) Die auf den Körper i wirkende Gesamtkraft ist die Summe aller Kräfte F_{ij} – die Vektorsumme wohlge-

Wie groß ist das Universum?

Nach aktuellen Schätzungen sind die Teile des Kosmos, deren Licht wir heute gerade noch empfangen können, 42 bis 47 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt. Dieses Licht kann zwar nur 13,7 Milliarden Jahre unterwegs gewesen sein. Aber in der Zwischenzeit ist seine Quelle wegen der kosmischen Expansion von uns weggewandert, und zwar um über 30 Milliarden Lichtjahre, also mit mehr als der doppelten Lichtgeschwindigkeit. Das steht nicht im Widerspruch zur speziellen Relativitätstheorie, weil sich mit dieser Geschwindigkeit keine Materie bewegt hat, sondern nur der Raum expandiert.

In <http://scienceblogs.com/startswithabang/2009/07/31/the-size-of-the-universe-a-har/> erläutert Ethan Siegel die Sache (auf Englisch) mit bildreichen Metaphern.



ANATOLIY KUPIN, LIND, ANDREY V. KRAVTSOV, UNIVERSITY OF CHICAGO

merkt. Man muss auch die Richtung berücksichtigen, in der die Kräfte wirken; das ist für die Kraft F_{ij} die Richtung der Verbindungslinie zwischen den Körpern i und j . Insgesamt sind also $n(n-1)/2$ Kraftvektoren zu berechnen, eine für jedes Paar von Körpern.

Eine weitere Gleichung Newtons verbindet diese Gesamtkraft mit der Beschleunigung, die der Körper dadurch erfährt: $F=ma$. Ist die Beschleunigung eines Massenpunkts zu einem Zeitpunkt bekannt, so lässt sich daraus seine Geschwindigkeit kurze Zeit später berechnen und daraus wiederum seine Bahn für das kurze Zeitintervall Δt dazwischen. Dieser erste Verfahrensschritt ergibt die Geschwindigkeiten und Positionen der Körper zum Zeitpunkt $t_0+\Delta t$, die anschließend als Ausgangsdaten für den nächsten Rechenschritt dienen.

Kosmologische Simulationen des n -Körper-Problems arbeiten mit Werten für n im Bereich einiger Milliarden. Das läuft auf einen immensen Rechenaufwand hinaus. Für $n=10^9$ Massenpunkte sind $n(n-1)/2=5 \cdot 10^{17}$ Kräfte zu berechnen – weit jenseits der Möglichkeiten auch der modernsten Supercomputer, von der Ausdauer eines Menschen ganz zu schweigen. Das oben beschriebene direkte Rechenverfahren kommt also nicht in Frage.

Was tun? Die Grundidee kommt aus der Elementarphysik. Man ersetze Gruppen eng benachbarter Körper durch jeweils einen einzigen mit der Summe der Massen und der Position im Schwerpunkt des Ensembles. Aus großer Entfernung ist die Kraft, die von dem fiktiven Körper ausgeübt wird, von der Summe der Einzelkräfte kaum zu unterscheiden. Wir fassen ja auch alle Atome der Erde zu einem einzigen Massenpunkt namens »Erde« zusammen. Das tut der Genauigkeit keinen Abbruch, wenn es um die Bahn der Erde im Sonnensystem geht. Nur bei der Bestimmung der Gezeiten zeigt die Näherung ihre Schwächen.

Diese Vergrößerung des Systems bringt bei sehr geringem Verlust an Genauigkeit einen gewaltigen Zuwachs an Rechengeschwindigkeit. Wenn man es geschickt anstellt, sinkt der Rechenaufwand größenordnungsmäßig von $n(n-1)/2$

auf $n \log n$. Im Beispiel $n=10^9$ sind das nur noch 10^{10} statt 10^{17} Rechenschritte; das macht einen Faktor zehn Millionen aus, entsprechend dem Unterschied zwischen einer Sekunde und vier Monaten Rechenzeit.

Aber Vorsicht! Diese Vereinfachung darf man nur für große Entfernungen anwenden. Für den »Nahverkehr« muss man auf die Einzelberechnung der Kräfte zurückgreifen. Um die beiden Fälle richtig zu unterscheiden, arbeitet die Simulation Bolshoi mit einem Algorithmus namens »adaptive refinement tree« (adaptiver Verfeinerungsbaum). Entwickelt haben ihn in den 1990er Jahren der heutige Projektleiter Klypin, Andrey V. Kravtsov, der inzwischen an der University of Chicago arbeitet, und Alexei M. Khokhlov vom U. S. Naval Research Laboratory.

Das intergalaktische Bolshoi-Ballett

Das Verfahren unterteilt zunächst den Raumwürfel, dessen Entwicklung simuliert werden soll, in kleinere, ebenfalls würfelförmige Zellen. Jede dieser »0-Zellen« kann wiederum in acht würfelförmige »1-Zellen« mit der halben Kantenlänge aufgeteilt werden, jede von diesen in acht »2-Zellen« und so weiter. Der Aufteilungsprozess wird so lange fortgesetzt, bis die Anzahl der Massenpunkte in jeder Zelle einen gegebenen Schwellenwert unterschreitet. Dabei dürfen verschiedene Regionen des Gesamtraums unterschiedlich fein unterteilt sein; so fallen aufwändige Berechnungen mit hoher Auflösung nur dort an, wo sie tatsächlich nötig sind.

Wenn ein Massenpunkt von einer größeren in eine kleinere Zelle wandert oder umgekehrt, wird die von ihm ausgehende Kraft anders falsch berechnet als zuvor. Damit das keine allzu störenden Auswirkungen hat, dürfen sich benachbarte Zellen höchstens um eine Größenklasse unterscheiden (Bild S. 98).

Bolshoi bearbeitet einen würfelförmigen Raumausschnitt mit einer Kantenlänge von ungefähr einer Milliarde Lichtjahren (Bild S. 96). Zum Vergleich: Der leuchtende Teil einer großen Galaxie ist typischerweise 100 000 Lichtjahre breit, der Durchmesser des beobachtbaren Universums beträgt



ungefähr 90 Milliarden Lichtjahre (Kasten S. 100). Das simulierte Volumen ist also groß genug, um Millionen von Galaxien zu enthalten, entspricht aber nur einem kleinen Bruchteil des sichtbaren Universums.

Der Würfel wird zunächst entlang jeder Raumrichtung in 256 Teile unterteilt; der adaptive Verfeinerungsbaum beginnt also mit 256^3 (16,8 Millionen) 0-Zellen. Die höchste zulässige Verfeinerungsstufe ist 10; die Kante einer 0-Zelle wird demnach in bis zu $2^{10}=1024$ Teile zerlegt, so dass die kleinsten Zellen eine Kantenlänge von etwa 4000 Lichtjahren haben.

Evolution eines Universums

Was geschieht an den Rändern dieses willkürlich gewählten Raumausschnitts? Kein physikalischer Grund hindert einen Massenpunkt, über die Grenzen des Würfels hinauszuwandern; damit würde er aus dem simulierten Universum verschwinden. Man müsste zum Ausgleich irgendwie Massen von außen einströmen lassen oder den Würfel »innen verspiegeln«, also jeden Massenpunkt, der auf die Grenze gerät, einwärts reflektieren – alles sehr unphysikalische Notmaßnahmen. Die Autoren von Bolshoi verfielen auf eine ebenfalls unphysikalische, aber viel elegantere Lösung: periodische Randbedingungen. Verlässt ein Massenpunkt die Kiste auf der einen Seite, tritt er zugleich auf der entgegengesetzten wieder ein. Auch die Gravitationskräfte wirken so, als käme links von ganz links ganz rechts oder als bestünde das Universum aus unendlich vielen neben-, vor- und übereinandergesetzten Exemplaren desselben Simulationswürfels. Das ist eine gute Annäherung an einen homogenen, das heißt an jeder Stelle ungefähr gleich aussehenden Kosmos.

Demnach würde jeder Massenpunkt von seinen Ebenbildern in den Nachbarwürfeln angezogen, ganz zu schweigen davon, dass auch alle anderen Massen unendlichfach vorkommen. Damit derlei Unfug nicht die Rechenzeit hochtreibt, haben die Autoren einen »long-range cut-off« eingeführt: Oberhalb einer Entfernung von einer halben Würfelbreite werden keine Gravitationskräfte mehr berechnet; auf diese große Entfernung sind sie ohnehin von null kaum zu unterscheiden. Es gibt auch einen »short-range cut-off«.

Kräfte auf sehr kurze Entfernung werden ebenfalls nicht berechnet, aber nicht weil sie zu klein, sondern weil sie zu groß wären. Wenn sich zwei Massenpunkte sehr nahe kommen, beeinflussen sie sich sehr heftig, aber nur für sehr kurze Zeit, weil sie durch die starke Beschleunigung alsbald wieder auseinandergetrieben werden. In der Simulation würde eine solche Beschleunigungsspitze über einen ganzen Zeitschritt hinweg wirken, also viel zu lang, und dadurch zu völlig falschen Ergebnissen führen.

Der Bolshoi-Würfel wird von 2048^3 (das sind 8 589 934 592) identischen Objekten bevölkert. Das ist ziemlich viel für das Computerprogramm, das ihre Wege zu verfolgen hat, aber kläglich wenig gemessen am Original. Jedes dieser Objekte, von den Programmierern verniedlichend »Teilchen« (particles) genannt, entspricht ungefähr 200 Millionen Sonnenmassen. Wegen dieser Größe hat es auch keinen Sinn, zwischen baryonischer und Dunkler Materie zu unterscheiden: Alle Teilchen der Simulation sind Dunkle Materie. In der Entwicklung des echten Universums haben sich ohnehin zuerst Halos aus Dunkler Materie gebildet und dann erst in deren Innerem die Galaxien. Da schadet es nicht, dass die Galaxien selbst überhaupt nicht explizit repräsentiert werden.

Zu Beginn der Berechnungen sind die reichlich acht Milliarden Teilchen fast gleichmäßig im Würfel verteilt, das heißt, ihre Dichte schwankt nur wenig. Das beschreibt ungefähr den Zustand des Universums nach der inflationären Phase, nicht lange nachdem die letzte kosmische Hintergrundstrahlung ausgesandt wurde. Die Simulation beginnt bei einem Alter des Universums von etwa 23 Millionen Jahren und durchläuft bis zur Gegenwart ungefähr 400 000 Rechenschritte, deren jeder etwa 34 000 Jahren entspricht. In Abständen von 40 bis 80 Millionen Jahren wird der Zustand des simulierten Systems gespeichert (»Schnappschuss«; Bild S. 100/101).

Die Berechnungen liefen auf dem Computer »Pleiades« am Ames Research Center der NASA in Kalifornien. In der Liste der 500 leistungsfähigsten Supercomputer der Welt steht Pleiades auf Platz 11 (Spektrum der Wissenschaft 10/2012, S. 90). Bolshoi nutzt 13 824 Prozessorkerne und 13 Terabyte Speicherplatz.

Mit dem Simulationslauf sind die Berechnungen noch nicht beendet. Bei der anschließenden Datenanalyse sucht zunächst ein Programm namens »halo finder« Bereiche erhöhter Dichte, in denen die Teilchen durch ihre Anziehungskräfte gebunden sind. Dichtespitzen zu finden, ist der leichte

W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema
»Modelle des Universums, kosmische Inflation« kostenfrei
herunterladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/universum



Michael Teuber
Professioneller Radrennfahrer und mehrfacher Paralympics-Sieger

Um mehr über Michael Teuber zu erfahren, scannen Sie den QR-Code mit der entsprechenden App Ihres Smartphones oder gehen Sie direkt auf www.focus-entscheider.de/teuber

AUFGEBEN IST NICHT.

Das Entscheidende im

FOCUS

Teil der Aufgabe; da aber die Teilchen sich in einem Halo wie die Bienen in einem Schwarm bewegen, ist es schwierig zu entscheiden, welche von ihnen tatsächlich dazugehören und welche nur durchreisende Gäste sind.

Alle Daten der Simulation, einschließlich der Schnappschüsse, Halokataloge und Verschmelzungsbäume, welche die Herausbildung der Halos zeigen, sind über die Datenbank »MultiDark« frei zugänglich.

Wie sieht das Bolshoi-Universum aus, und wie unterscheidet es sich von der Welt, wie wir sie wahrnehmen? Bereits zu Beginn der Simulation entwickeln sich etwa fünf Millionen Halos. Später, wenn sich weitere Teilchen unter dem Einfluss ihrer Anziehungskraft zusammenballen, wächst ihre Zahl auf zwölf Millionen. Auch ganze Halos unterliegen denselben Anziehungskräften und tendieren dazu, miteinander zu verschmelzen. Dadurch bilden sich weniger, dafür aber größere Ansammlungen heraus (Bild S. 99). Am Ende der Berechnungen bleiben etwa zehn Millionen Halos übrig; viele von ihnen werden als »Subhalos« klassifiziert, weil sie zwar innerhalb anderer Halos existieren, aber eine gewisse Eigenständigkeit bewahren. Ihre Größe variiert von 10^{10} (entsprechend einer kleinen Galaxie) bis zu 10^{15} Sonnenmassen (großer Galaxiencluster).

Diesen Simulationsbefund müssen die Forscher nun mit der Wirklichkeit vergleichen. Entsprechende Arbeiten haben gerade erst begonnen, etwa an Statistiken über Satellitengalaxien. Die Milchstraße besitzt zwei bekannte Satelliten, die Große und die Kleine Magellansche Wolke am südlichen Sternenhimmel. Beobachtungsdaten aus dem Sloan Digital Sky Survey lassen darauf schließen, dass diese Situation vergleichsweise selten vorkommt. Unter den Galaxien mit vergleichbarer Masse haben nur etwa zehn Prozent zwei solche Begleiter. Eine Untersuchung der Bolshoi-Ergebnisse durch Michael T. Busha und seine Kollegen zeigt ähnliche Werte. Auch für die Häufigkeit von Galaxien mit nur einem oder gar keinem Satelliten stimmen die Ergebnisse der Modellrechnung und die echten Daten gut überein.


Leider gilt das nicht für jeden Vergleich von Modell und Realität. Sebastian Trujillo-Gomez und seine Kollegen haben echte und simulierte Galaxien beziehungsweise deren Halos im Hinblick auf ihre Rotationsgeschwindigkeit verglichen – eine Größe, die eng mit der Gesamtmasse und der Helligkeit einer Galaxie zusammenhängt. Für den größten Teil der Werte stimmen die relativen Häufigkeiten gut überein; allerdings sagt Bolshoi eine zu geringe Anzahl von Galaxien mit der maximalen Rotationsgeschwindigkeit voraus. Noch beunruhigender ist eine Diskrepanz am unteren Ende der Skala. Die Simulation ergibt eine Zahl an Zwerggalaxien, die den beobachteten Wert um den Faktor zehn übersteigt.

Für diese Abweichung gibt es bisher keine Erklärung, aber mehrere Hypothesen. So könnte die Simulation schlicht fehlerhaft sein. Oder es gibt tatsächlich so viele Zwerggalaxien, aber auf Grund einer unerkannten systematischen Verzerrung der Beobachtungsdaten sehen wir nur jede zehnte von ihnen. Oder die Theorie ist revisionsbedürftig: Vielleicht ist

die Dunkle Materie im All nicht kalt, sondern lauwarm. Sollte sich diese letzte Vermutung erhärten, stehen wir möglicherweise kurz vor einer weiteren großen Veränderung unserer kosmischen Vorstellungen.

Brunos Vermächtnis

Vor 400 Jahren war die Erkenntnis, dass die Erde die Sonne umkreist und nicht umgekehrt, nicht nur ein wissenschaftlicher Durchbruch, sondern vor allem ein Kulturschock. Die Menschen wurden genötigt, ihre Vorstellung von der Welt, in der sie leben, grundlegend zu verändern. Das war nicht immer willkommen; es wurden Bücher verbrannt und im Fall Giordano Brunos auch der Verfasser.

Heute dagegen scheinen kosmologische Revolutionen kaum eine Spur im öffentlichen Bewusstsein zu hinterlassen. Kosmische Inflation, Dunkle Materie, Dunkle Energie – diese Ideen fordern auch von uns, die Vorstellung von der Welt zu revidieren. Außerhalb der Wissenschaftlergemeinschaft hat sich aber kaum jemand darüber aufgeregt. Das ist beruhigend für die Kosmologen; sie müssen nicht mehr um ihr Leben fürchten. Sind wir aber tatsächlich liberaler und offener als früher – oder vielleicht nur gleichgültig? 

DER AUTOR



Brian Hayes ist Verfasser der Kolumne »Computing Science« im »American Scientist«, aus dem dieser Artikel stammt. In seinem Blog <http://bit-player.org> präsentiert er unter anderem ergänzendes Material zu seinen Kolumnen.

QUELLEN

- Busha, M. T. et al.:** Statistics of Satellite Galaxies around Milky way-Like Hosts. Preprint, 2010. <http://arxiv.org/abs/1011.6373>
- Gottlöber, S., Klypin, A. A.:** The ART of Cosmological Simulations. In: Wagner, S. et al. (Hg.): High Performance Computing in Science and Engineering. Springer, Berlin 2009, S. 29–44
- Klypin, A.:** Numerical Simulations in Cosmology. In: Bonometto, S. (Hg.): Modern Cosmology. Institute of Physics, Philadelphia 2002, S. 420–473
- Klypin, A. A. et al.:** Dark Matter Halos in the Standard Cosmological Model: Results from the Bolshoi Simulation. In: Astrophysical Journal 740, 102, 2011. Online unter <http://hipacc.ucsc.edu/Bolshoi/Papers.html>
- Kravtsov, A. V. et al.:** Adaptive Refinement Tree: A New High-Resolution n -Body Code for Cosmological Simulations. In: Astrophysical Journal Supplement 111, S. 73–94, 1997. Online unter <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9701195>
- Riebe, K. et al.:** The MultiDark Database: Release of the Bolshoi and Multi-Dark Cosmological Simulations. Preprint, 2011. <http://arxiv.org/abs/1109.0003>

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1168634

© American Scientist
www.americanscientist.org



Tim Flach
Ganz nah
 Porträts von Tieren
 Aus dem Englischen
 von Christa Broermann und Elsbeth Ranke.
 Knesebeck, München 2012. 312 S., € 68,-

FOTOGRAFIE

Tierbilder als Kunstwerke

Viele der Porträts sind überaus beeindruckend – selbst wenn man nicht versucht, sie mit Tiefsinn aufzuladen.

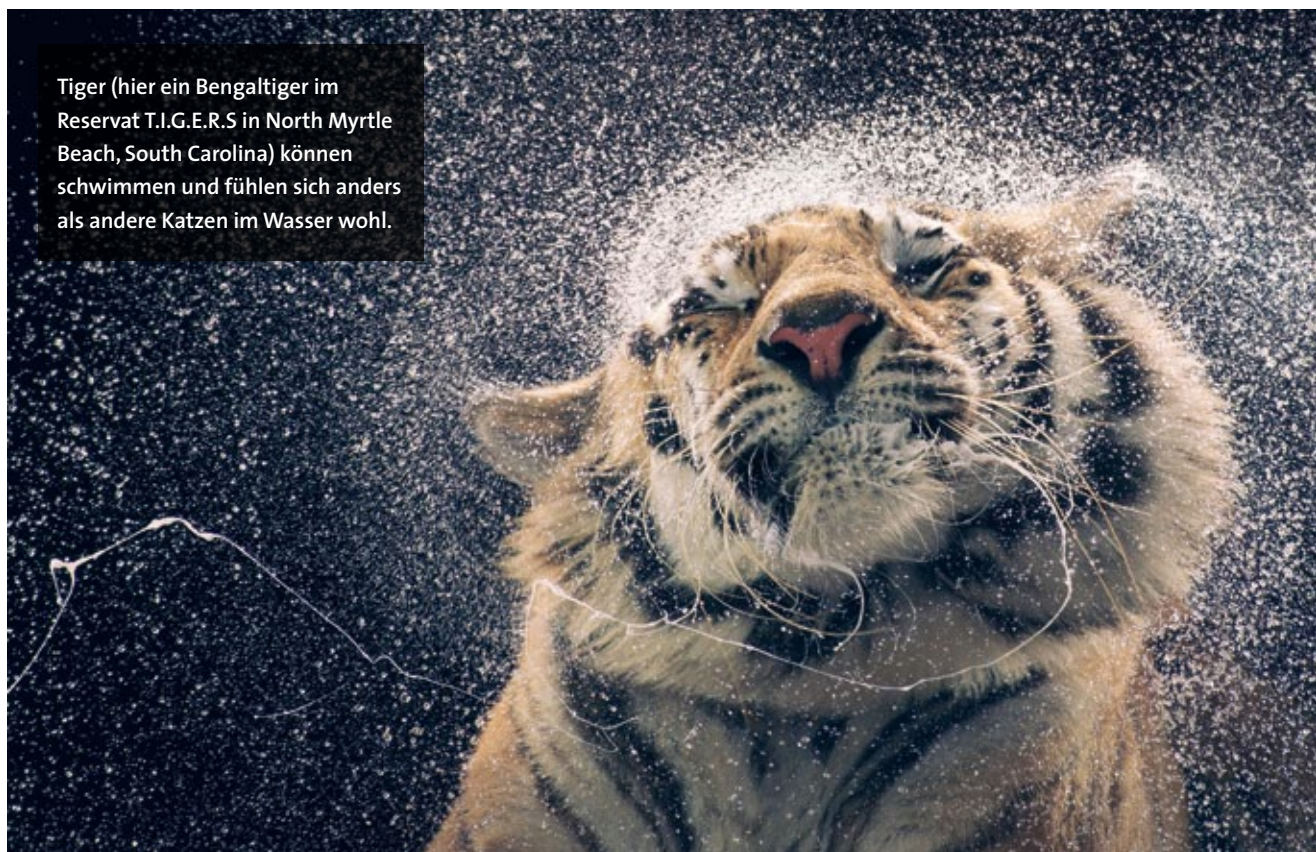
Tim Flach ist ein vielfach preisgekrönter britischer Fotograf; im deutschen Sprachraum ist er durch seine Bildbände »Equus« (2008) und »Hunde« (2010) bekannt geworden. In seinem neuen Werk bildet er nicht nur eine Tierart ab, sondern alles, was nicht menschlich ist; der Originaltitel »More than Human« trifft die Sache, während entgegen dem deutschen Titel nicht nur Nahaufnahmen zu finden sind.

Die beeindruckendsten Fotos sind die Detailaufnahmen der Menschenaffen. Es rührt den Betrachter unmittelbar an, wie die Schimpansenmutter ihrem Kind die Hand küsst, der alte Affe die gleichen Fingernägel zeigt wie ein alter Gärtner nach einem arbeitsreichen Tag oder der Weißschulterkapuzineraffe so sorgfältig mit seinen Fingern arbeitet, als würde er gerade seine E-Mails auf dem Smartphone che-

cken. Gleiches gilt für den selbstzufriedenen Panda auf dem Titelbild, den schwarzen Panter, der sich genüsslich die Pfote leckt, und den nachdenklichen Löwen, der im vollen Bewusstsein seiner Macht sogar ein freundliches Lächeln für den Betrachter aufbringt.

Die Aufnahmen von den Flughunden, die mit dem Kopf nach unten hängend zu ruhen pflegen, hat Tim Flach einfach umgedreht – sozusagen auf die Füße gestellt. Und auf einmal glaubt man Herrn und Frau Flughund beim Ehekrach zu sehen, einen galanten Herrn, der einer Dame sein Geleit anbietet, und ein Mädchen, das schüchtern den Blick abwendet.

Natürlich interpretiert der Betrachter diese menschlichen Seelenregungen in die Tiere hinein. Genau das macht Tim Flach in der Einleitung zum Thema: Es sei wichtig und kontrovers, wie der Anthropozentrismus »unsere Wahrnehmung der Welt und ihrer Bewohner formt, verzerrt und in Frage stellt ...« und: »Obwohl mir klar ist, dass man bei der Konstruktion solcher Bilder nicht neutral bleiben kann, hoffe



Tiger (hier ein Bengaltiger im Reservat T.I.G.E.R.S in North Myrtle Beach, South Carolina) können schwimmen und fühlen sich anders als andere Katzen im Wasser wohl.

ich doch, dass die Arbeiten neutral präsentiert werden.«

Andere Bilder wollen nicht zum Anthropozentrismus passen. Die Meerwalnuss, eine Qualle, die durch die Eroberung des Schwarzen Meers auf Kosten der ansässigen Fischpopulationen von sich reden machte, fasziniert durch ihren farbenprächtig-durchsichtigen Körper, die japanische Kompassqualle durch ihre anmutig tanzenden, bis zu drei Meter langen Tentakel und der Flughund durch seine ausgebreiteten, durchscheinenden Flughäute. Der weiße Pudel, der so künstlich geschoren ist wie die bizarr geformten Sträucher des englischen Gartens Leven's Hall im Hintergrund, und der Afghane mit dem langen, glatten, gescheitelten Haupthaar sehen aus, als wären sie einem Reklamebild entsprungen. Wirklich ganz nah sind die ausdrucksvollen, von Fell

umgebenen Augen – die sich als die Augenflecken des Nachtfalters *Gynanisa maja* entpuppen.

Ein roter Faden lässt sich in dem Buch nicht wirklich finden. Tim Flach will uns dazu anregen, über das Verhältnis des Menschen zu »den anderen Arten« nachzudenken. Das misslingt, weil der Betrachter so mit den Bildern und den atemberaubenden Details beschäftigt ist, dass er sich nicht zusätzlich noch philosophische und ethische Gedanken macht. Da helfen auch die erklärenden Texte nicht viel. Ja, die gestochen scharfen Aufnahmen der tanzenden, zur leichteren Verarbeitung federlos gezüchteten Hühnern und der auf Steakausbeute optimierten Muskelprotzbullen schockieren. Vielleicht ist es ja übertrieben, wenn wir die Tiere, die wir essen, obendrein noch niedlich finden wollen. Aber ich halte nichts da-

von, dass Tim Flachs Koautor Lewis Blackwell in dem zugehörigen Text implizit die Gentechnik verharmlost.

Der erste Eindruck ist in der Tat fantastisch. Erst bei näherer Betrachtung fallen vermeidbare Schwächen auf. So verschwinden manchmal wichtige Teile eines doppelseitigen Bilds im Falz, was den künstlerischen Eindruck stark beeinträchtigt. Manche Übergänge von einem Thema zum nächsten sind sehr abrupt, und neben den erstklassigen Bildern fallen etliche »nur« gute merklich ab. Am Ende stellt sich das Preis-Leistungs-Verhältnis dann doch als unbefriedigend heraus.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplombiologe und arbeitet als IT Support Engineer beim Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg.



Charles Duhigg

Die Macht der Gewohnheit

Warum wir tun, was wir tun

Aus dem Englischen von Thorsten Schmidt.

Berlin Verlag, Berlin 2012. 416 S., € 22,99

PSYCHOLOGIE

Etwas bewegen

Charles Duhigg erklärt auf sehr amerikanische Weise, wie man Gewohnheiten durchschauen, ändern und nutzen kann.

Charles Duhigg, ein renommierter Wirtschaftsredakteur bei der »New York Times«, hat sich für sein erstes Buch ein wahrhaft alltägliches Thema gewählt – und ist damit prompt auf Platz 10 der amerikanischen Bestsellerliste gelandet. Es geht um die Handlungs-, Emotions- und Denksequenzen, die nach einem immer gleichen Muster ablaufen und uns dadurch das Leben erleichtern.

Hirnforscher haben festgestellt, dass Gewohnheitsschleifen im Wesentlichen durch die Basalganglien im Hirnstamm ausgeführt werden. Damit sind sie dem Bewusstsein entzogen. In dem Moment,

in dem eine Gewohnheit anspringt, beschäftigt sich die Großhirnrinde nicht mehr mit ihr und kann ihre Kapazitäten effektiver für andere Dinge nutzen.

Unser ganzes Leben besteht zu einem großen Teil aus Gewohnheiten. Die meisten sind gut, ja sogar überlebensnotwendig, da sie unser Gehirn vor permanenter Überforderung schützen. Manche wirken sich allerdings sogar schädlich aus, und es ist nicht einfach, sie loszuwerden. Entsprechend erklärt uns der Autor auch, wie man Herr seiner eigenen Gewohnheiten werden und sich diejenigen anderer zu Nutze machen kann.

Für sein Buch hat der Autor Professoren, Wirtschaftsbosse und Betroffene interviewt und unzählige Forschungsberichte von Unternehmen sowie wissenschaftliche Publikationen aus der Psychologie und der Neurologie durchforstet. Anhand zahlreicher Beispiele beleuchtet er neben individuellen Gewohnheiten diejenigen großer Gruppen und ganzer Gesellschaften. Schließlich stellt er die Frage, inwieweit wir für unser gewohnheitsmäßiges Handeln selbst verantwortlich sind.

Laut Duhigg gibt es immer einen spezifischen Auslösereiz, der eine Routinehandlung in Gang bringt. Diese läuft dann automatisch ab, ohne dass man darüber nachdenken muss. Am Ende steht die erwartete Belohnung. Das Verlangen nach derselben ist der Motor der Gewohnheit.

Wer also eine schlechte Gewohnheit ändern will, muss nur den Auslösereiz erkennen, die Belohnung und das zu Grunde liegende Verlangen identifizieren und schließlich die Routine durch eine weniger schlechte ersetzen. Dazu noch ein selbst erstellter Plan, feste Entschlossenheit und der Glaube an den eigenen freien Willen, und schon klappt's! Dieses Rahmenmodell kann

man sich auch übersichtlich in Form eines Flussdiagramms von Duhiggs Webseite <http://charlesduhigg.com> herunterladen. Natürlich ist es nicht immer ganz so einfach, wie es sich liest, aber das gibt der Autor selbst auch zu.

Um eine neue Gewohnheit zu entwickeln, gilt es eine neue Belohnung zu finden und ein Verlangen danach auszubilden. Das muss nicht unbedingt der Mensch selbst tun, der sich vielleicht auf diesem Weg eine neue Routine zulegen will.

Dass Zähneputzen zu einer täglichen Ritualhandlung wurde, verdanken wir der Marketingstrategie eines Zahnpastaherstellers. Die neue Zahnpasta enthielt ätherische Öle, die ein angenehmes Frischegefühl hinterließen. Der unangenehme »Zahnfilm« (Auszöseriz) konnte durch regelmäßiges Putzen (neue Routine) beseitigt werden. Die Belohnung war das Frischegefühl im Mund, das der zugehörige Mensch mit Sauberkeit gleichsetzte. Das Verlangen danach war der Motor der neuen

Gewohnheit, die nebenbei die Verkaufszahlen in die Höhe trieb.

Es reicht allerdings oft nicht aus, nur eine neue Gewohnheit zu etablieren, um eine alte zu ändern, sagt Duhigg. Entschlossenheit, Überzeugung und der Glaube, es zu schaffen, seien wesentliche Voraussetzungen für einen dauerhaften Erfolg. Und den erreiche man in einer Gemeinschaft besser als allein.

»In manchen krisenhaften Situationen ist es günstiger, die Angst weiter zu schüren, als sie abebben zu lassen«

So erklärt der Autor den Erfolg der Anonymen Alkoholiker. Auch Willenskraft und Tugendhaftigkeit bezeichnet er als erlernbare Gewohnheiten.

Gewisse Gewohnheiten wirken, einmal etabliert, über sich hinaus und sind geeignet, das ganze Leben positiv zu verändern. Duhigg nennt als Beispiele: morgens die Betten zu machen, abends gemeinsam zu essen oder ein Haushaltsbuch zu führen. Nur sind diese »Schlüsselgewohnheiten« nicht ein-

fach und vor allem nicht im Voraus als solche zu erkennen.

Das Buch ist weit mehr als nur ein persönlicher Ratgeber. Es gibt Einblicke, wie Gewohnheiten in größeren Gruppen funktionieren und wie man sie für seine Ziele steuern kann. Der Autor zeigt, wie man durch geschickte Manipulation der Gewohnheiten anderer nicht nur deren Kaufverhalten beein-

flussen, sondern auch Footballteams zum Sieg bringen, Unternehmen zum Erfolg führen und Glaubensgemeinschaften oder politische Bewegungen gründen kann. Besonders wenn »lose Bindungen« (soziale Netzwerke) und starke freundschaftliche Bande miteinander verschmelzen, würden große gesellschaftliche Veränderungen möglich.

Krisen seien oft Wendepunkte für solche Veränderungen. Deshalb sei es mitunter günstiger, die Angst vor einer

ANZEIGE

Unabhängige Deutsche Universitätszeitung Wissenschaft weiterdenken



Holen Sie sich alle wichtigen Infos aus Hochschule und Wissenschaft:

duz.de

duz-wissenschaftskarriere.de

Hintergrundinfos · Nachrichten · Empfehlungen und die besten Jobs
für Nachwuchswissenschaftler, Fach- und Führungskräfte aus Hochschule und Wissenschaft



Hansjörg Küster

Die Entdeckung der Landschaft. Einführung in eine neue Wissenschaft

C.H.Beck, München 2012. 362 S., € 17,95

Der Autor, Pflanzenökologe am Institut für Geobotanik der Universität Hannover, besticht wieder einmal mit einem lesenswerten, inhaltsreichen Buch, in dem er geologisch-geografische und biologisch-ökologische mit natur- und kulturhistorischen Gegebenheiten und Entwicklungen verbindet. Er betrachtet hierbei vor allem die letzten 10 000 Jahre und räumt besonders Manipulationen durch den Menschen viel Platz ein. Landschaftsforschung ist zwar eine junge Disziplin innerhalb der Kulturwissenschaften, erfordert laut Küster jedoch unbedingt Experten mit naturwissenschaftlicher Ausbildung. Der kleine Band kann durchaus als erste Einführung in dieses junge Fachgebiet dienen, eignet sich aber auch einfach zum Schmökern für alle, die gern mehr über die menschliche Siedlungsgeschichte und deren heute noch vorhandene Spuren erfahren möchten.

ADELHEID STAHNKE



Anna Frebel

Auf der Suche nach den ältesten Sternen

S. Fischer, Frankfurt am Main 2012. 352 S., € 19,99

Die deutsche Astrophysikerin Anna Frebel war gerade erst Mitte 20, als sie den Stern mit dem niedrigsten bekannten Eisengehalt entdeckte. Seither forscht sie an den renommiertesten Universitäten, derzeit als Assistant Professor für Physik am MIT in Cambridge, Massachusetts (USA). In ihrem Buch erklärt sie, was extrem metallarme Sonnen über den Kosmos verraten. Wie Frebel darlegt, gehören diese Objekte zu den ältesten bekannten Sternen, und ihre Untersuchung liefert wichtige Hinweise darauf, wie sich die chemische Vielfalt des Kosmos entwickelt hat. Das Buch gibt einen erhellenden Einblick in die Astrophysik der Sterne und die Geschichte des Universums. An einigen Stellen neigt die Autorin dazu, sich in Details zu verlieren. Dafür streut sie immer wieder Schilderungen von persönlichen Erlebnissen ein, die für Abwechslung beim Lesen sorgen.

FRANK SCHUBERT



Andreas Heuer

Der perfekte Tipp. Statistik des Fußballspiels

Wiley-VCH, Weinheim 2012. 321 S., € 24,90

Ein Tor beim Fußball ist ein relativ seltenes Ereignis; deswegen hängt der Ausgang eines Spiels nicht nur von den Fähigkeiten der beiden Mannschaften, sondern auch vom Glück ab. Das ist gut für alle Beteiligten, denn dadurch bleibt die Sache spannend. Andreas Heuer, im Hauptberuf Professor für physikalische Chemie in Münster, hat durch umfangreiche statistische Analysen die Ergebnisse vieler Fußballspiele in einen vorhersagbaren und einen – größeren – zufallsabhängigen Anteil zerlegt. Zu ersterem zählen naheliegende Größen wie die Spielstärke einer Mannschaft und der Heimvorteil (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2010, S. 68). In seinem Buch analysiert Heuer darüber hinaus Größen wie den Marktwert eines Spielers, den Effekt einer Trainerentlassung und die Brauchbarkeit der von Zeitschriften wie »kicker« vergebenen Schulnoten. Alles in einer wohlthuenden Mischung aus sachlicher Korrektheit und lebendiger Beschreibung.

CHRISTOPH PÖPPE



Thomas Martin, Wighart von Koenigswald, Gudrun Radtke, Jes Rust (Hg.)

Paläontologie. 100 Jahre Paläontologische Gesellschaft

Friedrich Pfeil, München 2012. 192 S., € 24,90

Die Paläontologische Gesellschaft gibt zu ihrem 100. Geburtstag eine Festschrift heraus – und stellt dabei nicht etwa die Paläontologen prominent heraus, sondern ihre Forschungsgegenstände. Eine gute Entscheidung! Der Bildband präsentiert fast 100 bedeutende Fossilien mit zum Teil beeindruckenden ganzseitigen Fotos. Die Auswahl reicht von mikroskopischen Einzellern bis zum größten Dinosaurierskelett der Welt, das im Berliner Museum für Naturkunde zu sehen ist. Die knapp einseitigen Erläuterungstexte sind von Wissenschaftlern verfasst, die mit den Fundstücken vertraut sind, und größtenteils mit Literaturangaben versehen. Die Texte sind zwar kurz, aber überaus gehaltvoll – harte Kost für den Unkundigen, zu wenig für den Appetit des wirklich Wissbegierigen. Aber als schöner Bildband zum Blättern und Einstieg für den ernsthaft Interessierten ist das Buch vorbehaltlos zu empfehlen.

EIKE REINECKE

Krise weiter zu schüren, als sie abebben zu lassen. Kluge Führungskräfte würden demnach bewusst nach Krisenmomenten suchen oder eine Krisenwahrnehmung erzeugen, wenn sie etwas verändern wollten. Wenn solche Weisheiten an Universitäten gelehrt werden, wen wundert es da noch, dass eine Finanzkrise die nächste jagt?

Das Buch ist gespickt mit zahlreichen Fallbeispielen, die so fesselnd ge-

schrieben sind, dass man es kaum aus der Hand legen kann. Vor lauter Geschichten muss man allerdings aufpassen, dass man die Essenz des Buchs nicht verpasst – die hätte vermutlich auf zehn Seiten mühelos Platz gefunden. Zwischendurch kann es auch mal nerven, wenn man die Sachinformation immer nur häppchenweise und unterbrochen durch lange, amerikanische Erfolgsstorys serviert bekommt.

Dieses Buch erfüllt sämtliche Klischees eines amerikanischen Bestsellers. Dennoch ist es insgesamt gesehen durchaus ein Lesevergnügen und darüber hinaus interessant für alle, die etwas bewegen wollen.

Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg.



Bernhard Kegel

Ein tiefer Fall

Mare, Hamburg 2012. 508 S., € 19,90

ROMAN

Im Strudel der Lüge

Aus Betrugspraktiken in der Wissenschaft macht Bernhard Kegel einen spannenden Krimi.

Beim Schreiben eines Fachartikels schläft der Kieler Biologieprofessor Hermann Pauli vor dem Computer ein. Mitten in der Nacht wecken ihn Geräusche, und dann tropft auch noch Wasser von der Decke. Als er nachsieht, findet er im obersten Stockwerk des Instituts eine Leiche – ausgerechnet in den Arbeitsräumen des gefeierten Starwissenschaftlers Frank Moebus. Wenig später wird ein zweiter Toter entdeckt; auch er gehörte zu Moebus' Arbeitsgruppe. Die Polizei steht vor einem Rätsel. Hat der Fall etwas mit den urtümlichen Zellen zu tun, die Moebus in der Tiefsee aufgespürt hat und mit denen er weltweit für Schlagzeilen sorgte?

Bewegung kommt in die Sache, als prominente Forscher einen offenen Brief an Moebus schreiben. Darin werfen sie ihm vor, er überlasse ihnen trotz wiederholter Bitten keine Proben der Zellen: ein klarer Verstoß gegen gute wissenschaftliche Praxis. Neugierig geworden, beginnt Hermann Pauli mit

Nachforschungen, zumal die Polizei wenig Interesse für die fachlichen Hintergründe erübrigt. Die wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus Moebus' Arbeitsgruppe werfen Fragen auf. Warum war ein unerfahrener Doktorand damit befasst, das Erbgut der Tiefseezellen zu entschlüsseln? Welcher Art ist das merkwürdige Verhältnis zwischen Moebus und seinen Mitarbeitern? Gibt es einen Zusammenhang zwischen all diesen Dingen? In Pauli keimt ein unheimlicher Verdacht. Als er später ein Laborbuch aus der Gruppe findet, werden selbst seine schlimmsten Befürchtungen weit übertroffen.

In seinem neuesten Wissenschaftskrimi erzählt der promovierte Biologe und vielfach ausgezeichnete Autor Bernhard Kegel eine fesselnde Geschichte über Betrug in der Wissenschaft. Die Handlung des Romans ist frei erfunden, aber von echten Fälschungsskandalen inspiriert – etwa dem des koreanischen Stammzellforschers Hwang Woo-Suk,

des deutschen Physikers Jan Hendrik Schön oder der Krebsforscher Friedhelm Herrmann und Marion Brach. Mit gut aufeinander abgestimmten Handlungssträngen, überzeugend gezeichneten Charakteren und einem Spannungsbogen, der sich bis zum Ende durchzieht, bereitet Kegel das Thema packend und verständlich auf. Dabei verbindet er erzählerische Fülle gekonnt mit dem Sinn fürs Wesentliche.

»Ein tiefer Fall« knüpft lose an Kegels ebenfalls lesenswerten Roman »Der Rote« an. Man muss diesen aber nicht kennen, um vom neuen Krimi fasziniert zu sein. Kegel gelingt es sehr gut, die Welt der Wissenschaft zu skizzieren, ohne dabei in ermüdende Erklärungen zu verfallen. Wohldosiert, eingebettet in die Krimigeschichte und diese sinnvoll ergänzend vermittelt er Fachwissen, Denkweisen, Hierarchien und Gepflogenheiten des Forschungsbetriebs. Wissenschaft erscheint hier weder als selbstverliebte Eigenschau noch als klischeehafte Beschreibung von außen, sondern als kenntnisreich geschilderte Tätigkeit von Menschen, die Stärken und Schwächen haben. Ein empfehlenswertes Buch, das auch Laien ohne Weiteres in den Bann ziehen kann.

Frank Schubert

Der Rezensent ist promovierter Biophysiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

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

Chaos und Turbulenz

Forscher versuchen, die Geheimnisse des Chaos zu ergründen, in dem turbulente Prozesse eine zentrale Rolle spielen. Mit ausgefeilter Mathematik und Simulationen analysieren sie nicht nur entsprechende Vorgänge in Wolken und Strömungen, sondern auch in biologischen Abläufen.



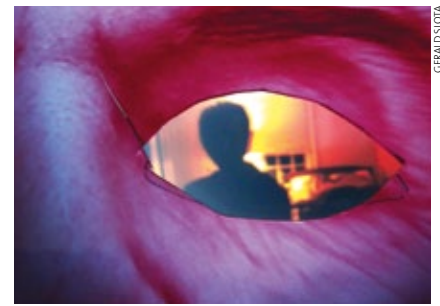
DREAMTIME / VITALITY STANINOV

Gammablitze aus den Wolken

Dass Gewitter Gammastrahlung produzieren, wissen Physiker seit 20 Jahren. Doch ihre Theorien zur Entstehung der extrem energiereichen Strahlung wurden immer wieder von neuen Messungen widerlegt. Nun aber scheinen sie dem Rätsel auf die Spur zu kommen.

Der Geist als Beweger

Gelähmte, die ihre künstlichen Gliedmaßen bloß mit der Kraft ihrer Gedanken steuern – das ist keine Sciencefiction mehr. Schon in wenigen Jahren könnte eine Ganzkörperprothese die verlorene Beweglichkeit komplett ersetzen.



GERALD SLOTA

Mord im Schlaf

Manchmal verüben Schlafwandler Gewalttaten, bis hin zum Mord. Forscher verstehen zunehmend, was das Gehirn bei abgeschaltetem Bewusstsein vermag – und was nicht. Damit gelingt es heute oft, schuldhaft Taten bei vorgeblichem Schlafwandel von wirklich unverschuldeten zu unterscheiden.



ARNOLD FELIX, DAI

Paradiese auf Erden

Wohlduftende Blumen, kühlende Wasserläufe – so besangen Dichter die maurischen Gärten im mittelalterlichen Spanien. Archäologische Untersuchungen zeichnen ein nüchterneres Bild, das neue Fragen aufwirft: Kannten die Mauren bereits die Gesetze der Perspektive?

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 GESCHENKIDEE* FÜR JUNGE WISSENSCHAFTLER!

* Spektrum **NEO** jetzt auch im Abo:
Für alle Kinder zwischen 10 und 14 Jahren,
die nicht nur das »Was«, sondern
auch das »Wie« und »Warum« interessiert.
4 Ausgaben für nur € 5,50 pro Heft.

(Das Abo ist jederzeit kündbar)



Als Dank für Ihre Bestellung erhalten
Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Bestellen Sie jetzt für Ihr Kind!

www.spektrum-neo.de/abo



AcademiaNet ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hochqualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

AcademiaNet, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbänden
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

www.academia-net.org

Spektrum **EXTRA**

DER WISSENSCHAFT

Spektrum
DER WISSENSCHAFT



WISSENSCHAFT
VERSTEHEN

Die Preisträger 2012



ERSCHIENEN IM DEZEMBER 2012

Eine Kooperation von Spektrum und  HELMHOLTZ
ZENTRUM FÜR
UMWELTFORSCHUNG
UFZ



SciLogs

*Diskutieren Sie mit –
auf unserem Portal für
Wissenschaftsblogs!*



Umweltforsch
ein Blog von Forschern
des UFZ

In Umwelt**forsch** schreiben Sozial- und Naturwissenschaftler vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig über Mensch und Natur unter dem Einfluss des globalen Wandels. Ihnen geht es um die interdisziplinäre Diskussion zur Überwindung komplexer Umweltprobleme. Dabei sind sie oft Grenzgänger zwischen den sozial- und naturwissenschaftlichen Welten.

SciLogs.de/umweltforsch

Joachim Schüring
Redaktionsleiter
schuering@spektrum.com



Verehrte Leserinnen und Leser!

Das sonntägliche Kaffeekränzchen im Kreis der Familie gerät für den angehenden Wissenschaftler nicht selten zu einer ernst zu nehmenden Herausforderung. Denn fast so schlimm wie die Fragen zum Vortrag vor großem Fachpublikum sind die von Tante Hilde und Onkel Detlef bei Kuchen und Konfekt. Man habe ja nun schon so lange studiert – und noch immer keine richtige Anstellung: »Was machst du denn da jetzt eigentlich noch so lange an der Uni?«

In diesem Fall gibt es zwei Strategien. Erstens, man referiert aus dem Projektantrag und spricht von Dioxygenasen, die die posttranslationale Hydroxylierung von Aminosäure-Seitenketten während der Kollagensynthese katalysieren. Das klingt klug, birgt aber die Gefahr, dass die Verwandtschaft den Jungforscher peinlich findet und fortan meidet.

Oder man sagt, zweitens, dass es in der Arbeit um die Wirkung bestimmter Unkrautvernichtungsmittel auf die Umwelt gehe. Und dass man dafür im Labor untersuche, ob diese Substanzen, nachdem sie den Disteln den Garaus gemacht haben, im Boden von Bakterien rasch genug abgebaut werden – damit sie das Grundwasser nicht gefährden. Derart nützliches Tun wird sich in der Verwandtschaft herumsprechen und für Lob und Anerkennung sorgen.

So ist es im Kleinen wie im Großen: Mikro- und Makrokosmos des Wissenstransfers vom Labor in die Öffentlichkeit gleichen sich. Deshalb gibt es Tage der offenen Tür, deshalb verzichtet kaum eine Universität, kaum ein Forschungsinstitut auf starke Presseabteilungen.

Natürlich geht es hier um Selbstdarstellung und Wettbewerbsvorteile – etwa im Konkurrenzkampf um öffentliche Fördermittel. Aber es geht auch um das Verhältnis des einzelnen Wissenschaftlers zu seiner Arbeit. Angesichts der immer spezielleren Themen stellt sich die Frage, ob man sich in den vier Wänden des Labors einigeln will. Oder

ob man eben wegen dieser zunehmenden Spezialisierung wieder mehr Distanz zu seinem Thema anstrebt und nach den größeren Zusammenhängen sucht – etwa im Rahmen multidisziplinärer Projekte. Wenn Chemiker und Physiker mit Raumplanern und Sozialwissenschaftlern in ein und demselben Projekt am gleichen Strang ziehen müssen, geht ohne Kommunikation über den Tellerrand hinaus gar nichts.

Dass diese nicht nur lästige Pflicht sein muss, zeigen beispielhaft die seit einigen Jahren überaus erfolgreichen Wissenschaftsblogs, in denen Forscher den Dialog sowohl mit Kollegen anderer Fachrichtungen als auch mit interessierten Laien suchen. Dank der Möglichkeiten des Internets entstehen dabei völlig neue Ideen und bis dahin nie geahnte Kooperationen!

Auch Aktionen wie die vielerorts stattfindenden Science Slams oder der vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung gemeinsam mit »Spektrum der Wissenschaft« ausgerichtete Wettbewerb »Wissenschaft verstehen« sind berechtete Beispiele dafür, dass Wissenschaftskommunikation vor allem auch Spaß macht – mindestens so viel wie ein Kaffeekränzchen.

Ich freue mich über den Erfolg der jungen Autoren in diesem Heft und wünsche Ihnen bei der Lektüre viel Freude!

Ihr

Inhalt

03 Editorial

06 Wissenschaftler ins Netz!

Ein Plädoyer für Wissenschaftskommunikation

08 »Das kann man nicht delegieren«

Interview mit Annette Leßmöllmann



10 Iris Kröger will etwas gegen sommerliche Mückenplagen tun. Dabei setzt sie ganz auf die Hilfe von Wasserflöhen.



14 Helge Gößling nutzt die leistungsfähigsten Computer der Welt – um zu berechnen, woher der Regen kommt.



18 Ulrich Bohrn züchtet lebende Zellen auf Schaltkreisen. Sein Zellchip könnte der perfekte Sensor für Luftschadstoffe werden.



22 Katja Heubach ist davon überzeugt, dass die Artenvielfalt in der afrikanischen Savanne einen hohen ökonomischen Wert hat.



26 Benjamin Creutzfeldt misst winzige Veränderungen der Schwerkraft – und verfolgt so den Kreislauf des Wassers im Untergrund.



30 Susan Schamfuß untersucht, wie Bakterien mit Hilfe von Pilzen dorthin gelangen, wo sie Schadstoffe im Boden abbauen können.

34 Der »Küchenzuruf«

TITELMOTIV (JEWEILS VON LINKS NACH RECHTS):
OBEN: ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ [M]; MIKE BECKERS [M]; THORSTEN NAESER [M];
UNTEN: RUDI FEUSER [M]; KAROLINE WOLF [M]; ANDRÉ KÜNZELMANN, UFZ [M]

**»Erklärt uns
eure Arbeit so,
dass wir sie verstehen.
Begeistert uns!«**

Mit diesem Aufruf richteten sich das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig und »Spektrum der Wissenschaft« an junge Forscherinnen und Forscher, die sich mit umweltrelevanten Themen auseinandersetzen.

An dem alle zwei Jahre stattfindenden Wettbewerb »Wissenschaft verstehen« können Mediziner, Raumplaner und Sozialwissenschaftler genauso teilnehmen wie Ökologen, Klimaforscher oder Physiker. Wichtigste Voraussetzung: Die Bewerber wollen in spannender und allgemein verständlicher Art und Weise über ihre Arbeit berichten. Dazu müssen sie ihr Thema von einem Standpunkt aus betrachten, den sie zuvor vielleicht noch nie eingenommen hatten: dem des Laien.

Wer mitmachen will, sollte mindestens ein Jahr an seiner Dissertation arbeiten oder den Dokortitel seit höchstens zwei Jahren in der Tasche haben.

Die eingereichten Beiträge umfassen rund 9000 Anschläge und werden von einer Jury beurteilt. Die sechs besten erscheinen in der Reihe »Spektrum der Wissenschaft EXTRA«.

Das Finale der diesjährigen Runde, die Kür der Siegerin oder des Siegers, findet am 3. Dezember 2012 um 17.00 Uhr im Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ in Leipzig statt. Dort haben die Kandidaten der Endrunde Gelegenheit, ihre Arbeiten einem großen Publikum vorzustellen. Jeder Zuhörer ist herzlich willkommen. Eintritt ist frei.

Wer an diesem Abend den besten Vortrag präsentiert, erhält einen Scheck über 3000 Euro. Platz zwei und drei werden mit 2000 beziehungsweise 1000 Euro prämiert. Die vierten Plätze gehen mit einem Preisgeld von 500 Euro nach Hause.

Der Wettbewerb wird unterstützt von: Sparkasse Leipzig, MITGAS-Mitteldeutsche Gasversorgung GmbH, Bauer Umwelt GmbH, Leipziger Stiftung für Innovation und Technologietransfer, Agilent Technologies, Verein der Freunde und Förderer des UFZ.

WISSENSCHAFT
VERSTEHEN ■



Jury

- > **Mario Beck**
Wissenschaftsredakteur
der »Leipziger Volkszeitung«
- > **Dr. Jörg Junhold**
Direktor des Zoo Leipzig
- > **Nora Liebmann und
Cornelius Penno**
Schüler der 12. Klasse des
Wilhelm-Ostwald-Gymnasiums,
Leipzig
- > **Dr. Claudia Schreiner**
Programmchefin Kultur /
Wissenschaft des Mittel-
deutschen Rundfunks
- > **Prof. Dr. Beate A. Schücking**
Rektorin der Universität Leipzig
- > **Dr. Joachim Schüring**
Redaktionsleiter, Spektrum
der Wissenschaft Verlag,
Heidelberg
- > **Prof. Dr. Georg Teutsch**
Wissenschaftlicher Geschäftsfüh-
rer des Helmholtz-Zentrums für
Umweltforschung – UFZ, Leipzig

Wissenschaftler ins Netz!

Warum müssen Forscher über ihre Arbeit reden? Weil sie heute mehr denn je die Möglichkeiten haben, gehört zu werden. Und weil es heute mehr denn je nötig ist. Lars Fischer kommentiert die Bedeutung von Wissenschaftskommunikation in der Gesellschaft des 21. Jahrhunderts.



Unter den Dingen, die gute Wissenschaft ausmacht, hatte das Herausragen von neuen Ideen in die Welt schon immer seinen festen Platz neben Forschung, Lehre und der Veröffentlichung der Ergebnisse. In der Vergangenheit sind viele große Wissenschaftler auch durch ihre Publikumsvorträge berühmt geworden – man denke an Justus von Liebig oder Richard Feynman. Doch Professionalisierung und Spezialisierung auf der einen Seite und der enorme Wandel in den Medien und dem Verhalten ihrer Nutzer auf der anderen Seite haben dazu geführt, dass Gesellschaft

und Wissenschaft sich auseinandergeliebt haben, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sich überwiegend, abgekoppelt von der Allgemeinheit, nurmehr untereinander von ihren Ergebnissen berichten.

Doch das kann so nicht bleiben, schon aus ganz pragmatischen Gründen: Die Gesellschaft braucht fachliche Expertise. Dringend. Zu vielen wichtigen gesellschaftlichen Themen haben Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen etwas zu sagen, haben ungewohnte Einsichten zu bieten und ihre eigene Perspektive einzubringen. Auch Forscher sind

»Wissenschaftler dürfen heutzutage nicht mehr warten, bis jemand bei ihnen anklopft – der Kampf um die Deutungshoheit ist dann nämlich schon entschieden«

Bürger, deren Stimmen im Diskurs einer demokratischen Gesellschaft nicht fehlen dürfen. Die großen Fragen unserer Zeit, ob es um Ressourcen geht, um Klimawandel, Energie oder Infektionskrankheiten, sind ohne Expertise nicht zu beantworten; Katastrophen wie die Havarie von Fukushima erfordern wissenschaftliche Expertise, wenn man die Folgen beseitigt, und ebenso, wenn es darum geht, vergleichbare Unfälle zu verhindern.

Um gehört zu werden, müssen Forscher und Experten heutzutage mehr denn je sichtbar sein, und im Ringen um Aufmerksamkeit stehen sie im Wettbewerb nicht nur mit Unterhaltungsmedien, sondern auch und gerade mit Gruppen und Ideologien, die sich als Ersatz, sogar als bessere Alternative zur Wissenschaft anpreisen, wie Esoteriker oder Kreationisten. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen können und dürfen heutzutage nicht mehr warten, bis jemand bei ihnen anklopft – der Kampf um die Deutungshoheit ist dann nämlich schon entschieden, oft zu Ungunsten der Forscher.

Sichtbar sein ist denn auch das Stichwort, um das es geht. Erklären, und vor allem erklären können. Beides bedingt einander: Wer nie erklären musste, kann es, wenn es hart auf hart kommt, erst recht nicht, sei es bei einer Naturkatastrophe oder im Hörsaal, wenn es gilt, den Nachwuchs auszubilden. Diese Art der Kommunikation kommt ja nicht als zusätzliche Anforderung neu hinzu, viel passender ist das Bild vom verlorenen Sohn, der endlich heimkehrt. Erklären ist der Hauptberuf von Forscherinnen und Forschern; Forschung bedeutet, Welterklärungen zu suchen. Die Welt erklären, und zwar allen, die es wissen wollen.

Und gerade jetzt explodieren förmlich die Möglichkeiten, das zu tun: Eine neue Medienrevolution macht plötzlich jeden zum potenziellen Publizisten, gleichzeitig haben sich neue Formate der direkten Begegnung etabliert wie die langen Nächte der Wissenschaften, Science Slams oder Kinderunis. Stiftungen und Wettbewerbe schreiben sich auf die Fahne, Forschung in die Öffentlichkeit zu bringen. Selten war die Gelegenheit, den Austausch mit Laien zu suchen, so günstig wie heute.

Die Bedeutung der Wissenschaft für den Alltag, die Gesellschaft und unser Verständnis unserer selbst und unserer Position in der Welt ist viel zu groß, als dass Wissen-

schaftler darauf verzichten könnten, ihre Arbeit und ihre Erkenntnisse an die Allgemeinheit zu vermitteln. Es geht eben nicht nur darum, zu konkreten Fragen und Risiken Stellung zu beziehen oder diese und jene Technik zu erklären. Wissenschaft ist längst zentraler Teil unserer Kultur, was man ja auch daran erkennt, wie routinemäßig – oft verballhornte oder falsch verstandene – Argumentationsmuster aus der Wissenschaft in alltägliche Debatten einfließen. Es geht auch immer weniger um den eindimensionalen naturwissenschaftlichen Vortrag, sondern darum, Themen aufzunehmen und zu diskutieren. So wie die Wissenschaft in alle Teile der Gesellschaft hineinwirkt, muss auch die Gesellschaft in die Wissenschaft zurückwirken können, denn beide sind inzwischen untrennbar miteinander verbunden, im Guten wie im Schlechten.

Diese neuen Möglichkeiten zum Dialog sollten Forscherinnen und Forscher freudig nutzen, denn Dialog gehört zur Wissenschaft. Seit Jahrzehnten bringen Journalisten und Magazine die Neuigkeiten von der Forschungsfront zu Millionen begeisterten Lesern, machen wissenschaftliche Entdeckungen wie das Higgs-Boson Schlagzeilen rund um den Globus. Und das ist erst der Anfang einer neuen Wissensgesellschaft des 21. Jahrhunderts. Ihre wichtigsten Bestandteile sind eine offene und zugängliche Wissenschaft und all jene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die ihr schon jetzt den Weg bereiten.



> Lars Fischer ist

Chemiker und

Redakteur bei den

SciLogs.

Sein Blog: www.scilog.de/fischblog

»Das kann man nicht delegieren«

Im Interview mit »Spektrum der Wissenschaft« spricht Annette Leßmöllmann, Professorin für Journalistik mit dem Schwerpunkt Wissenschaftsjournalismus an der Hochschule Darmstadt, über Strategien zur Kommunikation von Forschung – und die Gefahren der Medienlandschaft.

Frau Leßmöllmann, warum sollten sich Wissenschaftler heutzutage mit Wissenschaftskommunikation beschäftigen?

Wenn wir Wissenschaftskommunikation als »Kommunikation mit der Öffentlichkeit« definieren, dann gibt es dafür eine Reihe Argumente. Zum Beispiel das Steuerzahlerargument: Die Bürger haben ein Anrecht darauf, zu wissen, was in der von ihnen finanzierten Forschung passiert. Ich finde diese Argumentation zwar etwas platt, weil sie nach einem Austausch »Geld gegen Wissen« klingt, und so einfach ist es nicht. Aber es ist nicht von der Hand zu weisen, dass die Öffentlichkeit einen berechtigten Anspruch hat. Viel wesentlicher ist allerdings, dass Kommunikation ein entscheidender Bestandteil der Wissenschaft selbst ist. Einerseits kommen Forscher und Forscherinnen gar nicht umhin, untereinander ihre Ergebnisse auszutauschen und zu diskutieren. Es ist natürlich auch für die individuelle Forscherkarriere unabdingbar, innerhalb der Wissenschaft effektiv zu kommunizieren. Aber damit ist es nicht getan, denn Wissenschaft wirkt automatisch in die Gesellschaft hinein, in Form von Technik, aber auch von Ideen. Das heißt, die Öffentlichkeit ist in den weiteren wissenschaftlichen Prozess ebenso involviert wie die Fachkollegen, und sie wirkt ebenfalls auf die Wissenschaft zurück. Deswegen sollten Forscher auch in dieser Richtung den Dialog suchen.

Warum können Forscher diese Aufgabe nicht den Pressesprechern und Journalisten überlassen?

Zum Teil können sie das, keine Frage. Aber das klingt so, als könne man das Kommunizieren insgesamt delegieren. Das kann man aber nicht, denn Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler müssen auch das Kommunizieren mit ihren Pressestellen und mit Journalisten trainieren. Denn diese Kanäle haben ihre Besonderheiten, die durchaus vorgeben, auf welche Weise man Inhalte vermitteln kann und welche überhaupt vermittelbar sind. Hinzu kommt, dass zum Beispiel Journalisten sehr wohl Interessen haben, die nicht mit denen von Wissenschaftlern übereinstimmen müssen – das sieht man schon daran, wie oft Wissenschaft-

ler die journalistische Berichterstattung über Wissenschaftsthemen kritisieren. Man muss diese Kommunikationswelten verstehen, um sinnvoll mit ihnen umgehen zu können. Vor allem aber ist diese Art der Kommunikation nicht nur sehr indirekt, sondern oft auch eine Einbahnstraße. Fragen und Bedenken der Adressaten erreichen die Wissenschaftler bestenfalls verspätet oder gar nicht. Diese Form der kontrollierten Kommunikation bricht spätestens dann zusammen, wenn mal etwas passiert. In einer Krise, sei es wenn in der Forschung selbst etwas schiefgeht, sei es bei einer Katastrophe wie in Fukushima, haben Forscher gar keine Wahl mehr – sie werden gefragt. Und dann ist es zu spät, erst einmal die nötige Erfahrung in der Kommunikation zu sammeln.

Wie kann man sich als Forscher diese Fähigkeit zur Kommunikation aneignen?

Auch da gibt es sehr unterschiedliche Möglichkeiten, die ersten Schritte zu wagen. Natürlich kann man einfach losgehen, einen Blog eröffnen und gucken, wie die Resonanz sich entwickelt, oder sich bei Twitter und Facebook profilieren. Aber der Sprung ins kalte Wasser ist nicht für jeden etwas. Zum Glück gibt es eine ganze Reihe Formate, in denen Wissenschaftler innerhalb eines verlässlichen Rahmens und gegebenenfalls mit Unterstützung durch professionelle Kommunikatoren die ersten Schritte machen können, zum Beispiel in Form eigener Artikel in Forschungsmagazinen, aber eben auch in Publikumsvorträgen zu besonderen Anlässen. Zudem existieren heute Institutionen und Stiftungen, die Wissenschaftler auf ihrem Weg in die Öffentlichkeit unterstützen, und zusätzlich kann man die eigene Pressestelle wegen solcher Projekte ansprechen.

Welche Instrumente sollten Forscher und Forscherinnen wählen, um direkt mit der Öffentlichkeit zu kommunizieren?

Da gibt es keine allgemein gültigen Wahrheiten. Am besten ist es sicher, verschiedene Sachen auszuprobieren und herauszufinden, was einem am ehesten liegt. Die vielen



Für gekonnte und bewusste Kommunikation plädiert Annette Leßmöllmann im Gespräch mit Lars Fischer von »Spektrum der Wissenschaft«. Die Hochschul-lehrerin will Wissenschaftler dazu motivieren, den richtigen Umgang mit den Medien zu üben. Und warnt zugleich: »Plumpe PR für die eigene Forschung wird nicht funktionieren.«

digitalen Kommunikationsmittel, Blogs und Social Media etwa sind ausgezeichnet dafür geeignet, und Wissenschaftler sollten sich mit diesen Kanälen zumindest einmal beschäftigt haben. Aber auch die traditionelleren Formen der Öffentlichkeitsarbeit wie Publikumsvorträge oder Tage der offenen Tür darf man dabei nicht vernachlässigen – im Gegenteil, diese Veranstaltungen werden heute wieder beliebter, zum Beispiel in Form der Langen Nächte der Wissenschaften in vielen Städten.

Ist es dann nicht Aufgabe der Universitäten, angehenden Wissenschaftlern Kurse in Kommunikation anzubieten?

Definitiv ja. Selbst wenn Wissenschaftler sich dagegen entscheiden, selbst zu kommunizieren, sollten sie eine Vorstellung davon haben, wie die Medienlandschaft aussieht, welche Akteure über Wissenschaft berichten und vor allem welche Instrumente sie verwenden und welche Interessen sie dabei haben. Forscher sind im Umgang mit Medien oft ungeübt und machen deswegen leicht vermeidbare Fehler, wenn sie irgendwann gezwungenermaßen in der Öffentlichkeit stehen. Deswegen wären derartige Veranstaltungen, am besten Pflichtseminare im Studium, unbedingt wünschenswert.

Wo liegen die Probleme solch offener Kommunikation, und wie geht man damit um?

Für Wissenschaftler ist das zuallererst eine Zeitfrage – die Zeit, die man auf solche Aktivitäten verwendet, fehlt einem für andere Dinge, die der eigenen wissenschaftlichen Arbeit zuerst einmal förderlicher sind. Man muss sich allerdings klarmachen, dass Kommunikation ein integraler Bestandteil der Wissenschaft ist. Besonders deutlich sieht man das bei der universitären Lehre, die ja auch Kommunikation ist – wer hier Zeit einsetzt, knapst sie von seiner For-

scherkarriere ab. Aber wenn kein Wissenschaftler mehr lehrt, ist die Wissenschaft selbst am Ende. Mit der Kommunikation nach außen ist es im Grunde ähnlich: Natürlich ist es in gewisser Weise riskant, offen zu kommunizieren. Aber nicht zu kommunizieren ist es mindestens ebenso. Man stelle sich eine Welt vor, in der kein Forscher mehr Austausch mit der Öffentlichkeit pflegte. Daraus entstünde eine Kaste von Wissenden, die etwas weiß, was niemanden sonst interessiert – und andersherum kreist dann auch die Wissenschaft nur um sich selbst.

Wieso wäre das ein Problem?

Vielleicht sehen das manche als Vorteil, sich nur mit Wissenschaft und mit sonst nichts zu befassen. Ich kann das sogar ein bisschen verstehen, es ist ja auch eine Frage der Neigung. Und wer nur um sich selbst kreist, der läuft auch nicht Gefahr, Dinge lediglich deshalb zu erforschen, weil sie für Schlagzeilen sorgen – denn das ist der Fallstrick der »Medialisierung der Wissenschaft«. Eine zu starke Ausrichtung auf den Medieneffekt birgt die Gefahr, wirklich relevante Fragestellungen zu unterdrücken. Und was wirklich relevant ist, sollte nicht nur das Mediensystem festlegen dürfen. Also: Kommunikation – ja, aber gekonnt und bewusst. Plumpe PR für den eigenen Forschungsbereich wird nicht funktionieren. Eine wahrhaft offene Kommunikation, die kritische Stimmen der Öffentlichkeit akzeptiert und nicht diffamiert – das ist gut für alle. »Kommunikation« sollte weniger im Sinne von »ich bin auf Sendung und ergieße Weisheit über die Menschen« aufgefasst werden, sondern als Dialog im Sinne eines Gesprächs: »Ich stelle meine Erkenntnisse zur Debatte und schaue mal, was dabei herauskommt.« Das ist eigentlich eine genuin wissenschaftliche Tätigkeit. Wieso diese Gesprächsform also nicht nur mit der Kollegin im Labor nebenan pflegen, sondern auch mit dem interessierten Laien?



In Weihern und Tümpeln fühlen sich Stechmückenlarven wohl. Das will Iris Kröger ändern, indem sie konkurrierenden Teichbewohnern einen Vorteil im Rennen um Platz und Nahrung verschafft. Regelmäßig filtert und zählt sie die Larven aus Wasserproben und erfährt so, ob ihre Strategie erfolgreich war.

Inis Kröger

ANDRÉ KUNZELMANN, UFZ

Tatort Pfütze – Wasserflöhe im Kampf gegen Mückenplagen

Ein kräftiger Sommerregen, und die nächste Invasion von Stechmücken steht bevor. Als effektives Gegenmittel erweisen sich natürliche Nahrungskonkurrenten – doch nur, wenn sie Starthilfe aus dem Labor erhalten.

Sie verleiden uns die sommerlichen Grillabende und rauben uns den Schlaf. In vielen anderen Teilen der Welt jedoch sind Stechmücken nicht nur lästig, sondern auch gefürchtete Krankheitsüberträger. Exotische Arten gelangen im Zuge der Globalisierung und Klimaerwärmung zunehmend in unsere Breiten – und übertragen hier womöglich gefährliche Krankheiten aus ihrer tropischen Heimat.

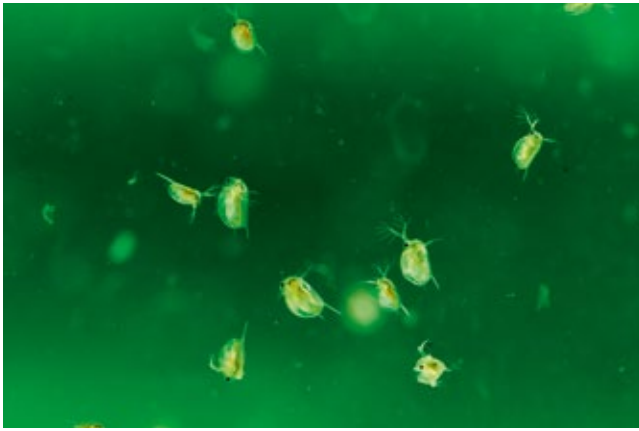
Im Kampf gegen die Mücken zeigt die Erfahrung, dass chemische Insektizide oft auch für zahlreiche andere Lebewesen verheerend sind. Wünschenswert wären gezielte biologische Methoden, vielleicht sogar mit Hilfe von Verbündeten aus dem Tierreich: eine Mückenpolizei, die etwas gegen die Plagegeister unternimmt.

Solche Helfer könnten winzige Krebse sein. Sie kommen in Tümpeln und Pfützen in einer immensen Artenvielfalt vor. Die Larven der Stechmücke wachsen ebenfalls in solchen Gewässern heran und treffen dort auf Blattfußkrebse, Ruderfußkrebse, Muschelkrebse und Co. Sie besiedeln nicht nur dieselben Lebensräume, sie fressen auch das Gleiche, nämlich kleine organische Partikel wie Algen oder Bakterien, die sie aus dem Wasser filtern.

Lässt sich diese Konkurrenz eventuell zur Mückenbekämpfung nutzen? Zur Beantwortung der Frage untersuchte ich, was passiert, wenn Larven der Gemeinen Stechmücke (*Culex pipiens*) und Wasserflöhe (*Daphnia spp.*) aufeinandertreffen. Dazu beobachteten meine Kollegen und ich einen Sommer lang das Leben in verschiedenen Gewässern.

Vor allem seichte Tümpel interessierten uns, die nicht selten mehr als 100 Quadratmeter groß werden, dabei aber nur knöcheltief sind und im Sommer innerhalb weniger heißer Wochen restlos austrocknen. Ein kräftiger Regenguss füllt sie wieder und gibt gewissermaßen den Startschuss für die Besiedlung dieses neuen Gewässers durch Mücken und Wasserflöhe. Welche der beiden Arten würde das Rennen für sich entscheiden? Könnten wir den Krebstieren so gute Startbedingungen geben, dass sie uns im Kampf gegen Mückenplagen unterstützen?

Wir stellten fest: Langfristig überlebten auch ohne menschliches Eingreifen in den Gewässern nur die Wasserflöhe. In jenen Tümpeln, in denen es viele von ihnen gab, fehlte es den Mückenlarven schlicht an Platz und Nahrung. Die Krebse gewannen offenbar den Kampf um die Ressourcen.



ANDRÉ KÖNIGSMANN, UFZ



Und instinktiv erahnen das wohl auch die Weibchen der Gemeinen Stechmücke. Sie suchten sich für die Eiablage nämlich gezielt solche Gewässer aus, in denen keine Wasserflöhe vorkamen. Wie die Mückenweibchen das erkennen, bleibt vorerst ihr Geheimnis. Man weiß aber bereits aus Laborversuchen, dass sie vor der Eiablage das Teichwasser trinken und so zum Beispiel die Anwesenheit räuberischer Insekten bemerken. Vermutlich verändern die Bewohner die chemische Zusammensetzung des Wassers. Wahrscheinlich schmecken die Mücken, dass sich Krebse in ihrer Nähe aufhalten.

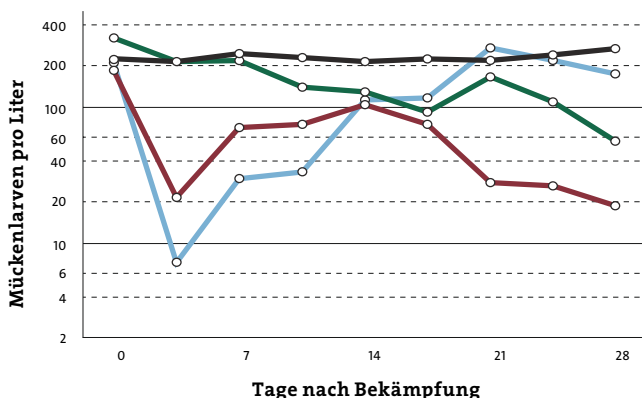
Wasserflöhe könnten demnach gleich auf zweifache Weise gegen die lästigen Blutsauger wirken. Zum einen stören sie die Eiablage der Mückenweibchen. Zum anderen entwickeln sich die wenigen Larven, die doch ins Wasser gelangen, wegen der Konkurrenz schlechter. Bräuchte man also nur Wasserflöhe in die Teiche und Tümpel zu setzen? Ganz so einfach ist es dann wieder nicht, denn die Mücke hat einen entscheidenden Vorteil: Sie ist schnell!

Um das zu verstehen, müssen wir zunächst die Frage klären, wie Mückenlarven und Wasserflöhe in die Tümpel gelangen. Bei Ersteren ist das einfach. Nach einem Regenguss suchen erwachsene Stechmückenweibchen gezielt nach Wasserstellen, um mehrere hundert Eier auf einmal abzulegen. Die Larven schlüpfen nach wenigen Tagen, so dass das Wasser rasch von vielen tausenden Exemplaren bevölkert wird.

Die Krebstierchen haben es da schwerer. Sie können nicht fliegen oder aktiv zu neuen Ufern streben. Sie reisen nur als blinde Passagiere, etwa im Gefieder von Wasservögeln. Allerdings produzieren Wasserflöhe so genannte Dauereier, die Kälte, Hitze und Trockenheit überstehen – jahrelang. Sobald sie ins Wasser gelangen, schlüpfen die Larven binnen weniger Tage. Die Weibchen benötigen daraufhin noch etwa ein bis zwei Wochen, ehe sie fortpflanzungsfähig sind, und produzieren danach alle drei Tage rund 30 Nachkommen.

Die Anzahl der Wasserflöhe ist in einem Gewässer also in den ersten Wochen gering, steigt dann aber sprunghaft an – sofern sie gute Lebensbedingungen vorfinden. Doch das ist meist nicht der Fall: Denn die vergleichsweise wenigen geschlüpften Wasserflöhe sehen sich einem Heer aus Mückenlarven gegenüber, die ihnen Platz und Futter streitig machen. Das Konkurrenzprinzip funktioniert in beide Richtungen. Leider.

Irgendwann aber schlüpfen die Mückenlarven und verlassen das Wasser, während die Wasserflöhe endlich die Vorherrschaft im Tümpel übernehmen können. Dieses Gewässer ist nun vor erneuter Eiablage durch die Blutsauger geschützt. Auch wenn Wasserflöhe die Stechmücken langfristig aus ihrem Lebensraum vertreiben, so sind sie doch machtlos gegen deren kurzfristige, dafür aber explosionsartige Ausbreitung kurz nach dem Entstehen eines Gewässers.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: IRIS KRÖGER

Bti-Toxin tötet die Mückenlarven in einem Tümpel, doch sobald das Insektizid abgebaut ist, bevölkern sie ihn erneut (blaue Kurve; der Graph ist logarithmisch aufgetragen). Eingesetzte Wasserflöhe verdrängen die Larven nur langsam (grüne Kurve). Werden beide Bekämpfungsmethoden kombiniert, bleibt die Anzahl der Mücken durchgehend niedrig (rote Kurve). Ohne jeden Eingriff ändert sich die Larvenmenge kaum (schwarze Kurve).

Wasserflöhe der Gattung *Daphnia* (links) konkurrieren mit den Larven der Gemeinen Stechmücke (*Culex pipiens*, rechts) um Platz und Nahrung. Neue Gewässer besiedeln die Mücken explosionsartig schnell, langfristig sind jedoch die Wasserflöhe im Vorteil.

Mit der richtigen Verstärkung könnte es dem Wasserfloh gelingen, ein Gewässer von Anfang an frei von Mückenlarven zu halten. Der *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) produziert ein Gift, das den Darm der Mückenlarven zerstört. Seit zwei Jahrzehnten wird der Stoff großtechnisch aus Bakterienkulturen gewonnen und weltweit als biologisches Insektizid zur Mückenbekämpfung eingesetzt. Die Mückenlarven nehmen diese Substanz mit dem Futter auf und sterben daran. Schon einige Stunden nachdem Bti-Toxin in die Tümpel ausgebracht wurde, sind sie tot.

Der Wirkmechanismus im Darm ist so komplex und spezifisch, dass im Gegensatz zu chemischen Insektiziden nur die Larven der Stechmücke und einiger weniger anderer Insekten betroffen sind. Wasserflöhe und andere Tiere werden durch das Bti-Toxin nicht geschädigt. Der Haken: Als biologische Substanz zersetzt sich der giftige Eiweißstoff innerhalb weniger Tage und ist dann unwirksam. Schon nach kurzer Zeit besiedeln die Mückenlarven die Gewässer erneut und müssen wieder mit Bti-Toxin bekämpft werden. Das ist aufwändig und teuer. Und je häufiger das Gift eingesetzt wird, desto rascher entwickeln die Insekten Resistenzen dagegen.

Auf der einen Seite haben wir also ein Insektizid, das schnell, aber nur für kurze Zeit wirkt; auf der anderen Seite den Wasserfloh, der sich nur langsam entwickelt, dafür über einen langen Zeitraum hinweg Mückenlarven verdrängt. Ob sich daraus eine kombinierte Strategie gegen Stechmückenplagen entwickeln lässt, testete ich in einem Freilandversuch, und zwar, indem ich drei verschiedene Methoden der Mückenbekämpfung verglich: den alleinigen Einsatz des Bti-Toxins sowie den der Wasserflöhe – und eine Kombination aus beidem (Diagramm links).

Das Ergebnis bestätigte meine Vermutung. Das Insektizid senkte die Anzahl der Mückenlarven während der ersten zwei Wochen, doch nach einem Monat waren wieder genauso viele vorhanden wie in einem unbehandelten Gewässer. Wurden nur Wasserflöhe eingesetzt, so vermehrten sie sich auf Grund der Konkurrenz durch die Mückenlarven nicht stark genug. Deren Zahl sank daher nur wenig.

Den erhofften Erfolg brachte schließlich die Kombination des Bakteriengifts mit Wasserflöhen. Die Mückenlarven starben sofort, so dass die Krebstiere genug Platz und Futter vorfanden, und sich kräftig vermehrten. Auch als nach zwei Wochen die Wirkung des Insektizids nachließ, sank die Zahl der Mückenlarven weiter. Es waren also bereits genug Kleinkrebse vorhanden, um eine Neubesiedlung des Teichs zu unterbinden. Eine einmalige Behand-

lung mit dem Giftstoff genügte – sofern er gemeinsam mit Wasserflöhen eingebracht wurde. Diese geben den Mückenlarven als natürliche Konkurrenten den Rest.

Auf dem Weg in die Praxis sind indes noch einige Fragen zu klären. In welchen Arten von Gewässern, von der Pfütze bis zum Teich, wird eine solche Methode effektiv sein? Eignen sich statt lebender Krebse auch ihre Dauereier, um Lagerung, Transport und Anwendung in entlegeneren Regionen zu vereinfachen? Schließlich geht es nicht nur darum, den Plagegeistern hier zu Lande das Leben schwerer zu machen. Weltweit könnten die unscheinbaren Wasserflöhe zu Verbündeten werden – gegen einen der am meisten gefürchteten Überträger tödlicher Krankheiten.

Iris Kröger

iris.kroeger@ufz.de



ANDRÉ KUNZELMANN, UFZ (M)

> geb. 1979 in München

> studierte Biologie in München

> promovierte am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig

> mit dem Thema »Biotopbindung, Nahrungsnetz und Kontrolle von heimischen Stechmückenlarven«

> Meine Stationen:

1. Im heimischen Garten führte ich als Kind erste »Verhaltensstudien« an Ameisen durch.
2. Im Zoo in München beobachtete ich für eine Schularbeit drei Monate lang Erdmännchen – und wollte danach unbedingt Biologie studieren.
3. Eine Tauchausbildung begeisterte mich für den Lebensraum Wasser – so kam ich zu den Mücken!

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... betreiben meine beiden kleinen Kinder Forschung an mir: Wie lange kommt Mama ohne Schlaf aus? Wann hebt sie meinen Löffel nicht wieder vom Boden auf?

> In fünf Jahren ...

... habe ich mich in der Mückenforschung etabliert, führe eine eigene Arbeitsgruppe und entschlüssele das geheime Leben der Stechmücke.

Wo kommt der Regen her?

Klimaforscher kennen die Wege, auf denen sich die Feuchtigkeit durch die Atmosphäre bewegt. Können sie damit auch vorhersagen, wie sich hier zu Lande die Regenmenge ändert, wenn anderswo weniger Wasserdampf aufsteigt? Computersimulationen machen klar: Der Zusammenhang von Niederschlag und Verdunstung ist komplizierter als bislang angenommen.

»W

o kommt der viele Regen eigentlich her?« – »Aus den Wolken, das siehst du doch!« – »Ja, aber wie kommt er da rein?« – »Aus dem Meer. Und aus den Bäumen.« Worüber sich in diesem Auszug aus dem Kinderhörspiel »Das Wunder Regenwald entdecken« drei tierische Bewohner des südamerikanischen Regenwalds unterhalten, das habe ich zum Gegenstand meiner Dissertation gemacht und den globalen Wasserkreislauf unter die Lupe genommen.

Der Mensch greift schon seit einigen Jahrtausenden in das Klimageschehen der Erde ein – indem er etwa Wälder rodet, um Ackerbau zu treiben. Die Landnutzung beeinflusst die hydrologischen Eigenschaften der Böden, also jene, die den Wasserhaushalt betreffen. So geben Bäume mit ihren tiefen Wurzeln einen größeren Anteil des versickerten Niederschlags in die Atmosphäre zurück als Acker- oder Weidepflanzen. Werden landwirtschaftliche Flächen hingegen künstlich bewässert, kann von diesen sogar mehr Wasser in die Atmosphäre aufsteigen, als dies im ursprünglichen Zustand der Fall war. Eine stärkere Verdunstung führt wiederum zu zweierlei: Mit ihr geht erstens eine Abkühlung einher – wie wir sie am eigenen Leib beim Schwitzen erfahren. Zweitens erhöht sie den Wasservorrat in der Atmosphäre, der schließlich irgendwo als Niederschlag wieder herunterkommen muss.

Mich interessiert insbesondere der zuletzt geschilderte Zusammenhang, den man als Feuchterecycling bezeichnet. Die wichtigsten Fragen dabei: Wo regnet das an einer Stelle verdunstete Wasser wieder herunter? Und, wie verändert sich die globale Verteilung der Niederschläge, wenn sich die Verdunstungsraten an einem bestimmten Ort ändern?

Mich erstaunte, dass sich die beteiligten Klimaforscher bisher offenbar damit begnügten, die Antwort auf die erste Frage zu kennen. Wüssten sie nämlich genau genug über die Transportwege der atmosphärischen Feuchte Bescheid, so könnten sie sogar näherungsweise vorhersagen, wo und wie stark sich Verdunstungsänderungen auswirkten. Stammte zum Beispiel im normalen Zustand in einer Region B die Hälfte des Niederschlags aus einer Region A, hätte ein vollständiges Erliegen der Verdunstung dort zur Folge, dass es in Region B nur noch etwa halb so viel regnete.

Die veränderten Verdunstungsraten haben jedoch noch andere Konsequenzen. Wasser verhält sich in der Atmosphäre eben nicht wie ein passives Schwebeteilchen. Die Phasenübergänge des Wassers sind vielmehr mit der Aufnahme beziehungsweise Abgabe von Wärme verbunden. Zudem ist Wasserdampf ein Treibhausgas, absorbiert also die von unserem Planeten abgegebene Wärmeenergie, die sonst in den Weltraum entweichen würde, und strahlt sie teilweise zur Erde zurück. Andererseits reflektieren die Wassertröpfchen in den Wolken einen Teil des auf die Erde fallenden Sonnenlichts zurück ins Weltall.

Die Wärmeverteilung wiederum beeinflusst sowohl die lokale Bildung von Niederschlag als auch die globalen Strömungsmuster. Kurzum, eine veränderte Verdunstung in einer Region bringt nicht einfach nur entsprechend mehr oder weniger Wasser in die Atmosphäre, sondern wirkt sich vielfältig aus. Mir geht es daher nicht bloß darum, herauszufinden, wo der Regen herkommt. Ich erforsche, was wir darüber hinaus wissen müssen, um das Zusammenspiel zwischen Verdunstung und Niederschlag zu verstehen.

Helge Gößling



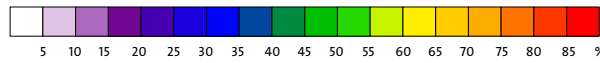
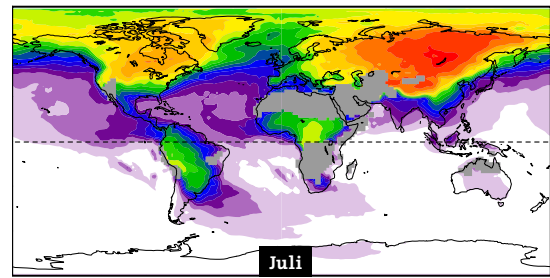
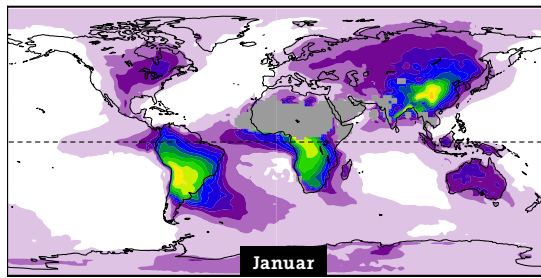
SPEKTRUM ONLINE: WWW.SPEKTRUM.ONLINE

IBM

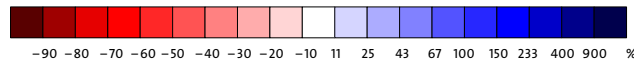
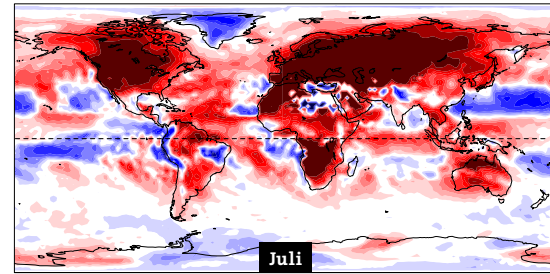
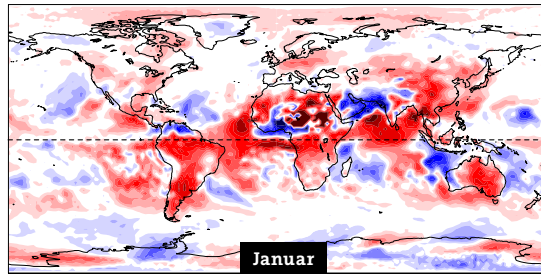
575

Die Superrechner des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg gehören zu den weltweit leistungsfähigsten Computern, mit denen mögliche zukünftige Klimaänderungen simuliert werden. Helge Gößling führte seine Experimente mit dem hier abgebildeten Hochleistungsrechner »Blizzard« durch.

prozentualer Anteil
kontinentalen
Wassers im Niederschlag



Niederschlagsänderung
bei fehlender
Landverdunstung in Prozent



Doch ist bereits die Frage, wo Luftmassen das Wasser einer Regenwolke ursprünglich aufnehmen, nicht einfach zu beantworten. Messungen der chemischen Beschaffenheit des Niederschlags helfen da nicht, denn jedes Wassermolekül gleicht (abgesehen von isotopischen Varianten) dem anderen und lässt daher nicht auf seine Herkunft schließen.

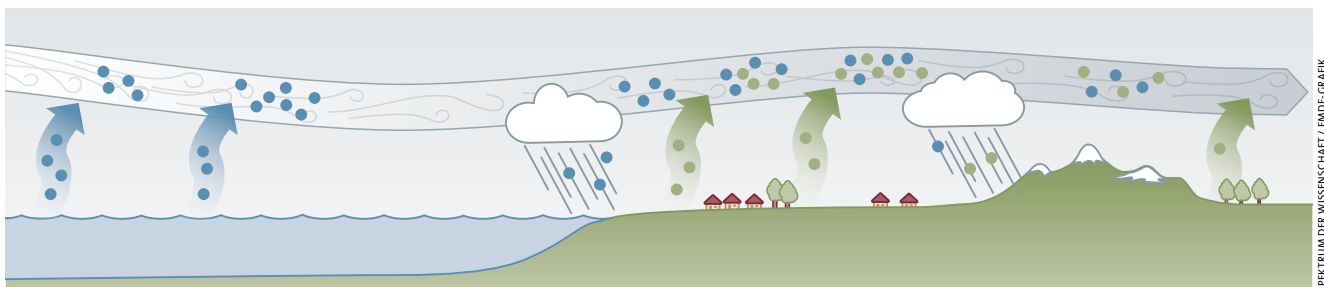
Einzig Computermodelle machen das möglich. Sie dienen vornehmlich der Simulation von kurzfristigen Wetter- und langfristigen Klimaentwicklungen. Darin bewegen sich virtuelle Luftmassen über ein Abbild der Erdoberfläche. Trotz aller Vereinfachungen sind dafür leistungsfähige Supercomputer vonnöten – etwa die des Deutschen Klimarechenzentrums in Hamburg. Ich nutzte das Erdsystemmodell des dortigen Max-Planck-Instituts für Meteorologie und markierte die virtuellen Wasserteilchen, die in den ver-

schiedenen Bereichen der Erde verdunsteten, unterschiedlich. Sie breiteten sich in der simulierten Atmosphäre aus und gingen schließlich irgendwo als Regen nieder. Dann las ich einfach anhand der Markierungen ab, aus welchen Gebieten die enthaltenen Wassermoleküle kamen und welchen Anteil sie jeweils am Niederschlag in einer bestimmten Region hatten (siehe Grafik unten).

So konnte ich die Erdoberfläche in verschiedene Quellregionen aufteilen. Hier möchte ich mich auf den besonders anschaulichen Fall beschränken, in dem Wasser lediglich danach unterschieden wird, ob es aus dem Ozean oder von den Kontinenten stammt. Können wir bereits aus dieser einfachen Unterscheidung etwas über das komplexe Zusammenspiel von Verdunstung und Niederschlag lernen?

Je nachdem, wo das Wasser niedergeht, stammen meiner Simulation zufolge bis zu 85 Prozent davon aus Landverdunstung (siehe oberste Karten). Derartig hohe Anteile werden allerdings nur im Nordsommer im östlichen Teil Eurasiens erreicht. Hier wehen die Luftmassen üblicherweise von Westen heran und haben viel Zeit, in Europa und Westasien mit kontinentalem Wasser betankt zu werden.

Je nach Ort der Verdunstung wird Wasser unterschiedlich markiert und mit Luftströmungen durch die simulierte Atmosphäre transportiert. An der Zusammensetzung des Regens lässt sich ablesen, woher die Feuchtigkeit stammt.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK,
NACH: HELGE GÖSSLING

Die Karten oben zeigen den simulierten Anteil des über den Kontinenten verdunsteten Wassers im weltweiten Niederschlag für die Monate Januar und Juli, gemittelt über zehn Jahre heutigen Klimas. In den grau gefärbten Regionen regnet es mehr als die Hälfte der Zeit gar nicht. Bei völlig fehlender Landverdunstung (unten) ändern sich die simulierten Niederschlagsmengen vielerorts drastisch, vor allem im Nordsommer. So klar definierte Simulationen sind ein wichtiger erster Schritt, um zu klären, wie sich veränderte Verdunstungsraten global auswirken.

Bislang wurde angenommen, das Wissen über die Transportwege reiche aus, um die Konsequenzen veränderter Verdunstungsraten zu berechnen. Dann könnten wir mit meinen Ergebnissen also vorhersagen, wo der Niederschlag wie stark abnähme, wenn sämtliche Landmassen ihre Fähigkeit, Wasser zu verdunsten, gänzlich verlören. Zwar ist ein solches Szenario völlig unrealistisch, doch handelt es sich um einen wohldefinierten Fall, mit dem sich die Gültigkeit dieser Annahme prüfen lässt. In der Realität müssten für unser Experiment alle Landoberflächen in steinige Wüsten verwandelt werden – mit einem Klimamodell lassen sich derartige Verhältnisse hingegen leicht simulieren.

Das Ergebnis: Ohne Landverdunstung käme es in weiten Teilen der Erde zu drastischen Minderungen der Niederschlagsmengen (siehe untere Karten links), vor allem im Nordsommer in Eurasien und Nordamerika. Dies stimmt tatsächlich mit dem überein, was wir auf Grund der Anteile kontinentaler Feuchte im Niederschlag erwarten sollten. Bei genauerem Hinsehen jedoch zeigt sich, dass die Muster nicht recht zusammenpassen. Warum nimmt der Niederschlag vielerorts zu, beispielsweise in Grönland im Juli, wenn dort laut meiner Simulation doch im Normalzustand zwischen 60 und 70 Prozent des Niederschlags aus Landverdunstung stammen? Und warum wird es im Juli im Westteil Eurasiens und Nordamerikas trockener als im Ostteil, da wir doch das Gegenteil erwarten?

Die Antwort habe ich oben bereits vorweggenommen. Wasserteilchen strömen nicht nur passiv von A nach B, sondern beeinflussen ihrerseits das Geschehen in der Atmosphäre entscheidend. So würde es infolge der ausbleibenden Verdunstungskühlung auf den Kontinenten deutlich wärmer, in Eurasien und Nordamerika im Juli um bis zu 16 Grad Celsius! Das wiederum hätte schwer wiegende Folgen für die atmosphärischen Windmuster. Unter anderem würden die vorherrschenden Westwinde derart abgeschwächt, dass Europa und das westliche Nordamerika unter stärkeren kontinentalen Einfluss gerieten. Dies erklärt, warum es dort bei fehlender Landverdunstung kaum noch regnete.

Meine Ergebnisse verdeutlichen, dass es eben nicht genügt zu wissen, wo der Regen herkommt, um die Auswirkungen veränderter Verdunstungsraten abzuschätzen. Wasser ist ein zentraler Mitspieler im atmosphärischen Ge-

schehen. Nun gilt es herauszufinden, ob sein Einfluss ausreichend stark ist, um auch bei realistischeren Szenarien, also bei weniger drastischen Eingriffen in den Verdunstungshaushalt der Erde, die Atmosphäre derart aus dem Takt zu bringen. Oder ob in solchen Fällen womöglich tatsächlich die einfache, bisher übliche Analyse der Transportwege reicht.

Untersuchungen wie diese tragen zu einem ganzheitlicheren Verständnis des Klimasystems bei. Und vielleicht könnten wir in Zukunft sogar durch wohlüberlegte Landnutzung katastrophalen Ereignissen wie Dürren und Unwettern entgegenwirken.



helge.goessling@awi.de



MIKE BECKERS (M)

> geb. 1983 in Hamburg

> studierte Biophysik in Berlin

> promovierte im Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg

> mit dem Thema »Continental moisture recycling and evaporation-precipitation coupling: water as passive tracer and as active component«

> Meine Stationen:

1. Mit meinen drei Brüdern wurde ich naturnah im französischen Jura groß – wir halfen auf dem Bauernhof nebenan und sammelten Fossilien.
2. Zwischen Studium und Gesangsausbildung wählte ich die erste meiner beiden Leidenschaften zum Beruf. Das gelang sogar in der Regelstudienzeit – nach der Geburt meiner ersten Tochter eine besondere Herausforderung.

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... bin ich vermutlich entweder bei meiner Familie oder singe mit meinem Vokalquintett SeiCento.

> In fünf Jahren ...

... finde ich trotz Forschung – seit Oktober 2012 am Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Bremerhaven – und Lehre noch genügend Zeit für die mittlerweile vier Frauen in meiner Familie und die Musik.

A photograph of Ulrich Bohrn, a man with glasses and a white lab coat, working in a laboratory. He is looking down at a piece of equipment, possibly a microfluidic chip, which is part of a larger apparatus with various tubes and components. The lighting is warm and focused on the work area.

Ulrich Bohrn

Auf winzigen Schaltkreisen lässt Ulrich Bohrn lebende Zellen wachsen. Ein Computer überwacht deren Reaktion auf Giftstoffe in einem Gasgemisch. Mehrere Chips arbeiten nebeneinander, um die Luftqualität kontinuierlich und zuverlässig zu kontrollieren.

Lebende Zellen »erschnüffeln« giftige Gase

Viele Schadstoffe in der Luft sind unsichtbar und geruchlos.

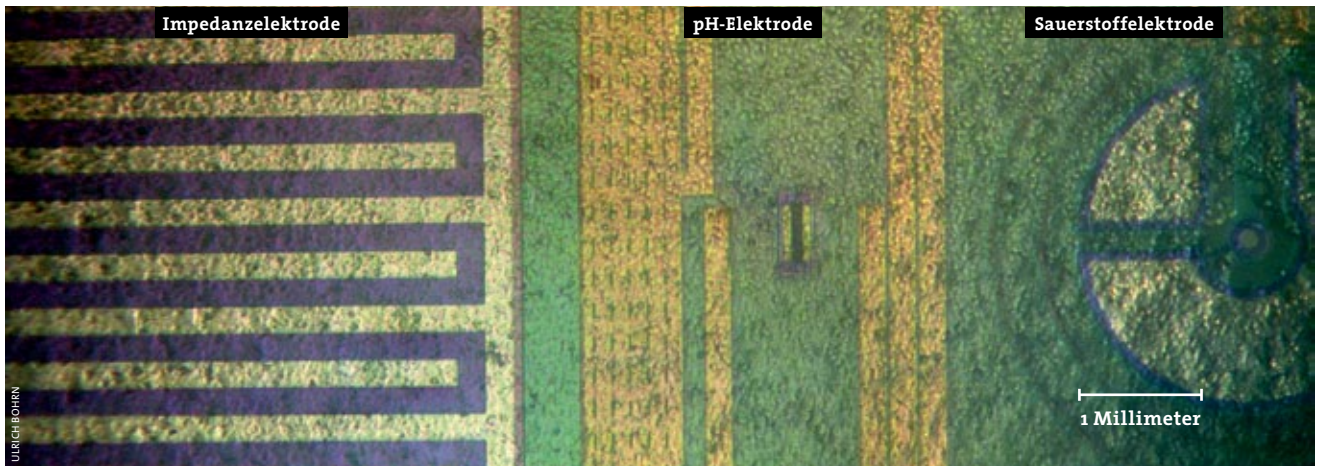
Zwar gibt es empfindliche Messgeräte, doch die warnen nur vor bekannten Schadstoffen.

Lebende Zellen hingegen reagieren auf alle Gifte – ließe sich mit ihnen der perfekte Universalsensor konstruieren?

E ist dunkel, feucht und über 30 Grad Celsius heiß. Wir befinden uns auf einer Zeitreise und besuchen ein Bergwerk im frühen 20. Jahrhundert. Plötzlich ruft ein Kumpel »Alarm!« aus einem der tiefsten Stollen. Tödliches Gas! Fast panisch verlassen die Bergleute die Grube. Ihr Lebensretter: ein Kanarienvogel.

Diese und andere Vögel waren vor mehr als 100 Jahren die ersten Echtzeitwarnsysteme. Sie reagierten auf gefährliche Gase wie etwa Methan oder Kohlenmonoxid, die sich in den schlecht belüfteten Tiefen eines Bergwerks bilden – unsichtbar und für den Menschen geruchlos. Die kleinen Vögel haben einen im Vergleich zu uns viel schnelleren Stoffwechsel und spüren die Auswirkungen der Gase früher, was sie den Bergmännern durch ihren warnenden Gesang anzeigten – oder spätestens durch ihr Verstummen.

Kanarienvögel waren bis zum Ende der 1980er Jahre im Einsatz und wurden erst nach und nach durch moderne Gassensoren ersetzt. Diese reagieren noch empfindlicher



und zuverlässiger als die Vögel, haben aber auch Nachteile. So registrieren sie nur bekannte Gase. Solche, mit denen ihre Konstrukteure nicht gerechnet haben, erkennen sie nicht.

Verlässliche Warnsysteme braucht es freilich nicht nur in Bergwerken. Arbeiter in der chemischen Industrie sind ebenso gefährdet wie die ahnungslosen Opfer eines Giftgasanschlags – etwa im Jahr 1995, als Sektenmitglieder in der Tokioter U-Bahn ein geruchloses Nervengift verbreiteten, 13 Menschen töteten und Tausende verletzten.

Einzig lebende Organismen reagieren auf alle potenziell gefährlichen Stoffe. Das ist auch der Grund, warum noch immer Tierversuche nötig sind, um die Giftigkeit von Wirkstoffen oder Chemikalien zu prüfen. Doch sind solche Experimente aufwändig, teuer und ethisch umstritten. Mein Ziel war es, die Vorteile lebender Zellen und technischer Sensoren zu kombinieren – ohne die jeweiligen Nachteile. In meiner Doktorarbeit entwickelte ich einen Hybriden: einen elektronischen Chip, der mit Hilfe eines Sensors aus biologischem Gewebe Schadstoffe in der Luft aufzuspüren vermag.

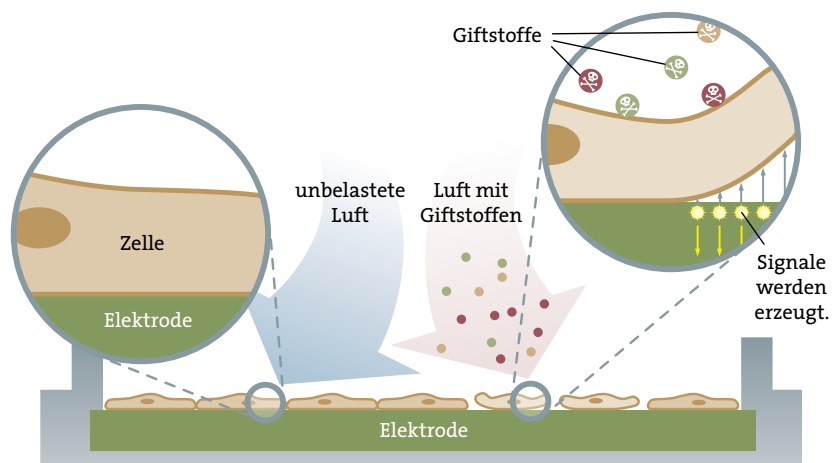
Zellbiologen analysieren seit vielen Jahrzehnten, wie sich Verunreinigungen in der Luft auf lebende Gewebe aus-

Auf diesem Siliziumchip wachsen menschliche Lungenzellen. Am rechteckigen Muster links entstehen Signale, wenn sich ihre Gestalt ändert. Weitere Elektroden liefern Daten zu pH-Wert (Mitte) und Sauerstoffgehalt (Kreis rechts) der Nährlösung. Die goldfarbenen Bahnen leiten die Signale zur Auswertungselektronik.

wirken. Solche Zellen stammen von Säugetieren und werden einmalig entnommen. Mit Hilfe biochemischer Verfahren werden sie zur Teilung angeregt, so dass ständiger Nachschub gesichert ist. Der ist auch nötig, denn die aufwändigen Testverfahren haben meist den Zelltod zur Folge. Man probiert also aus, von welchen Stoffen eine Gefahr ausgeht, und baut dann elektronische Sensoren, mit denen sich die Konzentrationen genau dieser Gifte kontinuierlich messen lassen.

Mein Ziel war nun, die Zellen eben nicht durch ein bestimmtes Gas abzutöten, sondern ihren Zustand zu überwachen. Vor allem würde es auf diese Weise möglich, allgemeine Verschlechterungen der Luftqualität festzustellen – ganz gleich, welcher Stoff sie auslöst.

Die Oberfläche des Chips ist komplett von einer Gewebeschicht bedeckt (Situation links). Kommen die Zellen mit Giftstoffen in Kontakt, ändern sie unter anderem ihre Form (rechts). Diese Reaktion wird mit Hilfe von Elektroden gemessen.



Dazu ließ ich lebende Zellen auf einem Sensorchip anwachsen, mit dem sich verschiedene Veränderungen in der Zelle elektronisch messen lassen.

Eine Impedanzelektrode reagiert, wenn die Zellen ihre Form ändern. Unter dem Einfluss von Stress versuchen sie, ihre Oberfläche zu minimieren: Sie nehmen eine kugelige Gestalt an und lösen sich teilweise von ihrem Untergrund (siehe Bild links unten). Die Elektrode registriert bereits ein leichtes Abheben der Zelle von der Chipoberfläche.

Mit Hilfe einer Sauerstoffelektrode lässt sich die Konzentration von Sauerstoff im flüssigen Nährmedium bestimmen. Um ihren Energiebedarf zu decken, nehmen die Zellen neben den Nährstoffen auch gelösten Sauerstoff aus dem Medium auf. Bei höherer Atmungsaktivität sinkt der Sauerstoffgehalt also schneller. Sind die Zellen indes geschwächt, verringert sich die Sauerstoffatmung.

Die pH-Elektroden zeigen schließlich den Säuregrad im Medium an. Wenn die Zellen Nährstoffe wie etwa Zucker zur Energiegewinnung verarbeiten, entstehen Verbindungen wie Milchsäure und Kohlendioxid. Diese Stoffe machen die Nährlösung, deren pH-Wert dadurch sinkt, saurer – bei höherer Stoffwechselaktivität geht das entsprechend schneller.

Kommen die Zellen mit giftigen Substanzen in Kontakt, registrieren die drei Elektroden die Reaktion des Gewebes. Die Zelle verformt sich, die Atmung wird beeinträchtigt, und der Stoffwechsel passt sich den neuen Bedingungen an. Das Zusammenspiel dieser Veränderungen zeigt nicht nur das Vorhandensein einer giftigen Substanz an, sondern auch den Schweregrad der Vergiftung. Bei milden Vergiftungserscheinungen erholen sich die Zellen nach einiger Zeit wieder. Höhere Schadstoffkonzentrationen können zu nachhaltigen Veränderungen bis zum Tod der Zellen führen, wodurch der Chip seine reaktive Schicht und damit seine Funktionsfähigkeit verliert. Die Zellen werden in dem Fall einfach ersetzt, so dass der Sensor innerhalb von 24 Stunden wieder einsetzbar ist.

Allerdings lassen sich mit dem Zellchip keine einzelnen Gifte identifizieren oder deren Konzentration bestimmen. Dafür ermöglicht er, unspezifisch gefährliche Gasgemische zu erkennen, die für uns Menschen schädlich sein könnten.

Bei der Konstruktion des Chips war die größte Herausforderung, dass die Zellen einerseits vom Nährmedium umspült werden müssen. Andererseits ist schon eine dünne Flüssigkeitsschicht eine große Barriere für wenig wasserlösliche Gase wie Kohlenmonoxid. Der Ausweg: Das Medium wird kurzzeitig abgesaugt, so dass die Luft direkt an die Zellmembranen gelangt. Mehrere Einzelchips arbeiten zeitversetzt, um die Luft während dieses Vorgangs kontinuierlich zu überwachen.

Bevor unser Zellchip eines Tages in der Praxis einsetzbar ist, stehen viele weitere Tests bevor. So müssen wir klären, welche Zellarten sich für die verschiedenen Anforderungen am besten eignen. Bisher verwenden wir unter anderem

menschliche Lungenzellen, doch liegt es nahe, dass beispielsweise Nervenzellen auf bestimmte Stoffe ganz anders reagieren. Und wir müssen herausfinden, ob der Detektor auf eine Vielzahl von bereits bekannten Giften zuverlässig reagiert. Erst dann können wir davon ausgehen, dass er universell einsetzbar ist und insbesondere auch unbekannte oder unerwartete Schadstoffe erkennt. Dann wäre der Zellchip ein echter Universaldetektor – so wie der Kanarienvogel der Bergleute.

Ulrich Bohrn

ulrichbohrn@hotmail.com



THORSTEN NAESER (M)

> geb. 1986 in der

Wiener Neustadt

> studierte Chemie in Wien

> promovierte kooperativ an der

belgischen Universität Hasselt,

der FH Aachen und bei Siemens CT

> mit dem Thema »Multiparametric

cell-based sensor system for the detection

of toxic pollutants in air«

> Meine Stationen:


Eine Bronzemedaille bei der Chemieolympiade in Österreich motivierte mich als Schüler; ein Gammelfleischsensor im »Labor 8« des Instituts für Biochemie an der Universität Wien wurde während meiner Diplomarbeit zur Herausforderung. Das führte mich schließlich zur »Chemical Sensors Group« bei Siemens Corporate Technology in München.

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... befasse ich mich mit Juristerei und engagiere mich in Vereinen wie dem Jungchemikerforum München.

> In fünf Jahren ...

... werde ich weiterhin im Dienst der Wissenschaft stehen – aber nicht mehr im Labor, sondern als Patentanwalt bei Lanxess in Köln.

A woman with her hair in a bun, wearing a vibrant patterned jacket and matching pants, is kneeling in a conservatory. She is holding a large, round baobab fruit in her left hand and a small seed in her right hand. The background is filled with lush green plants, including palm trees and ferns, and large rocks.

Katja Heubach

Wo das Geld auf den Bäumen wächst

Katja Heubach betrachtet eine Sheanuss, in der anderen Hand hält sie eine Frucht des imposanten Baobabs. Diese und zahlreiche weitere Produkte der Savanne haben einen großen wirtschaftlichen Nutzen, insbesondere für die Ärmsten in der Bevölkerung.

In vielen Regionen Afrikas scheint für die arme Bevölkerung Ackerland zunächst wichtiger als unberührte Savanne. Doch Artenschutz kann sich lohnen! Der ökonomische Wert der Pflanzenvielfalt ist erstaunlich hoch.

Mit einer großen bunten Schüssel auf dem Kopf streift die junge Frau durch das Unterholz. Ihr Gesicht verschwindet fast völlig im Schatten des blechernen Ungetüms. Es ist späte Trockenzeit in der westafrikanischen Savanne Benins. Der Blick der hochgewachsenen Frau wandert konzentriert durch die Landschaft auf der Suche nach deren größtem Schatz: den reiche Früchte tragenden Bäumen.

Die Bewohner der Savanne sammeln nicht nur zur eigenen Versorgung Nahrung und Rohstoffe. Auf Märkten verkaufen sie die Überschüsse. Es sind vor allem die Frauen, die sich auf diese Weise ein Einkommen sichern. Doch landwirtschaftliche Nutzung und Klimawandel bedrohen die Artenvielfalt und somit diese traditionelle Lebensweise. Artenschutz spielt bei den Regierungen der Region kaum eine

Rolle, wenn es darum geht, eine wachsende und größtenteils in Armut lebende Bevölkerung zu ernähren.

Ließe sich der volkswirtschaftliche Wert der Biodiversität jedoch beziffern, lägen klare ökonomische Argumente zu ihrer Erhaltung vor. Doch bisher gab es vor allem für die semiariden Klimazonen in Westafrika allenfalls spärliche Daten, die über Vielfalt, Mengen und Nutzung der verschiedenen Pflanzenprodukte Auskunft geben.

Eine der wichtigsten Nutzpflanzen dieser Region ist zugleich ihr imposantes Wahrzeichen: der Affenbrotbaum oder Baobab (*Adansonia digitata*). Seine bis zu 35 Meter hohe Krone ragt aus einem kurzen, dicken Stamm. Seine goldgelben Früchte sind so groß wie Kokosnüsse und enthalten ein Vitamin-C-reiches Puder. Die erbsengroßen, proteinreichen Samen werden in die Suppe gerieben. Noch beliebter sind die saftig-grünen Blätter des Baobabs. Nach langem Köcheln ergeben sie eine ziemlich zähflüssige, giftgrüne Soße, die dem Beniner eine Leibspeise zu Yams- oder Maisbrei ist. Wegen ihrer Konsistenz wird sie im Volksmund als »klebrige Soße aus dem Busch« bezeichnet. Mit geübten Handgriffen schlägt unsere Savannenläuferin Früchte und Blätter vom Baum und lässt sie in der Schüssel auf ihrem Kopf verschwinden.

Nur ein paar Schritte weiter ragt ein Sheabutter-Baum (*Vitellaria paradoxa*) in die Höhe und lockt mit seinen süßen Früchten. Sie sind nicht nur Pausensnack und Flüssigkeitsspender während des Sammelns. Die Frau hat es vielmehr auf die walnussgroßen Samen abgesehen, die vor gehaltvollem Öl nur so strotzen. Eine Sheanuss enthält zwischen 20 und 50 Prozent davon. Das macht sie nicht nur zum wichtigsten regionalen Speiseöllieferanten, sondern auch zum wichtigsten Grundstoff für Hautpflegemittel – auch außerhalb Westafrikas. Das reichhaltige Sheaöl findet sich weltweit in zahlreichen Kosmetikprodukten.

Die Sheافرüchte sind über Nacht zu Boden gefallen. Mit flinken Bewegungen wandern auch sie in die mittlerweile gut gefüllte Schüssel der Beninerin. Langsam sinkt die Sonne auf die Savanne herab. Es ist Zeit, nach Hause aufzubrechen und das Abendbrot zu richten.

Würden wir unsere Sammlerin weiter bei ihren täglichen Streifzügen durch die Savanne begleiten, stießen wir auf eine Fülle weiterer Nutzpflanzen. In Nordbenin untersuchte ich diese Vielfalt während meiner Doktorarbeit, ermittelte die verschiedenen Verwendungen für die Pflanzenteile durch die Bevölkerung und versuchte, den ökonomischen Wert des Pflanzenreichtums zu beziffern.

Die Einheimischen nutzen mehr als 90 Gehölzarten aus dem »Supermarkt Savanne« für ganz unterschiedliche Zwecke. Die Blätter, Samen, Wurzeln, Früchte, das Holz und die Rinden der Bäume sind schmackhaft, finden Anwendung in der traditionellen Medizin, dienen der Energieversorgung oder werden zum Bau von Möbeln und Hütten genutzt oder von den vielen Kunsthandwerkern der Region.

Durch die Verarbeitung und den Verkauf der gesammelten Pflanzenteile schaffen sich die Frauen ein wichtiges Ein-



Geübt balancieren Sammlerinnen in Nordbenin Blechschüsseln auf ihrem Kopf (oben). Früchte, die sie nicht selbst verbrauchen, verkaufen sie auf Märkten. Sheanüsse werden etwa zu Butterkugeln verarbeitet (links). So sichern sich insbesondere Frauen ein wichtiges eigenes Einkommen.

kommen, ohne das sie wesentlich abhängiger von den Einkünften ihrer Männer wären.

Es ist somit offensichtlich, dass die Haushalte von den vielen Wildpflanzenarten profitieren. Meine Kollegen und ich wollten jedoch den ökonomischen Wert von Shea, Baobab und Co. genau beziffern. Durch detaillierte Befragungen ermittelten wir für insgesamt 230 Haushalte, welche Pflanzen im Lauf eines Jahres gesammelt wurden und in welchen Mengen sie die Einwohner verbrauchten und verkauften.

Bei vielen Produkten legten wir die Verkaufspreise auf regionalen Märkten zu Grunde. Bei anderen Waren, die nicht gehandelt werden, ermittelten wir ebenfalls realistische Werte. Dazu verglichen wir die Produkte mit anderen Erzeugnissen, die eine ähnliche Funktion erfüllten, oder wir ließen die Einheimischen selbst den Preis eines Produkts schätzen, indem sie es mit anderen Gütern verglichen und so eine Rangliste erstellten.

Wir berechneten den jährlichen Beitrag einer Sammlerin zur Versorgung und zum Einkommen einer Familie und kamen zu einem erstaunlichen Ergebnis: Rund 39 Prozent des Jahreseinkommens einer Familie stammen aus Wildpflanzen! Bei etwa 700 Euro, die einem Beniner im Jahr zur Verfügung stehen, sind das gut 270 Euro. Die Wildpflanzenprodukte sind somit die zweitwichtigste Einkommensquelle nach den Erlösen aus der Landwirtschaft. Da sich im ländlichen Raum kaum Einkommensalternativen bieten, werden die Wildpflanzen insbesondere von den ärmsten Bevölkerungsschichten gesammelt. Sie sind folglich von der pflanzlichen Vielfalt der Savanne besonders abhängig.

Und die ist zunehmend gefährdet: Immer mehr Baumarten verschwinden aus der Landschaft. Dies ist einerseits Folge des globalen Klimawandels, denn seit den 1970er Jahren kommt es in der Region immer häufiger zu Dürren. Andererseits verändert sich die Landnutzung in Westafrika. Um die wachsende Bevölkerung zu ernähren, müssen landwirtschaftliche Flächen gewonnen werden – und die entstehen durch die Umwandlung von Savannengebieten. Auch verkürzen die Bauern die Brachezeiten der bestehenden Äcker – mit negativen Folgen für die Fruchtbarkeit der Böden und die Ernteerträge.

Hinzu kommt, dass die beninische Regierung – wie die anderer westafrikanischer Länder auch – seit einigen Jahren den Anbau von Baumwolle forciert. Sie verspricht hohe Renditen auf dem Weltmarkt. Die großflächige Anpflanzung dieser so genannten Cash Crops geht zu Lasten der Nahrungsmittelproduktion und verschlimmert die Situation zusätzlich. So fallen immer mehr Gehölze entweder den Macheten, dem Feuer oder den neu eingeführten Landmaschinen zum Opfer. Versorgungsengpässe, insbesondere bei den ganz Armen, sind die Folge.

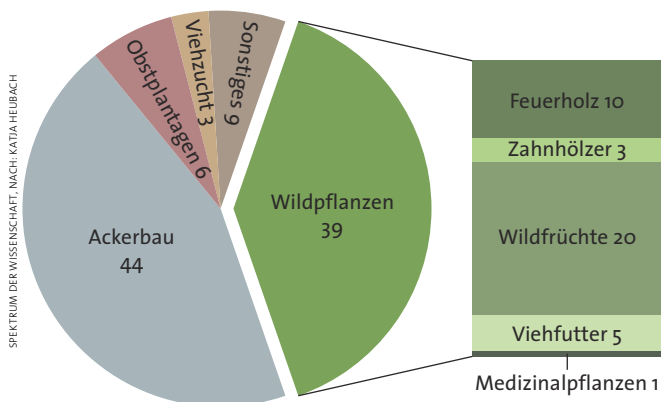
Wir hoffen, dass wir mit unseren Untersuchungen dazu beitragen, dass jene Regierungen bei ihren Entscheidungen die Bedeutung der ökologischen Vielfalt erkennen, und zwar auch als wirtschaftlichen Faktor! Doch bis das so weit ist, liegt der Schutz der Savanne vor allem in den Händen lokaler Nichtregierungsorganisationen. Ein Beispiel: Gemeinsam mit dem Netzwerk REDERC (Réseau de Développement de Réserves naturelles Communautaires) legen wir derzeit einen Nutzwald an und wählen die Arten auf Grundlage

unserer wissenschaftlichen Untersuchungen in der Gemeinde. Vor zehn Jahren gründete ein Einheimischer diese Organisation in dem kleinen Dorf Papatia. Sie zählt mittlerweile mehr als 300 Mitglieder in vier Gemeinden. In ihrer Obhut liegen zehn mehrere Hektar umfassende Schutz-zonen und zehn Schulgärten. Der erste Garten wurde 2001 auf Initiative der traditionellen Heiler im Ort eingerichtet, die den massiven Rückgang zahlreicher wichtiger Medizinalpflanzen feststellten. Heute sichert der Garten deren Vorkommen und ermöglicht den Heilern, ihr Wissen anzuwenden und weiterzugeben. Die Herstellung von Honig sichert insbesondere den ärmsten Gemeindemitgliedern ein Einkommen. Mittlerweile gibt es mehr als 60 Wildbienenstöcke, die jeweils bis zu 25 Liter Honig in einer Saison erzeugen.

Initiativen wie diese zeigen, dass die Bewohner der Savanne auf vielfältige Weise von Wildpflanzen profitieren. Wir konnten solchen Prozessen einen klaren ökonomischen Nutzen zuschreiben. Das hilft nicht nur bei der Gestaltung regionaler Projekte wie in Papatia. Der nächste Schritt wird sein, diese Zusammenhänge zur Grundlage überregionaler Landnutzungspläne zu machen.

Unsere Arbeit zeigt aber auch die Kehrseite einer anderen Strategie – und zwar die, die Artenvielfalt durch die Einrichtung von Schutz-zonen zu bewahren: Wird den Einheimischen nämlich die Nutzung der Pflanzen verwehrt, kann sich ihre wirtschaftliche Lage verschlechtern. Hingegen könnte eine Aufforstung mit den ökonomisch wichtigsten wilden Arten den Ertrag der Sammler steigern und Einkommensalternativen schaffen. Viele bereits degradierte und nicht mehr für den Anbau von Feldfrüchten geeignete Flächen könnten so einer neuen Nutzung zugeführt werden – das hilft der Bevölkerung und der Natur gleichermaßen.

Anteil am Einkommen in Prozent



Ein durchschnittlicher Haushalt in Nordbenin erwirtschaftet etwa 39 Prozent seines Einkommens aus dem Verkauf von Wildpflanzen. Müsste die arme Bevölkerung auf diese wichtige Einkommensquelle verzichten, verschlechterte sich ihre wirtschaftliche Situation dramatisch.

Und unsere Savannenläuferin? Ihr ist zu wünschen, dass sie auch weiterhin die reichen Schätze ihrer heimischen Natur in Fülle ernten kann, um sich und ihre Familie zu versorgen. Und die Forschung kann dabei helfen, indem sie zeigt: Biodiversität ist Mehrwert!

Katja Heubach

katja.heubach@senckenberg.de



RUDI FEUSER (M)

> geb. 1981 in Apolda

> studierte Biologie in Frankfurt a. M.

> promovierte am Biodiversität und Klima Forschungszentrum (BiK-F) in Frankfurt a. M.

> mit dem Thema »The socio-economic importance of NTFPs for rural livelihoods in West African savanna ecosystems: current status and trends«

> Meine Stationen:

1. Die täglichen Streifzüge nach Kienäpfeln, Heidelbeeren, Pilzen und Co., die ich als Kind mit meiner Großmutter im schönen Wald meiner Heimat Thüringen gemacht habe.
2. Mein erstes Umweltcamp mit der Naturfreundejugend Bayern im Alter von 15 Jahren.
3. Mein Praktikum bei der Schutzstation Wattenmeer auf Eiderstedt.
4. Meine erste Forschungsreise nach Ouagadougou.

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... kümmere ich mich gemeinsam mit meinen BUND-Kolleginnen und -Kollegen als »Urban Gardener« um die Frankfurter Stadtnatur – für mehr Biodiversität und Lebensqualität in der Großstadt.

> In fünf Jahren ...

... werden wir in Nordbenin einen Nutzgarten und in Frankfurt einen Stadtgarten ähnlich den Prinzessinnengärten in Berlin auf die Beine gestellt haben.

Wasser – ein anziehendes Element

Wenn es regnet, wird der Boden nass – das weiß jedes Kind. Doch wo bleibt das Wasser?

Wie viel versickert? Und wohin? Um Antworten auf diese Fragen zu finden, müssen Forscher zahlreiche Bodensensoren installieren und teure Grundwassermessstellen bohren. Moderne Schwerkraftmesser versprechen Abhilfe.

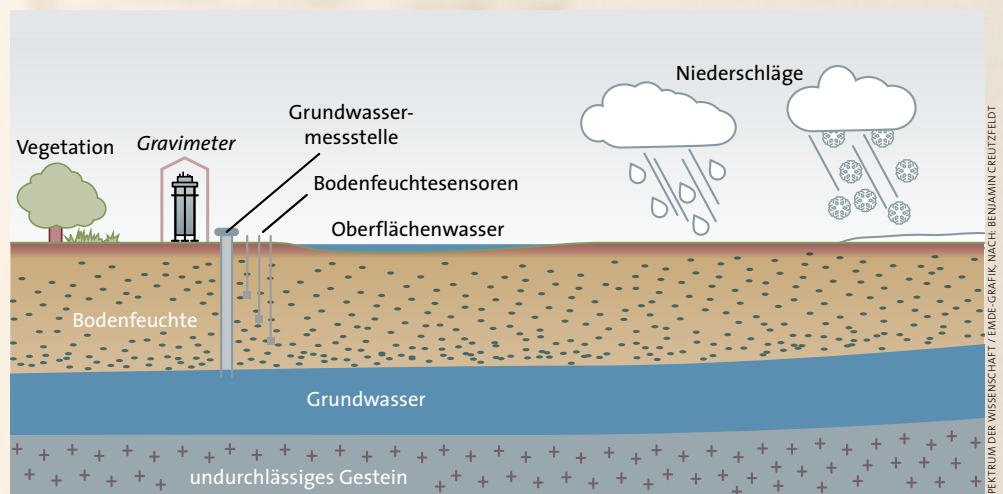
Unter unseren Füßen lagert eine lebenswichtige Resource: Grundwasser. Etwa die Hälfte unseres Bedarfs decken wir daraus, in einigen ländlichen Regionen sogar bis zu 90 Prozent. Die unterirdischen Speicher erscheinen unerschöpflich, und tatsächlich erneuern sie sich ständig. Doch tun sie es schnell genug, um den wachsenden Verbrauch zu decken?

Das Wasser ist ständig in Bewegung – in, auf und über der Erde. All das ist qualitativ gut erforscht. Quantitative Aussagen sind indes äußerst schwierig, insbesondere für die Reservoirs im Untergrund, die für uns so wichtig sind. Zum einen ist das Bohren von Brunnen teuer. Zum anderen

kann man aus den Grundwasserpegeln nicht ohne Weiteres auf die gespeicherte Menge schließen.

Bei der Suche nach neuen Methoden für die Überwachung von Grundwasserressourcen half meinen Kollegen vom Deutschen GeoForschungsZentrum Potsdam und mir eine Anfrage aus dem Bayerischen Wald. Dort, am Geodätischen Observatorium Wettzell, überwachen Forscher des Bundesamts für Kartografie und Geodäsie seit Jahren mit einem hochpräzisen Gravimeter die Anziehungskraft der Erde. Einen Teil ihrer Daten konnten sie sich nicht erklären. Sie gingen bereits von einem Zusammenhang mit schwankenden Grundwasserspiegeln aus, doch die Korrekturen,

Das Wasser in der Natur ist ständig in Bewegung – etwa im feuchten Boden oder als Grundwasser. Die jeweiligen Mengenänderungen lassen sich mit verschiedenen Sensoren sowie Grundwassermessstellen erfassen. Forscher können sie aber auch mit Hilfe eines Gravimeters, das auf entsprechende Massenänderungen reagiert, abschätzen.



Benjamin Creutzfeldt

Vor über 100 Jahren nutzten Wissenschaftler in Potsdam das Pendel im Hintergrund, um die Erdanziehung zu messen. Der ermittelte Wert war bis zum Jahr 1971 internationale Referenz. Forscher wie Benjamin Creutzfeldt messen heute mit modernen Geräten 1000-fach genauer.



die sie vornahmen, stellten die Wissenschaftler noch nicht zufrieden. So war das Thema meiner Doktorarbeit geboren.

Das Schwerkraftfeld der Erde entsteht zum einen durch die Anziehung ihrer Massen – ein Effekt, den Isaac Newton bereits 1687 beschrieben hat. Das sind vor allem die tausende Kilometer Gestein unter uns. Zum anderen erzeugt die Rotation unseres Planeten eine Fliehkraft. Im Vergleich dazu wirkt sich Wasser wenig auf die Erdanziehung aus. Doch gerade für die relativ kleinen Beiträge durch die Massen auf und dicht unter der Erdoberfläche interessieren sich die Geodäten besonders.

Wäre unser Planet eine homogene Kugel, dann wöge derselbe Körper allerorts gleich viel. Doch wegen seiner Drehbewegung und der dadurch entstehenden Fliehkraft ist die Erde abgeplattet und hat am Äquator einen etwa 40 Kilometer größeren Durchmesser als an den Polen. Als Modell sowohl für die Gestalt der Oberfläche als auch die des Schwerfelds wird deshalb ein Rotationsellipsoid verwendet. Wie jedes Modell beschreibt dieses die Natur nur näherungsweise. So wälzen etwa im oberen Erdmantel gewaltige Konvektionsströme die Gesteinsmassen um. Aber selbst Gebirge und Täler beeinflussen die Schwerkraft regional.

Als wären diese Einflüsse nicht kompliziert genug, ändert sich die Erdschwerkraft darüber hinaus an ein und demselben Ort im Lauf der Zeit. Jeder kennt das Auf und Ab der Meere bei Flut und Ebbe. Nur wenigen ist jedoch bewusst, dass die Kräfte von Sonne und Mond auch die gesamte Erde deformieren. Berlin zum Beispiel hebt und senkt sich täglich um bis zu 40 Zentimeter! Solche Prozesse müssen beispielsweise bei der GPS-Navigation und in der Raumfahrt berücksichtigt werden.

Um das Schwerkraftfeld unseres Planeten modellieren zu können, messen Geodäten und Geophysiker die Erdanziehung an möglichst vielen Punkten direkt – auf der Erde selbst, vom Flugzeug aus oder aus dem All mit Hilfe von Satelliten. Auf der Erde bestimmen sie mit Gravimetern die Kräfte, die auf eine Testmasse wirken. Die ersten Untersuchungen wurden bereits zu Newtons Zeiten mit einfachen Pendeln gemacht, später kamen Messungen mit Federwaagen und Versuche mit dem freien Fall hinzu. Mit



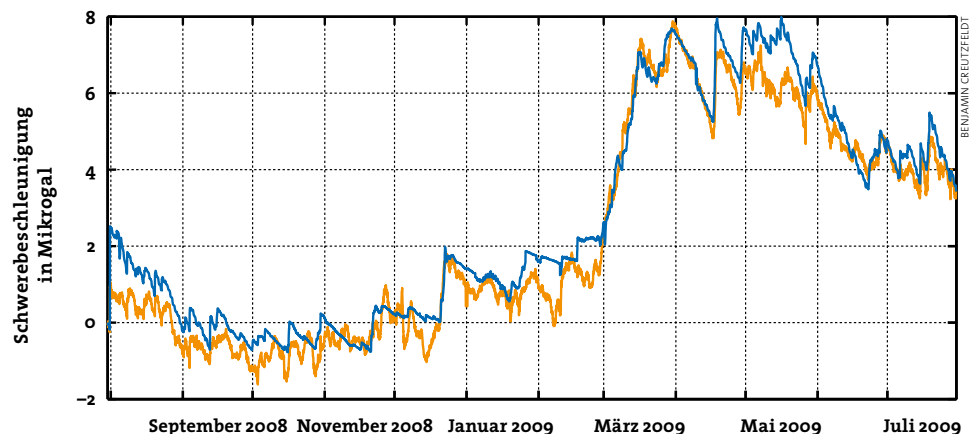
Die Forscher stanzen einen tonnenschweren Block aus dem Erdreich, um darin die Bewegungen des Sickerwassers zu studieren.

den genauesten Gravimetern ist man heute in der Lage, Unterschiede bei der Gravitationsbeschleunigung im Bereich von milliardstel Prozent zu bestimmen.

So genaue Daten stehen mit supraleitenden Gravimetern zur Verfügung. Ein solches ist am Observatorium Wettzell installiert. Im Inneren des mit flüssigem Helium gekühlten Geräts schwebt eine kleine Kugel im Magnetfeld einer Spule. Beide bestehen aus Niob, einem Material, dessen elektrischer Widerstand bei Temperaturen knapp über dem absoluten Nullpunkt auf Grund quantenmechanischer Effekte verschwindet, so dass ihr starkes und hochstabiles Feld über lange Zeit aufrechterhalten werden kann. Kleinste Änderungen der Schwerkraft bewegen die Masse aus ihrer Ruhelage. Eine stabilisierende Spule wird mit einer Regelschleife so gesteuert, dass sie dieser Bewegung entgegenwirkt. Die kleinsten Stromänderungen werden dann gemessen.

Fast all diese Schwankungen konnten die Forscher in Wettzell bekannten Ursachen zuordnen. Rätselhaft blieb ein

Die blaue Linie zeigt die simulierten Schwerkraftänderungen im Lauf eines Jahres, berechnet anhand der Messdaten aus aufwändig überwachten ober- und unterirdischen Wasserspeichern. Die orangefarbene Kurve stellt das real gemessene Gravimetersignal dar, bereinigt um bekannte Effekte, etwa die Gezeiten.



Signal, das mit den Jahreszeiten periodisch fluktuierte. Es war nun an uns herauszufinden, ob sich dahinter womöglich veränderliche Wassermengen im Untergrund verbergen und wie sie sich auf die hochgenaue Schweremessung auswirken.

Am einfachsten wäre es gewesen, wenn wir die Daten des Gravimeters mit den wirklichen Wasserbewegungen hätten vergleichen können. Doch wurden diese dort noch nie direkt gemessen. Da das Bohren von Messstellen aufwändig und teuer ist, spielten wir daher verschiedene Szenarien mit Hilfe von Computersimulationen durch. Auf diese Weise wollten wir etwa klären, welche Reaktion auf einen halben Meter Neuschnee zu erwarten wäre. Oder was das Gerät in einem heißen Sommer messen würde, wenn die Bodenfeuchte abnimmt und der Grundwasserspiegel sinkt. Das Ergebnis: Tatsächlich waren die von uns im Modell vorhergesagten Veränderungen der Schwerkraft von ähnlicher Größenordnung wie die bisher unerklärlichen Anteile in den Wettzeller Gravimeterkurven.

Nun war klar, dass wir echte Messdaten benötigten und auf dem Gebiet der Forschungsstation ein dichtes Netz mit Messstellen anlegen mussten. Und so trieben wir bis zu 30 Meter tiefe Bohrungen in den Grundwasserleiter, in denen wir die Pegeländerungen messen konnten, vergruben Hunderte von Bodenfeuchtesensoren und maßen die Regen- und Schneemengen. Wir stanzen sogar einen mehr als drei Tonnen schweren Erdblock aus dem Boden, um ihn wiegen und das Sickerwasser absaugen zu können. Auf diese Weise erfassten wir die Gewichtsschwankungen des Erdreichs infolge von Regenaufnahme, Verdunstung und Grundwasserneubildung.

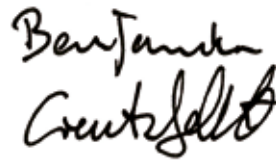
Eineinhalb Jahre lang sammelten wir Daten. Wir rechneten die Wassermengenänderungen in ein Signal um, wie es das Gravimeter registrieren würde. Dann verglichen wir unsere Messkurven mit denen der Wettzeller Schwerkraftforscher. Die Signale passten zusammen! Mehr noch: Das funktioniert nun auch umgekehrt – wir können mit dem Gravimeter also direkt messen, wie viel Wasser in der Umgebung des Observatoriums hinzukommt oder verloren geht.

Das könnte auch ein weiteres Problem in der Hydrologie lösen. Es ist nämlich schwierig, die Wasserspeicherung in der Landschaft zu messen, da sie von einem Ort zum anderen auch bei kleinen Entfernungen sehr verschieden sein kann. Mit Gravimetern kann hingegen ein großes Volumen über Unterschiede in der Landschaft hinweg und bis in hunderte Meter Tiefe untersucht werden.

Allerdings sind dafür extrem genaue Gravimeter erforderlich. Wir arbeiten mittlerweile mit dem Hersteller der Supraleitgravimeter zusammen, der transportable Geräte entwickelt, deren Präzision für solche Messungen ausreicht. In Tucson, Arizona, überwachen wir mit diesen Gravimetern die Entwicklung eines gigantischen Kanalprojekts, bei dem umgeleitetes Wasser aus dem hunderte Kilometer ent-

fernten Colorado River für eine künstliche Grundwasserneubildung in der wachsenden Wüstenstadt sorgen soll.

So können Hydrologen in Zukunft leichter überwachen, wie die Wasservorräte im Untergrund auf menschliche Nutzung und Klimaveränderungen reagieren, dieses Wissen in Computermodelle einfließen lassen und so die zukünftige Entwicklung gerade für Regionen vorhersagen, wo diese wichtige Ressource nicht so reichhaltig zur Verfügung steht wie in unseren Breiten.



b.creutzfeldt@gfz-potsdam.de



KAROLINE WOLF [IM]

> geb. 1978 in Überlingen

> studierte Geoökologie in Potsdam

> promovierte an der Universität Potsdam

> mit dem Thema »Der Effekt von Wasserspeicherung auf zeitliche Schwerkraftmessungen und der Nutzen für die Hydrologie«

> Meine Stationen:

1. Meine Faszination für das Wasser begann in früher Kindheit am Bodensee, den ich in unserer Jolle, auf Schlittschuhen, mit der Sauerstoffflasche und beim Langstreckenschwimmen erforschte.
2. In der Großstadt lernte ich, dass Chaos auch System haben kann – unabdingbare Voraussetzung für das Verständnis komplexer Zusammenhänge.
3. Wettzell im Bayerischen Wald, wo ich meine Feldversuche durchführte, war ein Ruhepol und eine willkommene Abwechslung zum Wissenschaftsbetrieb und Großstadtleben.

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... bin ich Vollblutpapa meiner zwei Kinder, spiele Volleyball und erkunde ferne Länder.

> In fünf Jahren ...

... werden die meisten Veränderungen hoffentlich weiter so unverhofft kommen wie bisher in meinem Leben.

Susan Schamfuß

»Alles einsteigen, bitte!« – Das U-Bahn- Netz der Pilze

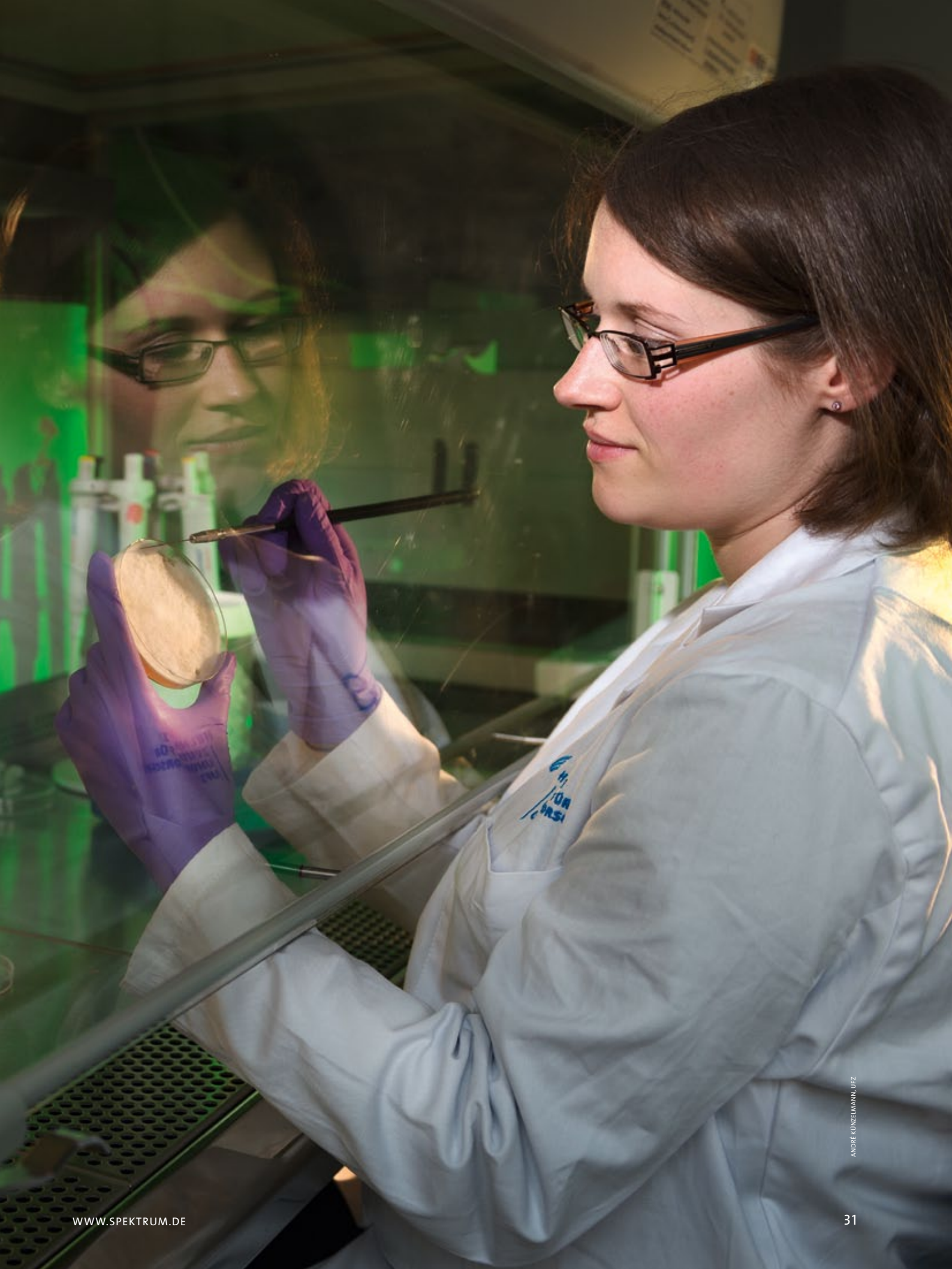
Viele Böden sind mit organischen Schadstoffen belastet, die nur langsam abgebaut werden. Dabei könnte das viel schneller gehen – mit Hilfe weit verzweigter Zellgeflechte. Sie bringen die giftigen Moleküle dorthin, wo Bakterien sie zersetzen können.

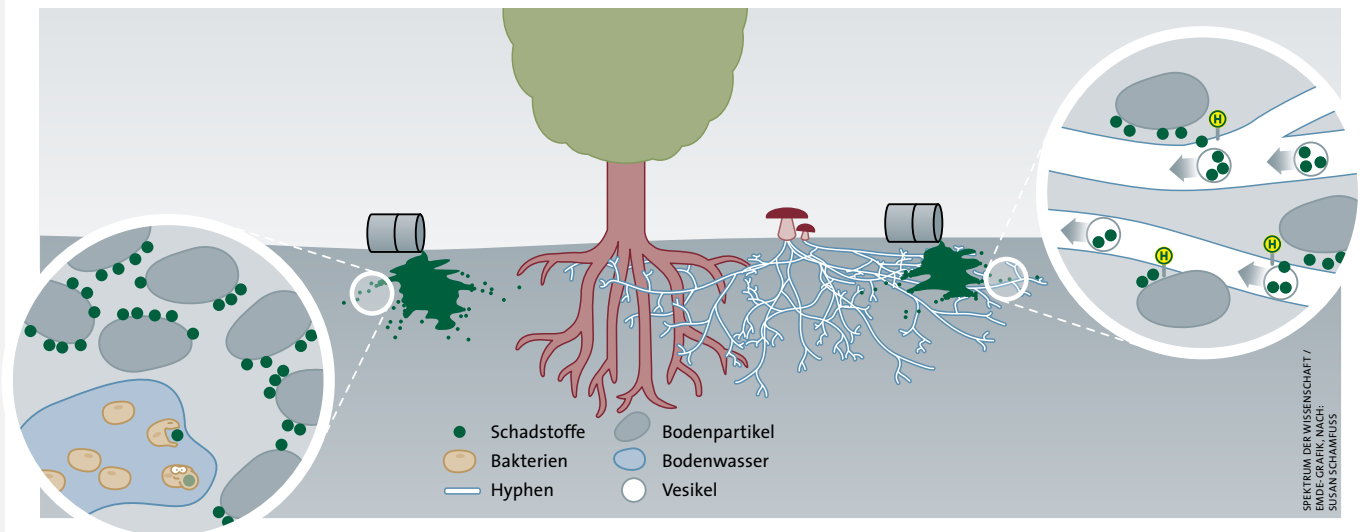
Nüchtern betrachtet handelt es sich lediglich um eine Mischung aus mineralischer Materie, organischen Stoffen, Wasser und Luft. Der Boden ist jedoch viel mehr: Lebensraum für unzählige Pflanzen und Tiere und nicht zuletzt Existenzgrundlage für uns Menschen.

Trotz seiner enormen Bedeutung sind viele Prozesse, die im Erdreich ablaufen, noch immer rätselhaft. Das komplexe Ökosystem Untergrund ist zudem sehr empfindlich. Ungeachtet dessen schädigt der Mensch es mit gefährlichen Substanzen. Dünger und Mittel zur Schädlingsbekämpfung beeinträchtigen die Bodenqualität ebenso wie Schadstoffe, die mit Abgasen aus der Luft eingetragen werden. Der »Spiegel« benannte das Problem bereits in den 1980er Jahren: »Eine übersehene Katastrophe«.

Die Wahrnehmung des Ökosystems Boden befindet sich jedoch mehr und mehr im Wandel. Die Verantwortlichen in Politik und Wirtschaft erkennen heute, wie wichtig es ist, unsere Kenntnisse über Bodenprozesse zu erweitern und wirksame Verfahren für die Sanierung von belastetem Erdreich zu entwickeln.

An der Sterilbank hält Susan Schamfuß eine Kultur von *Pythium ultimum* in den Händen. Dieser Pseudopilz dient in vielen Versuchen als Modellorganismus. Nach einigen Tagen auf einem Nährboden sieht er fast wattenähnlich aus. Mit einer Impfnadel entnimmt die Biochemikerin einige Zellfäden, um damit eine frische Kultur anzuzüchten.





Hydrophobe Schadstoffe lagern sich vor allem an Bodenpartikel an und lösen sich kaum in wassergefüllten Porenräumen, wo Bakterien sie abbauen könnten (links). Fetthaltige Vesikel in Pilzhypen (rechts) nehmen die Moleküle auf und befördern sie durch luftgefüllte Bereiche hindurch bis zu den Mikroben.

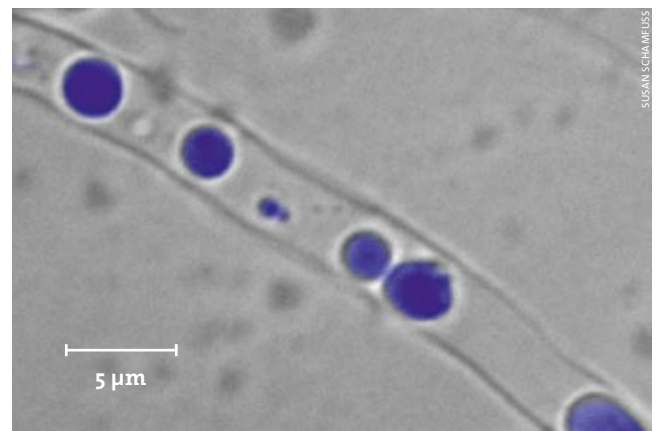
Besonders die Beseitigung hydrophober, also schwer wasserlöslicher organischer Schadstoffe steht dabei im Fokus – diese Stoffe entstehen bei Verbrennungsprozessen, etwa im Automotor. Auch in Erdölprodukten sind sie enthalten und kommen fast überall vor, besonders im Bereich von viel befahrenen Straßen, Tankstellen und Industriegebieten. Sie sind überaus langlebig und reichern sich deshalb im Untergrund an. Viele Böden leiden noch heute unter den Umweltsünden, die vor vielen Jahrzehnten begangen wurden.

Bemerkenswerterweise wohnt dem Erdreich selbst das größte Potenzial zur Beseitigung solcher organischen Schadstoffe inne. Sie sind Nahrung für Myriaden von dort lebenden Bakterien. Ihre Gesamtmasse innerhalb der oberen 30 Zentimeter eines ein Hektar großen Ackers beträgt etwa eine Tonne! Das klingt zunächst viel versprechend, doch gibt es im Hinblick auf die selbstreinigenden Kräfte ein entscheidendes Problem: die Heterogenität des Bodens. Er besteht aus unzähligen größeren und kleineren Partikeln mit wasser- und auch luftgefüllten Poren dazwischen.

Die schadstoffabbauenden Bakterien halten sich in den wassergefüllten Hohlräumen auf, da sie Wasser zum Leben und zur Fortbewegung benötigen. Die hydrophoben Moleküle hingegen kommen kaum im Wasser gelöst vor und lagern sich vorzugsweise an die Bodenpartikel an (siehe Grafik oben). Kurzum: Die Bakterien erreichen die Schadstoffe – ihre Nahrung – nicht, weil die Luftbarriere für sie unüberwindlich ist. Dieses Problem beschäftigt heute viele Bodenwissenschaftler. Pilze könnten sich dabei als nützliche Helfershelfer entpuppen.

Was viele nicht wissen: Pilze machen etwa ein Drittel der gesamten Biomasse im Boden aus. Dabei sind ihre auffälligen Fruchtkörper nur die sprichwörtliche Spitze des Eisbergs, denn der weitaus größere Teil versteckt sich unter der Erde. Dort bilden Pilze ein riesiges, wurzelähnliches Geflecht aus feinen, fadenförmigen Zellen, das Myzel. Dieses besteht aus so genannten Hyphen, die etwa 100-mal dünner sind als Wurzeln und zehnmal dünner als ein menschliches Haar. Das Zellgeflecht eines Pilzorganismus kann sich über viele Quadratkilometer erstrecken. Jeden Kubikzentimeter Boden durchziehen hunderte Meter der feinen Pilzhypen. Im Malheur National Forest in Oregon gedeiht seit rund 2400 Jahren ein Hallimasch, der sich mittlerweile über fast zehn Quadratkilometer ausgebreitet hat. Er gilt als das größte Lebewesen der Erde.

Der pilzähnliche Organismus *Pythium ultimum* ist im Boden weit verbreitet. Die Mikroskopaufnahme zeigt, dass sich in Vesikeln im Inneren der Zellen ein blau leuchtender organischer Schadstoff löst. Durch das weitläufige Hyphennetzwerk wird er im Untergrund verteilt und steht Bakterien als Nahrung zur Verfügung.



Im Gegensatz zu Bakterien sind Pilze nicht auf durchgängige wassergefüllte Bereiche angewiesen, um sich auszubreiten und nach Nahrung zu suchen. Sie durchwachsen auch luftgefüllte Bodenräume und dringen in Bereiche vor, die Bakterien verwehrt bleiben.

Die über das Myzel aufgenommenen Nährstoffe müssen innerhalb des riesigen Zellnetzwerks verteilt werden, um den gesamten Organismus zu versorgen. Dafür haben Pilze ein ausgeklügeltes System entwickelt. Innerhalb der Hyphen erhalten sie eine Strömung aufrecht, mit der Nährstoffe, Signalmoleküle und verschiedene Zellbestandteile hin- und herbefördert werden.

Meine Kollegen und ich konnten zeigen, dass die Pilznetzwerke nicht nur Nährstoffe, sondern auch andere organische Stoffe transportieren. So wiesen wir nach, dass sich die eingangs erwähnten hydrophoben Schadstoffe in fetthaltigen Bläschen, so genannten Vesikeln, im Inneren des Pilzes ansammeln und zusammen mit der Zellflüssigkeit durch die Hyphen strömen.

Diese Vesikel könnte man mit Mini-U-Bahnen vergleichen, die sich innerhalb ihrer Tunnel, den Hyphen, bewegen und Schadstoffe als Fahrgäste transportieren. Die Vesikel kommen dabei auf Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Stunde. Das erscheint nicht besonders schnell, doch entspricht diese Distanz dem 10000-Fachen einer Vesikellänge – übertragen auf die Größe einer echten U-Bahn entspräche das einer Geschwindigkeit von einigen hundert Kilometern pro Stunde!

Die Haltestellen liegen natürlich nicht an festgelegten Orten, sondern entstehen spontan immer dort, wo Schadstoffe die Zellwände durchdringen und in jenen fettreichen Vesikeln gebunden werden. Diese Bläschen wandern durch das Netzwerk. Die organischen Moleküle gelangen dann vor allem an solchen Stellen wieder nach außen, wo die Schadstoffkonzentration gering ist. Dort verwerten Bakterien in der Umgebung sie als Nahrung und bauen sie auf diese Weise ab.

Wir zeigten zudem, dass die Menge an beförderten Schadstoffen direkt mit der Anzahl möglicher Haltestellen zusammenhängt. Das bedeutet, dass der Pilz dieselbe Menge an Schadstoffen langsamer transportiert, wenn ein Zustieg nur in einem kleinen Bereich erfolgen kann. Dies lässt sich mit dem U-Bahn-System vergleichen: Wenn alle Fahrgäste versuchen, an einer Haltestelle einzusteigen, kommt es schnell zum Stau. Verteilen sie sich auf viele Haltestellen, können problemlos alle mitfahren.

Diese bisher unbekanntes Prozesse wiesen wir zunächst im Labor nach, wo wir das Zusammenwirken eines pilzähnlichen Organismus mit einem Bakterium beobachteten. Nun wollen wir die Mechanismen auch im natürlichen Boden testen. Hier leben viele verschiedene Pilz- und Bakterienarten nebeneinander. Nicht alle kommen so gut miteinander aus wie unsere Testkulturen; daher wird es vor allem darauf ankommen, für die gezielte Beseitigung von

wasserunlöslichen Verunreinigungen die richtigen Partner zu finden.

Am Ende können wir vielleicht Methoden entwickeln, mit denen sich Böden sanieren lassen, ohne dass das Erdreich abgetragen oder mechanisch bearbeitet werden muss. Es würde genügen, je nach Art der Schadstoffe einen maßgeschneiderten Cocktail aus Pilzen und Bakterien in den Boden einzubringen. Besonders optimistisch sind wir diesbezüglich in Gebieten mit vergleichsweise niedriger Kontamination: Die winzigen Organismen könnten unsichtbar die Böden aufbereiten – noch bevor sich die Schadstoffe in bedenklichem Maß anreichern.

Susan Schamfuß

susan.foss@ufz.de



ANDRE KUNZE/MANN/UFZ IMI

> geb. 1985 in Zwenkau

> studierte Biochemie
in Leipzig

> promoviert am Helmholtz-Zentrum
für Umweltforschung (UFZ) in Leipzig

> mit dem Thema »Der Einfluss von Pilz-
netzwerken auf die Bioverfügbarkeit
und den Abbau erdölbasierter Schadstoffe
in Böden«

> Meine Stationen:

Ein Chemieleistungskurs begeisterte mich für Naturwissenschaften. Im Studium merkte ich aber, dass ich nicht zur »Forscherin um der Forschung willen« geboren war. Praktika und Vorlesungen brachten mich dem UFZ nahe. Dessen Motto »Forschen für die Umwelt« ist genau das, was mich in meiner Arbeit antreibt.

> Wenn ich nicht gerade forsche ...

... verbringe ich meine Zeit mit Geigespielen, Chorsingen, Yoga und Freunden. Und bald auch mit dem Wechseln von Windeln.

> In fünf Jahren ...

... lebe ich hoffentlich mit zwei Kindern und meinem Mann in einer etwas größeren Wohnung.



STELL DIR VOR: 63% ALLER MÄNNER
MACHEN GERNE HAUSARBEIT!

Der »Küchenzuruf« ...

... ist ein Muss für jeden Text. Der Begriff wurde geprägt vom ehemaligen Chefredakteur des »Stern« Henri Nannen. In seiner Beschreibung aus den 1970er Jahren ist es allerdings Hans, der es sich nach dem Einkaufen mit der neuen Ausgabe des Magazins im Esszimmer gemütlich macht, während »Grete sich in die Küche verfugt«. Nach der Lektüre eines Artikels ruft Hans seiner Frau voller Empörung durch die geöffnete Küchentür zu: »Mensch, Grete, die in Bonn spinnen komplett! Die wollen schon wieder die Steuern erhöhen!« Diese beiden knappen Sätze sind der so genannte Küchenzuruf des journalistischen Textes.«

Spektrum CUSTOM
DER WISSENSCHAFT PUBLISHING

Leitung: Dr. Joachim Schüring
Anschrift: Spektrum der Wissenschaft –
Custom Publishing, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;
Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,
Tel. 06221 9126-612, Fax 06221 9126-5612;

www.spektrum.com/cp

Redaktion: Mike Beckers, Lars Fischer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Claus Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistent: Inga Merk
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Erscheinungstermin: Spektrum der Wissenschaft 12/2012


HELMHOLTZ
ZENTRUM FÜR
UMWELTFORSCHUNG
UFZ

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit: Doris Böhme,
Susanne Hufe, Bettina Hennebach
Anschrift: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ,
Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

www.ufz.de/wissenschaft-verstehen

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: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.



Wir forschen für eine Balance zwischen ökonomischer und gesellschaftlicher Entwicklung und langfristigem Schutz unserer Lebensgrundlagen.

Forschen für die Umwelt

www.ufz.de

Als internationales Kompetenzzentrum für Umweltwissenschaften untersucht das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ die komplexen Wechselwirkungen zwischen Mensch und Natur unter dem Einfluss des globalen Wandels. In enger Kooperation mit Entscheidungsträgern und Stakeholdern der Gesellschaft erarbeiten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des UFZ Systemlösungen, um komplexe Umweltsysteme besser zu managen und Umweltprobleme zu überwinden. So geht es etwa um das Management von Wasserressourcen, die Folgen des Landnutzungswandels für die biologische Vielfalt, die Wirkung von Chemikalien auf die Umwelt und die Gesundheit des Menschen sowie Anpassungsstrategien an den Klimawandel.

Unsere Kernthemen

1. Landnutzung / Biodiversität / Bioenergie
2. Wasser / Boden
3. Chemikalien in der Umwelt / Gesundheit

Unsere Querschnittsthemen

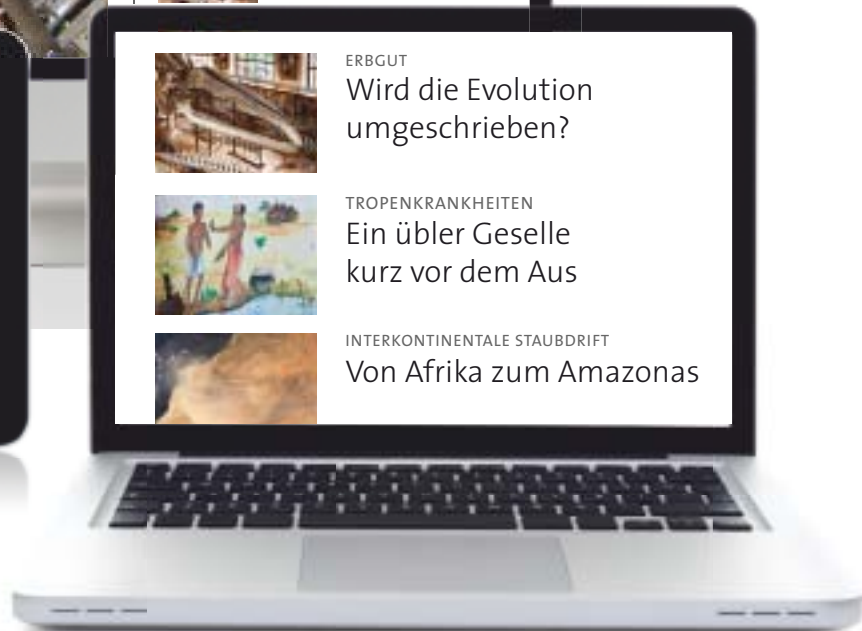
1. Sozialwissenschaften
2. Monitoring / Observatorien
3. Modellierung / Visualisierung

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin



Jetzt jeden Donnerstag

- mit mehr als 30 Seiten Hintergründen, News, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar



Infos und Bestellmöglichkeit:

www.spektrum.de/testwoche