

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

RÄTSEL  
GEKNACKT  
Immun  
gegen HIV



MAI 2013

KLIMAFORSCHUNG  
Was der Golfstrom  
wirklich leistet

SCHWARZE LÖCHER  
Auf der Jagd nach  
Zwergen und Riesen

ELEKTROCHROMIE  
Farbenspiele  
mit Strom

## Wohin geht der Mensch?

Einblicke in unsere  
evolutionäre  
Zukunft



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



DAMIT AUS NEUGIER WISSEN WIRD!



JETZT IM  
**ABO**  
BESTELLEN

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert. Jetzt abonnieren und sparen: 4 Ausgaben pro Jahr für je € 5,50 inkl. Inlandsversand (statt € 6,50 im Einzelkauf)!

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



Tel.: 06221 9126-743  
Fax: 06221 9126-751  
E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH  
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Hartwig Hanser  
Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.com

## Dem Wesen des Menschen auf der Spur

Die besten Sciencefiction-Romane und -Filme haben keine außerirdischen Welten oder interstellaren Schlachten als Kernthema, sondern ein uns viel näher liegendes Objekt: den Menschen und was ihn ausmacht. Klassiker wie »Solaris« oder »2001: Odyssee im Welt- raum« konfrontieren dazu Personen mit außergewöhnlichen Umständen und spüren den damit verbundenen Konsequenzen nach.

Häufig geht es auch um Spekulationen, in welche Richtung sich der Mensch zukünftig verändern könnte, sei es auf natürliche Weise oder durch technische Aufrüstung. Hier wird Hoffnungen sowie Ängsten Ausdruck verliehen, die gleichzeitig auf unser heutiges Verhalten zurückwirken. Wenn wir etwa befürchten, in der Zukunft von intelligenten Maschinen unterdrückt zu werden, erhöht das unsere Aufmerksamkeit gegenüber solchen denkbaren Entwicklungen und sorgt – vielleicht – für sinnvolle Vorkehrungen.

Insofern bietet es sich auch für uns als Wissenschaftsredaktion an, gelegentlich eine Art Bestandsaufnahme des menschlichen Entwicklungszustands zu machen. Dabei gehen wir nach dem Motto vor: Wer die Zukunft erforschen will, sollte die Vergangenheit kennen. So beschreibt der Biologe Robert M. Sapolsky ab S. 48 erst einmal unser evolutionäres Erbe. Dabei identifiziert er als einzigartiges menschliches Merkmal das Bestreben, eben gerade unsere evolutionären Grenzen zu überwinden, etwa mit Hilfe der modernen Naturwissenschaft.

Als weitere herausragende menschliche Eigenschaft gilt hohe Intelligenz. Schon vor einem Vierteljahrhundert stellte sich heraus, dass diese ständig zunimmt, wenn man gängige IQ-Tests zu Grunde legt. Aber werden wir wirklich immer schlauer? Tim Folger diskutiert unsere kognitive Evolution ab S. 52.

Manchen geht der Fortschritt des Homo sapiens noch nicht schnell genug: Laut den so genannten Transhumanisten muss der Mensch grundlegend verbessert werden, geistig wie körperlich. Zum ersten Mal in der Geschichte stehen dafür eine Reihe technischer Möglichkeiten zur Verfügung oder zeichnen sich zumindest am Horizont ab. Damit stellt sich aber nicht nur die Frage der Machbarkeit, sondern auch, ob solche Eingriffe überhaupt wünschenswert sind – oder aber umgekehrt geradezu obligatorisch. Der Philosoph Ludwig Siep bezieht zu diesem ethischen Problem ab S. 56 Position.

Allerdings gilt hier wieder einmal der berühmte Ausspruch, der wahlweise Niels Bohr, Mark Twain, Karl Valentin oder Winston Churchill zugeschrieben wird: Prognosen sind schwierig – vor allem, wenn sie die Zukunft betreffen. In diesem Sinn möchte unser Titelthema im Unterschied zur erwähnten Gattung der Sciencefiction weniger konkrete Szenarien entwickeln, wie sich der Mensch in den nächsten Jahrzehnten und Jahrhunderten verändern könnte. Vielmehr geht es uns darum, ein Mosaik zu zeigen – ein Mosaik der teilweise einzigartigen Fähigkeiten des Menschen, ihrer evolutionären Vorgeschichte und der Folgen für unsere weitere Entwicklung.

Eine anregende Lektüre wünscht Ihr

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



Seit der Januarausgabe 2009 erklärt der Physikdidaktiker **H. Joachim Schlichting** in seiner Kolumne »Schlichting!« (siehe S. 44) physikalische Phänomene des Alltags. Am 25. März erhielt er für seine Verdienste um den Physikunterricht den Archimedes Preis für Physik 2013.



Der Philosoph **Ludwig Siep** von der Universität Münster legt ab S. 56 seine Ansicht über die Forderungen der Transhumanisten nach einer Verbesserung des Menschen dar.



Das Bild vom Golfstrom als »Heizung Europas« gerät ins Wanken. Vor allem spezielle Luftströmungen scheinen eine wesentliche Rolle für unser vergleichsweise mildes Wetter zu spielen, so die Ozeanografen **M. Susan Lozier** (links) und **Stephan C. Riser** (S. 66).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Verknotetes Wasser • Hirnstrukturen von Autisten • Flusstäler auf dem Mars • Elektrosinn bei Hummeln • Versunkenes Land unter dem Indischen Ozean • Alkohol schützt Fliegenlarven

11 Bild des Monats

Einzigartiges Gelb

12 Forschung aktuell

**Brocken um ferne Sterne**  
Exokometen und Exo-asteroiden nachgewiesen

**Pflanzenschau aus der Luft**  
Fernerkundungssystem spürt subtilste ökologische Veränderungen auf

**DNA-Nanotechnologie vor dem großen Sprung**

Die ungeahnten Möglichkeiten des DNA-Legos

**Darmflora und Diabetes**  
Mikrobiom von Frauen erhöht Risiko für Autoimmunkrankheiten

SPRINGER'S EINWÜRFE  
**Schlechte Zeiten für Genies?**

30



38



62



BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 22 HIV unter Kontrolle

*Bruce D. Walker*

Einige HIV-Infizierte erkranken nicht an Aids: Sie können das Virus gut bekämpfen. Diese Abwehrkraft möchten Mediziner jetzt auch anderen Patienten schenken.

PHYSIK & ASTRONOMIE

▶ SERIE »RÄTSEL DER ASTRONOMIE« TEIL 2

30 Giganten im All

*Gerhard Börner*

Supermassereiche Schwarze Löcher scheint es in fast allen aktiven Galaxien zu geben. Womöglich beeinflussen die Riesen das Schicksal der ganzen Galaxie.

38 Zeugen des Urknalls

*Marek Abramowicz und Julia Tjus*

Wären kurz nach dem Urknall Schwarze »Minilöcher« entstanden, sollten diese heute explodieren. Doch bislang haben Astronomen davon nichts entdeckt.

SCHLICHTING!

44 Networking für Tomaten

*H. Joachim Schlichting*

Erstaunlicher Effekt in der Einkaufsstüte: Wiegt das Ganze weniger als die Summe seiner Teile?

MENSCH & KULTUR

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

62 QR-Kodes lesen – mit bloßem Auge

*Andreas Loos*

Aus dem merkwürdigen Quadratmosaik eine Internetadresse herauslesen? Dazu braucht man kein Smartphone!

► TITELTHEMA

## Wohin geht der Mensch?

Einblicke in unsere evolutionäre Zukunft

### 48 Auf dem Weg zum Supermenschen

*Robert M. Sapolsky*

Wir sind ein Produkt der biologischen Evolution – und versuchen doch laufend, ihre Ketten zu sprengen. Ein Mittel dazu ist die moderne Naturwissenschaft.

### 52 Werden wir immer klüger?

*Tim Folger*

Die gemessenen IQ-Werte steigen jährlich, aber nicht bei allen Fähigkeiten gleichermaßen.

### 56 Den Menschen verbessern?

*Ludwig Siep*

Zunehmend können wir unseren Körper optimieren. Aber wollen wir den »neuen Menschen« überhaupt?



76



ERDE & UMWELT

► 66 Neues vom Golfstrom

*Stephen C. Riser und M. Susan Lozier*

Nach herkömmlicher Auffassung erwärmt der Golfstrom die Luft vor Europa und sorgt so für milde Winter auf dem Kontinent. Doch das stimmt nur teilweise, wie neue Untersuchungen nahelegen.

TECHNIK & COMPUTER

► 76 Farbwechsel auf Knopfdruck

*Roger J. Mortimer*

Materialien mit elektrisch umschaltbarer Farbe eröffnen viele faszinierende Anwendungsmöglichkeiten – vom Blendschutz bis zur Tarnkleidung.

### 88 Rezensionen

*H.D. Zeh: Physik ohne Realität • E. Beck (Hg.): Die Vielfalt des Lebens • A. Gawande: Checklisten-Strategie • B. Falkenburg: Mythos Determinismus • A. Wagner: Das Tier in Dir • M.J. Kobbert: Wunderwelt Bernstein • D. Saunders: Mythos Überfremdung • R. Osteroth: Metall*

### 97 Wissenschaft im Rückblick

Von der Rheinrolltreppe bis zum Kranhubschrauber

### 98 Vorschau

Titelmotiv: dreamstime / Bruce Rolff [M]  
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

## Biochemie versus ganzheitlicher Ansatz

*Möglicherweise entstand die heftige Immunreaktion bei Allergien, um sich etwa gegen Tiergifte zu wehren, so drei Forscher von der Yale University (»Der Sinn der Allergie«, März 2013, S. 34).*

**Walter Züst, Rehetobel (Schweiz):** Die Artikelserie über Allergien gab für mich als ehemals pollengeplagten Laien sehr viel her. Der abschließende Artikel über den »Sinn« der Allergie hätte als Übersicht über die Problematik meiner Ansicht nach aber eigentlich an den Anfang gehört. Ich habe den Eindruck, dass die Forschung vor lauter Klärung komplexer biochemischer Details manchmal den Blick auf das Ganze verliert.

Ich persönlich habe meine Pollenallergie, die sich von Jahr zu Jahr ausweitete, mit Mentalarbeit zum Verschwinden gebracht. Mein Ansatz war ganz pragmatisch: Mein Immunsystem entdeckt Feinde, wo gar keine sind. Ob an der Wurzel ein zu sensitives Alarmsystem steht oder ob mein Körper Mühe hat, bei den Xenobiotika zwi-

schen harmlosen und bedrohlichen zu unterscheiden, ist eine spannende, aber für mich letztlich müßige Frage. Ich brachte dem Organismus mit Suggestionen bei, dass Pollen harmlos sind und die Luft, die ich einatme, rein und frisch ist. Es brauchte einige Anläufe und ziemlich viel Durchhaltevermögen, bis die Symptome nachließen und

schließlich verschwanden. Seit Jahren habe ich nur noch einige Niesanfalle zu Beginn der Pollensaison.

Ich bin davon überzeugt, dass viele Allergien im Anfangsstadium mit relativ geringem Aufwand auf diese Weise gestoppt werden könnten, bevor sich das neuronale und biochemische »Feindbild« zu sehr festigt. Leider gibt



## Spektrum

DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)  
**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)  
**Redaktion:** Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findelee (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Editor-at-Large:** Dr. rer. nat. habil. Reinhard Breuer  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Referentin des Chefredakteurs:** Kirsten Baumbusch  
**Redaktionsassistent:** 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. Werner Gans, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Ursula Loos, Claus-Peter Sesin, Dr. Sebastian Vogel.  
**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

### Vertrieb und Abonnementverwaltung:

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

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

**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90; E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf 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. 34 vom 01.01.2013.  
**Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung,

Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2013 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft 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.



es von der Pharmaindustrie für das Testen einer solchen Methode keine Forschungsgelder.

## Umkehrung der Verhältnisse

*Der Physiker Oliver Morsch berichtete über Versuche, in denen ein Gas mit negativer absoluter Temperatur hergestellt wurde (»Kälter als kalt und heißer als unendlich heiß«, März 2013, Forschung aktuell, S. 17).*

**Wilfried van Haag, Kalkar:** Sollte es in der Tat so sein, dass sich bestimmte Verhältnisse bei negativen Kelvingraden umkehren (zum Beispiel Anziehung beziehungsweise Abstoßung von Teilchen), könnte es dann nicht so sein, dass sich die Effekte bei Emission von Licht auch »umkehrten«? Wie wir wissen, kann Lichtemission (elektromagnetische Strahlung) entstehen, wenn Elektronen von einem angeregten Zustand in den »Normalzustand« zurückfallen. Was nun, wenn sich genau diese Emission in Richtung Nullemission respektive Absorption verschieben würde? Die Gravitation bliebe; das ist das, was beschrieben wird. Faszinierend – und natürlich nobelpreiswürdig!

**Antwort des Autors:** Die Umkehrung der atomaren Wechselwirkung von abstoßend zu anziehend wird in dem beschriebenen Experiment bewusst herbeigeführt, ist also keine Folge der negativen absoluten Temperatur. Ein Gas mit abstoßender Wechselwirkung wäre bei negativen Temperaturen nicht stabil, sondern würde kollabieren. Dies wurde im Artikel vielleicht nicht deutlich genug betont.

Was Ihre Überlegungen zur Absorption und Emission von Photonen betrifft, so haben Sie natürlich Recht, dass auch hier negative Temperaturen (allerdings der inneren, nicht der äußeren Freiheitsgrade) auftreten können. In einem Laser beispielsweise sind die Besetzungswahrscheinlichkeiten der atomaren Energieniveaus invertiert, was tatsächlich einer negativen absoluten Temperatur entspricht.

**Hans Reiner, Gerlingen:** Der Begriff der Temperatur stammt aus der Thermodynamik und stellt ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen eines vorgegebenen Systems dar. Der Temperaturbegriff ist nur eindeutig definiert bei Systemen, die im thermodynamischen Gleichgewicht sind. Da die kinetische Energie keine negativen Werte annehmen kann, kann die absolute Temperatur auch nicht negativ sein. Ideale Gase im thermodynamischen Gleichgewicht weisen eine so genannte maxwellsche Geschwindigkeitsverteilung auf.

Herr Morsch behauptet nun, dass ein Gas, in dem mehr Teilchen bei hohen als bei niedrigen Temperaturen zu finden sind, eine negative Temperatur aufweise. Warum dies so sein soll und wie er die Grenze zwischen hoher und niedriger Energie festlegt, verrät er nicht. Offenbar kann man also ein solches Gas durch geeignete Festlegung dieser Grenze auf verschiedene, auch negative, Temperaturen bringen. Er benutzt hier den Begriff Temperatur für ein System, für das der Begriff Temperatur gar nicht definiert ist, und behauptet nun, eine Temperatur erzeugt zu haben, die unter dem absoluten Nullpunkt liegt. Er vergleicht also hier in unzulässiger Weise die Zahlenwerte zweier verschiedener Begriffe.

**Antwort des Autors:** Ihre Bemerkung, dass die kinetische Energie eines Teilchens nicht negativ sein kann, ist natürlich vollkommen richtig. Temperatur lässt sich allerdings auch allgemeiner definieren, beispielsweise über die Änderung der Entropie bei Energiezufuhr: Steigt die Entropie, so ist die Temperatur positiv, sinkt sie dagegen, so liegt eine negative Temperatur vor. Ein System mit negativer Temperatur kann, wie die Experimente gezeigt haben, unter bestimmten (natürlich recht artifizialen) Bedingungen im thermodynamischen Gleichgewicht sein, und der Temperaturbegriff (der auch abstrakt einfach als Parametrisierung der Zustandsverteilung des Systems mit einem einzelnen Parameter gedacht werden kann) ist somit sinnvoll.

FOLGEN SIE UNS  
IM INTERNET



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



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



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



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

Umgehen kann man die (zugegebenermaßen etwas konterintuitive) Unterscheidung zwischen positiver und negativer Absoluttemperatur, indem man den Begriff der »hotness« einführt und damit ausdrückt, in welche Richtung Energie fließt, wenn zwei Systeme in Kontakt gebracht werden: Jenes, von dem aus Energie abfließt, ist per Definition »heißer« – auch wenn seine Absoluttemperatur, wie oben beschrieben, negativ ist.

## Erratum

»Datenspeicher für die Ewigkeit«, April 2013, Forschung aktuell, S. 16

Im Kasten auf S. 17 ist uns ein Fehler unterlaufen: Die im Text an zwei verschiedenen Stellen genannte Beispiel-Binärzahl muss nicht 10011010 lauten, sondern 10011110.

## BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

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

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

PHYSIK

## Verknotetes Wasser

Mehr als ein Jahrhundert nach den ersten theoretischen Überlegungen, ob man Wasser zu Knoten schnüren kann, ist Physikern das tatsächlich gelungen. Die Entdeckung liefert neue Anregungen, um Wirbelstrukturen zu untersuchen –

ob in ionisierten Gasen, supraleitenden Materialien oder Quantenfeldern in der Teilchenphysik.

Dustin Kleckner und William Irvine, Physiker an der University of Chicago, beschleunigten hierfür einen speziell geformten Flügel unter Wasser. Da-

durch erzeugten sie einen in sich geschlossenen Wirbel, den sie als »Wirbelknoten« bezeichnen. Um die Bewegung der Flüssigkeit nachzuverfolgen, leiteten die Forscher kleinste Gasbläschen ins Wasser. Diese wurden in Bereiche starker Verwirbelung hineingezogen. Ein Hochgeschwindigkeits-Laserscanner, der 76 000 Aufnahmen pro Sekunde machen kann, ermöglichte es den Wissenschaftlern, die räumliche Anordnung der Bläschen zu rekonstruieren und so den Knoten sichtbar zu machen.

Verknotete Wirbel spielen in der Physik eine große Rolle. Teilchenphysiker vermuten etwa, dass so genannte Glueballs – hypothetische Ansammlungen aus Gluonen, bestimmten Elementarteilchen – eng verknotete Quantenfelder sind.

*Nature Physics 10.1038/NPHYS2560, 2013*



Ein in sich geschlossener Wasserwirbel, sichtbar gemacht durch kleine Gasbläschen, die in die Flüssigkeit eingebracht wurden. Physiker erzeugen solche Wirbelknoten, indem sie kompliziert geformte Tragflächenstrukturen schlagartig unter Wasser beschleunigen.

DUSTIN KLECKNER UND WILLIAM T.M. IRVINE, UNIVERSITY OF CHICAGO

### Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Studien und Analysen lesen Sie jeden Donnerstag in

### Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

- Pflanzenkrankheiten: Orangen am Abgrund?
- Ilisu-Staudamm: Die unendliche Geschichte
- Reaktorkatastrophe: Wie sieht es im Inneren Fukushimas aus?

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

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin!

HIRNFORSCHUNG

## Veränderte Hirnarchitektur bei Autisten

Der Informationsaustausch zwischen verschiedenen Hirnregionen fällt bei autistischen Kindern aus dem Rahmen: Benachbarte Areale kommunizieren auffallend stark miteinander, während entfernte nur schwach verbunden sind. Das berichten Forscher der Universität de Lovain in Belgien.

Maxime Taquet und ihre Kollegen untersuchten autistische und gesunde Vorschulkinder per Elektroenzephalografie. Bei diesem Verfahren werden Spannungsschwankungen an der Kopfhaut aufgezeichnet, um auf die elektrische Aktivität von Nervenzellen im Gehirn zu schließen. Indem die Wissenschaftler berechneten, wie stark sich EEG-Signale ähnelten, die zur selben Zeit an verschiedenen Orten der Kopfhaut auftraten, erhielten sie Informationen über die Verknüpfungen verschiedener Hirnregionen. Eng zusam-

menarbeitende Areale zeigen typischerweise ähnliche Hirnstrommuster.

In den Denkkorganen der autistischen Kinder zeigten sich benachbarte Areale, die oft ähnliche Aufgaben erfüllen, überdurchschnittlich stark vernetzt. Weit voneinander entfernte Hirnregionen kommunizierten dagegen weniger intensiv als bei normalen Gleichaltrigen. In der Regel baut das kindliche Gehirn überflüssige Verknüpfungen während der ersten Lebensjahre ab. Dieser Vorgang ist bei Autisten offenbar beeinträchtigt.

Kinder mit Autismus widmen sich akribisch detailfokussierten Aufgaben, haben aber Schwierigkeiten, verschiedene Informationen zu übergeordneten Konzepten zusammenzuführen. Möglicherweise lässt sich das mit ihrer speziellen Hirnarchitektur erklären.

*BMC Medicine 11:54, 2013*



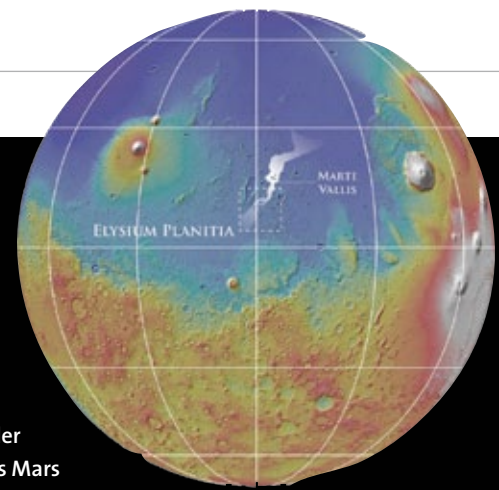
## Verborgene Flusstäler auf dem Mars

**A**uf dem Mars gibt es riesige Flusstäler, die vor hunderten Millionen Jahren durch Wasser entstanden sein müssen. Auch die Ebene Elysium Planitia enthält solche Rinnen. Die Täler sind dort aber teils von vulkanischer Lava überdeckt, was ihre Untersuchung erschwert. Forscher um Gareth Morgan von der Smithsonian Institution in Washington, USA, haben nun festgestellt, dass sich die Täler weiter erstrecken als bislang angenommen.

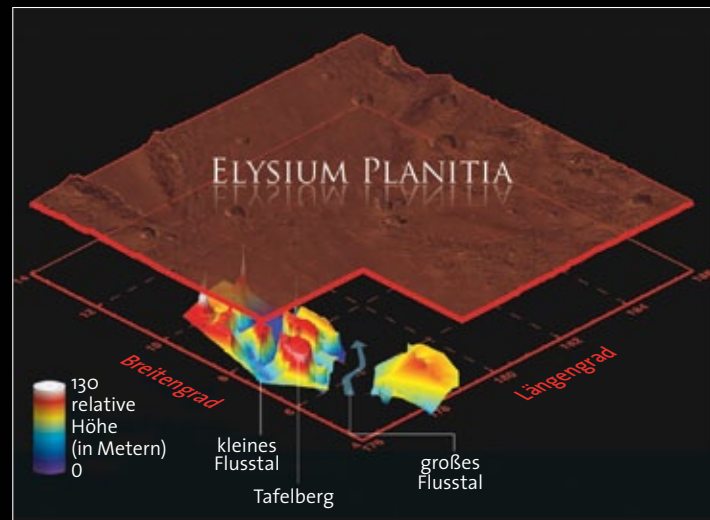
Die Wissenschaftler analysierten Messdaten des Bodenradars SHARAD an Bord der Raumsonde »Mars Reconnaissance Orbiter«. Dessen Radarwellen dringen mehrere hundert Meter tief in den Marsboden ein und werden dort an Gesteinsschichten reflektiert, was es erlaubt, die Beschaffenheit des Untergrunds zu ermitteln. Die Messungen in der Elysium-Ebene belegen, dass sich das verschüttete Talsystem rund 180 Kilometer weiter nach Osten ausdehnt als zuvor bekannt. Dabei sind die einstigen Täler zum Teil mehr als 100 Meter tief; zwischen ihnen ragen stromlinienförmige Tafelberge auf.

Wahrscheinlich entstanden die Strukturen vor weniger als 500 Millionen Jahren, als gewaltige Fluten über die damalige Oberfläche strömten und den Boden tief einschnitten. Möglicherweise handelte es sich um Grundwasser, freigesetzt durch vulkanische Aktivität. Denn zu jener Zeit war der Mars bereits die trockene, rostrote Wüste mit dünner Atmosphäre, als die er sich heute präsentiert. Erst lange, nachdem die Täler entstanden waren, füllten Lavaströme sie nach und nach auf.

*Science, 10.1126/science.1234787, 2013*



Die Ebene Elysium Planitia liegt auf der Nordhalbkugel des Mars (oben). Mittels Radarbeobachtung haben Forscher dort verschüttete Flusstäler im Untergrund entdeckt (unten, die heutige Oberfläche ist dunkelrot gezeit).



MARSKUGEL: NASA / MOLA TEAM / SMITHSONIAN; KARTE: SMITHSONIAN / NASA, JPL / CALTECH / SAPIENZA UNIVERSITÀ DI ROMA / MOLA TEAM / USGS



DOMINIC CLARKE, UNIVERSITY OF BRISTOL

**Auf der Suche nach Zuckerwasser: Hummeln lassen sich in einem Experiment auf künstlichen Blüten nieder.**

**N**ektar sammelnde Hummeln orientieren sich bei der Futtersuche an vielen verschiedenen Blütenmerkmalen. Auch aus dem elektrischen Feld einer Blüte beziehen sie wichtige Informationen, schreiben Daniel Robert von der University of Bristol (England) und seine Kollegen. Den Messungen der For-

### WAHRNEHMUNG

## Hummeln spüren elektrisches Feld von Blüten

scher zuzufolge sind fliegende Hummeln elektrisch leicht positiv geladen. Wenn sie sich auf einer Blüte niederlassen, um Nektar aufzunehmen – wobei sie mitgeschleppte Pollen deponieren –, erhöhen sie das elektrische Potenzial der Pflanze. Der Effekt tritt sofort ein und hält etwa anderthalb Minuten lang an. Das Potenzial der Blüte sagt also etwas darüber aus, ob sie kürzlich von Insekten besucht worden ist, und dementsprechend, wie viel Nektar sie noch vorrätig hat.

In weiteren Experimenten zeigte das Team, dass die Hummeln diese Information tatsächlich auswerten. Die Tiere hielten künstliche Blumen, die sich

nur im elektrischen Potenzial unterscheiden, zuverlässig auseinander. Enthielten etwa geladene Blüten eine Zuckerlösung, ungeladene aber bitteres Chinin, dann flogen die Hummeln schon nach kurzer Zeit zielsicher die ersten an. Versahen die Wissenschaftler alle Blüten mit demselben elektrischen Potenzial, waren die Hummeln nicht länger in der Lage, solche mit Zuckerlösung gezielt anzusteuern.

Womit die Insekten elektrische Felder wahrnehmen, ist noch ungeklärt. Die Forscher vermuten, dass sich die Körperhärchen der Tiere im Feld aufstellen und die Hummel dies registriert.

*Science 10.1126/science.1230883, 2013*

GEOLOGIE

## Versunkenes Land unter dem Meer

Am Boden des Indischen Ozeans liegen wahrscheinlich die Reste eines hunderte Kilometer langen Landstücks, das vor langer Zeit von Madagaskar abbrach. Wahrscheinlich löste es sich vor etwa 80 Millionen Jahren, während der Trennung Madagaskars von Indien, und wurde später durch Vulkanismus überdeckt. Seine

Überbleibsel erstrecken sich heute von der Insel Réunion bis zum Seychellen-Archipel.

Forscher um Trond Torsvik von der Universität Oslo haben satellitengestützte Messungen des Schwerefelds der Erde ausgewertet und stießen dabei auf eine bogenförmige Verdickung der Erdkruste unter dem Indischen Ozean – offenbar eine ehemalige Landmasse. Die Insel Mauritius sitzt auf diesem Block und besteht an der Oberfläche aus relativ jungem Vulkan- gestein mit einem Alter von einigen Millionen Jahren. Im basaltischen Sand der Insel fanden die Wissenschaftler

jedoch Zirkonkristalle, die mit mehreren hundert Millionen Jahren um ein Vielfaches älter sind.

Wahrscheinlich stammen die Zirkone aus der Kruste der ehemaligen Landmasse und sind zunächst mit ihr abgesunken, schreiben die Wissenschaftler. Später wurden sie bei vulkanischen Eruptionen mitgerissen und wieder an die Oberfläche befördert, so dass sie heute auf Mauritius zu finden sind. Die Forscher schließen aus, dass die Zirkonkristalle von den umliegenden Kontinenten stammen, da diese zu weit entfernt seien, als dass ihr Material bis in die Magmakammern unter der Insel gelangt sein könnte.

Wie die Experten vermuten, kommen derartige Vorgänge häufig vor und liegen noch viele bisher unbekannte Bruchstücke von Inseln und Kontinenten unter den Weltmeeren.

*Nature Geoscience 6, S. 223–227, 2013*



**Nordöstlich von Madagaskar ist die Erdkruste in einem großen Gebiet verdickt, das zeigen Satellitenmessungen (gestrichelt umrandete Fläche). Hier liegen wohl die Reste einer ehemaligen Landmasse.**

BIOLOGIE

## Alkohol schützt Fliegenlarven

Taufliegen der Gattung *Drosophila* legen ihre Eier auf alkoholhaltiger Nahrung ab, wenn parasitische Wespen zugegen sind. Zwar tötet der Alkohol einen Teil des Geleges, doch hält er die Wespen davon ab, ihre Eier in die geschlüpften Fliegenlarven zu legen, wodurch deren Überlebenschance insgesamt steigt.

Forscher um Todd Schlenke von der Emory University in Atlanta führen das Verhalten auf den Signalstoff Neuropeptid F zurück. Dessen Konzentration im Taufliegenhirn sinkt, wenn die Tiere weibliche Wespen erblicken. Als Folge davon steuern sie bevorzugt alkoholreiche Eiablageplätze an. Dies taten sie im Experiment sogar noch mehrere Tage nach dem Kontakt mit den Wespen. Der Anblick von männlichen Wespen oder von Schmarotzern, welche die Fliegen erst nach dem

Larvenstadium befallen, löste dieses Verhalten nicht aus.

Die Forscher beobachteten, dass *Drosophila* ihre Eier bevorzugt auf Nährböden mit 12 bis 15 Prozent Ethanolgehalt deponiert, wenn weibliche Wespen zugegen sind; dies entspricht

den höchsten in der Natur vorkommenden Alkoholkonzentrationen. In Abwesenheit von Parasiten bevorzugten die Tiere alkoholfreie Ablageplätze oder solche mit nur wenigen Prozent Ethanolgehalt.

*Science 339, S. 947–950, 2013*



Taufliegen legen ihre Eier gern auf gärenden Pflanzenstoffen ab. Daher kommen sie durchaus häufig mit Alkohol in Kontakt. Zu hochprozentig darf der Untergrund aber nicht sein, sonst suchen sie sich einen anderen Ablageplatz – es sei denn, parasitische Wespen sind in Sicht.

## EINZIGARTIGES GELB

Für manche Pinguine spielen gelbe Federn eine wichtige Rolle bei der Partnerfindung. Spektroskopischen Analysen zufolge gehört die dabei verwendete Farbe aber nicht zu den gängigen chemischen Pigmentklassen bei Vögeln. Sie scheint stattdessen den so genannten Pteriden zu

ähneln. Diese Stoffgruppe ist als Farbpigment bei Amphibien, Reptilien und Schmetterlingen bekannt; bei Vögeln hatte man sie bisher nur in der Iris gefunden.

*Journal of the Royal Society Interface*  
10 (83) 20121065, 2013

ASTRONOMIE

# Brocken um ferne Sterne

Asteroidenringe und Kometen außerhalb unseres Sternsystems nachgewiesen.

VON JAN HATTENBACH

Mit Weltraumteleskopen und ausgefeilten Messmethoden gelingt es Astronomen, selbst Asteroiden und Kometen bei fremden Sternen ausfindig zu machen. Zwei nahe gelegene Sterne sind sogar von Asteroidengürteln umgeben – genau wie unsere Sonne.

Die NASA-Ingenieure waren in Sorge. Ihre Raumsonde schickte sich gerade an, als erstes von Menschenhand gebautes Gerät in das äußere Sonnensystem vorzudringen, doch vor ihr lag ein gefährliches Hindernis: der Asteroidengürtel. In dieser rund 200 Millionen Kilometer breiten, ringförmigen Region

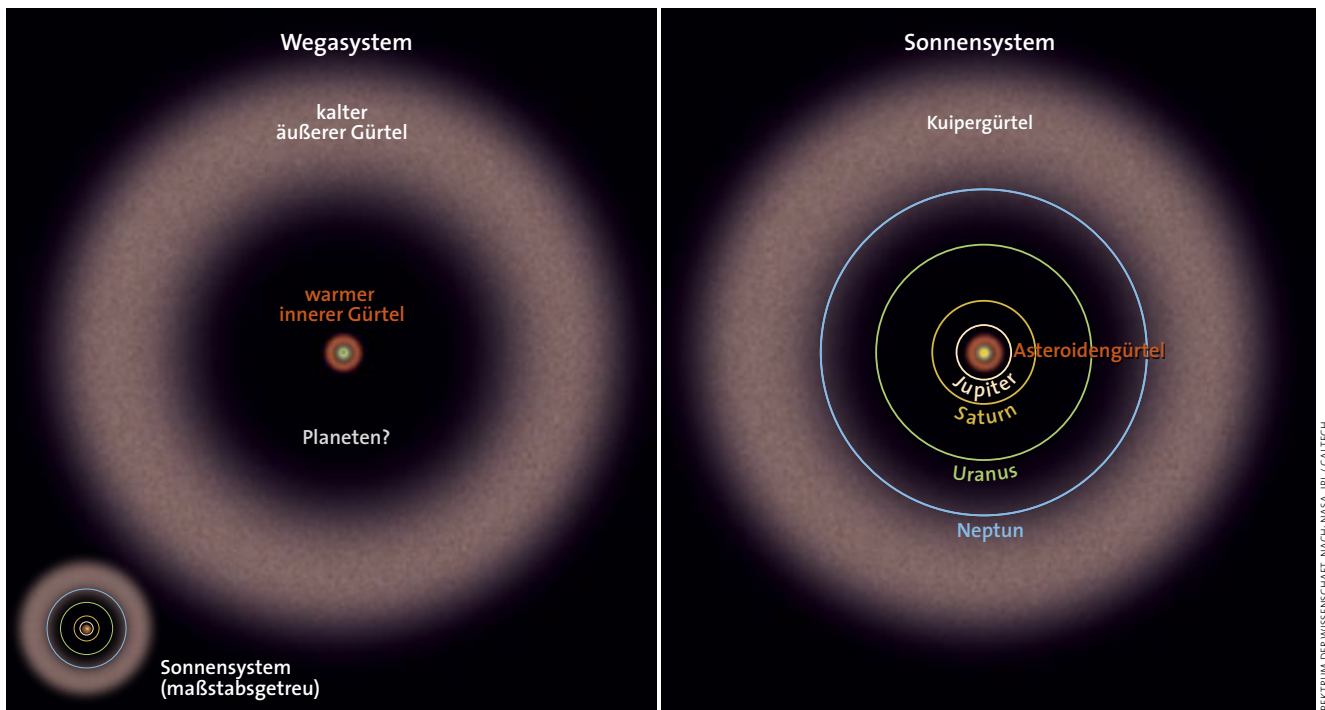
zwischen den Umlaufbahnen von Mars und Jupiter kreisen hunderttausende große Gesteinsbrocken und Abermillionen kleine um die Sonne. Die größten Exemplare durchmessen einige hundert Kilometer, doch selbst einen Zusammenstoß mit einem der kleineren Brocken würde das Raumfahrzeug keinesfalls überleben.

Erst als Pioneer 10 im Frühjahr 1973, rund sieben Monate später, immer noch Signale zur Erde funkte, war klar: Die Sonde hatte den gefährlichen Ritt überlebt. Daraus lernten die Astronomen eine wichtige Lektion – selbst im

Asteroidengürtel liegen gewaltige Abstände zwischen den einzelnen Himmelskörpern. Gleiches gilt, wie wir heute wissen, für den so genannten Kuiper-gürtel jenseits der Umlaufbahn des Neptuns, aus dem ein Teil der Kometen des Sonnensystems stammt. Allgegenwärtig in beiden ist nur feiner Staub.

40 Jahre später hilft Staub wie dieser, Asteroiden auch bei anderen Sternen aufzuspüren. Einem Team um Kate Su von der University of Arizona ist es gelungen, bei Wega im Sternbild Leier und bei Fomalhaut im Sternbild Südlicher Fisch Ringsysteme ähnlich denen im Sonnensystem nachzuweisen (*The Astrophysical Journal* 763, 16. Januar 2013). Demnach sind beide Sterne wie unser Heimatgestirn von einem inneren Asteroidengürtel und einem äußeren Kometenring umgeben. Zwar sind diese bei Wega und Fomalhaut ausgedehnter und enthalten mehr Ma-

Im Vergleich zum Sonnensystem sind die Asteroiden- und Kometengürtel um den Stern Wega rund viermal breiter. Die relativen Proportionen stimmen jedoch mit denen in unserer kosmischen Heimat überein: In beiden Fällen ist der kältere, äußere Gürtel zehnmal weiter vom Stern entfernt als der wärmere, innere. Verantwortlich für die Existenz der Ringe sind höchstwahrscheinlich mehrere Planeten, die durch ihre Gravitation die Bahnen der Kleinkörper beeinflussen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NASA, JPL / CALTECH



ILLUSTRATION: NASA, JPL / CALTECH

Ein Asteroidengürtel besteht neben unzähligen meter- bis kilometergroßen Gesteinsbrocken aus feinem Staub, der wie Nebel die größeren Objekte des Gürtels umhüllt. Mit Hilfe der Weltraumteleskope *Herschel* und *Spitzer* können Wissenschaftler diesen Staub auch bei nahen Sternen aufspüren (künstlerische Darstellung).

terial. Doch wie im Sonnensystem ist in beiden Fällen der äußere Gürtel etwa zehnmal so weit vom Zentralgestirn entfernt wie der innere.

Dass *Wega* und *Fomalhaut* von ausgedehnten Staubscheiben umgeben sind, war schon länger bekannt; schließlich befinden sie sich in gerade einmal rund 25 Lichtjahren Entfernung von der Erde. Aber erst mit Hilfe der Weltraumteleskope *Herschel* und *Spitzer* und deren hohem Auflösungsvermögen gelang es den Forschern, nun auch die innere Struktur der Scheiben zu untersuchen. In ihnen vermuten sie einzelne Brocken – Material, das bei der Entstehung des Planetensystems gewissermaßen übrig blieb und sich nicht zu großen Himmelskörpern formen konnte.

Nun ermöglichen es nicht einmal die besten Teleskope der Welt, einzelne Kleinkörper in der Umgebung eines anderen Sterns direkt abzulichten. Selbst die größten Exemplare unseres eigenen Asteroidenrings erscheinen in ihnen nur als schwache Lichtpunkte. Da-

rüber hinaus versagen bei Asteroiden und Kometen die Methoden, mit denen Astronomen Exoplaneten aufspüren: Die Massen der Körper sind zu klein, um ihren Stern in messbare Taumelbewegungen zu versetzen, und ihre Ausdehnung zu gering, um das Sternlicht bei einem Transit merklich abzuschwächen.

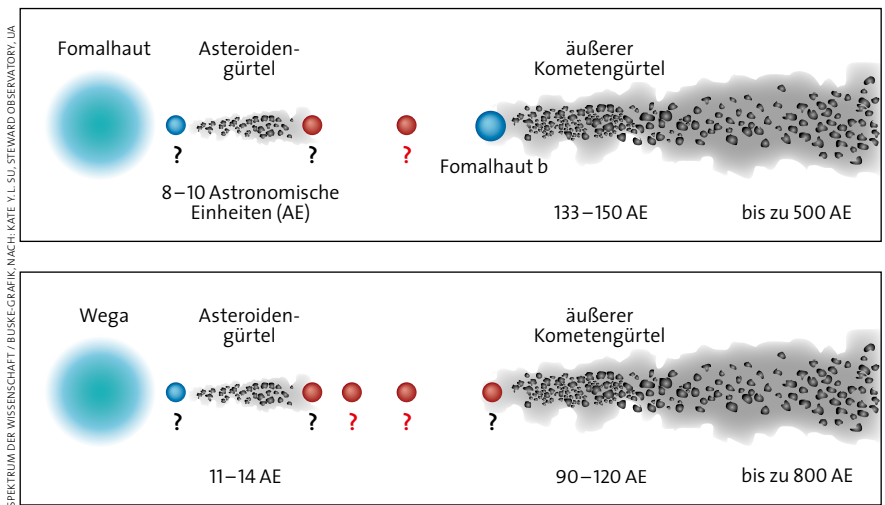
### Innere Ringe verlieren Gase und Wasser

Den Staub jedoch, den auch *Pioneer 10* in unserem Sonnensystem einst aufspürte, können die Forscher nachweisen. Er absorbiert das Sternlicht und sendet es als Infrarotlicht, also Wärmestrahlung, wieder aus. *Su* und ihre Kollegen stellten durch Messungen fest, dass der Staub im inneren Ring beider Sternsysteme mit etwa  $-120$  Grad Celsius wärmer ist als im äußeren, wo ihn der Stern nur noch auf  $-220$  Grad erwärmt. Die inneren Ringe müssen also sämtliche flüchtigen Substanzen längst verloren haben, allen voran Wasser. In dieser Region können größere Körper

daher nur aus Gestein und Metallen bestehen, so wie es auch bei den Asteroiden im Sonnensystem der Fall ist. Die äußeren Ringe sollten jedoch, wie der *Kuiper*gürtel, Mischkörper aus Gestein und Eis enthalten – also die typischen Kometenkerne.

Aber können sich die Forscher sicher sein, dass dort, wo Staub ist, größere Körper existieren? *Wega* und *Fomalhaut* sind beide nur rund 400 bis 600 Millionen Jahre alt, geradezu jugendlich gegenüber unserer fünf Milliarden Jahre alten Sonne. Könnte der Staub demnach zum Beispiel ein Überbleibsel der primordialen Wolke sein, aus der sich die Sterne gebildet haben? Nein, meint *Kate Su*, denn der Sternwind bläse fortwährend Material aus dem System; vom Staub der Anfangsphase sollte darum nichts mehr übrig sein. Was die Forscher gemessen haben, muss also »nachgeliefert« worden sein. Und das, so *Su*, bringen nur kollidierende Asteroiden und Kometen zu Wege.

Für den Nachweis von Exokometen haben Astronomen eine direktere Methode entwickelt. Entscheidend sind deren viele Millionen Kilometer messenden Schweife, die entstehen, wenn die Kometenkerne aus Eis und Gestein in die Nähe eines Sterns geraten und die Energie des von ihm ausgehenden



Schon länger wussten Astronomen, dass Fomalhaut (oben) und Wega jeweils von einem Staubhalo umgeben sind. Nun entdeckten sie in beiden Systemen Substrukturen aus zwei Ringen und einer breiten Lücke dazwischen. Dort befinden sich vermutlich Planeten.

Teilchen- und Strahlungswinds aufnehmen. Das geschieht zum Beispiel, wenn als Folge der Kollision von Gesteinsbrocken Objekte in Richtung des Sterns geschleudert werden. Auch vermögen vorbeiziehende Sterne die Umlaufbahnen einiger Kuipergürtelobjekte in Richtung Stern zu lenken. Die Schweife, die sich dann bilden, können heller leuchten als etwa ein Planet. Geraten sie darüber hinaus in die Sichtlinie zwischen Erde und Stern, verändern sie messbar das Sternspektrum.

Tatsächlich gelang es kürzlich einer Forschergruppe um Barry Welsh von der University of California in Berkeley, in den Spektren von sechs Sternen je einen »Fingerabdruck« eines Kometenschweifs zu identifizieren (*Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 124, S. 1042–1056, 2012). Die Wissenschaftler untersuchten dazu schwache, sich von Nacht zu Nacht ändernde Absorptionslinien in den Spektren. Als Erklärung für eine solch schnelle Variation der Spektrallinien kommen nur Kometen in Frage, so die Forscher.

Auf diese Weise hatten Astronomen bereits Ende der 1980er Jahre und danach die ersten Exokometen aufgespürt. Seitdem ist die Fahndung nach weiteren Exemplaren eingeschlafen; möglicherweise weil sich die Forscher lieber der Suche nach Planeten gewid-

met haben (die ersten wurden 1992 nachgewiesen). Außerdem hatten sie wohl nicht damit gerechnet, allzu viele weitere Exokometen entdecken zu können. Insgesamt sind darum erst zehn solcher Objekte bekannt, gegenüber knapp 1000 Exoplaneten.

**Rätselhafte Ringsysteme**

»Die nun gefundenen Exokometen zeigen«, so Welsh, »dass sie weit häufiger und einfacher zu entdecken sind als gedacht.« Vor wenigen Jahren träumten die Astronomen sogar noch davon, den Schweif eines Exokometen direkt fotografieren zu können. Der von der NASA geplante Terrestrial Planet Finder und die europäische Darwin-Mission, beide ausgelegt für den direkten Nachweis erdgroßer Planeten, wären dazu in der Lage gewesen. Leider wurden beide Missionen zwischenzeitlich eingestellt.

Die Existenz von Exokometen und Exoasteroiden gilt demnach als sicher. Doch warum ordnen sich die Kleinkörper überhaupt in Ringsystemen an? Nimmt man wiederum das Sonnensystem zum Vergleich, muss die Antwort lauten: weil sie von den Planeten dazu gezwungen werden. Doch bei Wega und Fomalhaut haben Forscher bislang nur Fomalhaut b gefunden, der knapp innerhalb des äußeren Kometengürtels kreist. Es muss also weitere geben. Im

Sonnensystem sind es Jupiter und Mars, die für die langfristige Stabilität des Asteroidengürtels sorgen; die äußeren Gasplaneten Uranus und Neptun tun dasselbe für den Kuipergürtel. Für Kate Su ist die Entdeckung der Ringe um Wega und Fomalhaut daher ein starker Hinweis darauf, dass auch diese Sterne mehrere Planeten besitzen. Allerdings sind diese wohl nicht viel größer als die Erde, sonst wären sie schon aufgefallen.

Ähnlich niedrig ist die Planetenquote bei den zehn Sternen, in deren Systemen Kometen nachgewiesen wurden; nur bei einem wurde bislang ein Begleiter gefunden. Doch auch hier gilt: Wo das nötige Baumaterial vorhanden ist, existieren mit großer Wahrscheinlichkeit ausgewachsene Planeten.

Streng genommen fehlt bislang aber der Nachweis, dass es sich tatsächlich um »Baumaterial« handelt. Diesen könnte eine Beobachtung von Wissenschaftlern um Sascha Quanz von der ETH Zürich liefern, über die sie jüngst in den »Astrophysical Journal Letters« berichteten (*Astrophysical Journal* 766 L 1, 28. Februar 2013). In der Staubscheibe um den rund 340 Lichtjahre entfernten Stern HD 1100546 hatten sie ein planetenartiges Objekt entdeckt, das gemessen an seiner Masse zu hell leuchtet. Eine mögliche Erklärung könnte lauten, dass fortwährend Kleinkörper aus der Scheibe auf das Objekt stürzen. Trifft diese Interpretation zu – was angesichts vieler ungeklärter Details keineswegs ausgemacht ist –, dann handelt es sich um den ersten noch im Wachstum begriffenen »Protoplaneten«, den Astronomen direkt beobachten konnten.

Su, Welsh und Quanz tragen mit ihren Arbeiten also einiges dazu bei, dass wir nicht nur fremde Sterne und ihre Planeten besser verstehen, sondern auch das Material dazwischen. Und schon jetzt zeichnet sich ab: Diese fremden Welten unterscheiden sich in vielerlei Hinsicht gar nicht so sehr von unserem Sonnensystem.

Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist in Aachen. Auf seinem Blog »Himmelslichter« auf [Scilogs.de](http://Scilogs.de) schreibt er über alles, was am Himmel passiert.

# Botanische Luftüberwachung

Ein flugzeuggestütztes Fernerkundungssystem dokumentiert in bisher beispielloser Auflösung selbst kleinste Veränderungen der Pflanzenwelt.

VON TIM HAARMANN

Gregory Asner hat in seinem Leben viele Bäume gezählt und vermessen. Nur ein Beispiel von vielen: Bei 119 775 Stück im südafrikanischen Krüger-Nationalpark bestimmte er die Größe bis auf den Dezimeter genau, und das gleich doppelt im Abstand von zwei Jahren. Aber Asner und sein damaliger Kollege Shaun Levick von der Carnegie Institution in Stanford (Kalifornien) sind dafür nicht etwa jahrelang mit Karte und Zentimetermaß durch die Savanne marschiert, sondern haben die Bestandsaufnahme innerhalb kürzester Zeit aus der Luft vorgenommen.

Zu Hilfe kam ihnen dabei eines der derzeit modernsten Fernerkundungssysteme: das Carnegie Airborne Observatory (CAO), eine Dornier 228 ausgestattet mit einem LIDAR-System (light detection and ranging), das pro Sekunde 100 000 Infrarotlaserpulse in Richtung Erdboden schickt. Aus dem

reflektierten Licht erstellen die Forscher ein hochpräzises, dreidimensionales Bild der Vegetation. Zwei Jahre später konnten sie dieses mit neuen Aufnahmen vergleichen und selbst kleinste Änderungen Baum für Baum dokumentieren (*Biological Conservation* 157, S. 121–127, 2013).

Typische Pflanzen der afrikanischen Trockensavanne sind einzeln stehende Schirmakazien. Diese wachsen nicht in Wäldern, sondern schlagen bevorzugt dort Wurzeln, wo Termiten zuvor den Boden aufgelockert haben. Ist der Baum dann zu einer gewissen Größe herangewachsen, gedeihen in seinem Schatten weitere Gewächse, was den Nährstoff-

kreislauf und den Wasserhaushalt des Bodens verbessert. Doch diese Mikrohabitate sind ständig bedroht: Elefanten rupfen die Äste der Bäume ab, Buschfeuer brennen sie nieder, und Dürren setzen ihnen zu.

Bislang war das Ausmaß der Gefährdung kaum bekannt, denn der Nationalpark ist schlicht zu groß, um jeden Baum aufzusuchen. Asner dagegen konnte dokumentieren, dass zwischen 2008 und 2010 mehr als 20 000 Bäume mindestens einen Meter an Höhe verloren hatten und 12703 sogar bis auf einen Stumpf abgebrochen waren.

## Luftaufklärung im Regenwald

In dem fliegenden Hightech-Observatorium sind Wissenschaftler seit einigen Jahren in den entlegensten Gegenden der Welt unterwegs, wie etwa im Westen Amazoniens. Dort, wo zum Teil noch nie ein Mensch einen Fuß hingewetzt hat, war ein genauer Blick auf die Vegetation dringend nötig geworden. Denn im Sommer 2005 war fast die Hälfte des sonst fallenden Regens aus-

**Falschfarbenaufnahme tropischer Baumkronen in Panama: Mit einem hochauflösenden Spektrometer analysieren Forscher das von den Pflanzen reflektierte Licht vom ultravioletten bis in den infraroten Wellenlängenbereich. Damit können sie die unterschiedlichen Arten aus der Luft bestimmen.**



GREGORY ASNER, CARNEGIE AIRBORNE OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION FOR SCIENCE

geblieben, während die Temperaturen Rekordwerte erreichten. Biologen befürchteten nachhaltige Schäden des Regenwalds durch die »Jahrhundertdürre«, blieben aber stichhaltige Belege schuldig. Für ihre Untersuchungen waren sie allein auf Satellitenbilder angewiesen – und diese lieferten widersprüchliche Ergebnisse.

Als fünf Jahre später die nächste »Jahrhundertdürre« folgte, waren sie besser vorbereitet: Asner und seine Kollegen hatten zuvor jeden einzelnen Baum auf einer 5000 Quadratkilometer großen Fläche in Peru an der Grenze zu Brasilien vermessen. Als die Ökologen das Gebiet nach dem heißen Sommer 2010 erneut kartierten, stellten sie fest: Jeder 25. Baum hatte die Dürre nicht überlebt; stellenweise war jeder zweite Baum blattlos.

Nicht nur Peru, sondern auch Länder wie Papua-Neuguinea und Madagaskar sind an dieser Form der Luftüberwachung interessiert, weil sie für den Erhalt ihrer üppigen Vegetation – eines bedeutenden Speichers für atmosphärisches Kohlendioxid – Ausgleichszahlungen von Industrieländern erhalten, die große Mengen Treibhausgase produzieren. Was mit Satellitenaufnahmen nur ungenau und zu Land schlechterdings unmöglich ist, leistet das fliegende Observatorium der Forscher aus Stanford. Allein in Kolumbien haben sie aus hochauflösenden Kartierstichproben das Kohlenstoffinventar von 40 Prozent des dortigen Regenwalds berechnet.

### Der fliegende Taxonom

Seit das CAO das erste Mal abgehoben ist, fliegt ein hochauflösendes Spektrometer mit. Das Gerät erfasst das vom Boden ausgestrahlte Lichtspektrum, so dass die Wissenschaftler aus der Luft Chlorophyllgehalt, Wasseranteil, Nährstoffe und viele weitere Kenngrößen der Vegetation untersuchen können. Die Messwerte gleichen sie mit einer Datenbank ab, in der die optischen Eigenschaften von 4700 Pflanzen gespeichert sind; Botaniker hatten hierfür zuvor Proben aus Berg- und Tieflandregenwäldern Perus, Madagaskars und

anderen Weltregionen gesammelt und chemisch analysiert.

Mit der neuesten Version des Spektrometers können die Wissenschaftler inzwischen fast 90 Prozent der Baumarten mancher Gebiete identifizieren, ohne einen Fuß auf den Boden setzen zu müssen. Damit lassen sich mögliche Änderungen der Artenzusammensetzung aus der Ferne dokumentieren. Bereits mit einem älteren Gerät stellten sie bei Flügen über Hawaii fest, dass viele Pflanzen dort deutlich niedrigere Werte für Wasser- und Stickstoffgehalt aufweisen, als dies für die heimische Vegetation der Insel typisch ist: Das legte die Verbreitung einer invasiven Art offen, deren Ausbreitung dann detailliert in kürzester Zeit kartografiert wurde.

Kürzlich war Gregory Asner wieder über der südafrikanischen Savanne unterwegs, denn nicht nur Elefanten, Buschfeuer und Dürren machen der dortigen Vegetation zu schaffen. Die

ländliche Bevölkerung ist zur Energieversorgung darauf angewiesen, der Savanne jährlich mehrere Tonnen Feuerholz zu entnehmen. Wie lange dieses noch reichen wird, zeigt jetzt der Blick aus der Vogelperspektive: 13 Jahre, wenn die Dorfbewohner die bisherige Nutzungsweise beibehalten, besagt eine Anfang des Jahres veröffentlichte Berechnung von Asner und seinen südafrikanischen Fachkollegen (*Environmental Research Letters* 8, Nr. 014007, 2013). Jede Veränderung – zum Guten wie zum Schlechten – können sie mit dem fliegenden Observatorium jetzt in bisher unerreichter Präzision dokumentieren.

**Tim Haarmann** ist promovierter Geograf und freier Wissenschaftsjournalist in Bremen.

Während des Studiums hat er unter vollem Körpereinsatz Baumgruppen in der südafrikanischen Savanne kartiert, erklettert und vermessen – Unterstützung aus der Luft hat er dabei nie erhalten.

## MATERIALWISSENSCHAFT

# DNA-Nanotechnologie vor dem großen Sprung

Das Konstruieren mit DNA-Molekülen entwickelt sich zu einer ernst zu nehmenden Technologie mit ungeahnten Möglichkeiten.

VON MICHAEL GROSS

Schon seit gut 20 Jahren bauen Forscher künstliche Gebilde im Nanometermaßstab, indem sie die natürliche Neigung komplementärer DNA-Stränge zum Aneinanderlagern nutzen. Doch bislang schien dabei meist der Spaß im Vordergrund zu stehen. Von ersten einfachen geometrischen Figuren bis hin zu Paul Rothemunds berühmten Smileys (Bild oben rechts) hatte man oft ein wenig den Eindruck, dass hier Erwachsene mit molekularen Legosteinen spielen.

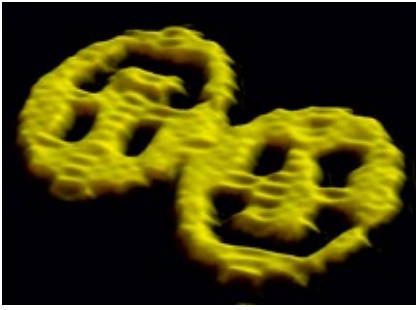
Die Smileys lieferten allerdings einen wichtigen Fortschritt, auf dem man

heute aufbaut: nämlich das Rückgrat eines Objekts aus einem einzelnen, langen DNA-Strang zu bilden, der durch Anlagern von hunderten kurzen »Klammer-Strängen« in der gewünschten Form stabilisiert wird. Nach der japanischen Kunst des Papierfaltens nennt man diese Methode auch DNA-Origami.

Mit ihrer Hilfe konnten Forscher in den letzten Jahren immer größere und komplexere Gebilde bauen, darunter auch bewegliche molekulare Maschinen mit Beinen oder Greifarmen. Einen neuen Meilenstein erreichten jetzt die Arbeitsgruppen von Hendrik Dietz



PAUL W. K. ROTHMUND, CALTECH; RENDERING: NICK PAPADAKIS



Diese Smileys entstanden mit Hilfe der so genannten DNA-Origami-Technik.

und Friedrich Simmel an der Technischen Universität München, die einen funktionierenden Ionenkanal aus DNA konstruierten und näher untersuchten (*Science* 338, S. 932–936, 2012).

Sie nahmen sich dabei das bakterielle Membranprotein  $\alpha$ -Hämolysin zum Vorbild, das andere Forscher bereits umfassend untersucht haben (siehe auch SdW 12/1997, S. 74–79). Bei diesem Protein handelt es sich um eine An-

griffswaffe von Bakterien: Es dringt in die Membran einer anderen Zelle ein und reißt dort eine Öffnung. An den austretenden Nährstoffen kann sich die Mikrobe dann laben.

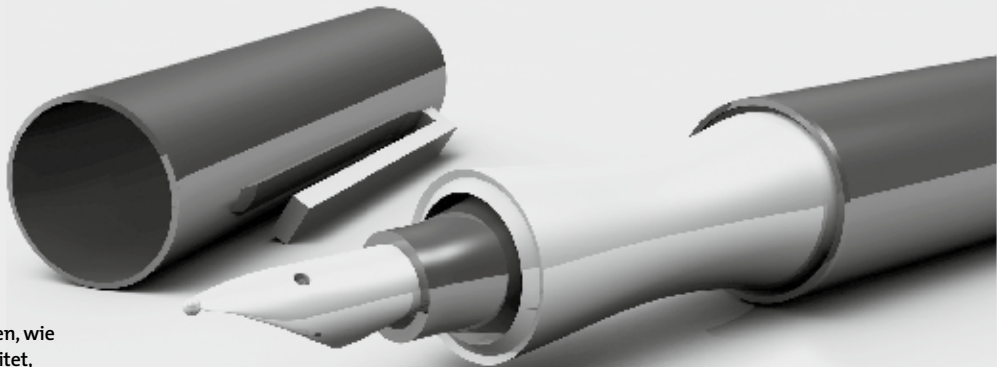
Allerdings gibt es fundamentale Unterschiede zwischen den chemischen Eigenschaften von DNA und Proteinen, weshalb die Ähnlichkeit zwischen der künstlichen DNA-Pore (Bild S. 18 unten) und ihrem natürlichen Vorbild auf die grobe Gestalt beschränkt bleibt. So hat die DNA keine Entsprechung für die Wasser meidenden (hydrophoben) Aminosäuren eines Proteins, über die es sich nahtlos in das hydrophobe Innere einer Zellmembran einfügen kann. Deshalb koppelten die Münchner ihren DNA-Ionenkanal mit einigen Cholesterinmolekülen, die für die Verankerung in der Membran sorgen.

Mit Elektronenmikroskopie konnten die Forscher nachweisen, dass sich die DNA-Pore tatsächlich wie geplant in eine Membran einlagert. Und wenn

sie eine elektrische Spannung an diese anlegten, bewegten sich erwartungsgemäß Ladungen durch den Kanal. Die Pore kann sich auch verschließen, was die Wissenschaftler auf das zufällige Ablösen eines einzelnen DNA-Strangs in ihrem Inneren zurückführten. Zum Testen der Hypothese bauten sie dann bei einer neuen Variante des Gebildes absichtlich einen losen Strang auf der Innenseite ein, worauf sich der Durchgang tatsächlich öfter verschloss als beim ersten Modell. Des Weiteren unterbrechen Moleküle, die sich kurzzeitig in der Pore aufhalten, den Ladungsfluss auf charakteristische Weise, wie es bereits von den Hämolysinporen bekannt ist.

Der Nanotunnel ist nicht das einzige neue Beispiel für DNA-Architektur: Guillermo Acuna und andere an der TU Braunschweig benutzten DNA-Origami, um eine mit zwei Nanopartikeln aus Gold verzierte Antenne auf einem Deckplättchen, wie man es normaler-

## DIE SPEKTRUM-SCHREIBWERKSTATT



Möchten Sie mehr darüber erfahren, wie ein wissenschaftlicher Verlag arbeitet, und die Grundregeln fachjournalistischen Schreibens erlernen?

Dann profitieren Sie als Teilnehmer des Spektrum-Workshops »Wissenschaftsjournalismus« vom Praxiswissen unserer Redakteure.

Weitere Informationen und Anmeldeöglichkeit

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

Workshop-Termine:

17. Mai 2013, 10.00 – ca. 15.00 Uhr

13. Juli 2013, 10.00 – ca. 15.00 Uhr

Ort: Heidelberg

Teilnahmegebühr: € 99,-



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

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

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

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT  
VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

weise zum Mikroskopieren benutzt, zu errichten (*Science* 338, S. 506–510, 2012).

Dem lag die Idee zu Grunde, dass spektroskopische Eigenschaften wie Fluoreszenz in der Nähe von Goldoberflächen verstärkt auftreten (durch die so genannte Plasmonen-Resonanz). Der Effekt wirkt besonders stark, wenn man eine Probe zwischen zwei Goldoberflächen untersuchen kann, die nur einige Nanometer voneinander entfernt sind.

Goldnanopartikel lassen sich mit kurzen DNA-Strängen koppeln, und deren Sequenz kann man dann so wählen, dass sie an eine genau definierte Stelle der Nanoantenne binden. Auf diese Weise brachten die Braunschweiger zwei solche Teilchen auf halber Höhe ihres Antennenmasts an, wobei der Abstand zwischen diesen genau 23 Nanometer betrug. Ein Kompromiss, denn eine geringere Entfernung würde zwar noch stärkere optische Effekte erzeugen, aber den Zutritt für größere Biomoleküle erschweren. Die Forscher konnten so die Fluoreszenz eines Pigments, das sie ebenfalls mittels der spezifischen DNA-Kopplung zwischen den beiden Nanopartikeln platziert hatten, mehr als 100-fach verstärken. Der Effekt ermöglicht es, einzelne Moleküle zu untersuchen, selbst wenn in der umgebenden Lösung andere Moleküle derselben Art in Konzentrationen herumswimmen, wie sie bei biologischen Proben üblich sind.

Bisher stand einem Routineeinsatz der DNA-Nanotechnologie noch die beträchtliche Zeit im Weg, die für die Herstellung nötig ist. Zwar hat Rothemunds Origami-Idee die Produktion von DNA-Gebilden jeglicher Art bereits radikal vereinfacht und dazu geführt, dass man heute beliebig komplizierte Objekte in einem einzigen Reaktionsgefäß durch Selbstorganisation erzeugen kann. Doch die gängige Methode geht von hohen Temperaturen aus, bei denen alle zueinander komplementären Doppelstränge der DNA aufgelöst werden, mit nachfolgender extrem langsamer Abkühlung, die sich über Tage hinziehen kann.

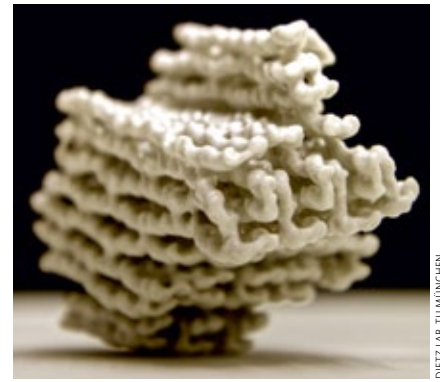
Hendrik Dietz und seine Arbeitsgruppe an der TU München untersuchten diesen Vorgang etwas näher und fanden dabei heraus, dass die entscheidenden Strukturbildungsschritte nur in einem sehr kleinen Abschnitt dieses langen Abkühlungsprozesses stattfinden. Dabei hängt die Übergangstemperatur von der Zusammensetzung des jeweiligen DNA-Bauwerks ab, muss also für jedes neue Design erst einmal ermittelt werden.

**Auf dem Weg zur Massenfertigung**

Hat man diese Information dann aber bei der Hand, kann die selbstständige Anordnung der Moleküle nach einem kurzen Hitzeschock bei konstanter Temperatur und rund 100-mal schneller als bisher üblich ablaufen (*Science* 338, S. 1458–1461, 2012). Einer sehr viel breiteren Nutzung und sogar einer Massenfertigung von Nanoobjekten aus DNA dürfte damit der Weg bereitet sein.

Für zukünftige Anwendungen dieser Technik ist es allerdings auch wichtig zu wissen, ob die DNA-Stränge sich wirklich genau so anordnen wie mit dem Computer vorhergesagt. Bisher hat man zwar mit elektronenmikroskopischen Aufnahmen bestätigen können, dass die angestrebte Form grob erreicht wurde, aber eine hoch aufgelöste Strukturanalyse eines größeren künstlichen DNA-Objekts gab es noch nicht.

Die Arbeitsgruppen von Hendrik Dietz in München und von Sjors Scheres am Laboratory of Molecular Biology in Cambridge haben nun einen DNA-



DIETZ LAB, TU MÜNCHEN

**Modell eines asymmetrischen DNA-Klumpens, dessen Struktur experimentell in hoher Auflösung bestimmt wurde.**

Klumpen eigens zur detaillierten Strukturanalyse entworfen (*Proceedings of the National Academy of Science USA* 109, S. 20012–20017, 2012). Dafür benutzten sie die Kryoelektronenmikroskopie, die hochauflösende Bilder durch Mittelung zahlreicher Aufnahmen erstellt. Entscheidend ist dabei, die Orientierung des Objekts zur Blickrichtung eindeutig zu erkennen.

Die Arbeitsgruppen von Dietz und Scheres konstruierten deshalb ihr DNA-Objekt, das fast doppelt so groß wie ein bakterielles Ribosom ist, bewusst unsymmetrisch, um sicherzustellen, dass es aus jeder Richtung verschieden aussieht. Auf diese Weise gelang es ihnen wirklich, einen hinreichend detaillierten Umriss zu erhalten, in den sie dann die bekannte Sequenz der DNA hineinmodellieren konnten. Damit hatten sie das erste Strukturbild eines künstlichen DNA-Objekts, das sogar einzelnen Atomen ihren genauen Platz zuweist.

Im Großen und Ganzen bestätigte die Analyse die beim Modellieren vorhergesagte Struktur, obwohl es an einigen Stellen zu unerwarteten Verwindungen kam. Durch einen fortgesetzten Dialog zwischen computergestütztem Design und Strukturuntersuchung können die Forscher nun die Vielfalt der durch DNA-Selbstorganisation zugänglichen Nanostrukturen massiv erweitern.

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

LANGEGGER, M. ET AL.: SYNTHETIC LIPID MEMBRANE CHANNELS FORMED BY DESIGNED DNA NANOSTRUCTURES. IN: SCIENCE 338, S. 932–936, 2012. FIG. 1A; ABDRUCK GENEHMIGT VON AAAS / CCC



**Künstlicher Ionenkanal aus DNA. In der Zeichnung ist der hydrophobe Teil, der die Membran durchspannt, rot markiert.**

# Weibliches Mikrobiom steigert Risiko für Autoimmunleiden

Viele Autoimmunerkrankungen treffen Frauen deutlich häufiger als Männer. Hierfür könnten Mikroorganismen im Darm verantwortlich sein, denn sie beeinflussen den Testosteronspiegel.

VON MAREN EMMERICH

**K**aum ein biologisches Forschungsgebiet fordert derzeit mehr zum Umdenken heraus als die Beziehung zwischen Mensch und Mikrobe. Ein Großteil der etwa 100 Billionen Bakterien, Pilze und anderen einzelligen Organismen, die der Körper eines Menschen beherbergt, sind keineswegs Krankheitserreger. Im Gegenteil: Das Mikrobiom – so bezeichnen Biologen die bunte Mischung der Kleinstlebewesen im Körper inklusive ihrer Gene – trägt entscheidend zum Wohlergehen seines Wirts bei. Seit einem guten Jahrzehnt häufen sich wissenschaftliche Belege für verschiedenste gesundheitsfördernde Einflüsse unserer winzigen Untermieter. So kann der richtige Bakterienmix vor Fettleibigkeit schützen, und auch mit der Entstehung von Allergien

haben Biologen das Mikrobiom bereits in Zusammenhang gebracht (siehe auch SdW 11/2012, S. 26 und 1/2013, S. 30). Als Drahtzieher für Letzteres gelten Darmkeime, die das Zuckermolekül Polysaccharid A produzieren: Es beruhigt das Immunsystem, indem es die Produktion regulatorischer T-Zellen anregt, die aggressiven Abwehrzellen Einhalt gebieten.

Wie ein internationales Forscherteam um Jayne S. Danska von der University of Toronto jetzt herausgefunden hat, scheinen die Mikroorganismen im Darm aber noch einen weitaus größeren Effekt zu haben, der sich auf die Anfälligkeit für Autoimmunerkrankungen auswirkt: Sie beeinflussen, wie viel Testosteron der Körper produziert. Die Konzentration des Sexualhormons wiederum korreliert direkt mit der Wahrscheinlichkeit, an Typ-1-Diabetes zu erkranken – zumindest bei Mäusen (*Science* 339, 1. März 2013, S. 1084–1088).

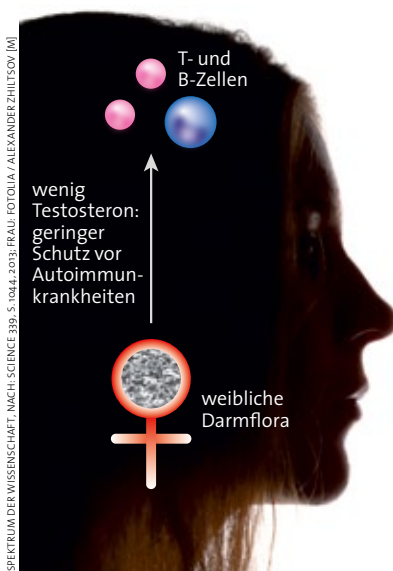
Die Forscher, darunter auch Ulrike Rolle-Kampczyk und Martin von Bergen vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung in Leipzig, untersuchten das Phänomen anhand einer Mauslinie, bei der eigene Immunzellen die Insulin produzierenden Betazellen der Bauchspeicheldrüse zerstören. Die Folge: Mit 40 Wochen, also als Erwachsene, leiden durchschnittlich 40 Prozent der männlichen und über 80 Prozent der weiblichen Tiere an Typ-1-Diabetes, dem so genannten juvenilen Diabetes. Als die Mäuse jedoch in steriler Umgebung aufwuchsen, somit ohne Darmbakterien lebten, erkrankten zum Erstaunen der Forscher beide Geschlechter etwa gleich oft, zu rund 60 Prozent.

Außerdem waren die Testosteronspiegel von männlichen und weiblichen Tieren deutlich angenähert – während sie normalerweise stark auseinanderklaffen. Nachforschungen ergaben, dass die Zusammensetzung der Mikroorganismen in früher Jugend, auch direkt nach der Entwöhnung von der Mutter mit etwa drei Wochen, noch weitgehend übereinstimmt. Erst in der Pubertät, die im Alter von rund sechs Wochen einsetzt, bauen sich langsam geschlechtsspezifische Unterschiede auf. Das Auseinanderdriften stagniert erst, wenn die Mäuse mehrere Monate alt und ausgewachsen sind.

Als Nächstes übertrugen die Forscher keimfrei gehaltenen drei Wochen alten Mäuseweibchen Darmflora von ausgewachsenen Mäusen. Stammte das Mikrobiom von einem Männchen, dann entwickelten die jungen Weibchen vorübergehend eine ganz eigene, weder typisch männliche noch typisch weibliche Mikrobienzusammensetzung. Die blieb gut zwei Monate lang stabil, war aber im Alter von 34 Wochen einer typisch weiblichen Darmflora gewichen. Von diesen Weibchen erkrankten im frühen Erwachsenenalter nur knapp 40 Prozent an Diabetes. Dagegen wurden über 80 Prozent der Weibchen, die weibliche Darmflora bekommen hatten, zuckerkrank.

Die Behandlung mit einem männlichen Mikrobiom spiegelte sich anfangs in etwas erhöhten Testosteronwerten. Sie waren jedoch viel niedriger als bei Männchen und beeinflussten auch später nicht die Fortpflanzung. Anscheinend wirkt somit das männliche Geschlechtshormon in der Jugend der Entstehung von insulinabhängigem Diabetes direkt entgegen. Denn wenn die Empfängerinnen männlicher Darmbakterien zusätzlich einen Testosteronhemmstoff erhielten, erkrankten sie später ebenso häufig wie ihre nicht manipulierten Geschlechtsgenossinnen.

Noch können die Wissenschaftler nicht erklären, wie das männliche Hormon die Anfälligkeit für diese Autoimmunkrankheit drosselt – und mutmaßlich auch für andere solche Leiden. Bekannt ist allerdings, dass Testosteron generell Entzündungsreaktionen



Anders als die männliche Darmflora erhöht die weibliche nicht den Testosteronlevel, der vor Autoimmunleiden schützt.

## Schlechte Zeiten für Genies?

**Die Wissenschaft steht angeblich vor dem Ende – wieder einmal.**

**A**ls der Abiturient Max Planck 1874 sein Interesse für Physik bekundete, riet ihm ein Münchener Professor dringend ab: In dem Fach sei schon so gut wie alles entdeckt. Planck hörte nicht darauf – und wurde zum Urheber der Quantenphysik, die das physikalische Weltbild von Grund auf umkremelte.

In regelmäßigen Abständen entsteht immer wieder der Eindruck, die Naturwissenschaft sei im Wesentlichen fertig. Derzeit gibt sich der britische Theoretiker Stephen Hawking in seinen populären Bestsellern überzeugt davon, die Theorie von Allem sei zum Greifen nah.

Träfe das zu, so brächen für künftige Genies vom Kaliber Newtons oder Einsteins schwere Zeiten an. Angenommen, heute geborene Höchstbegabte widmeten ihr Leben einer Grundlagenphysik, deren fundamentale Theorie soeben fertig geworden wäre: Die Tragik der späten Geburt würde ihr Schicksal prägen. Wer weiß, vielleicht wäre Einstein in dieser Situation Angestellter beim Schweizer Patentamt geblieben.

Einen von diesem tristen Szenario hergeleiteten Fall sekundärer Endzeittragik präsentiert nun der amerikanische Psychologe Dean Keith Simonton – nämlich sich selbst. Er studiert seit mehr als 30 Jahren das Phänomen des wissenschaftlichen Genies, hegt aber seit einiger Zeit die Befürchtung, dass sein Forschungsgegenstand mangels nachwachsender Exemplare verschwinde (*Nature* 493, S. 602, 2013).

Provokant fragt er: Wo bitte sind die zeitgenössischen Koryphäen vom Schlage Einsteins, Galileis und Darwins? Die drei hätten ganz neue Forschungsgebiete kreiert – Relativitätstheorie, Astrophysik, Evolution –, während heute der größte Erfolg darin bestehe, die Existenz des schon vor Jahrzehnten theoretisch vorhergesagten Higgs-Teilchens zu bestätigen.

Um seine pessimistische Prognose einer genialen Zukunft zu untermauern, behauptet Simonton, in praktisch allen Naturwissenschaften fehle gegenwärtig jener kritische Zustand, der erfahrungsgemäß einem Paradigmenwechsel vorausgeht. Bekanntlich schlug Einsteins große Stunde, als die Ätherhypothese – wonach eine mechanische Substanz als Träger elektromagnetischer Wellen fungiert – experimentell widerlegt und eine völlig neue Verbindung zwischen Elektromagnetismus und Mechanik nötig wurde.

**Herrscht heute wirklich nirgendwo solch ein kritischer Zustand?** Lassen Sie mich dazu in aller Bescheidenheit auf ein paar nicht ganz nebensächliche Tatbestände hinweisen. Wie wir erst seit einigen Jahren wissen, dehnt sich das Universum beschleunigt aus, offenbar angetrieben von einer ominösen Dunklen Energie. Außerdem steuert unsichtbare Dunkle Materie die Bewegungen der Galaxien; auch von ihr wissen wir praktisch nichts. Damit ist uns das All neuerdings zu 95 Prozent rätselhaft – ganz zu schweigen von den fünf Prozent »normaler Materie«, für die noch längst keine umfassende Theorie in Sicht ist, die alle Naturkräfte vereint.

Für Genies ein weites Feld, möchte ich meinen. Übrigens ragte selbst ein Jahrhunderttheoretiker wie Einstein nicht als singulärer Leuchtturm aus dem Meer seiner Fachkollegen. Bei der allgemeinen Relativitätstheorie waren ihm der deutsche Mathematiker David Hilbert und der Franzose Henri Poincaré dicht auf den Fersen. Galilei wiederum hatte Kopernikus gelesen und bekam ein Fernrohr aus Holland. Und Charles Darwin schrieb sein Hauptwerk erst, als Alfred Russel Wallace sich anschickte, die gleiche Theorie zu publizieren. Die Naturforschung war nie ein Geschäft für einsame Genies. Wir sollten die Hoffnung auf weitere Revolutionen also nicht aufgeben.



Michael Springer

hemmt. Die Beteiligung der Mikroorganismen verstehen die Forscher besser: Darmmikroben beeinflussen die Testosteronbildung direkt, indem sie Vorgängersubstanzen aus dem Körper des Wirts in das Geschlechtshormon umwandeln. Noch nicht bewiesen ist die These, dass die Darmkeime den Hormonspiegel zusätzlich indirekt durch Substanzen steuern, die eine Synthese oder den Abbau von Testosteron ankurzeln beziehungsweise hemmen.

### Mikrobenezufuhr zur Vorbeugung

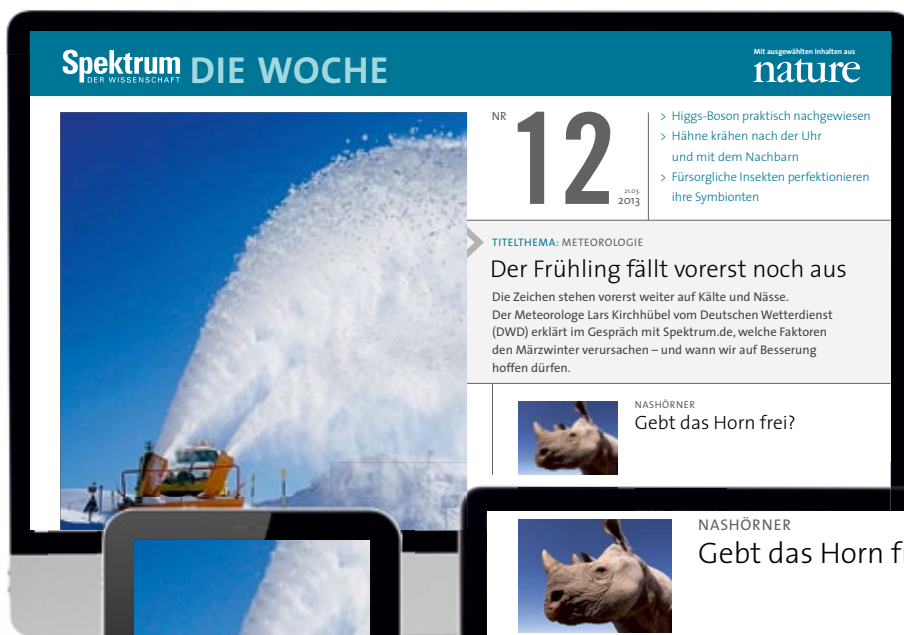
Beim Menschen leiden ähnlich viele Männer wie Frauen an insulinabhängigem Diabetes. Trotzdem könnte der beschriebene Zusammenhang auch auf uns zutreffen. Allerdings erkrankten die meisten Typ-1-Diabetiker schon im Kindesalter, also bevor sich die Testosteronspiegel auseinanderentwickeln und ein geschlechtstypisches Darmmikrobiom entsteht.

Von manchen anderen Autoimmunerkrankungen sind Frauen tatsächlich viel öfter betroffen als Männer, etwa von multipler Sklerose, rheumatoider Arthritis und Lupus erythematoses. Falls sich die neuen Erkenntnisse auch für Menschen bestätigen, könnten sich Risikopatienten zukünftig vielleicht einer Mikrobentherapie unterziehen. Eine Optimierung des einflussreichen Bakterienmixes im Darm hätte gegenüber einer Behandlung mit Testosteron den Vorteil, direkt an der Ursache des Problems anzusetzen.

Denkbar wäre etwa, nützliche Bakterienspezies so zu verkapseln, dass sie die Magenpassage überstehen und sich im Darm ansiedeln. Im Anschluss an Antibiotikabehandlungen und als Therapie gegen chronische Infektionen mit dem Bakterium *Clostridium difficile* bewähren sich Stuhltransplantationen bereits in klinischen Tests (*New England Journal of Medicine* 10.1056/NEJMoa1205037, 2013). Unsere Einstellung zu den Mikroben gewinnt tatsächlich ganz neue Dimensionen.

**Maren Emmerich** ist Mikrobiologin und forscht derzeit in Uppsala als Postdoc an der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften.

## Deutschlands erstes digitales, wöchentliches Wissenschaftsmagazin



### Jetzt jeden Donnerstag

- mit mehr als 40 Seiten News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung
- im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- jederzeit kündbar
- mit exklusivem Artikel aus **nature** in deutscher Übersetzung



Infos und Bestellmöglichkeit:

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



Bob Massie



Scott Wafrock

BEIDE FOTOS: RICHARD RENALDI

## MEDIZIN

# HIV unter Kontrolle

Einige HIV-Infizierte erkranken nicht an Aids: Dank einer genetischen Besonderheit hält ihr Immunsystem das Virus jahrzehntelang in Schach. Diesen starken Abwehrmechanismus möchten Forscher nun bei anderen Patienten gezielt hervorrufen.

Von Bruce D. Walker

**A**nfang 1995 kam Bob Massie zu mir in die Aids-Ambulanz am Massachusetts General Hospital in Boston. Der Mann erzählte, seit 16 Jahren sei er mit dem HI-Virus infiziert, aber noch niemals habe er davon irgendwelche Symptome verspürt. Ich untersuchte ihn gründlich: Er war in dieser Hinsicht tatsächlich gesund. Von der Immunschwäche Aids keine Spur.

Damals waren die meisten Menschen, die das Virus so lange trugen, aidskrank, wenn sie nicht schon an den Folgen gestorben waren. Wegen ihrer viel zu schwachen Abwehrkräfte litten sie an diversen Infektions- und Krebserkrankungen. In jenen Jahren erprobten Ärzte bei HIV-Infizierten bereits einen neuen Medikamentencocktail, der den langsamen Niedergang der Immunkräfte abbremsen sollte. Doch Bob Massie hatte solche Medikamente nie eingenommen. Nun glaub-

te er fest, wenn ich herausfände, wieso ihm das Virus nichts ausmache, ließen sich daraus Behandlungen für andere Betroffene entwickeln.

Massie litt an Hämophilie, der Bluterkrankheit: Ihm fehlte ein Gerinnungsfaktor, weshalb er häufig Bluttransfusionen benötigte. Seinerzeit griff man dafür auf Blutspenden zurück, die jedoch noch nicht auf HIV getestet wurden. Entsprechend waren damals fast alle Bluterkranken mit dem Virus infiziert. Heute werden die Gerinnungsfaktoren künstlich hergestellt.

In Massies Fall hatten Forscher schon früh Blutproben im Rahmen einer Studie aufbewahrt. Wie diese zeigten, hatte er sich bereits 1978 infiziert, einige Jahre bevor Mediziner Anfang der 1980er Jahre überhaupt auf Aids aufmerksam wurden. Die Viruszahl war aber über all die Jahre in sämtlichen



Doug Robinson



Loreen Willenberg

seiner Blutproben verschwindend gering geblieben, wie auch noch bei der Untersuchung 1995. Seine immunologischen Abwehrkräfte schienen in Ordnung zu sein.

Mit diesem Mann sah ich zum ersten Mal einen HIV-Infizierten, dessen Immunsystem das Virus offensichtlich von ganz allein unter Kontrolle hielt. Doch handelte es sich nicht um einen Einzelfall. Ich stellte bald fest, dass Mediziner bereits in den frühen 1990er Jahren in Kalifornien, Maryland, Italien und Frankreich vereinzelt auf solche Ausnahmepatienten gestoßen waren und nach den Gründen forschten. Als wir unsere Beobachtungen austauschten, erkannten wir bei den Betroffenen zwei unterschiedliche Verlaufsformen. Die Mehrzahl von ihnen bekämpfte das Virus zwar unge-

**Vier Menschen, deren Immunsystem sie vor Aids schützt: Bob Massie ist seit 34 Jahren mit HIV infiziert. Scott Wafrock trägt das Virus seit 26 Jahren. Doug Robinson erfuhr 2003, dass er infiziert ist. Loreen Willenberg lebt seit 20 Jahren problemlos mit dem Aidserreger.**

wöhnlich lange gut, erkrankte aber schließlich doch an Aids. Aber eine deutlich kleinere Gruppe, zu der Massie gehört, blieb auch nach vielen Jahren noch gesund. Erstere nennen wir englisch »long term nonprogressors« (Langzeit-Nichtfortschreitende), letztere »elite HIV controllers« (Elitekontrollleure).

Diese beiden Gruppen sind wohlgermerkt mit HIV infiziert, was sich anhand genetischer Spuren nachweisen lässt. Im Unterschied dazu gibt es einige wenige Menschen, die sich mit dem Virus gar nicht erst anstecken können, weil ihre Zellen wegen einer Mutation von vornherein gegen sein Eindringen gefeit sind (siehe SdW 5/2012, S. 34). Von diesen ist hier nicht die Rede.

Aber was läuft im Körper der trotz HIV-Infektion anscheinend dauerhaft Geschützten anders als bei den meisten Menschen? Wie vermag der Organismus die Viruslast so gering zu halten, dass teilweise keine vollständigen Viren mehr zu finden sind? Die Hoffnung ist natürlich, diese Eigenschaft auch anderen HIV-Patienten zugutekommen zu lassen – in Form einer Impfung oder einer anderen Therapieform, die dem Immunsystem deutlich mehr Abwehrkraft gegen das Virus verleiht, statt wie bislang nur den Erreger mit Medikamenten zu schwächen.

**AUF EINEN BLICK**

**KEIN AIDS TROTZ HIV**

**1** Von 300 HIV-Infizierten vermag im Schnitt einer, das Aidsvirus **ohne antivirale Medikamente** so wirksam zu bekämpfen, dass er jahrzehntelang gesund bleibt. Oft ist das Virus selbst nicht einmal mehr nachweisbar.

**2** Diese **HIV-Elitekontrollleure** profitieren von einer genetischen Mutation, die einen wichtigen Immunrezeptor verändert: genau gesagt eine Tasche im HLA-Molekül, das darin HIV-Stücke auf infizierten Zellen präsentiert. So erkennen zerstörerische Immunzellen vom Feind befallene Zellen besser.

**3** Die Erkenntnisse lassen auf neue Behandlungen für andere Infizierte hoffen. Das könnte auch weitere **Infektionskrankheiten** betreffen und sogar Krebstherapien.

Von den heute weltweit schätzungsweise 33 Millionen HIV-Infizierten haben gegenwärtig über sechs Millionen Zugang zu spezifischen antiviralen Präparaten. Aber diese Behandlung hat nicht nur starke Nebenwirkungen, sie heilt auch nicht. Deswegen müssen die Patienten die Mittel lebenslang einnehmen, denn das Virus bleibt im Körper und meldet sich zurück, wenn die Therapie aussetzt. Eine flächendeckende jahrzehntelange medikamentöse Versorgung aller HIV-Patienten dürfte sehr schwierig werden. Schon jetzt gelingt in vielen Ländern keine ausreichende Betreuung. Umso dringlicher suchen die Wissenschaftler nach besseren Lösungen. Im Idealfall ließen sich damit Neuinfektionen mit dem Virus verhüten, und Personen, die es sich zugezogen haben, würden nicht mehr erkranken.

### Warum Antikörper auf Dauer nicht genügen

In 20 Jahren Forschung an Menschen wie Bob Massie sind meine Kollegen und ich ein gutes Stück vorangekommen. Wir fanden heraus, wieso und an welcher Stelle ihr Immunsystem ungewöhnlich funktioniert. Es handelt sich um einen veränderten molekularen Mechanismus, von dem wir hoffentlich lernen werden, wie sich Aids besser vorbeugen und behandeln lässt. Diese Befunde könnten letztlich sogar dazu verhelfen, das Immunsystem auch gegen diverse andere Infektionen zu stählen – und vielleicht sogar gegen manche Krebsarten (siehe auch SdW 3/2012, S. 24).

Bei »normalen« HIV-Infizierten bleibt das Immunsystem durchaus nicht passiv. Auch bei ihnen kämpft es in der Anfangsphase direkt nach der Ansteckung meist heftig. Dabei werden gegen das Virus nach einiger Zeit wie bei anderen Infektionen massenhaft Antikörper gebildet. Nur gelingt es ihnen bei diesem speziellen Erreger leider nicht, das Virus wieder zu eliminieren – nicht einmal den Elitekontrollleuren.

Aber dem Immunsystem stehen noch andere Waffen zur Verfügung. Wie es eine Infektion ohne gute Antikörper bekämpft, ist recht verwickelt und noch nicht in allen Einzelheiten verstanden. Im Zentrum stehen dabei zwei Immunzellsorten, die so genannten T-Helferzellen (CD4<sup>+</sup>-Zellen) und die zytotoxischen T-Zellen oder T-Killerzellen (auch CD8<sup>+</sup>-Zellen genannt). Unverzichtbare Mitspieler sind zudem die HLA-Rezeptoren, die menschlichen Leukozytenantigene (Histokompatibilitäts- oder Gewebeverträglichkeitsantigene).

Viren, also auch HIV, können sich ohne fremde Hilfe nicht vermehren. HIV muss Zellen befallen, deren biochemischen Apparat unter seine Kontrolle bringen und sie zwingen, Material für neue Viren herzustellen. Allerdings verfügen Zellen über ein Frühwarnsystem, das dem Körper ihre Infektion meldet: Schon Stunden nachdem eine Zelle infiziert wurde, schickt sie Stücke der fremden Proteine, die sie produzieren muss, an ihre Oberfläche. Dort stellen spezialisierte HLA-

Rezeptoren das Fremdmaterial zur Schau. Andere Teile des Immunsystems werden hierauf schnell aufmerksam. Die T-Helferzellen mobilisieren nun eine Gruppe von zytotoxischen T-Zellen und trimmen diese darauf, gezielt HIV-infizierte Zellen zu vernichten (siehe Kasten S. 26/27 oben).

Daneben veranlassen die aktivierten Helferzellen auch die – deutlich langsamere – Produktion von Antikörpern gegen das Virus durch weitere Immunzellen. Diese Antikörper spüren den Erreger, der von den befallenen Zellen vermehrt und freigesetzt wurde, anhand bestimmter seiner Bestandteile auf. Daraufhin schlagen sie Alarm und rufen damit eine andere Abwehrphalanx herbei, die ihrerseits die Infektion bekämpft und solche Störenfriede eigentlich endgültig loswerden soll.

Aber warum funktioniert die Antikörperstrategie gerade beim HI-Virus nicht ausreichend? Sie hilft schließlich gegen die meisten Viren recht zufrieden stellend. Die Antwort: Der Aidserreger bedient sich eines besonderen Sabotageakts, mit dem er das Immunsystem allmählich lahmlegt und schließlich besiegt. Er infiziert nämlich bevorzugt ausgerechnet die unverzichtbaren T-Helferzellen – und dabei auch ihre speziell auf ihn getrimmte Fraktion. Hierdurch richtet er mit der Zeit direkt wie indirekt immer mehr dieser Immunzellen zu Grunde, also durch seine eigene Vermehrung und durch das Anlocken von Killerzellen.

Die Helferzellen könnte man als Generäle des Immunsystems bezeichnen, die Killerzellen als ihre Fußtruppen. Indem das HI-Virus die Befehlsgeber angreift, untergräbt es die Schlagkraft

**»Die T-Helferzellen könnte man als Generäle des Immunsystems bezeichnen, die T-Killerzellen als seine Fußsoldaten«**

des Heers. Einfach gesagt infiziert dieser Erreger das Immunsystem selbst, und das kann für den Organismus auf Dauer nicht gut ausgehen. Denn er verliert schließlich nicht nur seine Kampfkraft gegen dieses Virus, sondern überhaupt gegen Krankheitserreger.

Als ich Bob Massie kennen lernte, untersuchte meine Forschergruppe gerade die Rolle von zytotoxischen T-(Killer-) Zellen beim Kampf gegen eine HIV-Infektion. Von daher nahmen wir an, dass bei diesem Mann die im Blut zu messende Killerzellreaktion ungewöhnlich stark ausgeprägt sein musste – vorausgesetzt, es war wirklich sein Immunsystem, welches das Virus in Schach hielt. Wir nahmen ihn in eine laufende Studie auf, und wie sich zeigte, war die Reaktion der Fußsoldaten auf das Virus bei ihm tatsächlich stärker, als wir es je zuvor bei anderen Probanden gemessen hatten. Sein Immunsystem verfügte offenbar über eine große, speziell für den Kampf gegen HIV gerüstete Infanterie. Insoweit passte der Befund zu unserer Hypothese. Doch wie wir wussten, kommen starke Killerzellreaktionen mitunter auch bei HIV-Infizierten vor, die schließlich doch an Aids erkranken – als sei die Infanterie der Betroffenen zwar mann-, aber nicht besonders kampfstark.



## Einkreisen eines verantwortlichen Gens

**Umfangreiche Vergleiche der DNA** von mehreren tausend HIV-Infizierten, darunter vielen Elitekontrollleuren, führten Mediziner auf die Spur eines zentralen Immunerkennungsmoleküls – eines HLA-Rezeptors.

Von jedem Probanden wurden **1,3 Millionen SNPs** (»snips«) bestimmt: Positionen im DNA-Strang, an denen sich ein Baustein (Nukleotid) bei individuellen Menschen unterscheidet.



Bei den HIV-Elitekontrollleuren fanden sich zunächst **300 markante Abweichungen**.



Nach weiteren Eingrenzungen blieben davon **vier voneinander unabhängige SNPs** übrig. Sie liegen alle in der Nähe eines Abschnitts von Chromosom 6 für Gene des HLA-Systems, das für die Immunerkennung wesentlich ist.



Letztlich führten die Analysen zu **einem zentralen Protein**, mit dessen Hilfe Immunzellen HIV-infizierte Zellen aufspüren. Wegen seiner leicht **veränderten** Struktur erkennen zerstörerische T-Zellen letztere leichter.



Das brachte uns auf eine zweite Hypothese. War Massies Killerzellreaktion vielleicht deswegen so ausgeprägt, weil seine Helferzellen genau die richtigen, das heißt spezifischen Anweisungen erteilten? Funktionierten also auch die Befehlsgeber besonders effektiv und zielgerichtet? Dann wären sowohl die Generäle wie die Fußsoldaten auffallend gut für den Kampf gegen HIV geschult.

### **Chancenlos im Abwehrkampf, wenn der Generalstab ausgelöscht wird**

Mitte der 1980er Jahre hatte ich darüber geforscht, in welcher Weise T-Helferzellen wohl die spezifische Immunantwort gegen HIV koordinieren. Meine Kollegen und ich hatten damals in Blutproben von Dutzenden Aidspatienten nach Anhaltspunkten für eine solche gezielte Steuerung gesucht. Doch wir fanden beim besten Willen keinerlei Anzeichen für eine koordinierte Gegenwehr durch Helferzellen – als sei das Immunsystem schlicht nicht dazu fähig, dieser besonderen Bedrohung zu begegnen. Es gab einfach keine spezifischen Helferzellen gegen HIV. Jenes Manko im Generalstab schien die offenkundigste Lücke in der Abwehrphalanx bei einer solchen Infektion zu sein.

Bob Massie erwies sich auch in der Hinsicht als Ausnahme. Denn als wir den früheren Untersuchungsansatz wieder aufgriffen und bei ihm anwendeten, zeigte sich, dass der Generalstab seines Immunsystems bestens besetzt war. Nicht nur wies der Mann überhaupt speziell auf HIV abgerichtete Helferzellen auf – er besaß sogar riesige Mengen davon. Dieser Befund, den wir 1997 im Fachblatt »Science« veröffent-

lichten, veränderte unsere Sichtweise auf HIV grundlegend. Denn er bedeutete, dass das menschliche Immunsystem unter bestimmten Bedingungen anscheinend durchaus die Oberhand über das fatale Virus gewinnen kann. Eine entscheidende Voraussetzung für die Durchschlagskraft der Fußtruppen, also der zytotoxischen T-Zellen, war demnach wohl wirklich ein starker, unverwüchtlicher Stab an T-Helferzellen.

Wie so oft in der Forschung warf diese Einsicht viele neue Fragen und Hypothesen auf. Massie gehörte wie gesagt nicht zu den wenigen Menschen, die aus genetischen Gründen von vornherein resistent gegen eine Ansteckung mit HIV sind, weil es sich in ihrem Körper nicht vermehren kann. Bei diesen Leuten hindert ein schadhafter Rezeptor auf den Zellen das Virus schon daran, sie überhaupt zu befallen. Doch unser Proband hatte sich infiziert, und in seinem Blut war nach wie vor genetisches Material des Erregers nachweisbar. Seine Abwehrkräfte hatten es demnach trotz allem nicht vermocht, das Virus völlig zu eliminieren.

Man hätte bei Massie annehmen können, dass er generell eine starke Abwehrkraft besaß oder zumindest eine gegen Viren aller Art – nur war das leider nicht der Fall. So litt er etwa an Hepatitis C, ebenfalls eine Folge der vielen Transfusionen von Blutprodukten. Diese Infektion vermochte sein Organismus überhaupt nicht unter Kontrolle zu bringen, weswegen er vor einigen Jahren eine neue Leber erhielt. Der Eingriff heilte ihn übrigens nicht nur von der Hepatitis, sondern auch von seiner Bluterkrankheit – weil die Leberzellen den fehlenden Gerinnungsfaktor produzieren.

Wir überlegten auch, ob alle HIV-Infizierten anfangs vielleicht doch spezifische T-Helferzellen bilden, die nur sogleich wieder ausgemerzt werden. Falls dem so wäre, könnte man die wertvollen Befehlsgeber unterstützen, indem man die Virusvermehrung sehr früh mit scharfen Medikamenten praktisch total unterdrückt. Das gäbe dem Immunsystem am Anfang der Infektion genügend Zeit, solche spezifischen Helferzellen herauszubilden und sie die Oberhand gewinnen zu lassen. Vielleicht genügte das ja, damit sie auf Dauer erhalten blieben.

### Verborgene Kräfte der Immunabwehr trickreich herausgelockt

Die Idee erprobten wir in einer kleinen Studie mit einigen Dutzend freiwilligen Teilnehmern. Wie erwartet senkte die frühzeitige Behandlung die Viruskonzentration rasch unter die Nachweisgrenze – und innerhalb weniger Wochen traten massenhaft Helferzellen auf, die zytotoxische T-Zellen gezielt anweisen konnten, gegen mit HIV infizierte Zellen vorzugehen. Demnach vermag es das Immunsystem normalerweise durchaus, Generäle gegen HIV heranzubilden, wartet also mit den entsprechenden T-Helferzellen auf. Nur werden diese offenbar in den meisten Fällen unverzüglich vernichtet.

Langfristig heilte die Manipulation die Patienten jedoch nicht. Das zeigte sich, als wir die Behandlung bei einigen von ihnen mit ihrer Einwilligung sowie der Zustimmung einer Ethikkommission vorübergehend für ein Jahr oder länger einstellten. Daraufhin nahm bei den meisten von ihnen die Viruslast allmählich wieder zu, so dass sie erneut unterdrückende Medikamente benötigten. Doch immerhin konnten wir im Jahr 2000 in der Fachzeitschrift »Nature« schreiben, dass es Möglichkeiten gibt, die Kontrolle des Körpers über HIV zumindest zeitweise zu verbessern. Und zwar lassen sich die gleichen Immunmechanismen ankurbeln, die Leuten wie Massie von Natur aus zur Verfügung stehen.

Das eigentliche Ziel musste aber sein, die Verbesserung möglichst lange aufrechtzuerhalten, damit die Patienten selbst das Virus auf Dauer effektiv bekämpfen. Uns wurde klar, dass wir die Forschungen ganz neu, vor allem viel breiter ausrichten mussten. Statt nur die Aktionen und das Schicksal der verschiedenen Immunzellen zu untersuchen, wollten wir herausfinden, worauf die ungewöhnliche Immunreaktion eines Elitekontrolleurs letztlich beruht.

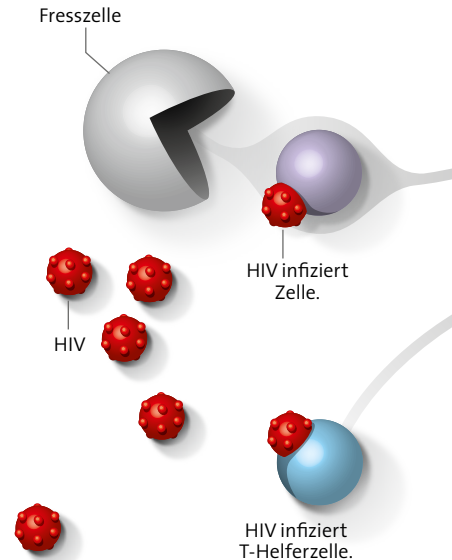
Mehrere Zufälle und glückliche Umstände kamen uns zu Hilfe. Bei einem Arbeitessen an der Harvard University lernte ich Eric Lander kennen, einen der führenden Genomforscher, der auch das Humangenomprojekt maßgeblich vorangebracht hatte. Heute arbeitet er am Massachusetts Institute of Technology (MIT), damals leitete er das frisch gegründete Broad Institute in Cambridge (Massachusetts). Ich wollte diesen Fachmann schon länger kontaktieren, denn er wusste gut darüber Bescheid, wie sich die neuesten Fortschritte in der Humangenetik in der medizinischen Forschung verwenden ließen (siehe auch SdW 2/2011, S. 34).

Lander kannte Bob Massie; sie hatten zusammen an der Princeton University (New Jersey) studiert. Er erzählte mir,

## Was HIV-Elitekontrolleure stark macht

**Im Normalfall schwindet die Anzahl der unverzichtbaren T-Helferzellen rasch**, weil HIV genug Zeit hat, sich zu vermehren und sie zu infizieren (oben). Aber einigen Menschen bleiben stets genügend solcher Helferzellen erhalten, denn infizierte Zellen werden von zytotoxischen T-Zellen viel schneller als normal aufgespürt und zerstört – so dass der Erreger wenig Chancen hat, sich zu vermehren und weitere Zellen zu befallen (unten).

**1** Anfänglich attackieren patrouillierende Fresszellen des Immunsystems, etwa Makrophagen, mit HIV infizierte Zellen, die Virusproteine herstellen.

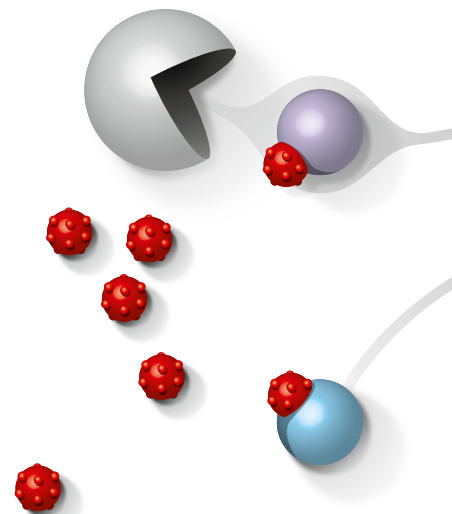


### KAMPF MIT NORMALEN MITTELN

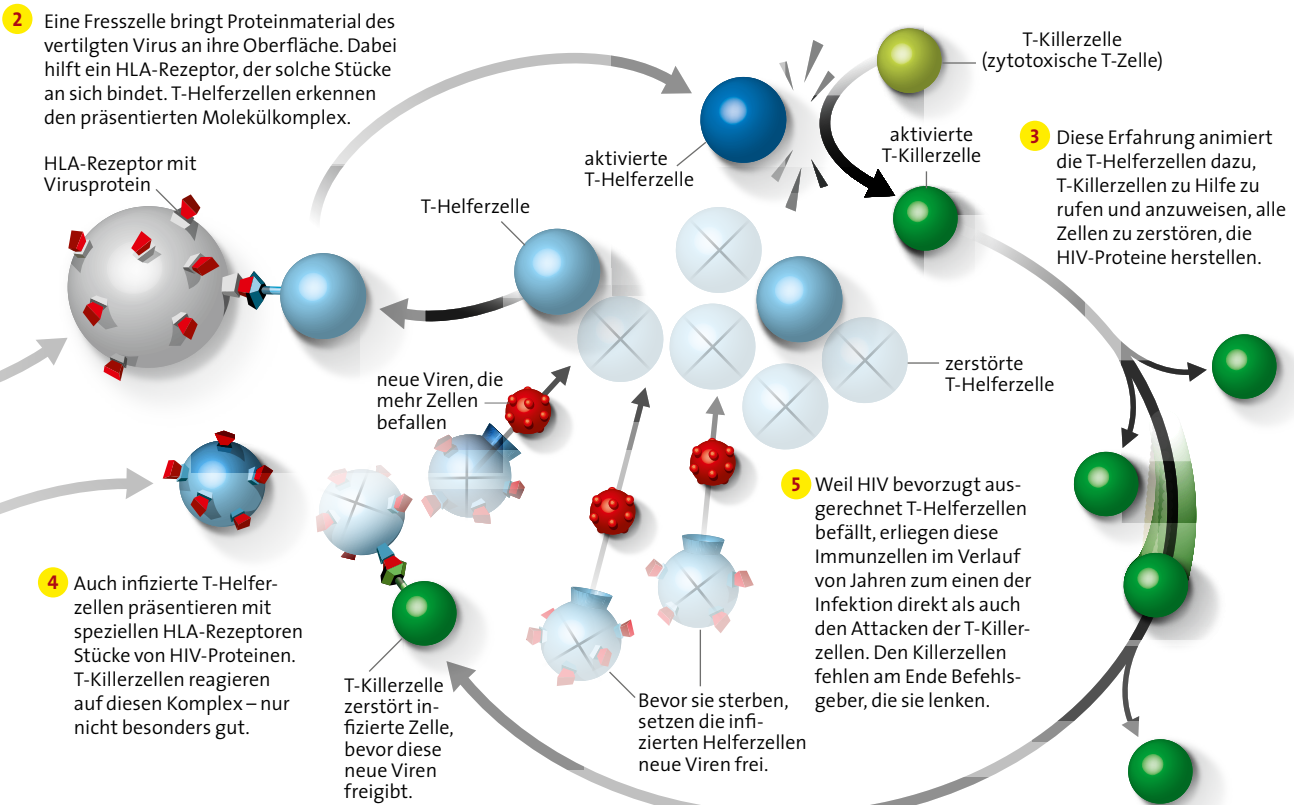
Im üblichen Fall bekämpft das Immunsystem eine HIV-Infektion über längere Zeit heftig – und gewinnt auch die ersten Runden. Doch im Lauf der Jahre verliert die Abwehr langsam an Kraft, weil die wichtigen T-Helferzellen nach und nach zu Grunde gehen. So gewinnt der Feind allmählich die Oberhand.

### DIE WAFFEN DER ELITEKONTROLLEURE

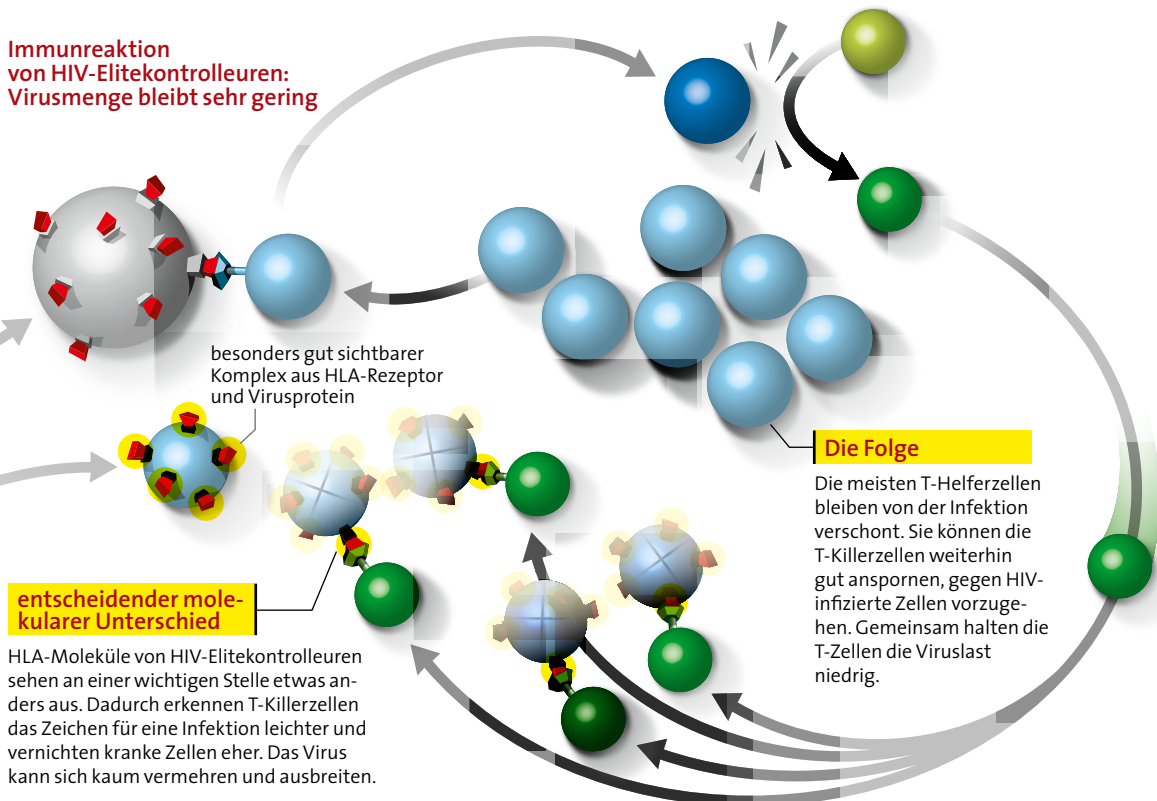
Im Prinzip benutzt das Immunsystem von Elitekontrolleuren die gleichen Waffen. Es kann sie allerdings wirksamer einsetzen, weil seine zytotoxischen T-Zellen den Feind besser sehen. Diese zerschlagen darum die kranken Zellen sehr viel schneller. So verhindern sie den Übergriff des Virus auf weitere Immunzellen.



## Normale Immunreaktion: Virusmenge wächst



## Immunreaktion von HIV-Elitekontrollleuren: Virusmenge bleibt sehr gering



JEN CHRISTIANSEN

wie man nach genetischen Unterschieden für Krankheitsanfälligkeit suchen konnte. Es ist möglich, in der Abfolge der Bausteine der DNA so genannte SNPs (sprich: snips, kurz für single nucleotide polymorphisms) aufzuspüren. Dies bedeutet, dass verschiedene Menschen an einer bestimmten Stelle des Genoms unterschiedliche Bausteine besitzen. Solche SNPs lassen sich als so genannte Marker (Anzeiger) verwenden, um jene Abschnitte auf den Chromosomen zu finden, die nur bei einem bestimmten Personenkreis abweichen. Irgendwo dort in der Nähe müsste dann ein verändertes Gen sitzen – sofern es eines gibt, mit dem die auffallende Eigenschaft zusammenhängt. Im Idealfall würden mit dieser Methode auch im Erbgut von HIV-Elitekontrollleuren solche verdächtigen Abschnitte auftauchen.

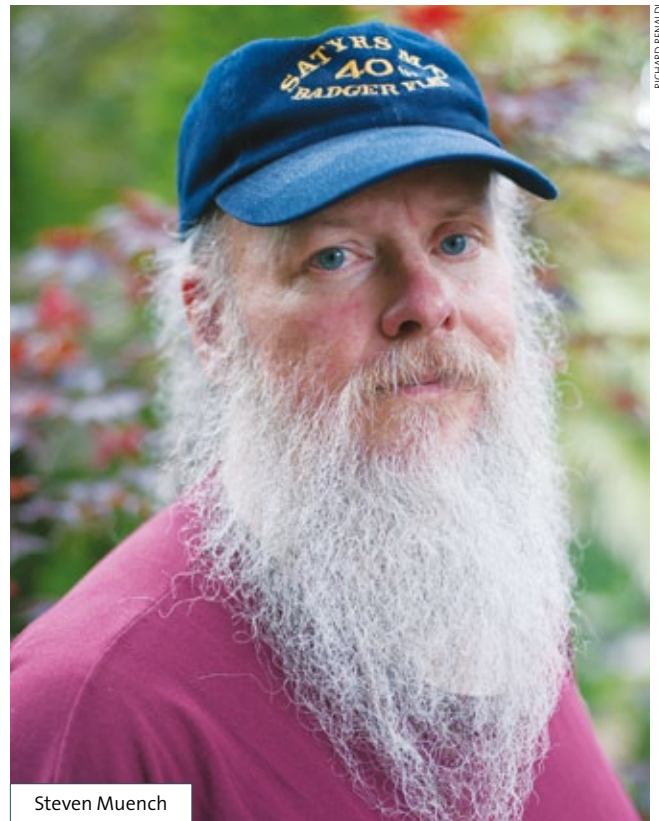
### Grenzen sprengende Studie

Für eine derartige Studie benötigt man allerdings aus statistischen Gründen sehr viele Teilnehmer. Wir veranschlagten rund 2000 Aidskranke und mindestens 1000 HIV-Elitekontrollleure. Von jeder einzelnen Person würde dann aus Blut- oder Speichelproben die Ausprägung von rund einer Million SNPs zu bestimmen sein. Aber gab es überhaupt genügend »Kontrollleure«? Zu jener Zeit kannten Forscher nur eine Hand voll seit Jahren HIV-Infizierter, denen das Virus keine Probleme bereitete.

Dann aber hielt ich in New York einen Vortrag vor 300 Ärzten und medizinisch geschulten Kräften, die in großen Praxen HIV-Patienten betreuten. Dabei schilderte ich auch Massies besonderen Fall. Inzwischen lebte er fast ein Vierteljahrhundert mit dem Virus. Immer noch entsprach die Zahl seiner Helferzellen der Norm, und der Erreger selbst blieb sogar mit den neuesten hochempfindlichen Tests unter der Nachweisgrenze. Aus einem Impuls heraus fragte ich meine Zuhörer, ob jemand von ihnen einen solchen Menschen kannte.

Ich muss vernehmbar nach Luft geschnappt haben, als über die Hälfte der Anwesenden die Hand hob. Denn das zeigte: Über Arztpraxen würden wir leicht an 1000 HIV-Kontrollleure herankommen. Das Massachusetts General Hospital (MGH) genehmigte die große Studie. Jedoch war keine der angesprochenen diversen Behörden oder Organisationen bereit, die Finanzierung zu unterstützen. Das Projekt erschien ihnen anscheinend zu vage, ein positives Ergebnis war ohnehin ungewiss.

Da bekam ich von dem Finanzmanager Mark Schwartz eine Einladung zu einem persönlichen allgemeinen Gespräch über Aids. Er und seine Frau Lisa unterstützten seit Kurzem in Afrika Projekte des Massachusetts General Hospital und der Harvard University, bei denen afrikanische Wissenschaftler und Ärzte für den Umgang mit HIV und Aids geschult wurden. Schwartz fragte auch nach meinen aktuellen Arbeiten. Während ich ihm davon erzählte, erwähnte ich die geplante Studie mit den HIV-Elitekontrollleuren, die aus finanziellen Gründen nicht zu Stande kam, obwohl ich sie für ausschlaggebend hielt. Schwartz wurde sogleich hellhörig.



Steven Muench

**Steven Muench könnte schon seit 35 Jahren mit dem HI-Virus infiziert sein. Obwohl der Viruspegel in seinem Blut in den letzten zehn Jahren leicht angestiegen ist, benötigt er bisher keine antiviralen Medikamente.**

Als wir uns voneinander verabschiedeten, hatten er und seine Frau 2,5 Millionen Dollar als Anstoßfinanzierung zugesagt. Dieses Geld war dazu gedacht, zunächst quer durch die USA Teilnehmer für die DNA-Untersuchungen zu finden und die erforderlichen genetischen Proben zu gewinnen. War dieser Schritt erst getan, sollte es nicht mehr so schwer sein, auch für die genetischen Analysen Geldgeber aufzutun.

Wir machten uns sofort an die Arbeit. Zunächst fragten wir bei allen größeren medizinischen Praxen der USA, die mit vielen HIV-Patienten zu tun hatten, nach Elitekontrollleuren und ersuchten um DNA-Proben. Später dehnten wir die Anfragen mit Erfolg auf Europa, Asien, Australien und Südamerika aus. Mit Afrika war es schwieriger, weil Tests auf HIV dort in vielen Ländern noch nicht Routine waren und sich deswegen oft nicht herauszufinden ließ, ob jemand trotz langjähriger HIV-Infektion gesund geblieben war. Das gesamte riesige Unterfangen organisierte die Ärztin und Wissenschaftlerin Florencia Pereyra von der Harvard Medical School mit wenigen Assistenten. Für die Weiterführung und den Abschluss des Projekts, an dem über 300 Forscher vieler Länder beteiligt waren, stellte die Bill & Melinda Gates Foundation 20 Millionen Dollar bereit.

Am Ende hatten wir Proben von 2648 Infizierten mit voranschreitender Immunerkrankung und von 974 HIV-Elite-

kontrollieren beisammen. Von jedem einzelnen dieser Menschen bestimmten wir mit einem automatisierten Chipsystem rund 1,3 Millionen SNPs. Diese riesigen Datensätze zu gewinnen und auszuwerten, dauerte fast ebenso lange wie das Beschaffen der Proben. Für die umfangreichen Analysen, mit denen wir genetische Unterschiede zwischen den beiden Patientengruppen aufspüren wollten, nahmen wir die Computerdienste des Broad Institute in Anspruch. Diese Arbeiten leitete der Genetiker Paul DeBakker.

2009 hatten wir ein erstes, grobes Ergebnis. Im menschlichen Genom fanden sich 300 SNPs, in denen sich die HIV-Elitekontrollierer signifikant von der Gruppe der Aidsgefährdeten und -erkrankten abhoben. Nach weiteren Analysen ließen sich die Unterschiede auf vier SNPs einkreisen. Jede einzelne dieser abweichenden Stellen im DNA-Strang korrelierte unabhängig voneinander hochsignifikant mit der Unterdrückung der Infektion. Alle vier befanden sich auf Chromosom 6, das viele Gene trägt, die sich auf Immunfunktionen auswirken.

Um weiterzukommen, mussten wir von den beiden Probandengruppen die genauen genetischen Sequenzen der betreffenden Region auf Chromosom 6 kennen, wo die vier SNPs liegen. Unsere Gelder reichten aber nicht, um die Basenabfolgen selbst zu bestimmen. An dieser Stelle half uns der Medizinstudent Xiaoming »Sherman« Jia mit einer genialen Idee weiter. Anhand exorbitanter Datenmengen aus großen genetischen Studien erstellte er einen Computeralgorithmus und konnte damit aus den SNP-Kombinationen von jedem unserer Teilnehmer die jeweilige DNA-Basenabfolge für diesen besonderen Chromosomenabschnitt herleiten. Diese Sequenzen wiederum ließen erkennen, wie sich die Gene der Region unterscheiden – und damit, an welchen Stellen die dort kodierten Proteine andere Aminosäuren besaßen.

Als hauptsächlichster Unterschied zwischen den beiden Studiengruppen erwies sich eine kleine Veränderung bei den HLA-Rezeptoren, die auf infizierten Zellen sitzen: Durch den Austausch von Aminosäuren bekommt eine bestimmte Eintiefung des Moleküls eine andere Form – und zwar ausgerechnet die Stelle, an der dieser wichtige Immunrezeptor an der Oberfläche einer infizierten Zelle Stücke von HIV-Proteinen zur Schau stellt. Offensichtlich erkennen zytotoxische T-Zellen hierdurch das Immunsignal von infizierten Zellen bei HIV-Kontrollierern viel besser als sonst – und schlagen deswegen mehr und insgesamt wirksamer zu (siehe Kasten S. 26/27, unten).

Im Ergebnis schützt also die erhöhte Schlagkraft der Fußtruppen die Generäle. Schon wenn die ersten Aidsviren im Körper auftauchen, gelingt es dem Immunsystem eines Elitekontrollierers, eine beträchtliche Anzahl von spezifischen T-Helferzellen verfügbar zu haben – und vor allem vermag es auf Dauer genügend dieser Generäle zu halten. Denn die

T-Killerzellen attackieren mit HIV infizierte Zellen wegen des mutierten HLA-Rezeptors dermaßen rasant, dass dem Virus kaum eine Chance bleibt, sich auszubreiten und weitere T-Helferzellen zu befallen. Eine Pattsituation kommt auf: Die Generäle können ihre Position behaupten, und das Virus vermag sich kaum zu vermehren. Wann immer der Erreger vorprescht, sind augenblicklich Killerzellen zur Stelle, die ihm Einhalt gebieten.

Das umfangreiche genetische Forschungsprojekt zu HIV-Elitekontrollierern hatte uns schließlich auf die Fährte eines entscheidenden Immunproteins geführt: des beteiligten

HLA-Rezeptors. Daran, dass einzelne Menschen das HIV-Virus beherrschen, hat offenbar eine Mutation dieses Moleküls wesentlichen Anteil.

Ein nächstes Ziel ist nun, diesen Befund zum Nutzen anderer HIV-Infizierter um-

zusetzen. Außerdem zeichnet sich allmählich immer genauer ab, was eigentlich auf molekularer Ebene zwischen spezifischen Erregern – oder Krebszellen – und dem Immunsystem abläuft und worauf es dabei besonders ankommt. Wenn wir diese Vorgänge erst besser verstehen, sollten sie sich auch gezielt steuern oder forcieren lassen. Zunächst wären dabei vordringlich wohl die verschiedenen T-Zellen zu unterstützen. Es gilt, den Abwehrkräften über Unzulänglichkeiten und kritische Situationen hinwegzuhelfen, damit sie uns noch besser zur Seite stehen können als jetzt schon. ~

## »Wann immer der Erreger vorprescht, sind augenblicklich Killerzellen zur Stelle, die ihm Einhalt gebieten«

### DER AUTOR



**Bruce D. Walker** ist Direktor des Ragon Institute in Cambridge und Professor für Medizin an der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts). Zudem ist er an der University of KwaZulu-Natal in Durban (Südafrika) Professor. Seinem ersten Aidspatienten begegnete er 1981 als junger Arzt am Massachusetts General Hospital.

### QUELLEN

**Carrington, M., Walker, B. D.:** Immunogenetics of Spontaneous Control of HIV. In: Annual Review of Medicine 63, S. 131–145, 2012  
**The International HIV Controllers Study:** The Major Genetic Determinants of HIV-1 Control Affect HLA Class I Peptide Presentation. In: Science 330, S. 1551–1557, 2010

### LITERATURTIPP

**Infektionskrankheiten.** Kampf den Keimen. Spektrum der Wissenschaft Dossier 3/2011  
*Artikelwahl aus »Spektrum der Wissenschaft« unter anderem über HIV, Aids und Impfstoffentwicklungen*

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188729](http://www.spektrum.de/artikel/1188729)

# Giganten im All

Seit in der Milchstraße ein supermassereiches Schwarzes Loch entdeckt wurde, haben Astronomen solche Objekte in fast allen aktiven Galaxien aufgespürt. Heute erforschen sie, wie stark die Gravitationsmonster Entstehung und Schicksal ihrer Galaxien beeinflussen und steuern.

Von Gerhard Börner

**S**ie sitzen im Zentrum fast jeder Galaxie, wo sie nichts tun außer fressen und wachsen: die supermassereichen Schwarzen Löcher. Millionen bis Milliarden von Sonnenmassen sind sie schwer, aber ihr Appetit ist weiterhin ungestillt. Manche sind bereits auf Diät gesetzt, weil sie ihre Umgebung schon ziemlich leer gefegt haben, wie etwa das vier Millionen Sonnenmassen schwere Objekt im Zentrum der Milchstraße. Andere dagegen verschlingen weiterhin Sterne und Gas in riesigen Mengen, soweit der Nachschub es eben erlaubt.

Direkt beobachten lässt sich keines dieser Objekte. Nur Strahlung lässt sich registrieren, die entsteht, wenn sich Materie beim Absturz in das Schwarze Loch aufheizt. Ihr Energieausstoß ist enorm, und so treten die Schwerkraftmonster trotz ihres Namens als die leuchtkräftigsten Objekte am Himmel in Erscheinung. Laut Beobachtungen entspringen enorme Energiemengen aus sehr kleinen Raumbereichen in der Mitte von Galaxien, wo sich die Materie offenbar mit hoher Geschwindigkeit bewegt. Alles deutet darauf hin, dass dort jeweils ein Objekt großer Masse sitzen muss.

Auf lange Sicht kann das nur ein Schwarzes Loch sein, sagt die Theorie. Alternative Kandidaten, wie ein sehr dichter Sternhaufen oder ein besonders schwerer Stern, würden bald gleichfalls zu einem Schwarzen Loch kollabieren. Seit ihrer Entdeckung vor 50 Jahren faszinieren die »supermassereichen Schwarzen Löcher« (SMSL) Physiker und Astronomen. SMSL können Teilchen auf ultrarelativistische Energien beschleunigen (auf über 20 Teraelektronvolt, TeV), sie verursachen Ströme von fast lichtschnellen Teilchen. Die Forscher sehen in ihnen eine Quelle der energiereichsten kosmischen Strahlen (siehe Teil I der Serie in SdW 4/2013, S. 40). Verschmelzen sie mit anderen Objekten, werden nach Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie Gravitationswellen emittiert, deren Nachweis ein neues Fenster für die Astronomie und den Zugang zu direkten Tests der einsteinschen Theorie im Bereich starker Gravitationsfelder eröffnen könnte.

In vielen Fällen konnten diese Gebilde in galaktischen Zentren aufgespürt werden. Wenn also, was Beobachtungen nahelegen, fast jede größere Galaxie ihr eigenes Schwarzes Superloch im Zentrum besitzt, dann besteht wahrscheinlich auch eine enge Verbindung zwischen diesem und der Entstehung und Entwicklung der Galaxie.

Aktive Galaxien und Quasare strahlen riesige Energiemengen ab, die das Licht aller ihrer Sterne noch um ein Vielfaches übertreffen. Die meisten Astronomen glauben, dass die Quelle dahinter stets ein Schwarzes Loch mit hoher Masse ist. Das jeweilige SMSL saugt durch sein starkes Gravitationsfeld Materie aus der Umgebung an. Diese stürzt aber nicht geradlinig auf das Schwarze Loch zu, sondern bewegt sich auf spiralförmigen Bahnen und sammelt sich vor dem endgültigen Absturz in einer rotierenden Akkretionsscheibe.

Bei der Annäherung bewegt sich die Materie auf ihren Umläufen immer rasanter mit mehr als zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit und erhitzt sich dabei so sehr, dass der innere Teil der Scheibe das Objekt schließlich als heiße Kugel nahezu einhüllt. Diese Zone emittiert intensive Röntgenstrahlung, die von einer ganzen Reihe Hochenergiesatelliten registriert wird. Zusätzlich entsteht in diesem Nahbereich entlang der Rotationsachse des Schwarzen Lochs ein gerichteter, eng begrenzter Teilchenstrahl – ein so genannter

## DIE SERIE IM ÜBERBLICK



### DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER ASTRONOMIE

|        |  |                 |
|--------|--|-----------------|
| Teil 1 | ▶ Heiße Stürme im Kosmos<br><i>Gerhard Börner</i>                    | April 2013      |
| Teil 2 | ▶ <b>Giganten im All</b><br><i>Gerhard Börner</i>                    | <b>Mai 2013</b> |
|        | ▶ Zeugen des Urknalls<br><i>Marek Abramowicz und Julia Tjus</i>      |                 |
| Teil 3 | ▶ Die Entstehung der Planeten<br><i>Thomas Henning</i>               | Juni 2013       |
| Teil 4 | ▶ Super-Erden – die Jagd nach Exoplaneten<br><i>Lisa Kaltenegger</i> | Juli 2013       |
| Teil 5 | ▶ Geburt und Tod von Sternen<br><i>Ralf Launhardt</i>                | August 2013     |
| Teil 6 | ▶ Dunkle Energie und Dunkle Materie<br><i>Volker Springel</i>        | September 2013  |

NASA, IPI, CALTECH/STSCI/CXC/UNIVERSITY OF ARIZONA/ESA/AURA/JHU

Jet, in dem Materie annähernd mit Lichtgeschwindigkeit nach außen rast.

Weiter entfernt vom Zentralkörper, wo es schon etwas kühler zugeht, sendet die Materie nur noch optische und Radiostrahlung aus, die sich auf der Erde und etwa vom Welt- raumteleskop Hubble (HST) einfangen lässt. So erhält man ein recht detailliertes Bild der Materiebewegungen.

Ein typisches Beispiel ist M87, eine aktive Galaxie in 54 Millionen Lichtjahren Entfernung im Sternbild Jungfrau. Mit dem Faint Object Spectrograph auf dem HST gelang es, die Dopplerverschiebung des abgestrahlten Lichts im Zentral- gebiet zu messen: Die Materie bewegt sich in einer rotieren- den Scheibe teils auf uns zu, was die Spektrallinien ins Blaue verschiebt, und teils von uns weg, was sie ins Rote verlagert. Die Bahngeschwindigkeiten in der Akkretionsscheibe errei- chen bis zu 550 Kilometer pro Sekunde, fast zwei Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Derart hohe Werte können nicht durch Sternhaufen verursacht werden, vielmehr muss es dort eine zentrale Masse geben. Die Beobachtungen zeigen: In einem Bereich von der Größe des Sonnensystems sind drei Milliar- den Sonnenmassen konzentriert.

Ähnlich ist die Situation in anderen Sternsystemen. So stößt die Galaxie NGC 4261 gewaltige Jets aus, die vom Zen- trum aus symmetrisch in beide Richtungen 88 000 Licht- jahre weit in den umgebenden Weltraum eindringen. Die in- tensive Radiostrahlung, die das Phänomen sichtbar macht, zeigt, dass in dem Jet elektrisch geladene Teilchen und Magnetfelder ins All geschleudert werden. Die Kraftmaschi- ne im Zentrum könnte wiederum ein Schwarzes Loch sein, mit etwa 400 Millionen Sonnenmassen. Gespeist wird es von einer dicken Scheibe mit einem Durchmesser von 800 Lichtjahren. Astronomen haben derartige Gebilde bereits in vielen aktiven Galaxien geortet. Es scheint, als seien Jets eine charakteristische Signatur für die Aktivität eines zentralen Schwarzen Lochs.

M87 heißt diese aktive Gala- xie, 54 Millionen Lichtjahre ent- fernt und das größte Objekt im Virgo-Galaxienhaufen (hier eine Aufnahme des Röntgen- teleskops Chandra). In ihrem Zentrum verbirgt sich ein Schwarzes Loch mit drei Milli- arden Sonnenmassen, das einen 5000 Lichtjahre langen Jet ausstößt. Umkreist wird es von einer Scheibe, die rasend schnell rotiert – teilweise mit 550 Kilometern pro Sekunde.



## AUF EINEN BLICK

### SUCHE NACH DEM EREIGNISHORIZONT

**1** Erst seit wenigen Jahren gilt die Existenz großer Schwarzer Löcher mit **Millionen und Milliarden Sonnenmassen** als gesichert.

**2** Entdeckt wurden sie im Zentrum der Milchstraße sowie vor allem in der Mitte junger, aktiver Galaxien. Die Astronomen rätseln heute darüber, wie ihre Existenz und ihr Wachstum mit der Entwicklung **ihrer jeweiligen Heimatgalaxie** verwoben sind.

**3** Künftige Beobachtungen sollen das Geschehen direkt am »Er- eignishorizont« der Gravitationsmonster entschlüsseln. Das könnte klären, ob ihre **fundamentalen Eigenschaften** tatsächlich der Vorhersage von Einsteins Gravitationstheorie entsprechen.

Die Sombrero-Galaxie (M104) im Sternbild Jungfrau, in 30 Millionen Lichtjahren Entfernung, erscheint zwar im op- tischen Licht relativ unauffällig, sendet dafür aber kräftige Röntgenstrahlung aus, besitzt also offenbar einen aktiven Kernbereich. Entsprechend registrierten Astronomen für Sterne nahe dem Zentrum sehr hohe Geschwindigkeiten. Dies nährte den Verdacht, dass auch in der Mitte des »Somb- reros« ein SMSL residiert, und zwar sogar mit einer Milliarde Sonnenmassen.

Es existieren also reichlich Hinweise auf Schwarze Löcher im Zentrum aktiver Galaxien. Die Beobachtungen belegen genau genommen aber nur, dass sich dort in einem kleinen Volumen jeweils eine große Masse zusammenballt. Nur indi- rekt folgt daraus die Existenz eines Schwarzen Lochs, näm- lich aus der Überlegung, dass keine physikalisch plausiblen Alternativen bekannt sind – weder Sternhaufen noch ein ein- zelner Riesenstern.

Während die Forscher zunächst vor allem die Existenz der SMSL als kompakte Schwerkraftzentren nachweisen wollten, geht es ihnen inzwischen darum, die Physik zu enträtseln,



ESO, LUIS CALÇADA, STÉPHANE GUIARD / MPE, MARC SCHARTMANN / NICK RISINGER / VISTA, JIM EMERSON / DIGITIZED SKY SURVEY 2

Im Zentrum unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, sitzt die Radioquelle Sagittarius A\*. In deren Mitte eingebettet ist ein großes Schwarzes Loch mit 4,1 Milliarden Sonnenmassen. Es wird von etwa einem Dutzend Sternen umkreist (blaue Linien). Das gezeigte Raumgebiet entspricht dem dreifachen Abstand Sonne-Neptun. Das Schwarze Loch hat einen Durchmesser von zwölf Millionen Kilometern, rund ein Fünftel der Merkurbahn.

die hinter den Erscheinungen steht: Wie entstehen die aktiven Galaxien? Und wie hängt ihre Entwicklung mit den supermassereichen Schwarzen Löchern zusammen? Gibt es Eigenschaften, die solche Objekte eindeutig identifizieren? Bis jetzt sind keine bekannt. Die Astronomen hoffen, durch noch präzisere und umfassendere Beobachtungen einem direkten Nachweis näher zu kommen. Die besten Chancen dazu bietet wohl unser »hauseigenes« Gravitationsmonster im Zentrum der Milchstraße, einfach weil es das nächstgelegene ist.

Die Vorgeschichte: Im Jahr 1974 entdeckten Astronomen im Sternbild Schütze die Radioquelle Sagittarius A\*, abgekürzt Sgr A\*. Deren besondere Eigenschaften nährten gleich den Verdacht, dort könnte ein größeres Schwarzes Loch verborgen sein. Allerdings ist diese Himmelsgegend von der Erde aus notorisch schwer zu beobachten. Denn quer durch die galaktische Scheibe, in der auch wir sitzen, wird fast alle Art von Strahlung durch Gas, Staub und Sterne blockiert. Allein Radio- und Infrarotwellen erlauben Blicke ins Innere der Milchstraße.

Es dauerte einige Jahre, bis Infrarotkameras mit genügender Trennschärfe von Satelliten aus die Gegend ins Visier nehmen konnten. Das Team von Reinhard Genzel am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching bei München leistete Pionierarbeit auf diesem Gebiet. Die Forschergruppe ist bis heute führend bei der Analyse der Sternbewegungen um Sagittarius A\*. Demnach umkreisen offenbar ein Dutzend Sterne mit hoher Geschwindigkeit ein unsichtbares zentrales Objekt innerhalb eines Radius, der etwa dem dreifachen Abstand zwischen Sonne und Neptun entspricht. Für einen dieser Sterne (S2) wurde eine Umlaufperiode von 16 Jahren und eine Geschwindigkeit von etwa 5000 Kilometer pro Sekunde bestimmt. Zum Vergleich: Die Sonne bewegt sich auf ihrer eher randständigen Bahn um das galak-

tische Zentrum mit rund 220 Kilometer pro Sekunde. Interferometrische Radiobeobachtungen zeigten zudem, dass Sgr A\* in Bezug auf die Galaxis mit einer Relativgeschwindigkeit von höchstens einem Kilometer pro Sekunde fast stillsteht.

Mit diesen Fakten konnten die Theoretiker für das zentrale SMSL der Milchstraße eine Masse von 4,1 Millionen Sonnenmassen errechnen. Sgr A\* ist nach heutigem Wissen also ein Schwarzes Loch – zwar riesig, aber nicht so gigantisch wie die in manch anderen Galaxien. Außerdem scheint dieses Objekt sozusagen auf Sparflamme zu köcheln, denn es emittiert nur wenig Röntgenstrahlung, erhält also nur einen geringen Materiezuffluss.

Womöglich könnte sich dies innerhalb der nächsten zehn Jahre ändern. Denn die Astronomen entdeckten eine Gaswolke (G2 genannt), die dann auf ihrer Umlaufbahn in den Einzugsbereich von Sgr A\* kommen wird. Sie bewegt sich zwar nicht direkt auf Kollisionskurs, wird aber dem Zentrum doch so nahe kommen, dass ein Teil der Wolke ins Schwarze Loch stürzen dürfte. Die Forscher erwarten einen spektakulären Ausbruch an Röntgenstrahlung sowie detaillierte Daten darüber, wie die Wolke in der Nähe des SMSL durch Gezeitenkräfte verzerrt und zerrissen wird.

Möglichst nahe an das Schwarze Loch vordringen möchten Wissenschaftler mit dem geplanten Event Horizon Telescope (Ereignishorizont-Teleskop, EHT), einer Zusammenschaltung von Radioteleskopen, die um den ganzen Erdball verteilt sind. Das multinationale Gerät soll 2022 in Betrieb gehen. Das dahinterstehende Verfahren der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ist so mächtig, dass sich das galaktische Zentrum prinzipiell mit einer Winkelauflösung von einigen millionstel Bogensekunden beobachten ließe.

Damit könnte man auch einen Apfel auf dem Mond erkennen. Mit dem Event Horizon Telescope könnten die Astronomen die Radiostrahlung mit einer Wellenlänge von 1,3 Milli-



metern nutzen, um Strukturen innerhalb des zehnfachen Radius des Schwarzen Lochs von Sgr A\* abzubilden. So könnten sie die Region erforschen, in der relativistische Effekte wichtig werden. Wichtigster Punkt auf der Agenda: die Überprüfung der Physik eines Schwarzen Lochs, wie es von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie vorhergesagt wurde. Auch das zentrale Objekt von M87 ließe sich mit dem EHT wesentlich detaillierter untersuchen.

Kurz nachdem Einstein Ende 1915 seine Gravitationstheorie veröffentlicht hatte, fand der deutsche Astronom Karl Schwarzschild eine exakte Lösung der einsteinschen Feldgleichungen. Diese »Schwarzschild-Geometrie« gilt als Prototyp eines Schwarzen Lochs, zugleich ist es die einfachste Beschreibung eines extremen Endzustands der Materie. Dazu stellen sich die Theoretiker vor, wie sich ein kugelförmiger Materiekumpen, etwa die Sonne, in einem immer kleineren Volumen konzentriert, so wie dies in der newtonschen Theorie bis hin zur idealisierten punktförmigen Masse möglich ist.

### Hinter dem Ereignishorizont wird Raum zur Zeit und Zeit zum Raum

Stets gilt dann im leeren Außenraum, also dem Gravitationsvakuum, welches das Schwarze Loch umgibt, die Schwarzschild-Lösung der Feldgleichungen, für die Schwarzschild mathematisch übliche »statische Koordinaten« für Zeit, Radius und Winkel verwendete. Unterschreitet man aber bei diesem Kollaps einen bestimmten Radius, verlieren diese Koordinaten ihre übliche Bedeutung; sie vertauschen ihre physikalische Bedeutung: Raum wird zur Zeit, Zeit wird zum Raum. Dort »vergeht« der Raum, so wie in der wirklichen Welt die Zeit. Wir erreichen in diesem Gedankenexperiment dann jedoch nicht das Äquivalent der newtonschen Punktmasse. Vielmehr verschwindet die Masse innerhalb der Grenzfläche, die durch den Schwarzschild-Radius gekennzeichnet ist: des Ereignishorizonts.

Was sich im Inneren dieses Volumens abspielt, bleibt uns als außenstehenden Beobachtern zunächst verborgen. Anhand der Wege, die das Licht in der Umgebung des Objekts nehmen kann, lässt sich jedoch die Struktur der gesamten Raumzeit analysieren, in deren Mittelpunkt das Schwarze Loch sitzt. Es ist von leerem Raum umgeben sowie einem Schwerfeld, das mit der Entfernung immer mehr abklingt bis zum Grenzfall der »flachen« Raumzeit, in der die Gravitation kaum mehr eine Rolle spielt. Weit außerhalb liegen demnach praktisch die gleichen Verhältnisse vor wie im flachen – für uns normalen – Raum, wo sich Lichtstrahlen stets entlang gerader Linien ausbreiten.

Doch je näher am Ereignishorizont ein Lichtstrahl verläuft, desto stärker krümmt das Schwerfeld seine Bahn. Direkt am Schwarzschild-Radius wird Licht – gleich in welche Richtung – dann so weit abgelenkt, dass es nicht mehr nach außen entweichen kann, sondern innerhalb einer Kugel mit diesem Radius gefangen bleibt. Das gibt es sonst nirgends im All: Lichtstrahlen, die am Ereignishorizont radial nach außen



## CGEM™ KOMETEN-AKTION



**CGEM Sonderangebot**  
inklusive Q-Turret Okularsatz

Alle Infos finden Sie **hier:**

[www.jahrhundertkomet.de/aktion](http://www.jahrhundertkomet.de/aktion)



gerichtet sind, bleiben an diesem Ort stehen, obwohl sie sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Strahlen, die innerhalb dieses Radius emittiert werden, können der Raumzeitkrümmung nicht entgehen, sondern enden in einer zentralen Singularität (einem Punkt mit theoretisch unendlich großer Gravitation) beim Radius null.

Licht aus dem Außenraum kann freilich auch weiterhin in den Bereich innerhalb des Schwarzschild-Radius eindringen, aber kein Lichtstrahl ihm jemals entkommen. Der Radius legt somit eine »Struktur in der Raumzeit« fest, einen Horizont, der unausweichlich außen und innen voneinander trennt. Da sich jede Art von Information höchstens mit Lichtgeschwindigkeit übermitteln lässt, wirkt der Horizont wie eine unsichtbare Membran, die nur in einer Richtung – nach innen – Energie und Information durchlässt. Diese endet schließlich in einer Singularität. Tatsächlich besagt die allgemeine Relativitätstheorie, dass jede Masse innerhalb des Horizonts als singuläre Punktmasse endet, wobei die Materiedichte gegen unendlich und die Ausdehnung gegen null geht.

Solche Singularitäten sind physikalisch sinnlos – würden sie doch bedeuten, dass die bekannten Naturgesetze dort ihre Gültigkeit verlieren. Weil die Physiker auf Grund ihrer Erfahrungen davon überzeugt sind, dass alle in der Natur vorkommenden Größen endlich und genau bestimmbar sind, betrachten sie Singularitäten als Folge einer unzureichenden mathematischen Formulierung oder als Ausdruck einer inneren Unvollständigkeit der Theorie. In diesem Sinn

muss die allgemeine Relativitätstheorie noch verbessert werden, wohl durch eine Verknüpfung mit der Quantentheorie.

Der Kollaps innerhalb des Schwarzschild-Radius in die Singularität hat eine verblüffende Konsequenz: Die Raumzeit der Schwarzschild-Geometrie ist ein reines Gravitationsvakuum – außerhalb und innerhalb des Horizonts befindet sich keine Materie, bis auf eine Punktmasse im Zentrum. Ein Beobachter im Außenraum registriert lediglich die Gravitationswirkung der Punktmasse. Dieses Gebilde, von den Astrophysikern Schwarzes Loch genannt, ist also weder ein materieller Körper noch besteht es aus Strahlung – es ist buchstäblich ein Loch in der Raumzeit.

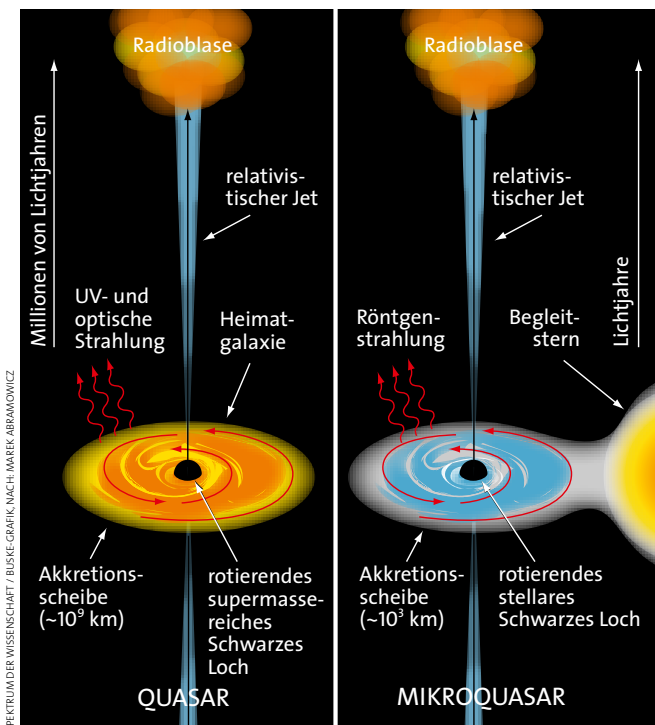
### Große Massen erleiden ein katastrophales Schicksal

Gewöhnliche Sterne, Planeten oder andere Alltagsdinge sind freilich weit größer als ihr Schwarzschild-Radius. Für die Sonne beträgt sein Wert drei Kilometer, für die Erde nur 0,9 Zentimeter. Er wächst proportional zur Masse, deshalb erreicht er für ein Objekt von einer Milliarde Sonnenmassen etwa drei Milliarden Kilometer; das Schwarze Loch der Milchstraße hat einen Schwarzschild-Radius von zwölf Millionen Kilometern.

Einsteins Gravitationstheorie sagt vorher, dass als extremer Endzustand der Materie Schwarze Löcher entstehen können. Auch intuitiv führt kein Weg daran vorbei, dass große Massen ein katastrophales Schicksal erleiden müssen. Denn die Gravitation zieht alle Materie in gleicher Weise an. Außerdem reicht diese Kraft unbegrenzt weit, denn sie klingt nur umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstands ab. Wird von einer beliebigen Masse immer mehr Materie angehäuft, so wächst die Gravitation quadratisch mit der Teilchenzahl an. Irgendwann gewinnt sie die Oberhand über alle Druckkräfte, die sich ihr entgegenstemmen könnten – sei es der thermonukleare Druck im Inneren eines Sterns, die abstoßende Kraft zwischen den positiven Ladungen im Inneren der Atomkerne oder der so genannte Fermidruck, wie ihn Gase quantenphysikalisch »entarteter« Elektronen oder Neutronen zeigen und wie er in Weißen Zwergen oder Neutronensternen herrscht.

Hinzu kommt, dass auch die Energie gravitativ wirkt und selbst der Schwerkraft unterliegt. Deshalb kann ein riesiger innerer Druck zwar eine große Masse bis zu einer gewissen Grenze im Gleichgewicht halten, aber der Druck trägt selbst zur Schwerkraft bei. So wird er schließlich mitverantwortlich für den Gravitationskollaps. Für große Massen gibt es kein Gleichgewicht mehr; das Gleiche gilt für rotierende Objekte – sie alle müssen zusammenbrechen und als Schwarzes Loch enden. Es ist erstaunlich, dass trotz der reichhaltigen Formen und Strukturen, in denen gravitative Massen auftreten, ihnen ein derart einfaches Endstadium gemein ist.

In den letzten Jahren haben Astronomen immer mehr Hinweise darauf gefunden, dass es eine enge Verbindung der Galaxie mit dem Schwarzen Loch, das sie beherbergt, gibt. Diese Beziehung zeigt sich in der so genannten M-Sigma-Relation. Sie gibt Hinweise, wie sich in einer Galaxie ein zen-



Quasare werden durch Materie angetrieben, die in Schwarze Löcher stürzt und dabei Jets ausstößt. In Mikroquasaren spielt sich Ähnliches, nur in Doppelsternen ab (siehe Folgeartikel). Deren Akkretionsscheibe ist heißer, so dass Röntgenstrahlung frei wird.



traler Wulst (»bulge«) entwickelt, der häufig ein Schwarzes Loch enthält. Möglicherweise wird Materie durch Akkretion laufend ins galaktische Zentrum nachgefüttert, was sowohl die Masse des Wulstes als auch das SMSL ziemlich gleichmäßig vergrößern würde

Allerdings ist das womöglich nur ein Teil der Wahrheit. Das Wachsen und Werden einer jungen Galaxie zeigt sich an der Menge der Sterne, die laufend durch kollabierendes kaltes Gas neu entstehen. Und das supermassereiche Schwarze Loch produziert mächtige Jets und jede Menge hochenergetische Strahlung. Sind diese Prozesse zwangsläufige Folge der Dinge, die sich beim Kollaps des kalten Gases in der Galaxie abspielen? Selbstverständlich kann das SMSL, wenn es Materie verschlingt und aktiv Strahlung und Teilchen emittiert, das Gas stark beeinflussen, es sogar aus der Galaxie hinaus-schleudern. Dort, wo es dann fehlt, wird die Sternbildung zurückgefahren. Gleichzeitig stellt das SMSL auch seine eigene Aktivität auf Sparflamme, weil dadurch die Akkretion von Materie ebenfalls eingeschränkt wird.

### Dunkle Materie – Geburtshelfer der Galaxien

Wie aber könnte ein zentrales Schwarzes Loch überhaupt das Schicksal der Galaxie direkt beeinflussen? Stellen wir uns vor, wir könnten einige Prozent der Masseenergie des SMSL in der Milchstraße auf die Teilchen (Baryonen, hauptsächlich Neutronen und Protonen) der Milchstraße umverteilen – eine Energiemenge, wie sie das Schwarze Loch in der Akkretionsphase als Strahlung ausstößt. Daraufhin könnten diese Baryonen das galaktische Schwerfeld überwinden und aus der Galaxis geschleudert werden. Wenn sich also mit vergleichsweise wenig Energie schon die ganze Galaxie beeinflussen ließe, dann wäre es nicht überraschend, wenn das SMSL tatsächlich ihr Schicksal mitgestalten würde.

Die gängigen Modelle zur Galaxienbildung nehmen an, dass zunächst kleine Verdichtungen des kosmischen Substrats im Lauf der kosmischen Expansion immer mehr anwachsen. Das geht so lange, bis schließlich ein überdichter Bereich sich vom kosmischen Gas abtrennt, kollabiert und allmählich zu einer Galaxie anwächst. Dieser Prozess wird komplizierter, sobald verschiedene, anfangs getrennte Verdichtungen miteinander verschmelzen, weiterhin Gas in das junge Gebilde einströmt und laufend neue Sterne entstehen. Das kosmische Substrat selbst ist auch nicht so einfach aufgebaut, wie es die Theoretiker gerne hätten. Nur zu einem

kleinen Teil (etwa fünf Prozent) enthält es die uns vertraute normale baryonische Materie. Rätselhafter sind zwei weitere Komponenten: die Dunkle Materie (mit 21 Prozent), ein stoß-freies Gas nichtbaryonischer Elementarteilchen, sowie die Dunkle Energie, von der wir nichts wissen, außer dass sie 74 Prozent der kosmischen Substanz ausmacht und äußerst gleichmäßig verteilt ist.

Wie kleine Dichteschwankungen anwachsen und schließlich zu Galaxien werden, muss man vor diesem Hintergrund betrachten. Denn lange vor den Galaxien bilden sich Schwerkraftzentren in der Dunklen Materie aus, in denen sich dann das Gas aus normaler Materie ansammelt. Warum das so kompliziert ablaufen muss, verrät eine andere Beobachtung: die kosmische Hintergrundstrahlung. Die winzigen Fluktuationen und Anisotropien in dieser Reststrahlung des Urknalls zeigen ziemlich direkt, dass die anfänglichen Dichteschwankungen in der kosmischen Frühzeit relativ klein gewesen sein müssen. Das erforderte den Umweg über die Dunkle Materie als Geburtshelfer der Galaxien.

Die prägalaktischen Gasklumpen, eingebettet in Dunkle Materie, kühlen sich ab und beginnen Sterne zu bilden. Schließlich entwickeln sie sich zu den Galaxien, wie wir sie kennen. In dieser Phase treten offenbar die Schwarzen Löcher auf die Bühne. Wie und wann genau, ist den Forschern noch immer ein Rätsel. Zwei Varianten sind denkbar.

- Die Schwerkraftzentren bilden sich in der kosmischen Materie um Schwarze Löcher aus, die von Anfang an vorhanden waren,
- oder sie entstehen erst später durch den Gravitationskollaps einer großen Gasmasse.

Das Problem bei der ersten Variante ist, dass im frühen Universum in einem relativ diffusen Medium sich kaum große Massen in einem kleinen Bereich konzentrierten und daraus Schwarze Löcher produzierten. Nachvollziehbarer wäre es, wenn zuerst ein massereicher Stern zum Schwarzen Loch kollabiert und dieses Objekt dann durch Zufütterung zu einem supermassereichen Objekt anschwillt.

Aber das wirft wieder die Frage auf, wie in einer so frühen kosmischen Epoche ein solcher Stern überhaupt entstehen kann. Die Geburtsfrage bleibt hier offen, und so beginnen fast alle Modelle gleich mit einem kleineren oder mittelgroßen Schwarzen Loch, das durch Akkretion von Materie allmählich anwächst.

Immerhin lassen sich die theoretischen Überlegungen heute durch astronomische Beobachtungen mit Satellitenspäthern – wie HST, Spitzer oder Herschel – sowie bodengebundenen Teleskopen im nahen Infrarotbereich des Spektrums überprüfen und erweitern. Damit können Astronomen Galaxien bereits in einem sehr frühen Stadium ihrer Entwicklungsgeschichte entdecken.

Gegenwärtig entstehen in Scheibengalaxien wie der Milchstraße neue Sterne in ziemlicher Regelmäßigkeit. Kaltes interstellares Gas wird verbraucht und zu Sternen verarbeitet – ein Vorgang, der die zentralen Schwarzen Löcher auf Diät setzt und nur wenig zu ihrem Wachstum beiträgt. Offen-

sichtlich verlief die Sternproduktion in der Vergangenheit aber deutlich aktiver. Die Astronomen stoßen immer wieder auf massereiche »rote und tote« Galaxien bei einer Rotverschiebung von  $z \sim 2$ , das heißt zu einer Zeit, als das Universum gerade ein Drittel seiner jetzigen Größe hatte.

Diese Gebilde enthalten inzwischen viele rote Sterne und produzieren nur wenig neue. Sie sind die Vorläufer der großen elliptischen Galaxien, wie sie den Kosmos heute dominieren, aber noch wesentlich kompakter. Offenbar erfordert ihre Entstehung das schnelle Verschmelzen sehr gasreicher Vorgänger, in denen Gas sich rasch abkühlt und zu hoher Dichte komprimiert wird. In der Situation könnten auch große Schwarze Löcher durch Akkretion stark anschwellen.

Astronomen haben oft nichtthermische Radio- und Röntgenstrahlung – ein Markenzeichen für das große zentrale Schwarze Loch – in aktiven Galaxien beobachtet, in denen zugleich besonders viele neue Sterne aufleuchten. Nicht nur, so scheint es, sind beide Prozesse eng miteinander verwoben, die SMSL könnten außerdem die Sternbildung deutlich beflügeln. Wie sollte sich das genau abspielen? Noch reichen die Daten nicht für ein klares Bild, aber Astronomen haben sich dafür bereits ein Szenario ausgedacht. Erster Akt: Wenn das zentrale Schwarze Loch zu kräftig Strahlung und Teilchen ausschleudert, dann bremst oder blockiert diese Rückkopplung im Wulst den weiteren Gaszustrom aus den fernerer Bereichen der Galaxie, so dass kaum mehr neue Sterne entstehen können.

Im zweiten Akt könnte kaltes Gas, das anfänglich aus dem Halo einer Galaxie entweicht – der Hülle Dunkler Materie, die jede Galaxie unsichtbar umgibt –, im Schwerfeld eines größeren Halo gebunden bleiben, der wie eine äußere Wolke sogar mehrere Galaxien einhüllt. Dritter Akt: Wenn dieser Superhalo später kollabiert, strömt das Gas in die Ausgangsgalaxie zurück, angereichert mit zusätzlichen Teilchenwolken, die in dem größeren Halo enthalten waren. Das würde dann nicht nur die Sternbildung wieder anfachen, sondern auch den Sturz von Gas und Materie in das zentrale Schwarze Loch.

Um dieses Szenario zu erhärten, müssten die Astronomen zuerst alle drei Akte über die gesamte kosmische Entwicklung hinweg verfolgen können. Das verlangt Daten bei hohen Rotverschiebungen, also tief in der Vergangenheit des Universums. Es könnte gut sein, dass der Vorrat an kaltem Gas, der einer Galaxie zur Sternbildung zur Verfügung steht, auch durch ein SMSL reduziert wird, das meistens ziemlich passiv ist, aber immer wieder reaktiviert wird. Ebenso könnte ein zentrales Schwarzes Loch auf Diät, das nur wenig Materie einfängt, in einen Sparmodus übergehen, in dem die Energie hauptsächlich in einem Teilchenstrahl als Bewegungsenergie statt als Strahlung emittiert wird.

Lange ging es den Astronomen nur darum, in den Zentren von Galaxien die Existenz supermassereicher Schwarzer Löcher nachzuweisen. Denn es schien ihnen einfach zu fantastisch, dass solche extremen Gravitationsmonster in Raum und Zeit tatsächlich existieren sollten. Mittlerweile

haben sie sich daran gewöhnt; sogar in Filmen, Büchern und Popsongs sind Schwarze Löcher zu alltäglichen Erscheinungen geworden.

Inzwischen geht es um andere Fragen:

► Wie beeinflussen Geburt und Wachstum der zentralen Schwarzen Löcher die Entwicklung der Galaxien?

► Was sind die fundamentalen Eigenschaften Schwarzer Löcher? Wird es gelingen, den Ereignishorizont direkt zu vermessen? Lässt sich seine Symmetrie erkennen und damit die wirkliche Natur dieser Objekte bestätigen, als Lösung der einsteinschen Gravitationstheorie? Und was wäre, wenn Abweichungen davon gefunden würden?

Am besten lässt sich die zentrale Kraftmaschine im inneren Bereich aktiver Galaxien mittels der »harten« Röntgenstrahlung untersuchen. Dort, wo ihre Energien Kiloelektronvolt überschreiten, stammt die Strahlung aus unmittelbarer Nähe des Schwarzen Lochs. Das ist vorläufig jedoch Zukunftsmusik, denn empfindliche Detektoren für harte Röntgenstrahlung sind schwer zu konstruieren.

Nur mit mehr Daten über die Gase nahe beim Schwarzen Loch und weit entfernt im Halo der Galaxie, über das Ausströmen von Materie aus der galaktischen Scheibe sowie die Sternbildung werden die Kosmologen das Zusammenspiel von Schwarzem Loch und Galaxie durchschauen. ~

#### DER AUTOR



**Gerhard Börner** promovierte an der Ludwig-Maximilians-Universität München mit einer Arbeit über Teilchenphysik. Nach Auslandsaufenthalten in Japan und den USA habilitierte er sich an der LMU für das Fach Physik und forschte als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Kosmologie, speziell die Entstehung und Entwicklung der Galaxien.

#### LITERATURTIPP

**Börner, G.:** Das neue Bild des Universums. Pantheon, München 2009  
*Überblick über das aktuelle Wissen in Kosmologie und Quantenphysik*

#### QUELLEN

**Dambeck, T.:** Beherrscht vom Schwarzen Loch. In: Spektrum der Wissenschaft 4/2013, S. 13–14  
**Genzel, R. et al.:** The GC Massive Black Hole and Nuclear Star Clusters. In: Reviews in Modern Physics 82, S. 3121–3195, 2010

#### WEBLINKS

[www.eso.org/public/videos/eso1151a/](http://www.eso.org/public/videos/eso1151a/)  
*Hier finden Sie ein Video einer Simulation der Sterne um Sgr A\*.*

[www.mpa-garching.mpg.de](http://www.mpa-garching.mpg.de)  
*Simulationen zur Galaxienbildung mit Schwarzen Löchern und andere Filme auf der Homepage des Max-Planck-Instituts für Astrophysik*

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188730](http://www.spektrum.de/artikel/1188730)

# Sky-Watcher®

**DAY &  
NIGHT**  
series



## HERITAGE-114P VIRTUOSO™

114mm (4.5") f/500 Auto-Tracking parabolischer Newton.  
Exzellentes Allround Teleskop für die Mond-, Planeten-  
und Deep-Sky Beobachtung.

### Lieferumfang:

10mm & 25mm Okulare, Red-Dot Finder, 90° Kameraadapter,  
Canon-EOS Auslösekabel, Virtuoso™ Multi-Function Mount.



## HERITAGE-90 VIRTUOSO™

90mm (3.5") f/1250 Auto-Tracking Maksutov-Cassegrain  
Ideal für die Mond-, Planeten- und Doppelsternbeobachtung,  
sowie für die hochauflösende Beobachtung bei Tage.

### Lieferumfang:

10mm & 25mm Okulare, Red-Dot Finder, 90° Kameraadapter,  
Canon-EOS Auslösekabel, Virtuoso™ Multi-Function Mount.



## VIRTUOSO™ MULTI-FUNCTION COMPUTERISED MOUNT

### Astronomische Funktionen:

- automatische Nachführung von astronomischen Objekten (Sternengeschwindigkeit)
- leise Positionierung in 5 Geschwindigkeiten: 8x, 16x, 64x, 400x & >2000x
- enthält die patentierte 'Freedom-Find' Duale-Encoder Technologie, erlaubt manuelle Schwenks in beiden Achsen ohne Verlust der Positionsdaten
- erweiterbar mit optional erhältlicher Go-To Synscan AZ Handbox & Kabel

### Fotografische Funktionen:

- "Camera Cruising": nehmen Sie automatisch Fotos mit Ihrer DSLR in bis zu 6 vorprogrammierten Positionen auf
- "Video Cruising" (Zeitrafferaufnahmen): nehmen Sie automatisch Filmsequenzen mit Ihrer Videokamera in bis zu 6 vorprogrammierten Positionen auf
- Panorama-/Matrix-Fotografie: Steuert Ihre DSLR für die Aufnahme von Panorama-Bildern bis zu 360°

[www.optical-vision.de](http://www.optical-vision.de)



Optical Vision Ltd. - UK  
Vertretungsbüro & Warenlager  
Duracher Str. 11  
D- 87437 Kempten

Tel: +49 (0)831 -697 28 82 - 10  
Fax: +49 (0)831 -697 28 82 - 20  
eMail: [info@optical-vision.de](mailto:info@optical-vision.de)  
[www.optical-vision.de](http://www.optical-vision.de)

# Zeugen des Urknalls

Möglicherweise sind in der Entstehungsphase des Universums winzige Schwarze Löcher entstanden. Ihre Entdeckung wäre eine Sensation – doch bislang entziehen sich die hypothetischen Objekte allen Nachweisversuchen.

Von **Marek A. Abramowicz** und **Julia Tjus**

**A**m 30. Juni 1908 ging in Sibirien nahe dem Fluss Tunguska ein kosmischer Querschläger nieder. Er zerstörte 2000 Quadratkilometer der unbewohnten Taiga, knickte Millionen von Bäumen um und tötete zahlreiche Tiere. Von der Kollision erzeugte Druckwellen in der Atmosphäre ließen sich noch in England nachweisen. Doch in Sibirien fanden Forscher bei ihrer Expedition einige Jahre später keinerlei Einschlagkrater. Dies führte zu ausgiebigen wissenschaftlichen Debatten – mit zum Teil bizarren Spekulationen, um welche Art Objekt es sich da gehandelt haben könnte: einen Meteor aus Antimaterie, einen eisigen Kometen, eine Geheimwaffe, ein Ufo?

1973 stellten zwei amerikanische Physiker aus Texas, Albert A. Jackson und Michael P. Ryan, die Hypothese auf, dass in der Tunguska-Region die Miniversion eines Schwarzen Lochs eingeschlagen haben könnte. Ein solches Objekt müsste eine 100-mal größere Masse gehabt haben als der Dinosaurierkiller, der vor 65 Millionen Jahren auf Yukatan niederging. Dabei wäre es winzig gewesen – gerade mal einen Millimeter groß. Solche Schwarzen Minilöcher könnten, wie Stephen Hawking in den 1970er Jahren vermutete, in der allerersten Frühzeit des Universums entstanden sein.

Die Vermutung von Jackson und Ryan ließ sich gut überprüfen. Zum einen hätte ein Miniloch beim Eindringen in die Atmosphäre tatsächlich eine Explosion ausgelöst, die Wälder großflächig zerstört hätte; zum anderen hätte so ein winziges Objekt beim Einschlag mit mehreren dutzend oder hundert Kilometern pro Sekunde kaum einen Krater erzeugt. Es hätte unter flachem Eintrittswinkel die Erdkruste durchstoßen und wäre kurze Zeit später auf der anderen Seite – mitten im Atlantik – wieder ausgetreten und ins All entschwinden. Dabei wären Erd- und Seebeben erzeugt worden. Doch die auch 1908 schon tätigen seismologischen Stationen beiderseits des Atlantiks hatten an jenem 30. Juni keine Auffälligkeiten registriert. Das besiegelte auch schon das Ende der aufregenden Hypothese.

Heute sind fast alle Forscher davon überzeugt, dass in Sibirien 1908 – entgegen obigen Spekulationen – lediglich ein kleinerer Meteorit niedergegangen ist. Dennoch bleibt die Möglichkeit von Schwarzen Minilöchern für Astronomen interessant und führt zu weitergehenden Fragen: Woher stammen solche Minilöcher? Wie häufig könnten sie mit der Erde kollidieren?

Obwohl die Diskussion um diese Objekte sehr spekulativ ist, lassen sich für die Suche danach Grenzen festlegen – teils mit theoretischen Überlegungen, teils durch bereits vorhandene Beobachtungen. Ein Schwarzes Loch kann sich nur bilden, wenn eine stark konzentrierte Masse auf ein kleines Volumen komprimiert wird. Die Größe des zur Verfügung stehenden Raumbereichs hängt ab vom so genannten Schwarzschild-Radius gemäß der Formel:  $\text{Radius} = 3 \text{ Kilometer} \times \text{Masse/Sonnenmasse}$ .

In kleinen Schwarzen Löchern müsste Materie noch wesentlich stärker zusammengepresst werden als in Atomkernen – was nur kurz nach dem Urknall passiert sein kann. Zu der Zeit war das Universum derart verdichtet, dass es in seinen eigenen Schwarzschild-Radius passte. Damit bildete der Kosmos selbst zwar noch kein Schwarzes Loch, es zeigt aber, wie dicht Materie und Strahlung seinerzeit komprimiert waren. Gleichzeitig dehnte sich das All sehr schnell aus, so dass

## AUF EINEN BLICK

### HAWKINGS SCHWARZE MINIBOMBEN

**1** Der Theoretiker Stephen Hawking sagt voraus, dass **alle Schwarzen Löcher strahlen** und sich am Ende in einer Explosion mit Gammastrahlung auflösen.

**2** Während **stellare Schwarze Löcher** in einer Supernova entstehen, können sich Schwarze Minilöcher nur kurz nach dem Urknall gebildet haben. Deren finale Gammastrahlung sollten Astronomen noch heute nachweisen können.

**3** **Schwarze Minilöcher** könnten auch mit der Erde kollidieren und Beben auslösen. Doch die These, dass der Einschlag am Tunguskafluss von 1908 ein winziges Schwarzes Loch gewesen sein könnte, gilt als widerlegt. Alle astronomischen Suchaktionen nach diesen Objekten blieben bisher ergebnislos.



Was geschah am 30. Juni 1908 in Tunguska (Sibirien)? War es ein Komet, der sich vor dem Einschlag auflöste und Millionen Bäumen umwarf? Oder traf die Erde ein Schwarzes Miniloch? Letztere Spekulation ist heute widerlegt. Doch sie beflügelte die Astrophysiker, im Kosmos verstärkt nach solchen Objekten Ausschau zu halten.

ein Kollaps in Schwarze Löcher nur an jenen Orten stattfand, wo Quantenfluktuationen lokal ultradichte Regionen erzeugten. Forscher sind sich weit gehend einig, dass auf diese Weise kleine, so genannte primordiale Schwarze Löcher unterschiedlicher Größe entstanden sein könnten.

Einsteins allgemeine Relativitätstheorie sagt die Existenz Schwarzer Löcher voraus, erlaubt aber keine Aussagen über deren Massen. Die bisher von Astronomen beobachteten Himmelskörper dieses Typs fallen in zwei sehr unterschiedliche Massenbereiche: stellare und supermassereiche.

### Entstehung nur kurz nach dem Urknall möglich

Stellare Schwarze Löcher haben mehrere Sonnenmassen sowie einen Durchmesser von wenigen dutzend Kilometern. In den letzten zwei Jahrzehnten wurden in der Milchstraße mehrere dieser Objekte entdeckt – alle in Doppelsternsystemen. Hier kreist jeweils ein Schwarzes Loch um einen gewöhnlichen Stern. Astronomen glauben jedoch, dass unsere Galaxie weit mehr dieser Doppelsternsysteme enthalten dürfte als die rund 20 bislang bekannten.

Stellare Schwarze Löcher entstehen am Ende des Lebens sehr schwerer Sterne in Supernova-Explosionen. Dabei kollabiert das Innere des Sterns unter der eigenen Schwerkraft und komprimiert die eingeschlossene Materie theoretisch bis über alle Grenzen hinaus. Ist die Ausgangsmasse hinreichend groß, bildet sich dabei ein Schwarzes Loch. Dessen Gravitation ist so stark, dass hinter einer bestimmten Grenze, dem so genannten Ereignishorizont, selbst Licht nicht mehr entweichen kann. Obwohl noch nicht alle Details eines solchen Gravitationskollapses mit heutigen Supercomputern simuliert werden können, gelten seine physikalischen Grundlagen als relativ gut verstanden. Wir glauben daher recht genau zu wissen, wie stellare Schwarze Löcher entstehen.

Ihre supermassereichen Geschwister besitzen hingegen Massen von Millionen- oder Milliardenfachen unserer Sonne. Ihre Größe reicht vom Durchmesser der Erd- bis zu dem der Pluto-Umlaufbahn. Solche Schwarzen Löcher haben Astronomen in den Zentren der meisten Galaxien aufgespürt,

auch in der Milchstraße. Ihre Entstehung ist weniger gut verstanden als die der stellaren Schwarzen Löcher (siehe den vorherigen Beitrag).

Die hypothetischen Schwarzen Minilöcher mit geringen Massen würden sich von den beiden Typen noch einmal deutlich unterscheiden. Sollte eines Tages ein solches Objekt nachgewiesen werden, dürfte es sich um einen primordialen Gast aus der Frühzeit des Universums handeln – einen Zeugen des Urknalls. Denn nur in der allerersten Frühzeit des Universums herrschten die notwendigen Bedingungen für ihre Entstehung, nämlich die überkritische Verdichtung der Materie in Quantenfluktuationen. Die Entdeckung eines derartigen Schwarzen Lochs wäre für Astrophysiker und Kosmologen von fundamentaler Bedeutung. Einerseits würde sie die Prozesse kurz nach dem Urknall beleuchten, andererseits – siehe unten – Stephen Hawkings These belegen, dass Schwarze Löcher nicht gar so schwarz sind, sondern verdampfen und explodieren können.

Trotz intensiver Suche wurden bislang jedoch noch keine Himmelsobjekte dieses Typs gefunden. Daran könnten un-



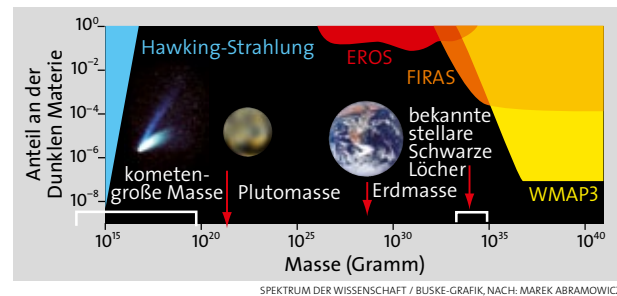
## Die Suche nach primordialen Schwarzen Löchern

Einen Blick auf **primordiale Schwarze Löcher** zu werfen, dürfte schon deshalb nicht einfach sein, weil sie sehr klein sind und die meiste Zeit nahezu unsichtbar. Sie könnten allerdings charakteristische Spuren hinterlassen. Das Fehlen aller Hinweise führt zu starken Einschränkungen, wenn man ihren Beitrag zur Dunklen Materie in unterschiedlichen Massebereichen abschätzen will:

- **Kometengroße Massen** ( $\sim 10^{15}$  Gramm): Diese Objekte sollten infolge der Hawking-Strahlung verdampfen. Da aber solche Zerfallssignale aus Gammastrahlung bislang nicht beobachtet wurden, dürfte diese Größenklasse primordialer Schwarzer Löcher weniger als das  $10^{-8}$ -Fache der Dunklen Materie ausmachen.
- **Planetengroße Massen** ( $\sim 10^{25}$  Gramm und mehr): Mit Hilfe des Mikrolinseneffekts konnten ebenfalls noch keine Hinweise entdeckt werden. Mit Suchprogrammen erwarten Astronomen den Beitrag dieser Kategorie auf maximal zehn Prozent der Dunklen Materie einzugrenzen.
- **Sternengroße Massen** ( $\sim 10^{30}$  Gramm und mehr): Analysen der kosmischen Hintergrundstrahlung lassen Rückschlüsse auf die Existenz solcher Schwarzer Löcher zu. Die bereits bekannten

derartigen Objekte können aber nicht in der Frühzeit des Universums entstanden sein, weil sie sonst einen starken Einfluss auf den (sehr gleichmäßigen) kosmischen Mikrowellenhintergrund ausgeübt hätten.

Daher können primordiale Schwarze Löcher mit Größen unterhalb von  $10^{15}$  Gramm und oberhalb von  $10^{25}$  Gramm als Hauptbestandteile der Dunklen Materie ausgeschlossen werden. Für die dazwischenliegenden gibt es noch keine guten Nachweismethoden. Diese Objekte mit Massen ähnlich der des Pluto scheinen sich spurlos durch das Universum zu bewegen – sofern sie überhaupt existieren. Selbst Kollisionen mit Objekten wie Sternen blieben für irdische Beobachter bisher verborgen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK, NACH: MAREK ABRAMOWICZ

geeignete Nachweismethoden schuld sein, oder Schwarze Minilöcher kommen in unserer Galaxie zu selten vor, oder die Natur hat sie einfach nicht hervorgebracht. Bis heute ist unklar, wo sie am besten aufgespürt werden könnten.

### Je mehr Energie Schwarze Minilöcher verlieren, desto heißer werden sie – bis sie explodieren

Manche Forscher halten es für möglich, dass solche Objekte Teil der so genannten Dunklen Materie sind. Diese wiederum bildet ein Rätsel für sich. Astronomische Präzisionsbeobachtungen haben zweifelsfrei ergeben, dass es im Universum viel zu wenig sichtbare Masse gibt, um allein gemäß den newtonschen Gesetzen die Geschwindigkeiten zu erklären, mit denen sich die Sterne voneinander wegbewegen. Daraus folgt, dass entweder das Schwerkraftgesetz einer Revision bedarf – oder dass es in der Milchstraße und anderen Galaxien große Mengen unsichtbarer Materie geben muss. Die meisten Forscher plädieren für letztere Erklärung. Andere halten es außerdem für möglich, dass ein Teil davon in unserer Galaxie aus primordialen Schwarzen Löchern besteht.

Wie könnten Astronomen das nachweisen? Und welche Konsequenzen hätte das? Diesen Fragen gehen die Experten nach, seitdem Stephen Hawking 1971 die Existenz von Miniaturlöchern postuliert hatte. Der britische Theoretiker schlug auch eine Methode vor, mit der sie nachgewiesen werden können – nämlich mittels einer Strahlung, die heute »Hawking-Strahlung« heißt und von Schwarzen Löchern generell ausgehen soll. Demzufolge wären solche Objekte nicht völlig schwarz, sondern emittierten Elementarteilchen – ein

Phänomen, das mit Quantenfluktuationen am Ereignishorizont zusammenhängt.

Dieser Teilchenstrom reduziert allmählich die Masse  $M$  eines Schwarzen Lochs, bis es sich mutmaßlich in einer gewaltigen finalen Explosion energiereicher Gammastrahlung auflöst. Diesem Prozess lässt sich eine Temperatur zuordnen, die mit  $1/M$  variiert, sowie eine Lebensdauer proportional zu  $M^3$ . Das heißt: Kleine Massen erhitzen sich schneller und existieren kürzer, große Massen haben Lebensdauern, die das Alter des Universums übertreffen. Primordiale Schwarze Löcher mit einer Masse von weniger als  $10^{15}$  Gramm (was der eines kleinen Kometen entspricht) wären heute bereits explodiert. Denn ihre Lebensdauer entspricht laut Hawking genau dem Alter des Universums von 13,7 Milliarden Jahren; sie würden also gerade in unserer kosmischen Epoche zerplatzen. Für ein Schwarzes Loch mit einer Sonnenmasse läge die Lebensdauer dagegen bei sagenhaften  $10^{67}$  Jahren, würde aber bei  $10^{11}$  Kilogramm auf relativ kurze 2,7 Milliarden Jahre schrumpfen. Das wäre ein Objekt, das astronomische Spuren hinterlassen haben könnte.

Der Moskauer Astrophysiker Maxim Y. Khlopov und seine Kollegen berechneten, dass wir in der Dunklen Materie die Spuren der Gammastrahlung beobachten können müssten, die bei der Explosion kleiner Schwarzer Löcher freigesetzt würde. Leider konnten solche Strahlungsrelikte bislang nicht entdeckt werden. Das bisherige Fehlen jedes Hinweises in den Beobachtungsdaten lässt eher daran zweifeln, dass primordiale Schwarze Löcher tatsächlich Teil der Dunklen Materie sind.





**Freie Stellen!**

- Fachberater/in Astronomie
- Leiter/in Produktsourcing und Lieferantenbeziehungen
- Mitarbeiter/in im Content Management - Kategorien Astronomie und Mikroskopie

weitere Informationen finden Sie auf unserer Unternehmensseite [nimax.de](http://nimax.de)

## Teleskope und Ferngläser

### ■ Omegon Einsteigerteleskope

Die Teleskope von Omegon sind gerade für den Einstieg in die Astronomie besonders zu empfehlen. Unsere Marke Omegon steht für ausgewählte Produkte und geprüfte Qualität zum kleinen Preis, oft günstiger als vergleichbare Modelle anderer Marken.



**Unser Kauf Tipp**

|   | Artikel-Nr.  | Preis                          |
|---|--------------|--------------------------------|
| 1 | 60/700 AZ-1  | 11267 <b>69,90</b> statt 79,-  |
| 2 | 114/900 EQ-1 | 11266 <b>149,-</b> statt 159,- |
| 3 | 130/920 EQ-2 | 13762 <b>199,-</b>             |
| 4 | 150/750 EQ-4 | 22465 <b>329,-</b> statt 349,- |

### ■ Omegon Nightstar 20x80

Ein sehr schönes Fernglas, mit hoher Auflösung. Mit 80mm Öffnung sammelt es fast 20% mehr Licht als eine 70mm Öffnung. Erkennen Sie mehr Himmelsobjekte und entdecken somit weit entfernt liegende Galaxien und Einzelsterne. Nicht selbstverständlich ist eine volle Multivergütung auf allen optischen Flächen, aber bei dem 20x80 ist auch dies gegeben. Damit haben Sie eine hervorragende Bildhelligkeit bei hohem Kontrast.



Artikel-Nr.: 12461 Preis: 129,-

### ■ Omegon Nightstar 25x100 mit Tasche

Das Omegon Nightstar 25x100 ist ein leistungsfähiges Großfernglas für Naturbeobachtungen und ein lichtstarkes Instrument für astronomische Übersichtsbeobachtungen. Es eignet sich aufgrund der eingebauten Filtergewinde auch ausgezeichnet für großflächige Nebelregionen. Es bietet mit 4mm Austrittspupille auch dem Naturbeobachter bei zunehmender Dämmerung eine helle und kontrastreiche Abbildung. Durch überdimensionierte BaK-4 Prismen ist eine große Ausleuchtung gewährleistet.



Artikel-Nr.: 14698 Preis: 299,-

## Empfehlungen

### ■ Kosmos Himmelsjahr 2013

Dieses Jahrbuch beinhaltet alle Mondphasen, einen monatlichen Überblick von Planeten, Sternbildern und besondere Ereignisse am Firmament sowie Berichte über astronomische Phänomene und die Rätsel des Weltalls.



Artikel-Nr.: 25453 Preis: 16,99

### ■ Oculum Verlag Fernrohr Führerschein in 4 Schritten

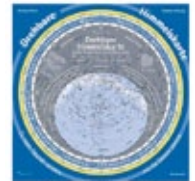
Dieses Buch bringt anfangersfreundlich alle Antworten auf Fragen rund um die Optik, Mechanik und Benutzung eines astronomischen Teleskops. Erstmals wurden alle wichtigen Definitionen und Formeln zur Fernrohrtechnik zusammengefasst.



Artikel-Nr.: 1486 Preis: 16,90

### ■ Oculum Verlag Drehbare Himmelskarte

Diese drehbare Sternkarte ist ein Basis-Instrument für das Hobby Astronomie. Hiermit lernen Sie umfassend den kompletten Sternenhimmel kennen.



Artikel-Nr.: 4893 Preis: 14,90

### ■ Sega Toys Homestar Planetarium

Holen Sie sich 60.000 funkelnde Sterne vom Himmel an Ihre Zimmerdecke. Stellen Sie sich vor Sie könnten den Sternenhimmel beobachten während Sie bequem auf der Couch sitzen. Mit Homestar, dem hochauflösenden 3 Watt LED Heimplanetarium mit Rotationsbewegung, das das Bild des Himmelsgewölbes dem Jahresverlauf getreu wiedergibt, wird dieser Traum Wirklichkeit.



Artikel-Nr.: 26925 Preis: 119,-

## Persönliche Beratung

@ Service@Astroshop.de

+49 8191 94049-1

+49 8191 94049-9

**Astroshop.de**  
c/o nimax GmbH  
Otto-Lilienthal-Str. 9  
86899 Landsberg am Lech  
Direkt an der A96 und B17,  
ca. 30min von Augsburg  
und München.

Damit wir uns genug Zeit für Sie nehmen können, rufen Sie bitte immer vor Ihrem Besuch bei uns an und vereinbaren einen Termin. >>>Danke<<<

Wir sind Mo-Fr von 9-17 Uhr und jeden 1. Sa im Monat von 10-16 Uhr für Sie da!



MEHR WISSEN BEI  
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Kosmologie« finden Sie unter  
[www.spektrum.de/kosmologie](http://www.spektrum.de/kosmologie)

Eine weitere Suchmethode hat der polnische Physiker Bohdan Paczynski (1940–2007) vorgeschlagen: Man könnte doch Schwarze Minilöcher als winzige Gravitationslinsen nutzen, die gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie das Licht jeweils dahinterliegender Lichtquellen ablenken und fokussieren. Das umfangreichste Programm in dieser Richtung läuft derzeit am Ein-Meter-Teleskop des La-Silla-Observatoriums in Chile. Dort wird nach Planeten Ausschau gehalten, die als Mikrogravitationslinsen fungieren könnten. Auch Schwarze Minilöcher lassen sich so vielleicht aufspüren.

### Hat die Natur sich gegen uns verschworen?

Laut einigen Forschern müssen auch sternähnliche Schwarze Löcher nicht unbedingt aus einem Sternkollaps hervorgegangen sein, sondern könnten aus der kosmischen Frühzeit stammen. Aber hätten sie sich damals überhaupt schon bilden können? Die Frage kann mit Hilfe der kosmischen Hintergrundstrahlung überprüft werden. Diese stammt aus der Zeit von etwa 300 000 Jahren nach dem Urknall und stellt einen der wichtigsten Belege dafür dar, dass dieser überhaupt stattgefunden hat. Sie entkoppelte sich damals von der übrigen Teilchensuppe und ist heute im Mikrowellenbereich nachweisbar.


Abgesehen von einer Verschiebung zu größeren Wellenlängen, die auf die Ausdehnung des Universums zurückgeht, blieb diese Strahlung weit gehend unverändert. Aus ihren Eigenschaften haben Theoretiker als Obergrenze abgeschätzt, dass Schwarze Löcher stellarer Masse höchstens 0,1 Prozent der gesamten Dunklen Materie ausmachen können. Sonst hätten sie sich in der kosmischen Hintergrundstrahlung durch größere Fluktuationen verraten müssen, als beobachtet wurden.

So kann ausgeschlossen werden, dass besonders kleine primordiale Schwarze Löcher (unterhalb von  $10^{15}$  Gramm) und solche mit der Masse mehrerer Sonnen signifikant zur Dunklen Materie beitragen (siehe den Kasten auf S. 40). Für solche mit der dazwischenliegenden Größe von Planetoiden ( $10^{15}$  bis  $10^{21}$  Gramm) gibt es bis heute keine Nachweismethode. Sollten diese den Löwenanteil der Dunklen Materie ausmachen, müssten sie auch häufig mit der leuchtenden Materie wechselwirken – insbesondere mit Sternen und ähnlichen Objekten.

Nur ließen sich leider solche Kollisionen nicht von der Erde aus beobachten. Denn zum einen müsste ein Schwarzes

Miniloch dabei hinreichende Mengen an Energie – als elektromagnetische Strahlung – aussenden. Zum anderen müssten sich derartige Ereignisse häufig genug ereignen, dass wir sie zu unseren Lebzeiten beobachten können.

Die Natur scheint sich also geradezu gegen uns verschworen zu haben: Kollisionen von Schwarzen Löchern mit der Masse von Kometen wären häufig, setzten dann aber zu wenig Energie frei, um mit heutigen Teleskopen nachweisbar zu sein. Bei Zusammenstößen mit schwarzen Minilöchern in der Größenordnung von Planeten entstünden hingegen riesige Energiemengen, diese Objekte wären jedoch äußerst selten. So oder so erhalten wir keine Signale von Schwarzen Minilöchern mittlerer Größe, die mit stellaren Objekten kollidieren. Somit sehen die Astronomen bisher keine Möglichkeit, diese potenziellen Überreste des frühen Universums aufzuspüren, obwohl sie in unserer Galaxie möglicherweise in großer Zahl vorkommen.

Zu den neuesten Forschungsprojekten zählt die Suche nach Hinweisen auf bestimmte Schwingungen, mit denen sich Schwarze Minilöcher mit einer Masse oberhalb von  $10^{21}$  Gramm theoretisch nachweisen ließen: Die Kollision eines primordialen Schwarzen Lochs mit einem Stern ruft in dem Himmelskörper akustische Wellen hervor, die mit seismischen Sensoren gemessen werden könnten. Vielleicht kann man so ja doch noch herausfinden, ob größere Objekte dieser Art zur Dunklen Materie beitragen. Für den Massenbereich zwischen  $10^{15}$  und  $10^{21}$  Gramm müssen Physiker allerdings ganz neuartige Forschungsansätze entwickeln. 

#### DIE AUTOREN



**Marek A. Abramowicz** promovierte an der Universität in Warschau und ist heute Professor für Astrophysik an der Universität in Göteborg. Er befasst sich vorwiegend mit Schwarzen Löchern, Quasaren, Neutronensternen und

Gammastrahlenausbrüchen. **Julia Tjus** promovierte an der Technischen Universität Dortmund und arbeitete danach an der Universität in Göteborg zusammen mit Marek Abramowicz über primordiale Schwarze Löcher. Heute ist sie an der Ruhr-Universität Bochum Professorin für Plasma-Astroteilchenphysik und arbeitet vor allem über hochenergetische Teilchen in astrophysikalischen Quellen.

#### QUELLEN

- Camenzind, M.:** Compact Objects in Astrophysics: White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes. Springer, Heidelberg 2007  
**Schulz, G., Vaas, R.:** Hawkings Kosmos einfach erklärt: Vom Urknall zu den Schwarzen Löchern. Kosmos, Stuttgart 2011  
**Sing, S.:** Big Bang: Der Ursprung des Kosmos und die Erfindung der modernen Naturwissenschaft. dtv, München 2007

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188731](http://www.spektrum.de/artikel/1188731)

# NEHMEN SIE UNS MIT!

Ausgewählte Magazine aus dem Verlagshaus **Spektrum der Wissenschaft** nun auch für iPad und Android-Tablets



alle Artikel  
im Volltext

Lesemodus

zoombare  
Bilder und  
Grafiken

Videoclips  
& Weblinks

Leseseichen

Suchoptionen



[www.spektrum.com/kioskapp](http://www.spektrum.com/kioskapp)



Tel.: 06221 9126-743

Fax: 06221 9126-751

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

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH

Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

# Networking für Tomaten

Stapelt man Gegenstände in der Einkaufsstüte, fallen die obersten nicht mehr so sehr ins Gewicht. Wiegt das Ganze womöglich weniger als die Summe seiner Teile?

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Warum, dachte ich, sinkt wohl das Gewölbe nicht ein, da es doch keine Stütze hat?

Es steht, antwortete ich, weil alle Steine auf einmal einstürzen wollen.

*Heinrich von Kleist (1777–1811)*



H. JOACHIM SCHLICHTING

Die erste Regel beim Einpacken der Einkäufe an der Supermarktkasse lautet: Bloß nicht die Tomaten ganz nach unten! In der Hektik landen sie aber doch gelegentlich dort, und am Ende stapeln wir unter Umständen noch schwere Milchkartons obendrauf. Trotzdem: Zu Hause angekommen, holen wir die Tomaten meist unversehrt aus der Tüte, und selbst die gefährlich gegeneinander verkanteten Jogurtbecher sind heil geblieben. Macht die Schwerkraft, die sonst alles beherrscht, eine Ausnahme für Eingetütetes?

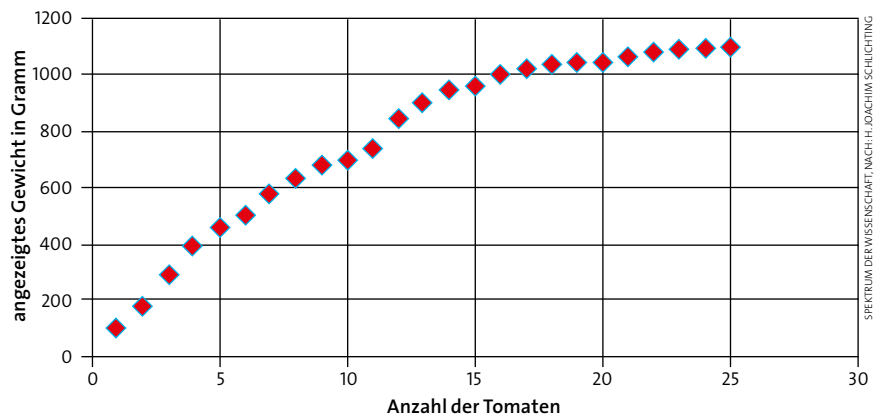
Tatsächlich fällt das, was eigentlich schwer auf den Tomaten lasten sollte, nicht so sehr ins Gewicht, wie man erwarten würde. Dieser Eindruck hält sogar einer wissenschaftlichen Überprüfung stand. Betrachten wir, was passiert, wenn wir Tomaten aufeinanderlegen. Dazu rollen wir eine feste Kunststoffolie zu einem Zylinder und fixieren diesen mit Klebeband in seiner Form; er soll die Wand der Einkaufsstüte repräsentieren. Nun stülpen wir ihn so über eine Haushaltswaage, dass er de-

Überraschendes Experiment: Zunächst erhöht jede hinzukommende Tomate die Anzeige der Waage um etwa denselben Betrag. Mit der Zeit scheinen zusätzliche Tomaten aber immer weniger ins Gewicht zu fallen (Diagramm unten).

ren Schale eng umgibt, diese sich aber dennoch frei auf- und abbewegt.

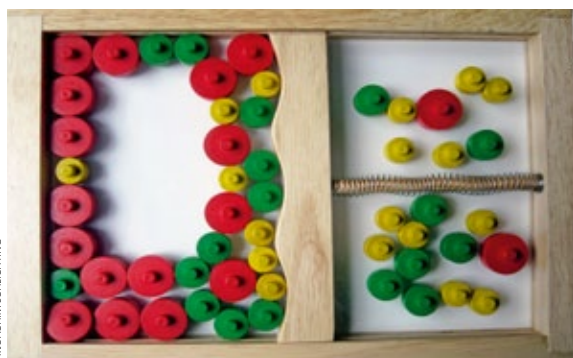
Jetzt brauchen wir noch einige möglichst gleich schwere Tomaten, die wir nacheinander auf die Schale der Waage

legen. Bei jedem einzelnen Exemplar, das hinzukommt, notieren wir den Gewichtszuwachs auf der Anzeige. Sobald die Schale voll ist, stapeln wir eine zweite und eine dritte Lage darüber, die nun



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH H. JOACHIM SCHLICHTING

Rätselhaftes Ergebnis: Je mehr Tomaten in den Zylinder gelegt werden (Fotos oben), desto weniger scheinen die neu hinzukommenden zu wiegen. Sperrige Güter, zum Beispiel Klötze verschiedener Formen, würden die Kurve noch stärker abknicken lassen.



Beim Scheibenmikado können relativ wenige Scheiben eine stabile Konfiguration bilden (linke Bildhälfte), die dem Druck der Feder (Bildmitte rechts) standhält.

nur noch der Kunststoffzylinder am Herunterkollern hindert.

Und siehe da, es geschieht Unerwartetes: Das Gewicht nimmt nicht etwa linear mit der Zahl der Tomaten zu. Beginnend schon mit der zweiten Lage, weicht sie immer mehr von der gedachten Geraden (Diagramm links unten) ab – ganz so, als ob die später aufgelegten Tomaten immer weniger wögen und schließlich fast gar nichts mehr zum Gewicht beitrügen.

### Unkalkulierbares Verhalten

Kann das sein? Wiederholen wir das Experiment mehrmals, um ganz sicher zu gehen. Dabei stellen wir fest, dass wir einander ähnliche, aber nicht dieselben Kurven erhalten. Sie lassen sich nicht einmal dann reproduzieren, wenn man die Tomaten in derselben Reihenfolge auftürmt. Nur eines ist immer gleich: Das von der Waage angezeigte Gesamtgewicht liegt stets unter der Summe der Einzelgewichte.

Aus diesem unkalkulierbaren Verhalten wurde sogar eine Spielidee entwickelt. Das so genannte Scheibenmikado (siehe Foto oben) basiert auf einem Rahmen mit vier festen Wänden und einer verschiebbaren fünften Begrenzung. Eine gespannte Feder sorgt dafür, dass Letztere gegen die vielen runden Scheiben drückt, mit denen der Raum zwischen den Wänden ausgefüllt ist. Die Aufgabe lautet, so viele Scheiben wie möglich vom Spielfeld zu entfernen, ohne dass sich dabei andere bewegen.

Es zeigt sich, dass nicht alle Scheiben dem Federdruck ausgesetzt sind: Manche lassen sich völlig frei entneh-

men. Doch schon, wenn zwei Scheiben nur geringe Kraft aufeinander ausüben, sollte man Vorsicht walten lassen – entfernt man eine davon, drückt die Feder unter Umständen das ganze Feld abrupt in eine neue Konstellation. Geschickte Spieler können das aber vermeiden. Am Ende bleibt dann etwa ein Muster nach Art eines Fachwerks übrig, welches das System zu stabilisieren vermag, obwohl es nur aus relativ wenigen Scheiben besteht.

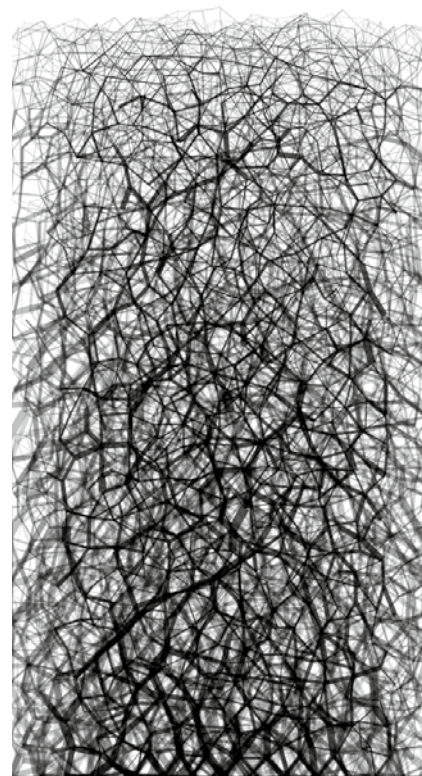
Der Grund für das erstaunliche Phänomen liegt offensichtlich darin, dass sich Kraftbrücken zwischen den Scheiben bilden. Die von der Feder ausgeübte Kraft wirkt also nicht einfach parallel zur Federachse, sondern entlang bestimmter, sich zufällig ausbildender Pfade zwischen den Kontaktpunkten von Scheiben und Behälterwänden. Manche Scheiben werden dabei »umgangen« und bleiben kräftefrei. Andere geben die Belastung weiter, bis sie schließlich nicht nur die der Feder gegenüberliegende Wand erreicht, sondern sich auf alle Wände verteilt.

### Selbsttragende Kraftbrücken wie im Gewölbekeller

Auch die Gewichtskraft des Inhalts unseres Plastikzylinders ist nicht einfach nur nach unten gerichtet. Vielmehr bilden sich zwischen den Tomaten selbsttragende Kraftbrücken aus, die bis zur Hülle reichen – ähnlich wie in Gewölbekellern, wo die Gewichtskraft der Deckensteine auf Wände oder Pfeiler abgeleitet wird. Während die Hülle dadurch nun stärker auf ihre Unterlage drückt, zeigt die Waagschale weniger an als erwartet;

beide Effekte gleichen sich natürlich genau so aus, dass die Masse des Ganzen eben doch der Summe der Einzelmassen entspricht. Darum ist auch der Träger der Einkaufsstüte nicht entlastet – die oben liegenden Tomaten zerren über den Umweg der Tütenwand weiterhin am Griff der Tüte.

Fachleute bezeichnen die sich über wechselnde und zufällige Pfade verteilenden Kräfte in einem solchen granularen System als Kontaktnetzwerke. Um sie zu simulieren, berechnet man die mechanische Wechselwirkung zwischen den Teilchen untereinander und mit den Wänden in vielen kleinen, aufeinander folgenden Zeitschritten. Dabei gilt das newtonsche Kraftgesetz: Die Masse der Teilchen multipliziert mit ihrer Beschleunigung – die etwa durch das Erdschwerefeld oder durch die gespannte Feder hervorgerufen wird – er-



Die grafische Darstellung eines Kontaktnetzwerks von Teilchen in einem Behälter entstammt einer Computersimulation. Jede Kraft zwischen zwei Teilchen ist durch eine Linie dargestellt, deren Dicke proportional zum Betrag der Kraft ist.



Im Oktober 2012 platzte einer dieser mit je 1000 Tonnen Gerste gefüllten Silos im niedersächsischen Bad Laer wie aus heiterem Himmel. Zu den möglichen Erklärungen zählt eine extreme Drucklokalisierung an der Behälterwand, wie sie sich in Kontaktnetzwerken kaum vermeiden lässt.

gibt die Kraft, mit der sie auf die darunterliegenden drücken. Darüber hinaus setzt man voraus, dass die Teilchen Kugelform besitzen, sich aber während des Kontakts elastisch verformen können. Außerdem spielt die Reibung zwischen ihnen und der Wand eine wichtige Rolle; beispielsweise dürfen sie nicht einfach aneinander abgleiten.

### Kontaktnetzwerke lassen sogar Silos platzen

In der Physik der so genannten granularen Materie haben Kontaktnetzwerke in den vergangenen beiden Jahrzehnten große Bedeutung erlangt. Beobachten lassen sie sich weder bei Flüssigkeiten noch im Inneren von Festkörpern, stattdessen aber zum Beispiel in Dünen, Staubwolken oder Lawinen und natürlich bei jeder Form von Schüttgütern wie etwa Sand, Getreide oder Pulver. Daher faszinieren sie nicht nur

Grundlagenforscher, sondern finden auch ganz bodenständige Anwendungen. So werden etwa Abfüllanlagen für Granulate zuweilen durch Kraftbrücken verstopft. In diesem Fall schaffen so genannte Rüttler Abhilfe, die dasselbe tun wie wir, wenn wir Reis abfüllen und dabei hin und wieder an den Trichter klopfen: Sie verhindern die Ausbildung stabiler Netzwerke.

Gelegentlich sorgt das Phänomen auch für größere Schäden. Wie jeder feststellen kann, der unser kleines Experiment nachvollzieht, deformieren die Tomaten ihre Hülle zuweilen überraschend stark. Solche Drucklokalisationen können in der Praxis nicht nur Einkaufsstüten, sondern ganze Getreidesilos regelrecht platzen lassen (siehe Foto oben). Die Regel ist das zum Glück nicht. Meist ordnet sich das Kontaktnetzwerk bei zunehmendem Druck einfach neu an. ~

### DER AUTOR



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

### QUELLE

**Masson, S., Martinez, J.:** Effect of Particle Mechanical Properties on Silo Flow and Stresses From Distinct Element Simulations. In: Powder Technology 109, S. 164–178, 2000

### LITERATURTIPP

**Wirthgen, S.:** Granulare Materie – ausgewählte Experimente und Simulationen. *Masterarbeit aus dem Jahr 2011 mit weiteren Beispielen, Auszüge siehe Link unten*

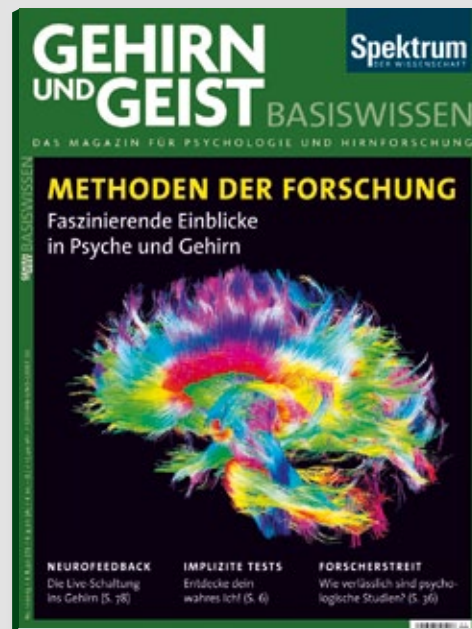
### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188733](http://www.spektrum.de/artikel/1188733)

# UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



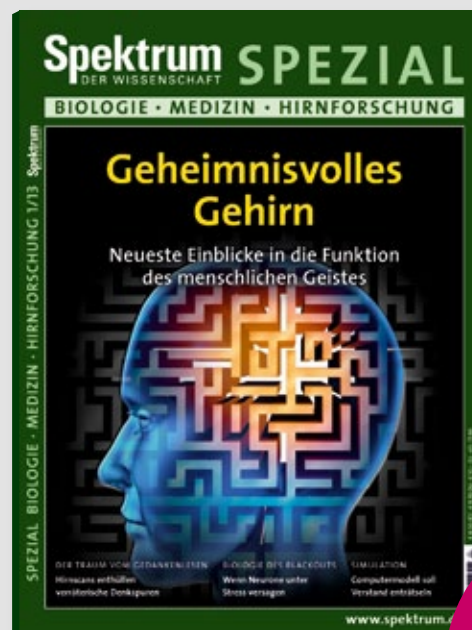
Wie unser Planet entstand – und wie das Leben darauf kam • Das Klima im Wandel der Erdgeschichte • Geologie: Stich in den Supervulkan • Was Fossilien erzählen • € 6,50 (ab 7.5.2013)



Neurofeedback: Live-Schaltung ins Gehirn • Implizite Tests: Das Unbewusste ergründen • Wie verlässlich sind psychologische Studien? • € 8,90



Besiedlung: Mit dem Boot in die neue Heimat • Amazonien: Versunkene Städte im Dschungel • Klima: Meeressedimente zeugen vom Ende einer Kultur • € 8,90



Komplexitätstheorie: Das Gehirn als Netzwerk • Springende Gene: Was jedes Gehirn einzigartig macht • Biologie des Blackouts • Schizophrenie: Vorboten des Ich-Verlusts • € 8,90

AUSGEWÄHLTE SONDERHEFTE ALS PDF ODER APP ERHÄLTlich

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

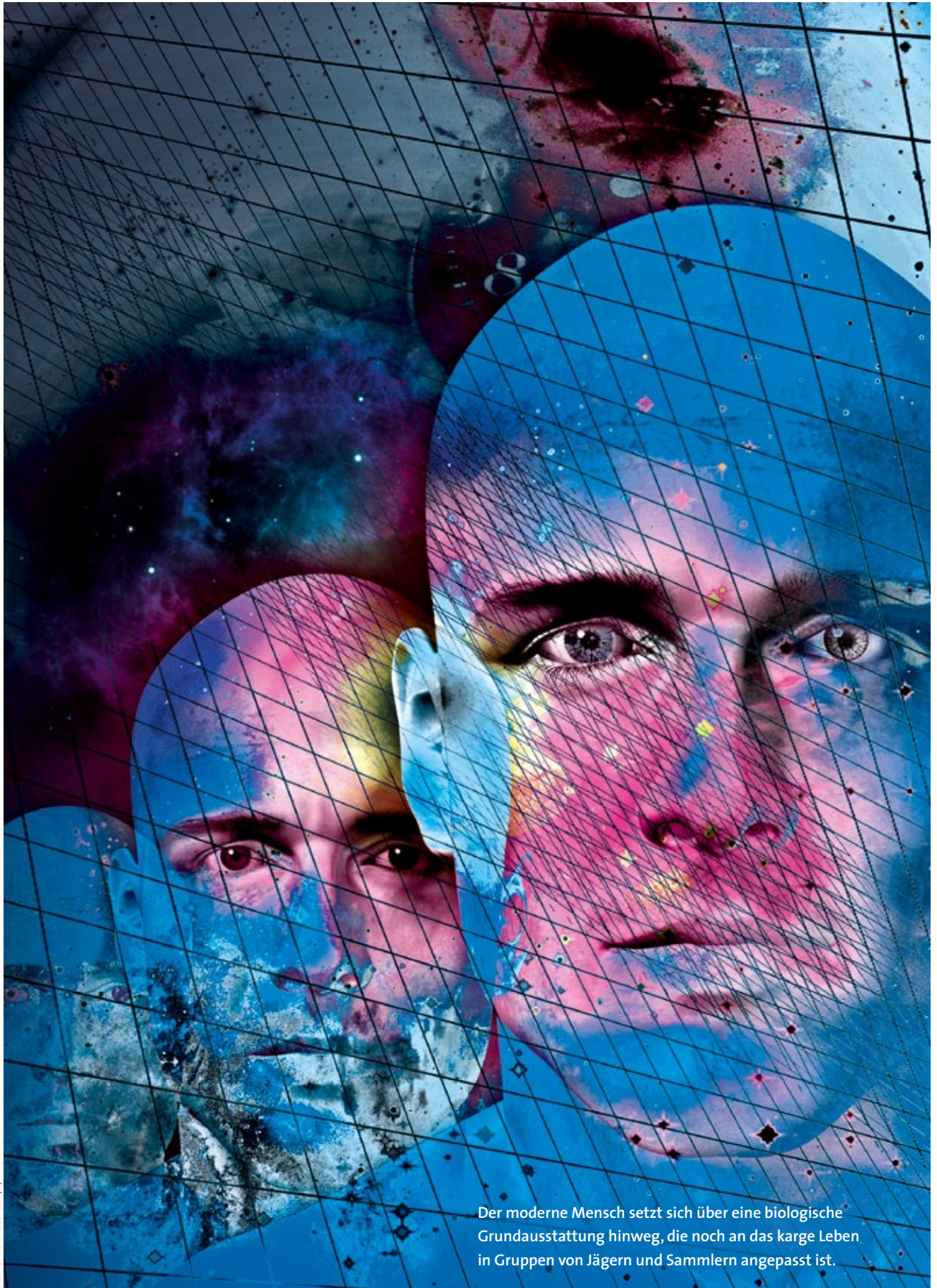


Tel.: 06221 9126-743  
Fax: 06221 9126-751  
E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH  
Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



Der moderne Mensch setzt sich über eine biologische Grundausrüstung hinweg, die noch an das karge Leben in Gruppen von Jägern und Sammlern angepasst ist.



TITELTHEMA | EVOLUTION

# Auf dem Weg zum Supermenschen

Wie alle Lebewesen sind auch wir ein Produkt der biologischen Evolution. Doch unser Drang, die evolutionären Ketten zu sprengen, unterscheidet uns von allen anderen Tieren. Ein wichtiges Mittel dazu ist die moderne Naturwissenschaft.

Von Robert M. Sapolsky

**W**enn man sich mit einem Anthropologen über die Natur des Menschen unterhält, bekommt man unweigerlich zu hören: »Die Menschheitsgeschichte hat sich zu 99 Prozent in der offenen Savanne abgespielt, wo kleine Gruppen aus Jägern und Sammlern zusammenlebten.« Das ist ein Klischee – und es stimmt. Tatsächlich haben sich auf diese Weise im Lauf von Millionen Jahren die für uns Menschen typischen Eigenschaften entwickelt, vor allem der aufrechte Gang und das große Gehirn. Diese ungemein nützlichen evolutionären Errungenschaften hatten allerdings ihren Preis. Das Stehen auf zwei Beinen macht anfällig für Rückenschmerzen, und unsere hoch entwickelte, zur Selbstreflexion fähige Großhirnrinde stürzt uns mitunter gar in existenzielle Verzweiflung.

Hinzu kommt: Die moderne Welt unterscheidet sich dramatisch von der Umgebung, in der sich Körper und Geist entwickelten und an die sie daher auch adaptiert sind. Statt das Abendessen zu Fuß zu jagen, bestellen wir es beim Pizzaservice. Um mit unseren Lieben zu kommunizieren, loggen wir uns bei Facebook ein, statt ein Leben lang den größten Teil des Tages mit ihnen zu verbringen. Wollen wir unser heutiges Dasein erklären, kommen wir also mit dem Klischee der Anthropologen allein nicht besonders weit. Was aber ermöglichte die rasante kulturelle Entwicklung des Menschen?

Offenbar zeichnet sich die menschliche Gattung dadurch aus, dass wir über die von der Evolution auferlegten Grenzen hinausstreben, indem wir Werkzeuge entwickeln, die uns schneller und klüger machen und länger am Leben erhalten. Ein solches Werkzeug ist die Wissenschaft. Sie zwingt uns, kurzichtiges Steinzeitdenken in Frage zu stellen, damit wir die jeweils aktuelle Hürde überwinden können – sei es eine Grippeepidemie oder der Klimawandel. Kurz: Wir möchten immer besser werden.

Um zu verstehen, wie die natürliche Selektion uns zu solch einzigartigen Primaten geformt hat, müssen wir kurz zur Savanne zurückkehren. Ihr offenes Gelände unterschied sich deutlich von den Wäldern, in denen die äffischen Vorläu-

fer des Menschen zu Hause gewesen waren. Die Sonne brannte heißer, und Nahrungspflanzen waren rarer. Wegen der Hitze verloren die Frühmenschen ihre dichte Körperbehaarung. Ihre Backenzähne schrumpften, weil sie nicht mehr nur harte Pflanzen kauten, sondern die vegetarische Diät durch das Fleisch von Jagdtieren ergänzten.

## Typisch menschliche Eigenheiten

Um trotz knapper Nahrung zu überleben, mussten die Körper unserer fernen Urahnen sie sehr effizient nutzen und momentan nicht benötigte Kalorien gut speichern können. Mit diesem ererbten Stoffwechsel jagen und sammeln wir heute Big Macs. Die Folge: Diabetes wird zur weltweiten Plage. Aber auch das Immunsystem entwickelte sich in einer Welt, in der man kaum einmal jemanden traf, der einen neuartigen Krankheitserreger in sich trug. Wenn Sie heutzutage auf einem Flughafen niesen, kann Ihr Schnupfenvirus am nächsten Tag zwölf Zeitzonen weit gereist sein.

Besonders eigentümlich ist unser Verhalten. Menschenaffen lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen. Einerseits gibt es recht friedfertige Arten, bei denen Männchen und Weibchen stabile, dauerhafte Paare bilden. Die Männchen kümmern sich teilweise oder sogar vorwiegend um die Jun-

## AUF EINEN BLICK

### FORSCHENDE PRIMATEN

**1** Die **moderne Welt** unterscheidet sich grundlegend von den Lebensbedingungen, an die sich unsere Vorfahren im Lauf von Millionen Jahren adaptiert haben. Das schafft eine Fülle von Problemen.

**2** Das **Missverhältnis zwischen biologischem Erbe und moderner Umwelt** ist selbst das Resultat einer typisch menschlichen Eigenschaft: Wir sind laufend bestrebt, die Grenzen unserer Evolutionsgeschichte zu sprengen.

**3** Speziell die **Naturwissenschaft** liefert uns Mittel, unsere körperlichen und geistigen Möglichkeiten in ungeahnter Weise zu erweitern.

gen; Weibchen und Männchen sind ungefähr gleich groß und sehen einander sehr ähnlich. Gibbons und viele südamerikanische Affen gehören zu dieser Gruppe. Ganz anders die Arten, bei denen Männchen um die Weibchen kämpfen. Hier sorgen ausschließlich die Weibchen für die Jungen. Die Männchen sind viel größer und präsentieren protzige Signale – auffällige Färbungen des Gesichts und silberne Rücken. Sie verbringen einen Großteil ihrer Zeit mit aggressiver Angeberei. Und dann gibt es uns Menschen, die nach anatomischen, physiologischen und genetischen Maßstäben weder zu der einen noch zu der anderen Gruppe gehören, sondern irgendwo dazwischenliegen.

Doch in einer Hinsicht verhalten sich Menschen genau wie andere Primaten: Wir sind sehr soziale Wesen, und in diesem Punkt ist unsere Intelligenz ganz besonders ausgeprägt. Auch wenn uns etwa ein kompliziertes Beispiel für mathematische Transitivität verwirrt, begreifen wir gleich: Wenn Person A über B herrscht und B über C, dann sollte C sich blind unterwerfen, sobald A erscheint. Wir können äußerst komplexe soziale Interaktionen erfassen und sofort herausfinden, ob eine Regel verletzt worden ist – wobei wir leichter entdecken, wenn jemand betrügt, als wenn er ausnehmend großzügig ist. Bei der Gesichtserkennung sind wir ausgesprochene Meister. Wir besitzen dafür sogar einen spezialisierten Bereich der Großhirnrinde, den so genannten Gyrus fusiformis.

### Hohe soziale Intelligenz

Der Selektionsvorteil eines hochgradig sozialen Gehirns ist offensichtlich. Wir können damit die Gedanken anderer Menschen erahnen, sie manipulieren und mögliche Geschlechtspartner oder Komplizen geschickt täuschen und anlocken. Zumindest bei jungen Amerikanern ist das Ausmaß sozialer Intelligenz ein besserer Indikator für späteren Berufserfolg als die Noten in schulischen Eignungstests.

Tatsächlich belegen Menschen hinsichtlich sozialer Intelligenz unter den Primaten sogar den Spitzenplatz. Bei allen Primatenarten steigt der Anteil des Neokortex an der Hirnmasse mit der durchschnittlichen Größe der sozialen Gruppe, aber beim Menschen ist dieser Zusammenhang am deutlichsten – wenn man die Gruppengrößen in traditionellen Gesellschaften heranzieht. Mit anderen Worten: Der für Primaten besonders typische Teil des menschlichen Gehirns wuchs, um zu verstehen, wer mit wem nicht klarkommt, wer in der Hierarchie gerade abstürzt und welches Pärchen heimlich turtelt, obwohl sich das nicht gehört.

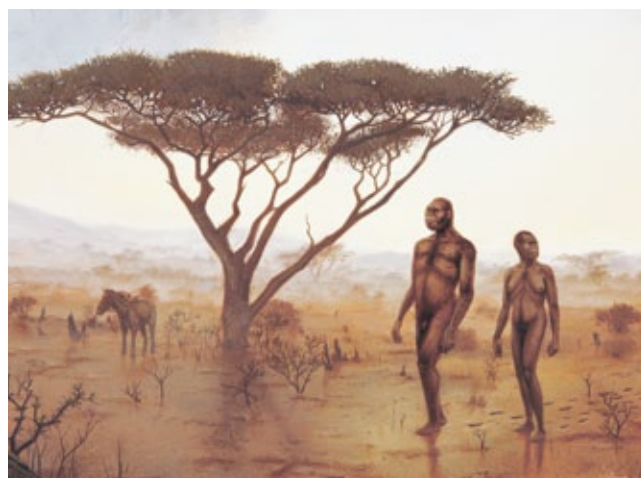
Wie der Körper wurden auch Gehirn und Verhalten durch das längst vergangene Dasein als Jäger und Sammler geprägt – und sie müssen in einer völlig anderen Gegenwart zurechtkommen. Wir wohnen mitunter tausende Kilometer vom Geburtsort entfernt. Wir können jemanden töten, ohne jemals sein Gesicht gesehen zu haben. In der Warteschlange vor einem Vergnügungspark treffen wir mehr Artgenossen als unsere Vorfahren im ganzen Leben. Wir können sogar das Bild eines Menschen betrachten und dabei Lust empfinden, obwohl

wir nicht wissen, wie dieser Mensch riecht – wie seltsam für ein Säugetier!

Dass wir in dieser völlig veränderten Welt wachsen und gedeihen, beweist: Es liegt in unserer Natur, uns über unsere Natur hinwegzusetzen. Wir sind gewohnt, über die biologischen Stränge zu schlagen. Ein besonders merkwürdiges und noch recht junges Betätigungsfeld, mit dem wir die Grenzen als Hominiden in Frage stellen, ist die Naturwissenschaft. Ihre Auswirkungen haben unsere Welt drastisch verändert – und das schafft offensichtlich Probleme. Nehmen wir nur die ersten Vorläufer der modernen Genetiker, die einst begannen, einige Pflanzen und Tiere zu domestizieren. Diese Erfindung sicherte enorme Nahrungszuwächse, droht nun aber in letzter Konsequenz, den Planeten seiner natürlichen Ressourcen zu berauben.

Auf einer etwas abstrakteren Ebene schärft die Wissenschaft den Sinn für Normen – für das, was als gut und noch besser gilt. Sie stellt unser Wesen in Frage. Dank ihrer steigt die Lebenserwartung, wächst die Körpergröße, erzielen wir bei Intelligenztests höhere Werte.

Eigentlich ist dabei erstaunlich, wie wenig diese Veränderungen uns selbst verändert haben. Selbst wenn wir noch so lange leben – irgendwann müssen wir sterben, es wird immer eine Haupttodesursache geben, und wir werden weiterhin das Gefühl haben, ein geliebter Mensch sei uns zu früh genommen worden. Und wenn die Menschen im Durchschnitt immer intelligenter, größer und leistungsfähiger werden, stellt sich die Frage: Wen interessiert schon der Durchschnitt? Jeder will individuell besser sein als andere. Das Gehirn ist gehässig, neidisch und stärker an relativen Kontrasten interessiert als an absoluten Werten. Schon die Sinne teilen uns die Qualität eines Reizes meist nur im Vergleich zu seiner Umgebung mit. Die Netzhaut enthält Zellen, die weniger auf eine Farbe an sich reagieren als auf deren räumliche Nähe zur Komplementärfarbe – etwa Rot versus Grün. Wir alle möchten klug sein, aber vor allem klüger als



ALFRED T. LICHMANIAN

**So könnten frühe Hominiden vor 3,6 Millionen Jahren die Savanne Ostafrikas durchstreift haben. Von ihrem evolutionären Erbe – vor allem dem flexiblen Sozialverhalten – zehren wir noch heute.**



unser Nachbar. Das Gleiche gilt für sportliche Leistungen, wobei für Hominiden lange die lebenswichtige Frage war: Wie schnell musst du laufen, um einem Löwen zu entkommen? Die Antwort lautet nach wie vor: schneller als der Mensch neben dir.

Die Art wissenschaftlichen Fragens verleitet dazu, Grenzen zu sprengen. Dabei sind vier Aspekte von Bedeutung. Erstens wirkt die Wissenschaft oft asozial. Damit ist weniger gemeint, dass ein Forscher um drei Uhr früh mutterseelenallein im Labor hockt, als dass er sich häufig für nicht lebende Dinge interessiert. Von dieser Regel gibt es offensichtlich viele Ausnahmen. Primatologen sitzen etwa gern beisammen und schwätzen über die Marotten ihrer Affen. Doch wichtige Wissenschaftsbereiche erforschen gänzlich unbelebte Objekte; beispielsweise versuchen Astrophysiker Planeten in anderen Sonnensystemen zu entdecken. Oft verlangt die Wissenschaft von unserem sozialen Hominidenhirn, sich leidenschaftlich für recht merkwürdige Themen zu begeistern.

### Grenzen der Anschauung

Zweitens stoßen wir an unsere Grenzen, wenn wir uns mit Gebieten wie Quantenmechanik, Nanotechnologie und Teilchenphysik beschäftigen, denn da sollen wir etwas glauben, was wir nicht sehen können. Als Student habe ich jahrelang Flüssigkeiten von einem Reagenzglas in ein anderes pipettiert, um die Konzentration von Hormonen und Neurotransmittern zu messen. Hätte ich einen Moment innegehalten und nachgedacht, wäre mir die Existenz solcher Substanzen im Grunde völlig ungläubwürdig erschienen. Darum geraten viele, die im Labor unsichtbare Dinge messen, klonen oder injizieren, ganz aus dem Häuschen, wenn sie einmal mit Trockeneis herumspielen dürfen.

Drittens vermag sich kein Tier so wie wir an die Vergangenheit zu erinnern oder die Zukunft vorzustellen. Doch auch diese Fähigkeit hat ihre Grenzen. Unsere jagenden und sammelnden Vorfahren merkten sich vielleicht etwas, was ihre

Großmutter von deren Großmutter gehört hatte, oder sie malten sich das Leben von ein, zwei künftigen Generationen aus. Hingegen zwingt die Naturforschung manchmal, ungeahnte Zeitspannen zu betrachten: Wann wird die nächste Eiszeit kommen? Werden sich die Erdteile jemals wieder zum Superkontinent Gondwana vereinen? Werden in einer Million Jahren Kakerlaken die Erde beherrschen?

Unser äffischer Geist sträubt sich hartnäckig gegen die Idee, es könnte derart langfristige Prozesse geben und sie seien dann womöglich auch noch von Interesse. Wir und andere Primaten ziehen den Spatz in der Hand der Taube auf dem Dach vor: Zehn Euro oder zehn Stückchen Affenfutter hier und jetzt sind verführerischer als elf am kommenden Tag. In bildgebenden Verfahren sehen wir, wie das Belohnungssystem im Gehirn anspringt, wenn wir auf sofortige Belohnung zusteuern. Offenbar würden die meisten Menschen lieber in der nächsten Woche eine Tüte altes Popcorn bekommen, als in jahrelanger Forschungsarbeit eine Hypothese zu bestätigen.

Viertens tauchen wissenschaftliche Fragen auf, die uns durch ihren Tiefgang überfordern. Dabei geht es um abstrakte Probleme wie: Existiert ein freier Wille? Wie funktioniert Bewusstsein? Gibt es Dinge, die man unmöglich wissen kann?

Der Wissenschaftsprozess übersteigt somit unweigerlich die Grenzen des Hominidenerbes. Wir sollen intensiv auf winzige oder gar unsichtbare Dinge achten, auf unbewegliche, nicht atmende Gegenstände, auf räumlich und zeitlich unvorstellbar weit entfernte Objekte. Wir sollen uns um Probleme kümmern, die nichts mit dem Alltagsleben zu tun haben. Und doch erfinden Forscher die Welt neu und bemühen sich, unser Los durch schrittweises Lösen wissenschaftlicher Probleme zu verbessern. Das liegt nun einmal in unserer Natur. ~

### DER AUTOR



**Robert M. Sapolsky** ist Professor für Biologie und Neurologie an der Stanford University in Kalifornien. Er erforscht Stress bei wild lebenden Pavianen. Sapolsky hat zahlreiche populärwissenschaftliche Artikel und Bücher über das menschliche Wesen verfasst.

### QUELLEN

**Sapolsky, R.M.:** Monkeyluv: And Other Essays on Our Lives as Animals. Scribner, New York 2006

**Sapolsky, R.M.:** Mein Leben als Pavian. Erinnerungen eines Primaten. Claassen, Berlin 2001

### WEBLINKS

[http://fora.tv/2011/02/15/Robert\\_Sapolsky\\_Are\\_Humans\\_Just\\_Another\\_Primate](http://fora.tv/2011/02/15/Robert_Sapolsky_Are_Humans_Just_Another_Primate)

Ein Videovortrag von Robert M. Sapolsky über Menschen und Affen

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188735](http://www.spektrum.de/artikel/1188735)



Ein Erklärungsversuch für die zunehmenden Werte bei Intelligenztests besagt, dass Heranwachsende ihr Abstraktionsvermögen fördern, indem sie regelmäßig am Computer spielen.

# Werden wir immer klüger?

Im Durchschnitt erzielen Menschen bei Intelligenztests von Jahr zu Jahr bessere Ergebnisse. Doch wie Forschungen zeigen, profitieren nicht alle kognitiven Fähigkeiten gleichermaßen von der Entwicklung. Das deutet auf die möglichen Ursachen des rätselhaften Anstiegs.

Von Tim Folger

Vor 28 Jahren entdeckte der amerikanische Politologe James R. Flynn von der University of Otago (Neuseeland) ein Phänomen, das Soziologen noch immer Rätsel aufgibt: Seit Beginn des 20. Jahrhunderts steigt der durch Tests ermittelte Intelligenzquotient (IQ) stetig an. Flynn überprüfte die Ergebnisse aus mehr als zwei Dutzend Ländern und stellte fest, dass die IQ-Werte um durchschnittlich drei Punkte pro Jahrzehnt zunahm. Seither haben zahlreiche Studien den globalen Aufwärtstrend bestätigt, den man heute Flynn-Effekt nennt.

Und die Werte steigen weiter. »Zu meinem Erstaunen setzt sich der Anstieg im 21. Jahrhundert fort«, sagt Flynn. »Wie die neuesten Daten zeigen, klettern die Werte in Amerika weiter um 0,3 Punkte pro Jahr.« Der seltsame Effekt treibt den IQ anscheinend unaufhaltsam nach oben. Joseph Rodgers, ein Psychologe an der University of Oklahoma in Norman, überprüfte beispielsweise die Testergebnisse von fast 13 000 amerikanischen Schülern, um den Flynn-Effekt auch über vergleichsweise kurze Zeitspannen aufzuspüren: »Sie steigen systematisch Jahr für Jahr«, resümiert Rodgers. »Jugendliche, die 1989 geboren wurden, schneiden etwas besser ab als 1988 geborene.«

Der Flynn-Effekt bedeutet, dass Kinder ihre Eltern bei Intelligenztests im Durchschnitt um zehn Punkte übertreffen. Falls sich die Entwicklung fortsetzt, werden unsere Nachkommen uns am Ende dieses Jahrhunderts um fast 30 Punkte übertreffen. Das entspricht dem Abstand zwischen durch-

schnittlicher Intelligenz und den schlauesten zwei Prozent der Bevölkerung. Aber kann sich der Trend ewig fortsetzen? Werden die Menschen künftig nach heutigen Maßstäben Genies sein? Oder gibt es eine naturgegebene Grenze für den Flynn-Effekt und ganz allgemein für die menschliche Intelligenz?

## Der moderne Intellekt

Bald nachdem der Flynn-Effekt entdeckt worden war, erkannten Forscher, dass die ansteigenden IQ-Werte fast ausschließlich von bestimmten Teilen der gebräuchlichsten Intelligenztests herrühren. Zum Beispiel besteht der so genannte Wechsler-Intelligenztest für Kinder und Jugendliche aus mehreren Bausteinen, die jeweils unterschiedliche Fähigkeiten prüfen. Man könnte nun erwarten, dass sich mit der Zeit vor allem vermehrtes Schulwissen in besseren Testresultaten niederschlägt. Doch das ist nicht der Fall: Die Überprüfung von Rechnen und Wortschatz liefert mehr oder weniger konstante Ergebnisse.

Die meisten IQ-Zuwächse stammen aus nur zwei Untertests, die auf abstraktes Denken zielen (siehe Kasten auf der nächsten Seite). Der eine behandelt »Gemeinsamkeiten« und fragt beispielsweise: »Was haben Äpfel und Orangen gemeinsam?« Die Antwort »Beide sind essbar« bekommt eine schlechtere Note als »Beide sind Früchte«, denn die zweite Aussage geht über die Angabe einer simplen physischen Eigenschaft hinaus. Der andere Untertest besteht aus einer Reihe von geometrischen Mustern, die auf abstrakte Weise verwandt sind, und der Prüfling muss diesen Zusammenhang richtig angeben.

Solche Tests wurden eigentlich entworfen, um den nonverbalen und nicht von Kultur abhängigen Anteil der Intelligenz zu messen – die angeborene Fähigkeit, neuartige Probleme zu lösen. Doch wie der Flynn-Effekt deutlich zeigt, übt irgendetwas in der Umwelt einen merklichen Einfluss auf die vermeintlich kulturunabhängigen Komponenten der Intelligenz aus, und zwar weltweit. Die Psychologen Ainsley Mitchum und Mark Fox von der Florida State University in Tallahassee haben detailliert untersucht, wie unterschiedliche Generationen bei Intelligenztests abschneiden. Sie ver-

### AUF EINEN BLICK

#### UNAUFHALTSAMER FLYNN-EFFEKT

- 1 Seit einem Jahrhundert werden bei Intelligenztests in aller Welt stetig **steigende Intelligenzquotienten** gemessen.
- 2 Dieser so genannte **Flynn-Effekt** zeigt sich am deutlichsten in den vermeintlich nicht kulturabhängigen Testaufgaben, etwa beim Vergleichen geometrischer Muster.
- 3 Forscher erklären den Effekt mit den **zunehmend abstrakten Anforderungen** des modernen Lebens. Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht in Sicht.

muten, dass unser gestiegenes Abstraktionsvermögen mit einer flexibleren Objektwahrnehmung zusammenhängt.

»Jeder Windows-Nutzer kennt den Startknopf auf dem Bildschirm, aber das ist natürlich kein wirklicher Knopf«, erklärt Mitchum. »Ich wollte meiner Großmutter erklären, wie sie ihren Computer herunterfahren kann, und sagte: Du drückst auf den Startknopf und wählst Herunterfahren. Daraufhin knallte sie die Maus gegen den Bildschirm.«

Mitchums Großmutter ist nicht schwer von Begriff, aber sie wuchs in einer Welt auf, in der Knöpfe noch Knöpfe waren und Telefone gewiss keine Kameras. Flynn und viele andere Forscher sind davon überzeugt, dass ansteigende IQ-Werte keinen Zuwachs an reiner Gehirnleistung widerspiegeln. Vielmehr zeigt der Flynn-Effekt, wie modern unser Verstand geworden ist. Die beschriebenen Tests erfordern die Fähigkeit, abstrakte Kategorien zu erkennen und Verbindungen zwischen ihnen herzustellen. Und diese Fähigkeit ist nach Flynn's Überzeugung im letzten Jahrhundert nützlicher geworden als jemals zuvor in der Menschheitsgeschichte.

»Wer nicht abstrahieren kann, wer nicht gewohnt ist, logisch zu denken, der kann die moderne Welt nicht meistern«, sagt Flynn. »Alexander Luria, ein sowjetischer Psychologe,

machte in den 1920er Jahren einige wundervolle Interviews mit russischen Bauern. Er fragte sie: Wo permanent Schnee liegt, sind Bären immer weiß; am Nordpol liegt immer Schnee; welche Farbe haben Bären dort? Die Bauern antworteten, sie hätten immer nur braune Bären gesehen. Sie hielten eine hypothetische Frage nicht für sinnvoll.«

Die Bauern waren nicht dumm; ihre Welt erforderte bloß andere Fähigkeiten. »Mich fasziniert weniger, dass wir heute bei Intelligenztests so viel besser abschneiden«, sagt Flynn, »sondern, was wir daraus über die Geschichte des Verstands im 20. Jahrhundert lernen.«

Eine naive Deutung des Flynn-Effekts führt schnell zu seltsamen Schlussfolgerungen. Extrapoliert man den Trend einfach zurück in die Vergangenheit, so müsste ein durchschnittlicher Brite um 1900 – gemessen am Standard von 1990 – einen IQ von rund 70 gehabt haben. »Das würde bedeuten, dass die meisten Briten damals geistig zurückgeblieben waren und niemals die Cricketregeln begriffen hätten«, sagt David Hambrick, Kognitionspsychologe an der Michigan State University in East Lansing. »Natürlich ist das absurd.«

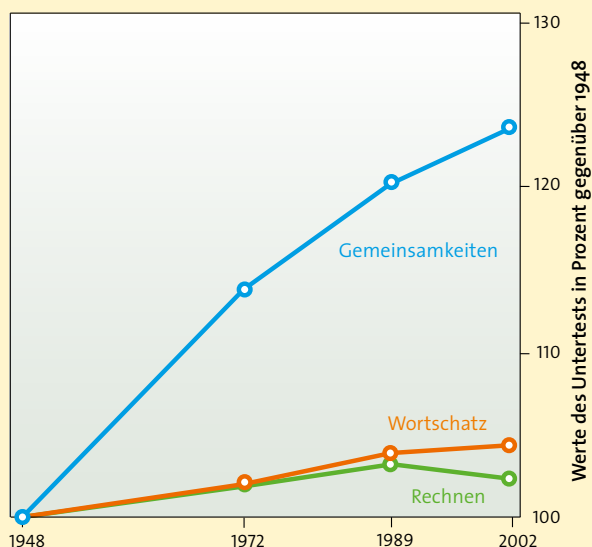
Vielleicht sind wir daher gar nicht intelligenter als unsere Vorfahren, aber zweifellos hat sich unser Verstand verändert. Flynn glaubt, dass die Veränderung von der industriellen Revolution ausging. Damals entstanden staatliche Schulsysteme, kleinere Familien und eine Gesellschaft, in der mehr Menschen in technischen Berufen oder in Büros arbeiteten als in der Landwirtschaft. Neue Berufsbilder entstanden – Ingenieur, Elektriker, Industriearchitekt –, die Abstraktionsvermögen verlangten. Die bessere Bildung trieb wiederum Innovationen und sozialen Wandel voran. So entstand eine positive Rückkopplung zwischen unserem Verstand und einer dynamischen, auf Technik beruhenden Kultur.

Es ist allerdings nicht leicht, die Ursachen des Flynn-Effekts präzise zu bestimmen – sonst ließe er sich durch Bildungs- und Sozialmaßnahmen gezielt verstärken. Bessere Bildung ist gewiss ein wichtiger Faktor. Noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts verbrachten die meisten Amerikaner nur sieben Jahre in der Schule. Heute verfügt die Hälfte aller Erwachsenen in den USA zumindest über eine gewisse Hochschulbildung.

Das reicht aber als Erklärung nicht aus. Einige Forscher haben vermutet, der Großteil des IQ-Anstiegs während des 20. Jahrhunderts stamme von der linken Seite der glockenförmigen Intelligenzverteilung, also von Menschen mit besonders niedrigen Werten – und das wäre wahrscheinlich eine Konsequenz besserer Bildungschancen. Doch kürzlich analysierten Jonathan Wai und Martha Putallaz von der Duke University in Durham (North Carolina) Testergebnisse aus einer Zeitspanne von 20 Jahren, die von 1,7 Millionen Schülern der fünften, sechsten und siebten Klasse stammten. Wie sich herausstellte, zeigen auch die besten fünf Prozent der Schüler den Flynn-Effekt. »Zum ersten Mal können wir beweisen, dass die gesamte Intelligenzkurve ansteigt«, sagt Wai. Demnach beeinflussen die kulturellen Faktoren, die hinter dem Anstieg stecken, alle Menschen gleichermaßen. Wai und Putallaz vermuten, dass die heutzutage allgegenwärtigen Vi-

## Spezielle Klugheit

**Wie misst man Intelligenz?** Ein gängiges Verfahren ist der Wechsler-Intelligenztest für Kinder und Jugendliche, der aus mehreren Bausteinen besteht. Einige – für Erwachsene eher einfache – Untertests messen Fähigkeiten wie Wortschatz, Rechnen oder Allgemeinwissen. Andere prüfen die Fähigkeit, Begriffe zu bilden. Zum Beispiel wird nach der abstrakten Gemeinsamkeit von Wörtern wie Fuchs und Kaninchen gefragt. Nur bei solchen Begriffskategorien sind die Testwerte angestiegen. Offenbar zeigt der Flynn-Effekt, dass wir mit Abstraktionen immer besser zurechtkommen.



NACH FLYNN, J.R.: ARE WE GETTING SMARTER? RISING IQ IN THE TWENTY-FIRST CENTURY. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012



deospiele – und sogar manche Fernsehshows – genau jene Fähigkeiten trainieren, die bei IQ-Tests besonders gefragt sind.

Für Rodgers spricht die universelle Geltung des Flynn-Effekts gegen eine einzelne Ursache: »Es muss vier oder fünf Hauptfaktoren geben, deren Schwankungen sich gegenseitig aufheben.« Als Ursache vermutet er bessere Kindernahrung, allgemeine Schulpflicht, kleinere Familien und den Einfluss gebildeter Mütter auf ihre Kinder. »Solange zwei dieser Faktoren wirkten, trieben sie den Flynn-Effekt voran«, meint Rodgers, »selbst wenn beispielsweise der Zweite Weltkrieg die anderen beiden zum Verschwinden brachte.«

### Flottere Autos erfordern bessere Straßen

Was wird die Zukunft bringen? Werden die IQ-Werte weiterhin ansteigen? Jedenfalls hört die Welt nicht auf, sich zu verändern. Flynn zieht einen Vergleich mit technischen Entwicklungen, um die langfristige Wechselwirkung zwischen Verstand und Kultur zu beschreiben: »Im Jahr 1900 fuhren die Autos im Schneckentempo, weil die Straßen so schlecht waren.« Mit besseren Straßen kamen dann flottere Autos, und diese erforderten wiederum bessere Straßen.

Eine ähnliche Feedback-Schleife verbindet Intellekt und Kultur. Vor wenigen Jahrzehnten hätte sich niemand träumen lassen, über welche Medien und in welchem Tempo wir heute Informationen austauschen. Jeder technische Fortschritt erfordert Köpfe, die mit dem Wandel Schritt halten können, und der veränderte Geist gestaltet erneut die Welt um. Der Flynn-Effekt wird in diesem Jahrhundert kaum zum Erliegen kommen.

Gewiss verändert sich unser Verstand nicht nur in einer mit Intelligenztests messbaren Weise. »Die Menschen werden schneller«, behauptet Psychologe Hambrick. »Üblicherweise vernachlässigt man bei Untersuchungen der Reaktionszeit alle Werte unter 200 Millisekunden, denn das gilt als

die für Menschen schnellstmögliche Reaktion. Doch neuerdings müssen die Forscher gemäß dieser Regel mehr Testwerte verwerfen; offenbar reagieren die Leute flinker. Wir kommunizieren per SMS, wir konzentrieren uns auf Computerspiele, wir beschäftigen uns mit vielem, das schnellste Reaktionen erfordert. Sobald genug Daten vorliegen, werden wir vermutlich auch bei Messungen der Wahrnehmungsgeschwindigkeit eine Art Flynn-Effekt finden.«

Vielleicht sollte uns die Existenz solcher Phänomene nicht allzu sehr überraschen. Ihr Fehlen wäre verwunderlicher: Es würde bedeuten, dass wir nicht mehr auf die Welt reagieren, die wir hervorbringen. ~

#### DER AUTOR



**Tim Folger** ist amerikanischer Wissenschaftsjournalist. Er gibt die jährliche Anthologie »The Best American Science and Nature Writing« heraus.

#### QUELLEN

**Flynn, J.R.:** Solving the IQ Puzzle. In: Scientific American Mind, S. 24–31, Oktober 2007

**Flynn, J.R.:** Are We Getting Smarter? Rising IQ in the Twenty-First Century. Cambridge University Press, 2012

**Rost, D.H.:** Intelligenz: Fakten und Mythen. Beltz, Weinheim 2009

**Zimmer, D.E.:** Ist Intelligenz erblich? Eine Klarstellung. Rowohlt, Hamburg 2012

#### WEBLINKS

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188736](http://www.spektrum.de/artikel/1188736)

# Den Menschen verbessern?

Ob wir versuchen sollten, uns selbst körperlich und geistig zu optimieren, wird seit Langem kritisch diskutiert. Unbestritten ist, dass die medizinischen und biotechnologischen Möglichkeiten dafür inzwischen enorm gewachsen sind. Doch wollen wir den »neuen Menschen« überhaupt?

Von Ludwig Siep

**D**er Mensch bedarf dringend der Verbesserung – sagen so genannte Transhumanisten. Sie wollen ihm so rasch wie möglich zu völlig neuen Eigenschaften verhelfen. Technologische Hilfsmittel sollen seine Fähigkeiten in Bereiche erweitern, die wir bisher nur von leistungsstarken Maschinen oder von anderen Lebewesen kennen, wie etwa beim Infrarotsehen oder Ultraschallhören.

Genetik und Biotechnologie haben längst Wege eröffnet, die menschliche Reproduktion zu optimieren. Dazu gehören Klonierungstechniken, Selektion bei der künstlichen Befruchtung sowie genetische Verbesserungen des Nachwuchses. Auch eine Lebensverlängerung scheint dank der regenerativen Medizin weit über das bisher Übliche hinaus machbar: etwa mittels Transplantationen, auch von Tierorganen (»Xenotransplantationen«), oder Stammzelltherapien etwa bei Krebserkrankungen.

Noch radikaler sind Visionen der Abschaltung von Genen, die für den Zelltod oder andere degenerative Prozesse verantwortlich sind. Die Medizin verspricht zudem über die Therapie hinaus Steigerungen im Rahmen des so genannten Neuro- und Psycho-Enhancements, und zwar mit Hilfe von

Eingriffen ins Gehirn, Implantaten und Pharmaka. Die Bewegung des »quantifying self« peilt die vollständige Kontrolle aller bisher unbewussten Körperfunktionen an. Das Ziel sind Menschen, die ständig und akribisch die eigenen Körperfunktionen kontrollieren. Und schließlich arbeitet die synthetische Biologie an neuen Bausteinen des Lebens (»bio-bricks«), die auch bei uns Anwendung finden könnten.

Brauchen wir überhaupt einen »neuen Menschen«? Und falls ja: Was gewinnen wir dabei? Was riskieren wir? Das sind Fragen, die nicht nur in den Labors von Wissenschaftlern und Ingenieuren erörtert werden sollten, sondern in aller Öffentlichkeit. Sie stellen sich auch für die Philosophie. Denn kaum eine andere Disziplin ringt wie diese seit Jahrtausenden mit dem Problem, was gute Handlungen und gute Menschen ausmacht. Also fragen Philosophen: Was gilt heute als Verbesserung? Und welche davon sind gut?

Menschen träumen schon seit alters davon, ihre Fähigkeiten zu verbessern. Immer wieder gab es auch Bestrebungen, sich gleich ganz neu zu erschaffen. Heute scheint die Verwirklichung dieses Traums näher zu rücken. Das hat verschiedene Gründe, vor allem wegen der neuen Möglichkeiten, den menschlichen Körper durch Bio- oder Informationstechnologie technisch zu verändern. Verstärkt wird das Wunschbild durch Vorbilder für übermenschliche Leistungen in Form von Maschinen, etwa Computern. Schließlich leiten viele auch aus der Evolutionstheorie die Notwendigkeit ab, den Menschen für schwieriger werdende Überlebensbedingungen fitter zu machen.

In vortechnischen Zeiten war der bessere Mensch einer, der durch große Taten und die Steigerung seiner moralischen Fähigkeiten – wie Tapferkeit oder Gerechtigkeit – in den Rang von Heroen, Halbgöttern oder Heiligen aufstieg. Dazu verhelfen konnten ihm außer der Gunst der Götter auch körperliches Training, strenge Askese und geistige Übung. Bei antiken sportlichen Helden war sicher auch immer schon »Doping« im Spiel.

Eine dauerhafte gezielte Körperveränderung lag für die Menschen der Antike außer Reichweite – daran kann man erst seit Entstehen der modernen Wissenschaft und Technik denken. Denn nur sie waren dazu in der Lage, Naturprozesse

## AUF EINEN BLICK

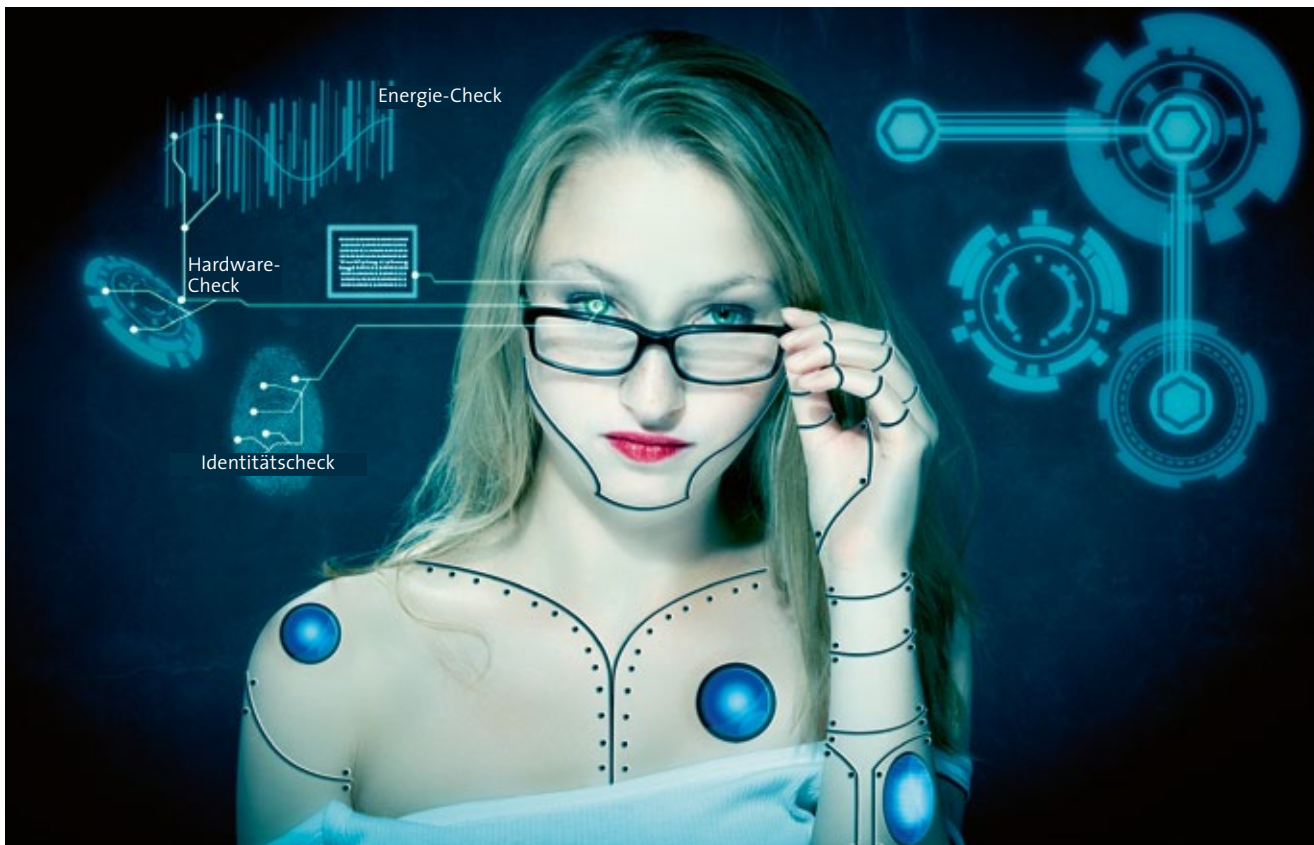
### PERFEKTION UND TRANSHUMANISMUS

**1** In Medizin, Biotechnik und Evolutionstheorie, aber auch in politischen Debatten wird immer häufiger die **Verbesserung des menschlichen Körpers** sowie kognitiver Funktionen als notwendiges oder lohnendes Ziel diskutiert.

**2** Der Autor plädiert dafür, Verbesserungen nicht an allgemeinen Leistungsskalen für Maschinen oder nichtmenschlichen Lebewesen zu bemessen, sondern nach dem, was nur **Menschen als kulturelle Wesen** können. Um Freude am eigenen Können zu empfinden, braucht es keine grundsätzliche technische Leistungssteigerung des Körpers.

**3** Es sollten die sozialen und institutionellen Bedingungen verbessert werden, damit Menschen die passenden **Kompetenzen** erwerben – und **soziale Tugenden** wie Gewaltlosigkeit und wechselseitige Anerkennung entwickeln können.





DREAMTIME / FRANCESCO DIBARTOLO

Enhancement ist das Zauberwort, in dem nicht nur der Wunsch nach gesteigerten Körper-, sondern auch nach verbesserten Geistesfunktionen steckt.

gesetzmäßig und experimentell nachprüfbar zu erklären. Damit ließen sich dann auch natürliche Funktionen systematisch verbessern sowie Geräte herstellen, die gemäß naturwissenschaftlichen Gesetzen ihren Zweck erfüllen. Dieses Stadium ist in Europa mit dem 17. Jahrhundert erreicht, wenn auch zunächst in rudimentärer Form. Entsprechend entstanden in dieser Zeit auch die ersten Konzepte zur Naturbeherrschung, einschließlich der Steigerung menschlicher Körperfunktionen sowie der Veränderung von Pflanzen und Tieren. Paradigmatisch schildert das etwa der Philosoph Francis Bacon in seiner Gesellschaftsutopie der »Nova Atlantis« aus dem Jahr 1627.

### Der »neue Mensch«, eine Utopie des 18. Jahrhunderts

Mit dem Beginn der empirischen Sozialwissenschaften in der Aufklärung des 18. Jahrhunderts tritt ein Projekt hinzu: die Schaffung einer perfekten Gesellschaftsordnung, die alle Mittel zur Steigerung menschlicher Fähigkeiten mobilisiert. Der »neue Mensch« ist ein Ziel, das in den Sozialutopien des späten 19. und frühen 20. Jahrhunderts mit revolutionärer oder staatlicher Gewalt verfolgt wird. Nach heute dominierender Auffassung ist es grandios gescheitert. Denn das utopische Projekt opferte die Freiheiten und erreichbaren Fortschritte der Lebensbedingungen einem Ziel, das die moralischen und natürlichen Fähigkeiten der Menschen über-

forderte. Es übersah, dass die Menschen zumeist ganz unterschiedliche Auffassungen über das haben, was »gut« oder »besser« ist.

In der gleichen Gefahr befinden sich auch gegenwärtige Projekte zur Verbesserung des Menschen. Denn Bioingenieure behaupten ebenfalls, mit rein technischen Maßstäben über »gut« und »besser« entscheiden zu können. Schließlich weiß doch jeder, was ein fortschrittlicheres Auto, Flugzeug, Handy oder ein schnellerer PC ist. Allerdings entpuppt sich selbst das schon als fragwürdige Unterstellung. Es unterscheiden sich nicht nur die ästhetischen Vorstellungen. Je nach Generation und Begabung sind auch Leistungssteigerungen von Geräten für die einen wünschenswert, für andere – etwa Ältere – dagegen weit gehend überflüssig oder gar überfordernd. Ob sich solche Ziele durch Staat oder Markt demokratisch beurteilen lassen, ist unklar. Und die Kaufkraft ist keineswegs ein so egalitäres und demokratisches Mittel wie das Wahlrecht.

So bleibt die Grundfrage: Was ist ein »besserer Mensch«? Unter welchen Bedingungen ist er wünschenswert? Und wann ist seine »Züchtung« vielleicht sogar geboten?

Traditionelle philosophische Begriffe von der menschlichen Güte versuchen, vom Besonderen aufs Allgemeine zu schließen: Wir alle wissen, was ein guter Arzt oder ein gutes Messer ist – nämlich Personen oder Gegenstände, die das

möglichst perfekt erfüllen, was gemäß ihren besonderen Fähigkeiten und Eigenschaften von ihnen erwartet wird. Kann man das auf Menschen übertragen? Wohl nur dann, wenn sie Fähigkeiten haben, die andere Lebewesen, Gegenstände oder Werkzeuge nicht oder nur in weitaus geringerem Maß besitzen.

Eine solche Qualität gibt es – die Vernunft. Was sie ist und wann sie sich jemandem zuschreiben lässt, darüber gibt es geteilte Meinungen. Übereinstimmend gilt Vernunft als Fähigkeit, Affekte zu beherrschen, Begriffe und Regeln zu bilden, sich sprachlich mit gleich gearteten Wesen zu verständigen. Philosophen und Theologen liefern weitere Vernunftbegriffe:

- Für die immanente Auffassung ist die Vernunft eine Art Moderations- und Integrationsfähigkeit der körperlichen und psychischen Kräfte des Menschen und seines Zusammenlebens mit anderen.
- Die transzendente Strömung sieht Vernunft dagegen als etwas vom menschlichen Körper Unabhängiges, das wir mit übermenschlichen und außerirdischen Wesen gemeinsam haben – etwa mit Göttern.

Im ersteren Fall sind die menschlichen Antriebskräfte alle »potenziell vernünftig«, und es kommt auf ihre interne Kultivierung an. Im zweiten Fall muss sich der Mensch von den Banden des sterblichen Körpers so weit wie möglich lösen und seiner überirdischen »Heimat« zustreben. Das kann zu einem Transhumanismus der Askese oder des Märtyrertums führen, aber auch zu mildereren Formen der Ablösung vom Diesseitigen – etwa durch die moralische Nachahmung von Vorbildern wie Helden, Heiligen oder Mensch gewordenen Göttern.

Moderne Formen des Transhumanismus haben mit solchen Vorstellungen des Übermenschlichen insofern wenig zu tun, als es ihnen um eine technische Verbesserung natürlicher Leistungen geht. Dem Streben nach dem Göttlichen ähnelt aber das Ziel der Überwindung menschlicher Schwächen und Grenzen: weniger Krankheiten, Schmerzen, Frustrationen sowie ein möglichst langes Leben.

Wichtiger als eine solche Ähnlichkeit mit der transzendenten Strömung ist das Verhältnis der modernen Verbesserungsbemühungen zur Tradition der immanenten Vernunft. Nach dieser Tradition ist jener Mensch tugendhaft und glücklich, der seine Fähigkeiten und Kräfte mit Vernunft moderiert und entwickelt. Tugend ist ein im Moralismus des 19. Jahrhunderts sozusagen verdorbener Begriff – erinnert er doch an sexuelle Enthaltsamkeit und Prüderie. Ursprünglich bezeichnete Tugend dagegen alle entwickelten menschlichen Fähigkeiten, einschließlich der körperlichen Fitness, der angenehmen Umgangsformen sowie der Perfektion des Verstandes in der Wissenschaft.

Ein Tugendhafter ist ein guter Sozialpartner und mit sich selbst im Lot. Das bedeutet: nicht zerrissen sein, sich nicht selbst dauernd Vorwürfe machen, nicht allzu viel bereuen müssen – nach Aristoteles die wichtigsten Voraussetzungen für Glück. Zudem sollte man Glück haben im Sinne günstiger

Umstände und Zufälle. Die lassen Freunde finden, bewahren uns vor Unfällen und bieten Chancen, unsere besonderen Fähigkeiten und Interessen zu verwirklichen.

Das setzt wiederum eine gute Sozialordnung voraus, an der prinzipiell alle Menschen teilhaben können. Zu vernünftiger öffentlicher Rede und Entscheidung sind sie nämlich annähernd gleich in der Lage. Dass Menschen die Absichten anderer weit besser erraten und damit besser kooperieren können als nichtmenschliche Primaten, bestätigen Forscher wie etwa der amerikanische Anthropologe Michael Tomasello. Diese Qualitäten versetzen uns in die Lage, natürliche Rangordnungen durch politische Auseinandersetzung und gewaltlose Entscheidungen zu ersetzen. Eine so geordnete Gesellschaft verträgt freilich nur wenige Übermenschen, die auf Kooperation nicht angewiesen sind und Diskussionen »auf Augenhöhe« verhindern.

Im Unterschied zu solchen Bildern vom Guten und Besseren sind die heutigen Ingenieursvorstellungen zumeist von Objekten abgeleitet, die Menschen als Hilfsmittel geschaffen haben – etwa für die Fortbewegung oder die Datenverarbeitung. Die Zwecke des Menschen selbst liegen dagegen woanders: in gemeinsamer sozialer Entwicklung, in glücklicher Betätigung und dem daraus folgenden Genuss typisch menschlicher Fähigkeiten.

### **Leiden mit technischer Vernunft zu überwinden, ist ein Ziel zur Verbesserung des Menschen**

Natürlich zählen dazu auch Sport, Kunst und Wissenschaft genauso wie Unterhaltung. Aber selbst da geht es letztlich um menschliche Fähigkeiten – sogar in einem Formel-1-Rennwagen oder bei einer Multimediashow. Entsprechend groß ist auch unser Interesse an den Gefühlen glücklicher Sieger oder tragischer Verlierer. Dass wir Maschinen bauen können, die uns körperlich und in einigen intellektuellen Fähigkeiten übertreffen, gehört zu den menschlichen Leistungen und ist aus verschiedenen Gründen erfreulich. Sie sind Instrumente (Mittel), die unser Leben erleichtern, die neue Möglichkeiten bieten und individuelle wie soziale Stärken unterstützen können – aber auch gefährden, wie etwa der Verlust an Fairness und Rücksicht im Individualverkehr oder im Internet zeigen.

Man kann das Gute aus seinem Gegenteil ableiten: aus dem, worunter man leidet, und den Wünschen, die einem versagt bleiben. Leiden nicht nur mit menschlicher Größe zu ertragen, sondern auch mit technischer Vernunft zu überwinden, ist eine der großen Herausforderungen für den neuzeitlichen Menschen. Verbesserungen der Lebensbedingungen sowie Eingriffe in den Körper, die von Mühsal und Leid befreien, gelten daher recht unumstritten als »gut« – auch im ethischen Sinn. Dazu zählen alle Artefakte für den Körper, von Seh-, Hör- und Gehhilfen bis hin zu Implantaten und transplantierten Organen.

Ist mit solchen Einbauten der Mensch allein schon technisch ein anderer und besserer geworden? Denkt man an die gebeugten, zahnlosen und schwerhörigen 60-Jährigen ver-



gangener Jahrhunderte zurück, ist das gar nicht zu bestreiten. Die Intention bei all diesen Eingriffen war jedoch immer, Leiden zu lindern, und keineswegs, einen neuen Menschen hervorzubringen. Natürlich wird mit einer therapeutischen Hilfe das Leben verlängert, was alte Träume erfüllt. Heute erscheint ja vielen sogar die Stammzelltherapie als ein zukünftiger Jungbrunnen.

Ob es zwischen Therapie und Enhancement – der gezielten Verbesserung körperlicher Leistungen – überhaupt eine Grenze gibt, wird in der Medizinethik heftig diskutiert. Aber selbst wenn diese fließend ist, sind Unterscheidungen nicht automatisch sinnlos. Es hängt eben davon ab, ob wir Steigerungen gemäß den erwähnten Leistungsskalen anstreben oder uns von manifesten körperlichen Leiden befreien wollen. Oder sind alle unerfüllten Wünsche Quelle von Leiden, auch die nach Perfektion? In der modernen Ethik gibt es die Position, statt der Vermeidung von Schmerzen könne es nur um die Verhinderung der Frustration subjektiver Wünsche beziehungsweise Präferenzen gehen (»Präferenzutilitarismus«). Da solche Wünsche völlig konträr sein können, gäbe es kein gemeinsames Maß der Verbesserung.

Doch es scheint Wünsche zu geben, die von (fast) allen geteilt werden und die für einen biotechnisch verbesserten Menschen erfüllbar wären, etwa die Verlängerung der Lebensdauer. Es liegt auf der Hand, dass sie nur dann ein erstrebenswertes Gut wäre, wenn sie mit einer angemessenen Lebensqualität im Alter einhergeht. Wir können das nicht nur bei Gullivers Reise auf die Insel der Uralten nachlesen, sondern erleben es auch in vielen heutigen Alters- und Pflegeheimen. Angenommen, es könnte das Leben bei guter Gesundheit verlängert werden – wäre das nicht unbestreitbar begrüßenswert? Wären wir dazu nicht unseren Nachkommen gegenüber sogar verpflichtet?

Für eine Beurteilung dieser Fragen sollte man sich die Folgen klarmachen:

- Ist eine Lebensverlängerung für alle gleichermaßen erreichbar, unabhängig von ihren finanziellen und anderen Mitteln?
- Falls nicht: Wie weit würde sie unseren Begriff von Gerechtigkeit verletzen und soziale Spannungen erhöhen?

➤ Wie viel Ressourcen der Natur würden für ein massenhaftes Älterwerden verbraucht? Gibt das die Erde und unsere zukünftige Technik her? Könnte es zur Verarmung von Biodiversität, Landschaften und Kulturleistungen führen?

➤ Was geschieht mit dem Generationenwechsel?

Wenn Menschen entsprechend länger den knappen Lebensraum Erde für sich in Anspruch nehmen würden, müssten sie zuallererst die menschliche Reproduktion drosseln. Es würde dann vermutlich weniger junge, veränderungswillige und kreative Menschen auf unserem Planeten geben. Würde das immer noch eine wünschenswerte Entwicklung darstellen?

Ich kann und will diese Frage hier nicht beantworten. Bevor wir aber unsere Bioingenieure ihre Projektionen vom neuen Menschen entwickeln lassen, sollte es eine Diskussion über das Gute und die Ziele einer Weiterentwicklung geben, die alle Gesichtspunkte berücksichtigt und alle Gruppen mit einbezieht. Hier sind die Werttraditionen von Kulturen und Rechtsordnungen ebenso gefragt wie ethische und religiöse Kriterien des gelingenden Lebens, des guten Menschen und nicht zuletzt einer von allen bejahbaren Welt.

Solange eine solche Debatte nicht geführt wird, scheint es mir ratsam, auf hastige und radikale Neuzüchtungsaktivitäten zu verzichten. Eine behutsame »Verbesserung« des menschlichen Körpers durch therapeutische Medizin und bessere Lebensbedingungen – Hygiene, Nahrung, Luft und Wasser – lässt uns Raum für kollektives Nachdenken und vermeidet unkorrigierbare Fehlentscheidungen.

### Das Überleben der Gattung ist keine Notwendigkeit

Jeoch: Haben wir überhaupt die Wahl? Sind wir nicht sogar gehalten, einen für das künftige Überleben geeigneteren Menschen hervorzubringen – bei Strafe des drohenden Untergangs? Müssen wir nicht unsere biologische Entwicklung endlich selbst in die Hand nehmen?

Die Evolution irdischer Lebewesen ist zunächst einmal ein Faktum, zu dem wir mit unseren Werten und Normen Stellung beziehen. Dabei könnten wir das Überleben der Gattung durchaus für verzichtbar halten. Nämlich dann, wenn das nur mit derart veränderten Menschen gelänge, die keinerlei gute Eigenschaften mehr besäßen – beispielsweise Sadisten, skrupellose Herrscher oder gefühlskalte KZ-Wächter, die in der Evolution alle anderen verdrängt hätten. Das wäre der Fall, wenn nach dem Kriterium der Fitness eventuell

nur solche Menschen übrig blieben beziehungsweise »hergestellt« würden. Könnten tatsächlich nur noch zu solchen Verhaltensweisen Fähige das Überleben der Menschheit sichern, dann wäre ihre Herstellung weder verpflichtend noch wünschenswert.

Was bedroht überhaupt das Fortleben unserer Art? Drei Gründe erscheinen besonders erwägenswert:

- ▶ Lebewesen, die uns radikal überlegen wären und von unserer Zerstörung lebten;
- ▶ Maschinen, die sich der Kontrolle entzögen und zu seiner Vernichtung ansetzten;
- ▶ die von Menschen verursachten Überlebensbedingungen auf der Erde.

Beim ersten könnte es sich vermutlich nur um Parasiten oder Krankheitserreger handeln. Uns dagegen fit zu machen, wäre ein sinnvolles medizinisches Ziel, das wohl kaum einen völlig neuen Menschen erfordert. Vermutlich auch keinen, bei dem sich die Bedingungen für Tugenden und Werte grundsätzlich verschlechtern würden.

### Kontrolle über Superroboter

Bei uns überlegenen Robotern wäre es zweifellos wichtig, dass wir die Macht über sie behalten. Beispielsweise dürften Maschinen, die menschliche Gehirne steuern und verändern könnten, gar nicht erst gebaut werden. Es scheint aber in jedem Fall von Vorteil, solche Formen von Robotik mit den rechtlichen Möglichkeiten der gegenwärtigen Menschheit zu verhindern – notfalls bis hin zur Einschränkung der Forschungsfreiheit. Das wäre einfacher, als uns selbst in einer Weise zu verändern, die um der Kontrolle der Superroboter willen alle aktuellen Rechte, Tugenden und Glücksmöglichkeiten untergraben könnte. Denn diese haben wir in Bezug auf den Menschen entwickelt, wie wir ihn bis heute kennen. Ihn zu perfektionieren, damit er Roboter beherrschen kann, die ihm in seiner bisherigen Verfassung überlegen sind, kann diese Verfassung so verändern, dass die Basis der Rechte verloren geht.

Bleibt die Bedrohung durch die globale Zivilisation. Philosophen haben schon lange erkannt, wie Moral und Recht von äußeren Bedingungen abhängen: von nicht zu knappen Lebensgrundlagen, von der Notwendigkeit der Kooperation sowie von einem Mindestmaß gegenseitiger Sympathie jenseits von purem Altruismus und Egoismus. Es ist kein Geheimnis, dass diese Bedingungen sich ändern können, und es ist immer wieder phasenweise geschehen (der »nackte Überlebenskampf«). Sollte man daher einen Menschen konstruieren, der passendere körperliche, psychische (Affektsteuerung) und soziale Qualitäten besitzt?

Die Frage ist, ob solche Veränderungen überhaupt möglich und ihre Risiken tragbar sind. Das körperliche und psychische System des Menschen scheint höchst komplex in dem Sinn, dass alle Aspekte gegenseitig voneinander abhängen. Daher können schon kleinste Manipulationen unübersehbare Folgen haben. Besitzen wir überhaupt das Wissen und die

Tugenden, so fein justierte Veränderungen hervorzubringen, um friedfertiger, aber nicht minder temperamentvolle, eigenwillige und selbstständige Menschen hervorzubringen, wie wir sie schätzen und brauchen?

Es scheint mir hier erheblich weniger riskant und klüger, auf konventionellen Wegen der Erziehung, der Ausbildung von Tugenden und der Entwicklung von Therapien den Menschen zu beeinflussen, was auch Psychopharmaka nicht generell ausschließt. Zu diesen pädagogischen Zielen zählt schon heute ein neuer Lebenswandel, der den Ruin unserer natürlichen Ressourcen aufhält, um einen Kampf aller gegen aller zu verhindern. Damit das klappt, können wir nicht auf irgendeinen neuen Menschen warten.

Was in der Vergangenheit, in Europa etwa seit dem 17. Jahrhundert, den Menschen erkennbar geholfen hat, ist nicht nur die Verbesserung seiner materiellen und körperlichen Lebensbedingungen. Wohlstand und gerechtere Institutionen haben vielmehr auch dazu geführt, dass ein Leben nach den Tugenden der Besonnenheit und der Fairness für viele ohne heroische Anstrengungen möglich wurde. Es ist eben leichter, in einem einigermaßen auskömmlichen, gewaltfreien Leben tugendhaft zu sein, als etwa in einem Slum oder einem gescheiterten Staat.

Es ist eine Bedingung sozialer und politischer Verbesserungen, dass die Menschen bei der Entwicklung ihrer Fähigkeiten und ihrer Zufriedenheit mit sich und ihrer Umgebung nicht überfordert werden. Das halte ich für wichtiger, als nach technischen Maßstäben einen Hochleistungsmenschen hervorzubringen. ~

### DER AUTOR



**Ludwig Siep** ist Professor für Philosophie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Seit Langem befasst er sich mit den Zielen und Folgen der modernen Biotechnologie. Er möchte die Kriterien des »besseren« Menschen nicht den Ingenieuren und Produzenten überlassen, sondern sie philosophisch und öffentlich diskutieren. In diesem Jahr erscheint dazu sein Essay-Band mit dem Titel »Moral und Gottesbild. Aufsätze zur konkreten Ethik«.

### QUELLEN

- Fukuyama, F.:** Das Ende des Menschen. DVA, Stuttgart 2002  
**Gesang, B.:** Perfektionierung des Menschen. De Gruyter, Berlin 2007  
**Harris, J.:** Enhancing Evolution – The Ethical Case of Making People better. Princeton University Press, Princeton 2007  
**Schöne-Seifert, B., Talbot, D. (Hg.):** Enhancement – Die ethische Debatte. Mentis, Paderborn 2009

### WEBLINKS

<http://humanityplus.org/philosophy/transhumanist-declaration/>  
Erklärung des Transhumanismus

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188738](http://www.spektrum.de/artikel/1188738)

Technology Review präsentiert:

**Das Sonderheft zur Energiewende – jetzt bestellen!**



Inklusive  
Dokumentarfilm  
auf DVD!

Die **Energiewende** ist ein Jahrhundertprojekt – und wirft Fragen auf, von deren Antworten die wirtschaftliche und gesellschaftliche **Zukunft Deutschlands** abhängt. **Technology Review** hat die Fakten zu den **56 wichtigsten Fragen** recherchiert. Für alle, die wissen wollen, was mit der Energiewende auf uns zukommt, was hinter den verschiedenen Technologien steckt und wie wir die Herausforderungen bewältigen können.

**Extra auf DVD:** der 100-minütige Dokumentarfilm „**Leben mit der Energiewende**“ in einer aktualisierten, exklusiven Fassung

**Bestellen Sie Ihr Exemplar jetzt portofrei\*  
für nur 9,90 Euro bequem nach Hause:  
[shop.heise.de/tr-energie](http://shop.heise.de/tr-energie)**



\* portofreie Lieferung für Zeitschriften-Abonnenten des Heise Zeitschriften Verlags und ab einem Gesamtwarenkorb von 15 Euro

**Schlauer einkaufen:** Einfach finden. Direkt bestellen. Schnell bekommen.

 **heise shop**

[shop.heise.de/tr-energie](http://shop.heise.de/tr-energie)

# QR-Kodes lesen – mit bloßem Auge

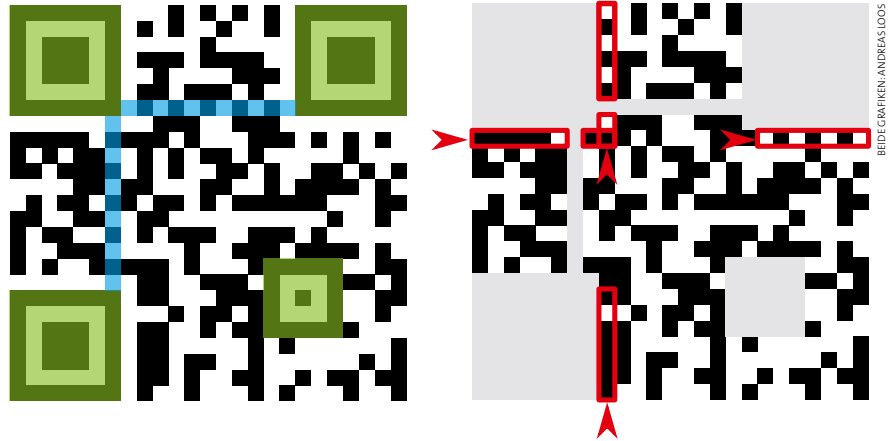
Ein Fingertipp, und schon weiß das Smartphone, welche Nachricht sich hinter dem schwarz-weißen Mosaikquadrat verbirgt. Das können wir auch ohne Handy. Es dauert nur ein bisschen länger!

VON ANDREAS LOOS

Sie sehen ein bisschen so aus, als hätte jemand ein Schachbrett durcheinandergebracht – und sind inzwischen allgegenwärtig: auf Fischstäbchenverpackungen, in Zeitschriften und auf Werbeplakaten. QR-Kodes wurden ursprünglich 1994 für die japanische Autoindustrie entworfen, als maschinenlesbare, zweidimensionale Codes, die mehr Informationen auf begrenztem Raum speichern können als die eindimensionalen (nur in einer Richtung zu lesenden) Barcodes, die wir aus dem Supermarkt kennen. Doch schon bald entdeckten auch Werbetreibende die Codes als Mittel, ihre Zielgruppe schnell mit komplexeren Informationen zu versorgen – QR steht für »quick response«, also schnelle Antwort.

Heute gilt für die schwarz-weißen Mosaikquadrate weltweit die Norm ISO 18004 der International Organization for Standardization. Sie ist so ausgelegt, dass eine Digitalkamera mit angeschlossenem Computer – mit anderen Worten: ein Smartphone – schnell und fehlerfrei die in dem Muster niedergelegte Information erfasst, auch wenn sie dieses perspektivisch verzerrt, teilweise beschattet oder verknittert zu sehen bekommt. Dass ein Mensch sie unmittelbar lesen kann, ist eigentlich nicht vorgesehen. Aber es geht; im Folgenden will ich erklären, wie.

Jedes der kleinen Quadrate im Kode steht für eine Binärziffer, ein »Bit«: ein schwarzes Feld für das Bit Eins und ein weißes für das Bit Null. Der Hauptteil des Kodes – er enthält die Originaldaten und weitere Informationen, mit denen sich Lesefehler korrigieren lassen – ist eine lange Schlange aus Hunderten von Bits, die sich über das ganze »Schach-



Ein QR-Kode besteht aus kleinen schwarzen und weißen Quadraten (»Pixeln«), die in einem größeren Quadrat angeordnet sind (links). Gewisse Teilfelder (grün) dienen dem Lesegerät zur Orientierung, die Timing-Streifen (blau) zum Abzählen der kleinen Quadrate und damit indirekt zur Bestimmung der Pixelgröße. Im rechten Teilbild sind diese Hilfsfelder ausgeblendet; die rot markierten Streifen enthalten die Information über Fehlerkorrektur und Maskierung.

brett« schlängelt. Sie beginnt in der rechten unteren Ecke – doch wie weiß das Lesegerät, wo rechts unten ist? Das erfährt es durch Orientierungsfelder in den Ecken des Kodes.

QR-Kodes haben stets eine Kantenlänge der Form  $17 + 4n$ , wobei  $n$  eine Zahl zwischen 1 und 40 ist. Die möglichen Kantenlängen betragen also 21, 25, 29, ... Die Zahl  $n$  wird die Version des Kodes genannt. Das hier gezeigte Beispiel (Bild oben, links) hat Kantenlänge 25; der Kode ist also in Version 2.

Jeder QR-Kode enthält drei Flächen (die auffälligen Quadrate in drei der vier Ecken), mit deren Hilfe das Lesegerät herausfindet, wo oben ist, und zwei so genannte Timing-Streifen, welche die Orientierungsflächen verbinden und aus abwechselnd schwarzen und weißen Feldern bestehen. Das Lesegerät

kann die Kantenlänge des Kodes und damit dessen Version ermitteln, indem es diese Pixel zählt. Mit zunehmender Größe enthalten die Codes mehr und mehr zusätzliche Orientierungsfelder an genau festgelegten Positionen. Für einen Kode in Version 2 wie im gezeigten Beispiel ist es ein einzelnes; es liegt rechts etwas unterhalb der Mitte. Ab Version 7 wird noch jeweils oberhalb der linken unteren und links von der oberen rechten Orientierungsfläche eine Versionsinformation in der Größe  $3 \cdot 6$  hinzugefügt. Zwei Streifen mit besonderer Bedeutung, die »Informationsstreifen« (Bild oben, rechts) teilen dem Empfänger Einzelheiten zur Maskierung und zum Fehlerkorrekturverfahren mit, die bei der Erstellung des Kodes verwendet wurden. Was heißt das genau?

Zur Fehlerkorrektur wird bei QR-Kodes das so genannte Reed-Solomon-Verfahren benutzt, das zum Beispiel auch bei Audio-CDs und im Mobilfunk Anwendung findet. Dabei werden etwas mehr Daten als die eigentliche Information übertragen; dieser »Mehrwert« hilft zu erkennen, ob bei der Übertragung Schäden aufgetreten sind und wie die Originalinformation ursprünglich lautete (Kasten S. 64).

Die Fehlerkorrektur im QR-Kode gibt es in vier Stärken: niedrig (bezeichnet mit L oder der Kennzahl 3), mittel (M, 2), hoch (Q, 1) und sehr hoch (H, 0). Die Stärke der Fehlerkorrektur zeigt damit indirekt die Anzahl der zusätzlichen Bits an. Je nachdem, welche Stärke der Schreiber des Kodes wählt, kann der Leser die ursprüngliche Nachricht vollständig rekonstruieren, wenn er 93, 85, 75 beziehungsweise nur 70 Prozent davon korrekt empfangen hat.

Größere Teilflächen (»Inseln«) aus lauter schwarzen oder weißen Pixeln können die Lesegeräte schlecht in einzelne Bits auflösen. Um daraus resultierende Fehler zu vermeiden, werden problematische Pixelmuster beim Kodieren »nachbehandelt«. Und zwar wird eine Auswahl der Bits von 1 in 0 verwandelt und umgekehrt; welche

Bits das betrifft, entscheidet eine so genannte Maske (Bild unten). Die kann man sich als Blech mit Löchern vorstellen, das über das ganze Feld gelegt wird. Umgewandelt (»geflippt«) werden die Pixel, die durch die Löcher zu sehen sind (wobei die Orientierungsfelder und die Infostreifen verschont bleiben), die anderen bleiben unverändert. Das muss der Empfänger vor dem eigentlichen Lesen rückgängig machen – und dazu natürlich wissen, welche der acht von der Norm vorgesehenen Masken zur Anwendung kam.

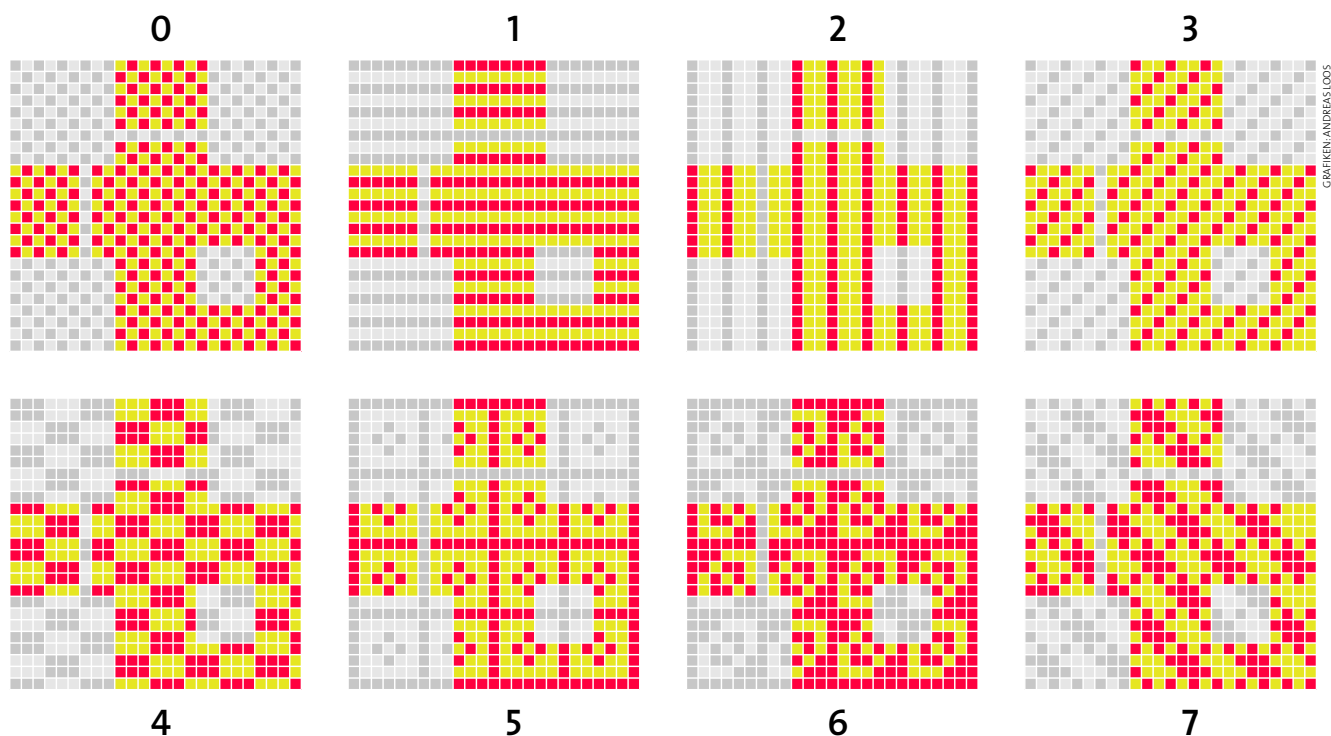
### Bitchen wechsel dich

Da die Informationen über Maske und Fehlerkorrektur so entscheidend sind, wird der sie enthaltende Streifen Sicherheitshalber zweimal im Code wiedergegeben: einmal horizontal von links nach rechts und einmal vertikal von unten nach oben. Ein schwarzes Feld bedeutet wie üblich 1, ein weißes 0. Im Beispiel lautet der Informationsstreifen also 1111101110101010.

Die ersten fünf Bits des Infostreifens enthalten die Informationen über die Art der Fehlerkorrektur (Bits 1 und 2) und den Typ der Maskierung (Bits 3 bis 5), in unserem Beispiel also 11 und 111. Die ersten beiden Bits kann man unmittelbar als Binärzahl verstehen;  $(11)_2 = (3)_{10}$  sagt uns, dass die Fehlerkorrektur der niedrigsten Stufe 3 (L) verwendet wurde. (Die tiefgestellte Zahl kennzeichnet das Zahlensystem, in dem das Eingeklammerte zu verstehen ist. Die obige Gleichung sagt also »11 im Zweier-(Binär-)system ist gleich 3 im üblichen Dezimalsystem«.)

Von den folgenden drei Bits muss man noch das erste und das letzte flippen (warum, bleibt das Geheimnis der Kodedesigner). Es ergibt sich  $(010)_2 = (2)_{10}$ . Also wurde Maske 2 verwendet, das heißt, alle Bits in den Spalten 0, 3, 6, ... (und sonst keine) wurden geflippt, die Orientierungsfelder und die Informationsstreifen ausgenommen. (Informtiker beginnen jede Nummerierung – seien es Spalten, Fehlerkorrekturniveaus

Zur Nachbehandlung eines QR-Kodes zwecks besserer Lesbarkeit stehen dem Ersteller acht Masken mit den Nummern 0 bis 7 zur Auswahl. Die Bits an den rot gekennzeichneten Stellen werden von 0 in 1 verwandelt und umgekehrt, die anderen bleiben unverändert. Diese Maskierung muss der Empfänger des Kodes rückgängig machen.

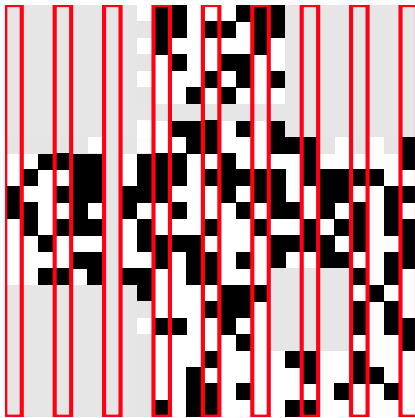


oder Masken – mit 0.) Flippt man sie zurück, erhält man nun endlich die Webadresse, den Text oder was auch immer im QR-Kode gespeichert ist, und zwar als lange Kette von Nullen und Einsen (Bild unten). Der Rest des Informationsstreifens speichert die Einzelheiten des

Verfahrens (genauer: die Koeffizienten des Polynoms), das der Sender zur Erzeugung der Korrekturbits verwendet hat (Kasten).

Nun kann das eigentliche Dekodieren beginnen. Man startet in der rechten unteren Ecke und liest die Bits im-

mer im Zickzack zwischen zwei Spalten (Bild unten). Oben angekommen geht es in den nächsten beiden Spalten wieder nach unten, und so weiter bis zum Ende. Orientierungsfelder und Informationsstreifen werden einfach übersprungen.



So sieht der QR-Kode aus dem Bild auf S. 62 aus, nachdem er »demaskiert« wurde (links): Auf ihn wurde Maske 2 angewandt, was die erste Anwendung dieser Maske beim Kodieren genau rückgängig macht. Alle Bits der Spalten 0, 3, 6, ..., 24 (rote Rahmen) wurden von 0 in 1 verwandelt und umgekehrt. Das rechte Bild zeigt die Reihenfolge, in der die Daten aus dem QR-Kode ausgelesen werden.

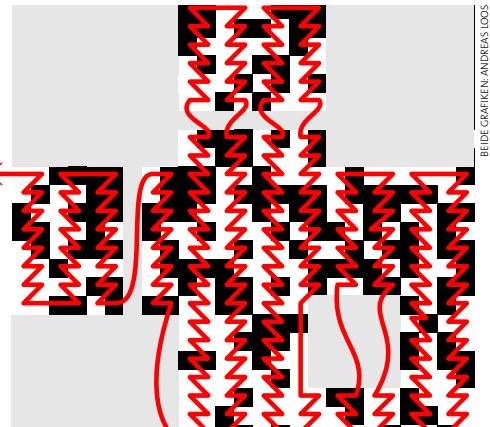


BILD: GRAPHEN-ANDREAS LOS

## Fehlerkorrektur

**Wie kann der Sender einer Nachricht erreichen,** dass sie heil beim Empfänger ankommt, obwohl möglicherweise einige Zeichen unterwegs verfälscht oder falsch gelesen werden? Oder dass der Empfänger zumindest merkt, dass etwas mit der Nachricht nicht stimmt?

Das einfachste Rezept ist: Sag es zweimal. Dann kann der Empfänger beide Versionen Bit für Bit vergleichen – wie üblich stellen wir uns die Nachricht binär, also durch die Zeichen 0 und 1 kodiert vor – und weiß, dass überall dort, wo die Bits aus beiden Versionen nicht übereinstimmen, ein Fehler vorliegen muss. Will er auch noch wissen, welches Bit das richtige ist, braucht er drei Versionen. Bei drei Bits kann er stets eine Mehrheitsentscheidung treffen.

Dieses Verfahren ist allerdings übermäßig geschwätzig, mit der Folge, dass zum Beispiel in einem QR-Kode nur ein Drittel des eigentlich verfügbaren Platzes wirklich nutzbar wäre. Um erkennbar zu machen, ob irgendein Bit verfälscht ist, genügt dagegen bereits eine einfache Paritätsprüfung: Der Sender zählt die Einsen in der Nachricht und hängt eine Eins an sie an, wenn diese Anzahl ungerade ist, im anderen Fall eine Null. Der Empfänger muss zur Überprüfung nur nachzählen.

An Stelle der einfachen Summe aller Einsen kann man viele andere Rechenvorschriften (im mathematischen Sprachgebrauch »Abbildungen« oder »Funktionen«) auf die Nachricht anwenden und damit weitere Prüfbits erzeugen. Dadurch bekommt der Empfänger mehr Hinweise auf die Position des feh-

lerhaften Bits. Weiter verfeinert, erlaubt das Verfahren nicht nur das Erkennen von Fehlern, sondern auch deren Korrektur, und das auch dann, wenn mehrere auftreten (die einfache Paritätsprüfung versagt bereits bei zwei Fehlern). Dabei bleibt die Gesamtzahl der Prüfbits weit unter der Länge der Nachricht; deren Übermittlung erfordert also deutlich weniger Aufwand als das Zweimalssagen.

**Beim Reed-Solomon-Verfahren** sind die wichtigsten Hilfsmittel zum Erzeugen der Prüfbits so genannte Polynome, also Ausdrücke der Form  $f(x) = b_k x^k + b_{k-1} x^{k-1} + \dots + b_1 x + b_0$ . Aber der Sender rechnet nicht etwa einen Funktionswert  $f(x)$  aus; es ist nicht einmal klar, was  $x$  eigentlich sein soll. Vielmehr sind die Koeffizienten  $b_0, b_1, b_2, \dots$  des Polynoms die Bits der Nachricht. Die Prüfbits gewinnt man, indem man verschiedene Polynome miteinander multipliziert und die Koeffizienten des Produkts ausrechnet. Das geschieht jedoch nicht mit gewöhnlichen reellen Zahlen, sondern mit eigens definierten Objekten, den Elementen eines endlichen Körpers (Spektrum der Wissenschaft 4/2012, S. 52). Man kann sie nach denselben Rechenregeln addieren und multiplizieren wie gewöhnliche Zahlen, aber die Ergebnisse sind häufig völlig anders, als man erwarten würde. Im Gegensatz zum Rechnen mit reellen Zahlen spielen Rundungsfehler dabei keine Rolle; daher können der Computer des Senders und der des Empfängers diese Rechenaufgaben schnell und elegant erledigen.



| Typ            | Kennung | Zeichenlänge (Bits) |                   |                   |
|----------------|---------|---------------------|-------------------|-------------------|
|                |         | Version 1 bis 9     | Version 10 bis 26 | Version 27 bis 40 |
| numerisch      | 0001    | 10                  | 12                | 14                |
| alphanumerisch | 0010    | 9                   | 11                | 13                |
| binär          | 0100    | 8                   | 16                | 16                |
| japanisch      | 1000    | 8                   | 10                | 12                |

Die ersten vier Bits verraten, worum es im vorliegenden Code geht (Tabelle oben). 0001 sagt: Gespeichert sind im Folgenden Zahlen, und weil es ein Kode der Version 2 ist, haben diese Zahlen jeweils 10 Bit Länge. Die erste dieser Zahlen verrät, wie viele Zahlen zu erwarten sind, bevor die eigentliche Nachricht zu Ende ist. Am Ende der langen Zeichenschlange stehen die Fehlerkorrekturbits; was dazwischen an Platz bleibt, wird mit bedeutungslosen »Füllbits« aufgefüllt. Wir lesen:  $(0000101101)_2$ , es geht also um  $(45)_{10}$  Zahlen. Es folgen  $(0001111011)_2 = (123)_{10}$ ,  $(0111001000)_2 = (456)_{10}$ ,  $(1100010101)_2 = (789)_{10}$  und so weiter.

Will man in einem QR-Kode Buchstaben, Zahlen und einige wenige Sonderzeichen speichern – alles, was man zum Beispiel für eine Internetadresse braucht –, dann muss man diese zunächst in Zahlen umsetzen. Dazu dient eine von der Standardkodierung ASCII hergeleitete Tabelle, die jedem der zulässigen Zeichen eine Zahl zwischen 0 und 44 zuweist. In QR-Kodes werden diese »alphanumerischen Zeichen« in Pärchen kodiert, und zwar durch den Tabellenwert des ersten Buchstabens mal 45 plus den Wert des zweiten. »ABCD« (Tabellenwerte 10, 11, 12 und 13) würde damit zu den zwei Zahlen  $10 \cdot 45 + 11 = 461$  und  $12 \cdot 45 + 13 = 553$ .

Binärdaten sind dagegen eher etwas für Computer. Damit lassen sich beliebige Folgen von Bits speichern, etwa Informationen für Industrieroboter. Und japanische Zeichen sind ein Tribut an das Herkunftsland der QR-Kodes.

Damit haben wir alles Nötige beisammen, um den Beispielcode mit bloßem Auge zu entschlüsseln: Wo oben ist, sehen wir mühelos; durch Abzählen des Timing-Streifens erkennen wir, dass es sich um einen Kode der Version

2 handelt, nach Maßgabe des Informationsstreifens wenden wir Maske 2 an (Maskieren und Demaskieren sind dasselbe Verfahren), dann beginnen wir entlang des Zickzackwegs (Bild linke Seite, rechts) zu lesen, erfahren aus den ersten vier Bits, dass es sich um numerische Daten handelt, wandeln die Binärzahlen in gewöhnliche dezimale um und lesen schließlich eine Folge von 45 dreistelligen Zahlen: 123 456 789 101 112 131 415 ...

Wenn wir aber dieses oder jenes schwarze Pixel mit einem weißen verwechselt hätten oder umgekehrt? Dann müssten wir jetzt Fehlerkorrekturberechnungen anstellen. Das geht auch mit Bleistift, Papier und wenig mehr als Schulwissen; aber es wird eine lange Nebenrechnung. Man muss zwar nie mit Zahlen über 256 rechnen (so viele Elemente hat der endliche Körper, in dem sich diese Berechnungen abspielen), aber jede Menge Polynome miteinander multiplizieren.  $\approx$

#### DER AUTOR



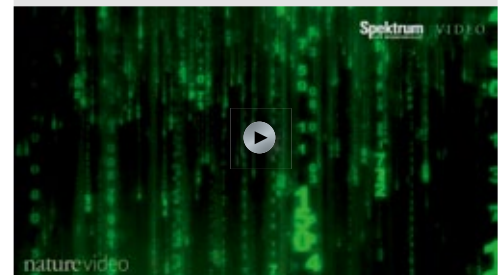
**Andreas Loos** ist promovierter Mathematiker und arbeitet als Autor und Journalist in Berlin.

#### LITERATURTIPP

**van Lint, J.H.:** Die Mathematik der Compact Disc. In: Aigner, M., Behrends, E. (Hg.): Alles Mathematik. Vieweg, Wiesbaden, 2. Auflage 2002, S. 11–19  
*Näheres zur Fehlerkorrektur mit dem Reed-Solomon-Verfahren*

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1188739](http://www.spektrum.de/artikel/1188739)



### Zebrafische in der Matrix

Forscher schnallen Fische in einer virtuellen Umgebung fest und beobachten die Hirnzellen – die Zebraabärblinge in ihrer Petrischale sind währenddessen davon überzeugt, durch einen reißenden Fluss zu schwimmen.



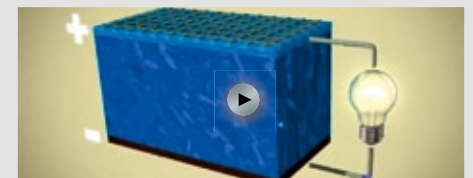
### Die ungewisse Zukunft der Gletscher

Fast weltweit schmelzen die Gletscher. Lässt sich berechnen, wie lange dieser Vorgang dauert?



### Fähren als Forschungsschiffe

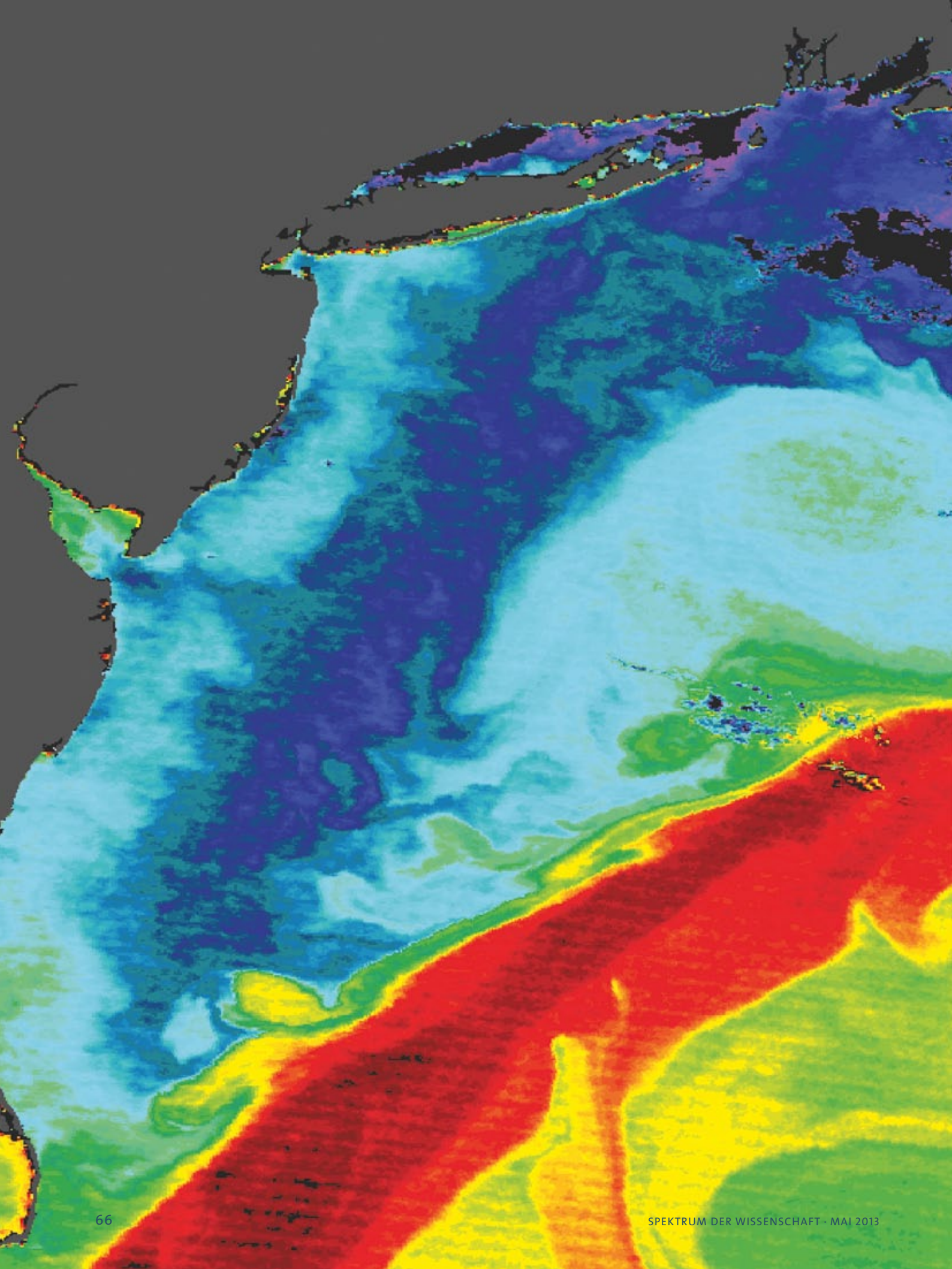
Wissenschaftler, die mit Messinstrumenten die Weltmeere befahren, können nicht überall sein. Besser ist es, gewöhnliche Handelsschiffe mit autonomen Messsystemen zu bestücken.



### Solarzellen der übernächsten Generation

Dünnschichtsolarzellen könnten künftig eine wichtige Rolle spielen. Sie wandeln Sonnenlicht effizient in Strom um und sind so biegsam, dass sie sich problemlos an vielen Flächen anbringen lassen.





KLIMAFORSCHUNG

# Neues vom Golfstrom

In den Lehrbüchern steht, der Golfstrom erwärme die Luft vor Nordwesteuropa und Sorge dadurch auf dem Kontinent für milde Winter. Doch das stimmt nur teilweise, wie neuere Untersuchungen nahelegen. Ihnen zufolge prägen komplizierte Luftströmungen unser Klima.

Von Stephen C. Riser und M. Susan Lozier

Innerhalb des Atlantiks zeichnet sich der Golfstrom durch besonders warmes Wasser (rot) aus, wie diese Infrarotaufnahme zeigt. Die Farben Gelb, Grün, Blau und Violett stehen für zunehmend tiefere Temperaturen.

NASA / MODIS / PETER MINNETT UND BOB EVANS, UNIVERSITY OF MIAMI

Der Golfstrom ist die Heizung Europas – so lautet eine weit verbreitete Einschätzung. Demnach transportiert er warmes Wasser aus dem tropischen Atlantik nach Nordwesteuropa, erwärmt dort die unteren Luftschichten und sorgt so dafür, dass vergleichsweise milde Luft auf den Kontinent strömt. Deshalb seien die Winter bei uns deutlich weniger hart als auf den gleichen Breitengraden im Nordosten Amerikas.

Doch die klimatischen Auswirkungen des Golfstroms sind bei Weitem nicht so klar wie bislang angenommen. Das legen Computersimulationen und Messungen nahe, die in den zurückliegenden Jahren durch ein verstärktes Interesse am Weltklima angeregt wurden. Die Studien liefern neue, abweichende Erklärungen für die relativ milden Winter auf der europäischen Seite des Atlantiks. Gleichzeitig verstehen die Klimaforscher jetzt besser, warum die Winter im Nordwesten der USA wärmer sind als auf der russischen Seite des Pazifiks. Die Untersuchungen ziehen auch die populäre Annahme in Zweifel, wonach ein Abschmelzen des arktischen Eises den Golfstrom unterbrechen könnte und somit verheerende Folgen für das Wetter in Europa hätte.

Für die weltweiten Klimaunterschiede ist vor allem die Kugelform der Erde verantwortlich. Am Äquator treffen die Sonnenstrahlen senkrecht auf den Boden und erhitzen ihn

stark, in hohen Breiten dagegen fallen sie flach ein und erwärmen die Erdoberfläche sehr viel weniger intensiv. Deshalb herrschen in den Tropen deutlich höhere Temperaturen als an den Polen. Dieses Gefälle verursacht Winde, welche die Wärme aus den äquatornahen Regionen in die Polgebiete transportieren.

### Gegensätzliche Ansichten

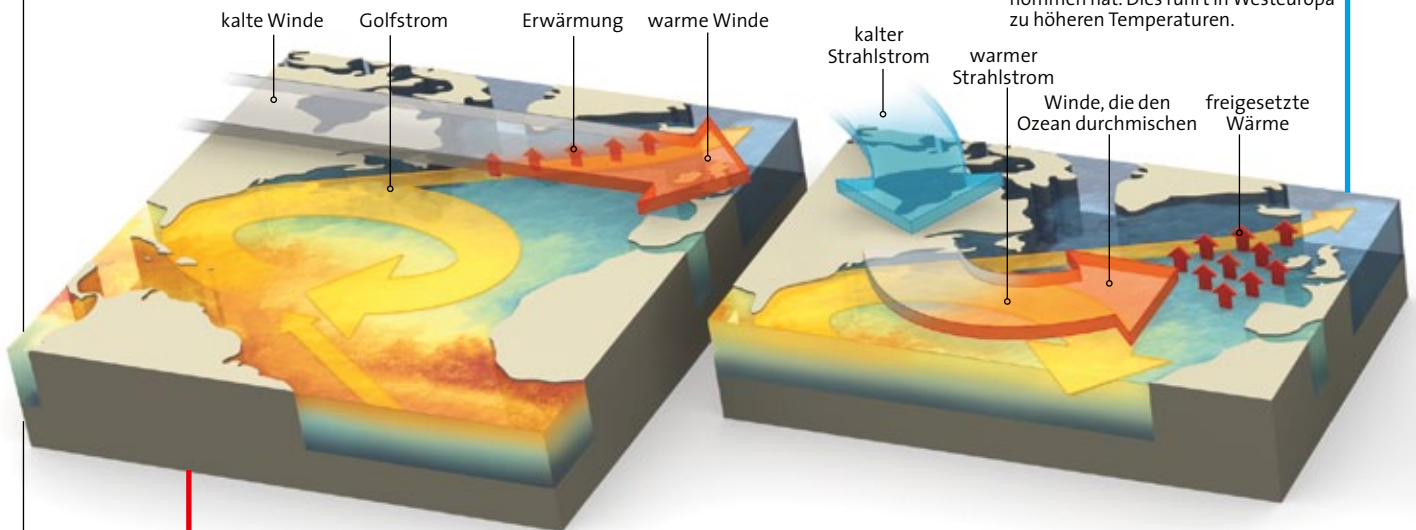
Für die weltweite Umverteilung der eingestrahlten Sonnenenergie spielen jedoch nicht nur die Windströmungen eine Rolle, sondern auch die Ozeane. Sie bedecken 70 Prozent unseres Planeten und speichern allein in ihren oberen zwei Metern mehr Wärmeenergie als die gesamte atmosphärische Luftsäule, die auf ihnen lastet. Das liegt an der volumenbezogenen Wärmekapazität des Wassers, die etwa 4000-mal so groß ist wie die von Luft und etwa fünfmal so groß wie die des Erdreichs. Wenn die Ozeantemperaturen schwanken – in den mittleren Breiten etwa verändern sie sich innerhalb der oberen 100 bis 200 Meter Wasser um zehn Grad Celsius im Verlauf eines Jahres –, werden deshalb enorme Energiemengen gespeichert und wieder abgegeben. Meeresströmungen wie der Golfstrom transportieren diese Wärme teils über Tausende von Kilometern, bevor sie sie auf die Atmosphäre übertragen.

## Warum es in Europa im Winter wärmer ist

Eine rund 100 Jahre alte Annahme besagt, der warme Golfstrom sorge in Europa für mildere Winter als auf dem gleichen Breitengrad in Nordamerika. Neue Untersuchungen machen jedoch eher den Strahlstrom, die vorherrschenden Winde und Luftdrucksysteme dafür verantwortlich.

### MODELL EINS: DER STRAHLSTROM

Der auf- und abschwingende Strahlstrom nähert sich Europa von Südwesten her. Winde durchmischen die warmen oberen Schichten des Atlantiks. Das setzt Wärmeenergie frei, die das Wasser im Sommer aufgenommen hat. Dies führt in Westeuropa zu höheren Temperaturen.



### DIE KLASSISCHE ERKLÄRUNG

Der Golfstrom transportiert warmes Wasser aus den Tropen zum Südosten der USA und überquert anschließend den Atlantischen Ozean. In der Nähe Europas erwärmt er die unteren Atmosphärenschichten. Winde tragen die milde Luft landeinwärts.

Die Vermutung liegt daher nahe, dass warme Meeresströmungen milde Winter verursachen können – etwa in Irland, wo die winterlichen Lufttemperaturen um zirka 20 Grad höher liegen als in der kanadischen Provinz Neufundland und Labrador, einige tausend Kilometer weiter westlich auf demselben Breitengrad. Oder auf der Ostseite des Pazifiks, etwa in der kanadischen Stadt Vancouver, wo im Winter durchschnittlich 20 Grad mehr herrschen als auf der gleichen geografischen Breite in Kamtschatka.

Der Geograf und Ozeanograf Matthew Fontaine Maury (1806–1873) war der Erste, der die Wärmeumverteilung durch den Golfstrom mit dem relativ milden Klima Nordwesteuropas in Zusammenhang brachte. Er formulierte die Hypothese, dass der Golfstrom tropische Wärme speichert und quer über den Atlantik nach Nordwesteuropa transportiert – entlang der Südküste der USA in Richtung Norden und schließlich auf Höhe North Carolinas nach Osten schwenkend. Maury vermutete bereits, der Golfstrom erwärme die Winde, die nach Nordwesteuropa wehen. Zudem spekulierte er, dass es in Europa viel strengere Winter gäbe, wenn sich diese Meeresströmung abschwächte. Die These klang plausibel und wurde lange Zeit nicht in Frage gestellt. Bis vor gut zehn Jahren.

Im Jahr 2002 zeigten Forscher um Richard Seager vom Lamont-Doherty Earth Observatory der Columbia University

(New York), dass sich die milden europäischen Winter auch ohne den Golfstrom erklären lassen. In Computersimulationen hatten sie die Bahn des Strahlstroms berechnet – eines ostwärts strömenden Starkwindbandes an der Grenze zur Stratosphäre. Trifft der Strahlstrom auf das Gebirge der Rocky Mountains, beginnt er laut den Berechnungen nach Norden und Süden zu schwingen. Hierdurch entstehen einerseits nordwestliche Winde, die dem Norden der USA kalte

## AUF EINEN BLICK

### RÄTSELHAFTE WÄRMEPUMPE

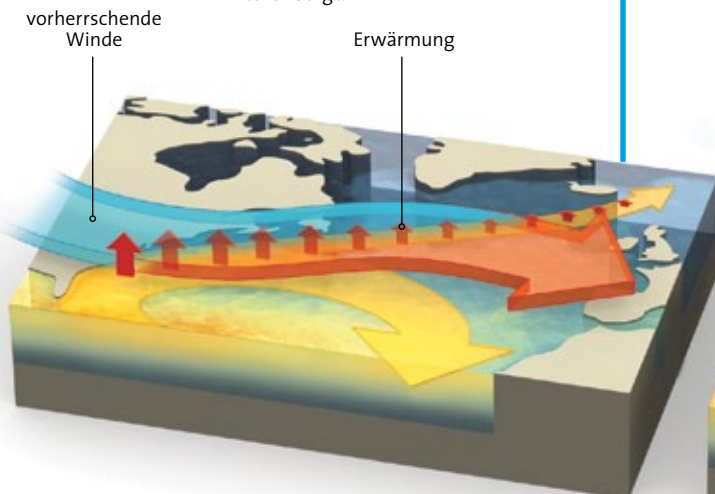
**1** Bisherigen Vorstellungen zufolge sorgt der Golfstrom direkt für milde Winter in Europa. **Neue Klimamodelle** kommen zu dem Schluss, dass das wohl nicht zutrifft. Stattdessen machen sie eher Luftströmungen für die moderaten winterlichen Temperaturen verantwortlich.

**2** Auch dass ein großflächiges Abschmelzen des arktischen Eises den Golfstrom unterbrechen würde, scheint ein **Trugschluss** zu sein, wie aus Simulationen hervorgeht.

**3** Seit einigen Jahren überwachen Forscher mit tausenden Bojen weltweit die Temperaturen und Salzgehalte der Ozeane. Die Ergebnisse sollen helfen, den **Einfluss der Weltmeere auf das Klima** genauer zu ergründen.

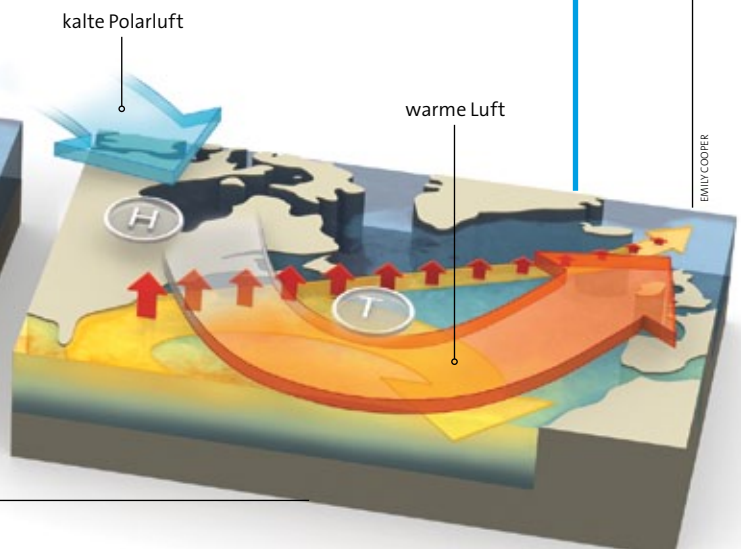
#### MODELL ZWEI: AUFGEWÄRMTE WINDE

Der Golfstrom gibt bereits vor Nordostamerika viel Wärme an die Atmosphäre ab. Auf seinem weiteren Weg durch den Atlantik hält der Austausch thermischer Energie an. Die vorherrschenden Winde transportieren die Wärme ostwärts nach Europa, wo sie für gemäßigte Temperaturen sorgt.



#### MODELL DREI: LUFTDRUCKSYSTEME

Die Wärme, die der Golfstrom freisetzt, erzeugt stationäre atmosphärische Hoch- und Tiefdruckgebiete. Diese lenken warme, südwestliche Winde nach Europa und ziehen kalte, arktische Luft nach Nordostamerika. Hieraus resultiert ein starker winterlicher Temperaturunterschied zwischen den Kontinenten.



## Wind und Wasser

Der Golfstrom gilt als Heizung Europas. Bisherigen Annahmen zufolge fallen die Winter auf unserem Kontinent vergleichsweise mild aus, weil das riesige Wasserband enorme Wärmemengen aus den Subtropen bis an unsere Küsten transportiert. Doch dieses Bild gerät ins Wanken. Neue Messdaten und Computermodelle deuten darauf hin, dass es eher großräumige Winde sind, die warme Luft nach Europa transportieren. Haben wir die Klimarelevanz des Golfstroms überschätzt? »Spektrum der Wissenschaft« fragte Michael Schulz, Experte für Ozeanografie und Geosystem-Modellierung am Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) der Universität Bremen.

*Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Schulz, neue Studien hinterfragen die klassische Vorstellung, wonach das warme Wasser des Golfstroms Europa aufheizt. Zu Recht?*

**MICHAEL SCHULZ:** Wenn man sich den Wärmetransport in Richtung der hohen Breiten anschaut, dann ist der Anteil, den der Ozean dazu beiträgt, verschwindend klein. Dagegen sorgt die Atmosphäre für einen Großteil des Transports. Was man aber nicht vergessen darf: Der Golfstrom bewegt in den Subtropen – also dort, wo er am stärksten ist – natürlich enorm viel Wärme, die in der Atmosphäre schließlich weitertransportiert wird. Da es sich um ein miteinander verknüpftes System handelt, ergibt es wenig Sinn, den Ozean oder die Atmosphäre jeweils gesondert zu betrachten. Das ist ja nun mal das Vertrackte an der Sache.

*Wenn der Golfstrom maßgeblich vom Wind angetrieben wird, brauchen wir also nicht zu befürchten, dass er abreißt, wenn die grönländischen Gletscher schmelzen?*

**SCHULZ:** Vermutlich spielen Sie auf das Szenario an, das der berühmte Katastrophenfilm »The Day After Tomorrow« zeigt. Dieses Szenario ist aus mehreren Gründen falsch: Man muss unterscheiden zwischen der vom Wind angetriebenen Wasserzirkulation und jener, die mit der großräumigen vertikalen Umwälzung des Ozeans, der so genannten thermohalinen Zirkulation, verknüpft ist. Erstere wird sich durch Schmelzwasser nicht wesentlich verändern, oder zumindest nicht so, dass der Golfstrom dadurch abreißt. Die vom Wind angetriebene Wasserzirkulation verschwindet nicht, solange die Erde sich dreht ...

*... weil die Corioliskraft den Wind breitenabhängig mitsteuert und dieser permanent auf das Wasser einwirkt.*

**SCHULZ:** Genau. Wenn es aber um das Abschmelzen von Grönland geht, ist die thermohaline Zirkulation maßgeblich. Und sie kann sich durchaus stark verändern.

*Woher wissen wir das?*

**SCHULZ:** Erste Hinweise darauf kamen aus der Paläoklimaforschung, der Erforschung des Erdklimas mit geowissenschaftlichen Methoden. Analysen von Eisbohrkernen und Sedimentkernen aus dem Nordatlantik haben zu der Erkenntnis geführt, dass sich die Tiefenwasserbildung im Ozean abschwächt, wenn genügend Schmelzwasser in den Nordatlantik fließt. Dass die Umwälzbewegung dabei weitgehend zusammenbrechen kann, haben Ozeanografen lange nicht wahrhaben wollen. Ich erinnere mich noch gut: Während meines Studiums, Ende der 1980er Jahre, war die Annahme, die thermohaline Zirkulation könne unter bestimmten Umständen stoppen, in der physikalischen Ozeanografie ein verbreitetes »No-Go«. Diese Auffassung hat sich mittlerweile komplett gewandelt. Heute würde kaum noch jemand sagen, das geht nicht.

*Die Umwälzbewegung im Atlantik hat sich schon einmal abgeschwächt, als der Agassizsee, ein riesiger Gletschersee in Nordamerika, vor etwa 13 000 Jahren in den Atlantik abfloss.*

**SCHULZ:** Das ist im Grunde ein Paradebeispiel, an dem man untersuchen kann, wie empfindlich das Klima in der Nordatlantikregion auf einen kurzfristigen Eintrag von Süßwasser reagiert. Im Agassizsee hatte sich enorm viel Schmelzwasser angesammelt. Irgendwann wurde der Druck auf die natürliche Umrandung so groß, dass sie brach. In den Sedimentkernen – und zwar des gesamten Nordatlantiks – sehen wir, dass es damals einen kurzen Ein-



KAI UWE BOHN, UNIVERSITÄT BREMEN; MIT FRDL. GEN. VON MICHAEL SCHULZ

Professor Dr. Michael Schulz ist Direktor am Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) der Universität Bremen und leitet den Forschungsbereich »Ozean und Klima«. Er ist zudem Vorsitzender der Senatskommission für Ozeanografie der Deutschen Forschungsgemeinschaft und Hauptautor des Kapitels »Informationen aus Paläoklima-Archiven« im fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

bruch in der Stärke der thermohalinen Zirkulation gab. Sie erholte sich aber wieder, nachdem der Schmelzwasserzufluss versiegt war.

**Gibt es für diese Zeit auch Hinweise auf Klimaunterschiede zwischen der Ost- und Westküste des Atlantiks?**

**SCHULZ:** Nein, das lässt sich aus den Messdaten – Geowissenschaftler analysieren Ablagerungen vom Meeresgrund und vom Land – nicht ableiten. Hierfür sind die Ungenauigkeiten zu groß. Selbst mit der heutigen Vielzahl von Beobachtungen gelingt es nicht, ganz klar zu sagen, was die winterliche Temperaturdifferenz zwischen Nordostamerika und Europa antreibt. Angesichts der wenigen Messpunkte, die wir aus geologischen Archiven haben, lassen sich die neuen, am Computer erstellten Hypothesen nur eingeschränkt mit Befunden zum früheren Erdklima vergleichen.

**Können wir uns dann überhaupt auf Computersimulationen verlassen?**

**SCHULZ:** Die Modelle sind schon sehr gut. Natürlich gibt es immer Möglichkeiten, sie zu verbessern. Beispielsweise strömt das Schmelzwasser von Eisschilden in einem sehr schmalen Band entlang der Ozeanränder. So etwas im Modell nachzustellen, ist bisher nur schwer möglich, weil die erreichbare räumliche Auflösung nicht genügt. Der Grund hierfür liegt in dem enormen Rechenaufwand: Selbst Modelle, die entsprechend kleinräumige Strömungsmuster nicht miteinbeziehen, benötigen auf modernen Supercomputern monatelange Rechenzeiten. Bis Klimamodelle existieren, die kleinräumige Muster mit berücksichtigen, können noch ein paar Jahre vergehen.

**Um die Simulationen zu verbessern, treiben derzeit mehr als 3000 Messbojen des Argo-Projekts durch die Welt-**

**meere. Wie wichtig ist das Vorhaben für das Verständnis der Meeresströmungen, etwa des Golfstroms?**

**SCHULZ:** Das Projekt ist ein fantastisches Programm der Ozeanografie; es koordiniert über so lange Zeit aufrechtzuerhalten, stellt eine beachtliche Leistung dar. Durch internationale Absprachen schafft man es im Argo-Projekt, die Bojen relativ gleichmäßig auszusetzen, so dass fast alle Meeresregionen vermessen werden – eine enorme logistische Herausforderung. Durch die Bewegung der Bojen sehen wir, wie sich die Zirkulation verändert. Dabei haben wir etwa festgestellt, dass der westliche ozeanische Randstrom wesentlich »ausgefranst« ist als bisher gedacht. Die Messdaten gehen ihrerseits in Modelle ein und haben einen völlig neuen Blick auf die Weltmeere eröffnet. Es gibt zurzeit keine bessere Möglichkeit, flächendeckend Informationen über den tiefen Ozean zu erhalten!

**Die Daten haben eine Erwärmung der Ozeane in den letzten zehn Jahren nachgewiesen.**

**SCHULZ:** Man kann jetzt endlich ein konsistentes Bild zeichnen. Wenn man sich die Treibhausgasemissionen anschaut, sollte man erwarten, dass sich die Atmosphäre weit stärker erwärmt, als wir das beobachten. Man muss sich also fragen, wohin die Wärme verschwunden ist. Die Daten der Messbojen belegen ganz deutlich: Die Ozeane haben sie aufgenommen. Früher wurde teilweise vermutet, dass der Ozean die Wärme abgibt, die er vor langer Zeit gespeichert hat, und so zur Erderwärmung beiträgt. Das kann man jetzt mit Sicherheit ausschließen. ~

Das Interview führte **Tim Haarmann**, Geograf und Wissenschaftsjournalist in Bremen.

Kontinentalluft zuführen, und andererseits südwestliche Strömungen, die warme, vom Meer beeinflusste Luft nach Europa bringen (siehe Kasten S. 68/69).

Laut diesem Modell ist es nicht der Golfstrom, der in Europa für ein moderates Klima sorgt. Stattdessen durchmischen südwestliche Winde das Meer vor den Küsten Europas und setzen dabei Wärme frei, die in den oberen Wasserschichten gespeichert ist. Das reicht nach den Berechnungen Seagers aus, um die winterlichen Temperaturunterschiede zwischen West- und Ostküste des Atlantiks zu erklären.

### Im Januar fällt die Heizung aus

Seagers Modell lässt den Wärmetransport durch Meeresströmungen allerdings weit gehend außer Acht – ein Umstand, der schon bald kritisiert wurde. Etwa von Peter Rhines (University of Washington) und Sirpa Häkkinen (Goddard Space Flight Center der NASA). Die beiden Ozeanografen hatten archivierte Daten von den Temperaturen an der Meeresoberfläche durchgesehen. Dabei waren sie zu dem Schluss gekommen, dass die Wärmemenge, die in den oberen Schichten des Atlantiks vor Europas Küsten gespeichert ist, nicht ausreicht, um die milden west- und nordeuropäischen Winter zu erklären. In durchschnittlichen Jahren genüge die Energie gerade einmal, um bis Ende Dezember für moderate Temperaturen zu sorgen. Damit auch der restliche Winter mild bleibe, sei ein zusätzlicher Wärmeimport nötig. Hierfür komme vor allem der Golfstrom in Frage.

Mit diesem Argument stützten Rhines und Häkkinen wieder die alte Hypothese von Maury, allerdings mit einem wichtigen Unterschied. Die Untersuchungen der Forscher hatten gezeigt, dass der Golfstrom auf 35 Grad nördlicher Breite – ungefähr der Höhe von North Carolina – etwa 800 Billionen Watt thermische Energie nordwärts transportiert. Auf 55 Grad nördlicher Breite jedoch, der Höhe Labradors in Kanada, findet praktisch kein Wärmetransport in Richtung Nordpol mehr statt. Wohin verschwindet all die Energie? Rhines und Häkkinen vermuten, dass der Golfstrom sie bereits vor Nordostamerika an die Atmosphäre abgibt. Die vorherrschenden Winde bringen sie dann ostwärts nach Europa, wo sie für ein moderates Klima sorgt. Die Wirkung des Golfstroms auf den Kontinent wäre demnach indirekt.

Vor zwei Jahren brachten Yohai Kaspi vom Weizmann Institute of Science (Israel) und Tapio Schneider vom California Institute of Technology eine weitere Möglichkeit ins Spiel. In numerischen Simulationen konzentrierten sie sich auf großräumige Luftdruckmuster über dem Atlantik. Dabei kamen sie zu dem Ergebnis, die Wärmeabgabe des Golfstroms erzeuge ein stationäres Hochdruckgebiet über der nordöstlichen Küste Amerikas, während sie auf der europäischen Seite des Atlantiks ein anhaltendes Tiefdruckgebiet hervorbringe. In dieser Situation führen komplexe Wechselwirkungen dazu, dass im Winter milde Luft nach Westeuropa strömt, weil die südwestlichen Winde des Strahlstroms Wärme heranzuführen, die der Golfstrom abgegeben hat. Das stationäre Hoch bei Amerika hingegen zieht kalte, arktische Luft in den

nordöstlichen Teil der USA, was die Temperaturunterschiede zwischen Nordamerika und Europa verstärkt.

Die Wärmemenge, die der Golfstrom im Winter abgeben muss, um diese Umwälzungen zu erzeugen, führt er zum Teil aus tropennahen Gebieten heran, wie die Berechnungen von Kaspi und Schneider zeigen. Insofern bestätigt auch ihr Modell die Hypothese von Matthew Fontaine Maury. Zugleich untermauert es Teile der widersprechenden These von Richard Seager, indem es den südwestlichen Winden eine wichtige Rolle beim Wärmetransport nach Europa beimisst.

Mit ihrem Modell können Kaspi und Schneider auch erklären, warum die Winter in den US-Bundesstaaten Oregon und Washington deutlich milder sind als auf dem gleichen Breitengrad in Kamtschatka. Bisher hatte man angenommen, das pazifische Gegenstück des Golfstroms – der Japanstrom – sei zu schwach, um für diese klimatischen Gegensätze verantwortlich zu sein. Kaspi und Schneider haben jedoch gezeigt, dass hier ein ähnlicher Mechanismus wie im Atlantik vorliegen könnte. Der Japanstrom würde demnach Wärme abgeben und dadurch stationäre Luftdruckunterschiede über dem Pazifik erzeugen, die kalte Polarluft nach Nordasien und warme Luft zur nördlichen US-Pazifikküste leiten.

Mit der neuen Sicht auf den Golfstrom steht auch die Annahme, sein Abreißen führe zu härteren Wintern in Nordwesteuropa, auf dem Prüfstand. An der Oberfläche des Nordatlantiks strömt warmes Wasser zur Arktis, in der Tiefe fließt kaltes Wasser in Richtung Äquator. Beide Strömungen sind Teil einer riesigen Umwälzpumpe, der »thermohalinen Zirkulation«. Das nordwärts strömende, warme und salzreiche Oberflächenwasser kühlt in den hohen Breiten ab und sinkt in die Tiefe. Am oder nahe dem Meeresgrund bewegt es sich zurück nach Süden und steigt vor der Antarktis wieder auf.

Jahrelang hatten sich Meeresforscher, beeinflusst durch Maury's Hypothese, eine bange Frage gestellt. Wenn die riesigen Eisvorkommen in der Arktis infolge des Klimawandels abschmelzen sollten, kommt dann der Golfstrom zum Erliegen? Und was bedeutet das für unser Klima?



Mehr als 3000 Schwimmkörper erfassen im Projekt Argo fortlaufend die Temperaturen und Salzgehalte in den Ozeanen. Die Weltkarte (Ausschnitt) zeigt ihre Positionen im März 2013.





MEHR WISSEN BEI  
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Klimawandel« finden Sie unter  
[www.spektrum.de/klima](http://www.spektrum.de/klima)

Die typischen Szenarien zeichnen hierzu folgendes Bild: Schmilzt das arktische Eis, fließen in den hohen Breiten riesige Mengen Süßwasser in den Ozean. Das entstehende Mischwasser hat einen niedrigeren Salzgehalt und somit eine geringere Dichte als Meerwasser. Deshalb sinkt es nicht zum Meeresboden, und der abwärtsgerichtete Strom der thermohalinen Zirkulation kommt zum Erliegen. Da im Norden nun kein Wasser mehr absinkt, steigt im Süden auch keins zum Ausgleich auf. Die Umwälzpumpe verlangsamt sich oder bleibt ganz stehen, was den Golfstrom abschwächt beziehungsweise komplett abreißen lässt. Anderen Modellen zufolge wird er nach Süden abgelenkt. So oder so gelangt weniger Wärme nach Europa, woraufhin der Nordatlantik und Nordwesteuropa abkühlen. Mit diesem Szenario rechnen viele Klimaprognosen nach wie vor.

### Robustes Förderband

Neuere, hochauflösende Simulationen der Ozeanströmungen stellen dieses Bild jetzt in Frage. Sie zeigen, dass das arktische Schmelzwasser sich vor allem mit küstennahen Strömungen vermischen würde. Dort aber hätte es wenig Einfluss auf die atlantischen Umwälzbewegungen, die sich vor allem im offenen Meer abspielen. Und selbst wenn es das Sinken der Wassermassen im Nordatlantik maßgeblich beeinflussen sollte: Ein Abreißen des Golfstroms ist höchst unwahrscheinlich, denn dessen Bahn und Stärke hängen großteils von den Winden in den mittleren Breiten ab. Deren vorherrschende Richtung aber ändert sich in den meisten Klimaszenarien nur unbedeutend, wenn die Arktis schmilzt, so dass auch der Golfstrom weit gehend konstant bleiben sollte. Möglich erscheint immerhin, dass sein relativ kleiner nordöstlicher Zweig zum Stillstand kommt, der warmes Oberflächenwasser in die Subpolarregionen transportiert.

Gegenwärtig sagen Forscher vor allem mit Computersimulationen vorher, wie sich das Wetter in Europa und anderswo infolge des Klimawandels verändern wird. Den Berechnungen wohnen jedoch beträchtliche Unsicherheiten inne. Abhilfe können nur umfangreiche Messreihen liefern, etwa zu den Strömungen, Temperaturen und Salzgehalten der Ozeane. Doch die vorliegenden Daten erstrecken sich selten weiter zurück als 100 Jahre. Über Satellitenmessungen verfügen wir ohnehin erst seit etwa 30 Jahren.

Um dies zu ändern, arbeiten Forscher aus mehr als 30 Ländern im internationalen Argo-Projekt zusammen, dessen Ziel darin besteht, Temperaturen, Salzgehalte und Strömungen in den Ozeanen weltweit zu überwachen. Hierfür stehen den

Wissenschaftlern mehr als 3000 Bojen zur Verfügung, die im Meer treiben und selbstständig Messwerte aus bis zu zwei Kilometer Wassertiefe aufnehmen. Aus den Daten, die per Satellit übermittelt werden, lassen sich quasi in Echtzeit entsprechende Karten der Ozeane erstellen. Auch wenn das Projekt erst seit zehn Jahren läuft und damit immer noch in den Kinderschuhen steckt, verzeichnet es bereits erhebliche Erfolge.

So zeigt ein Vergleich der bisher erhobenen Messwerte mit Daten aus den 1980er Jahren, dass sich die oberen paar hundert Meter der Ozeane in den vergangenen 20 Jahren um etwa 0,2 Grad Celsius erwärmt haben und um zirka 0,1 Prozent salzhaltiger geworden sind. Die darunterliegenden Wasserschichten scheinen hingegen beträchtlich an Salzgehalt verloren zu haben. Ob diese Veränderungen sich auf das Klima auswirken werden, ist unbekannt. Jedenfalls stimmen die Ergebnisse mit der Annahme überein, dass die Erde wegen des gestiegenen Treibhausgas-Anteils in der Atmosphäre mittlerweile ein Watt pro Quadratmeter weniger Wärmeenergie in den Weltraum zurückgibt, als über die Sonnenstrahlung hereinkommt. Das führt zu einer allmählichen Temperaturzunahme.

Mit Hilfe des Argo-Netzwerks und von Satellitenüberwachungsprojekten dürften wir bald sehr viel besser dazu in der Lage sein, den Einfluss der Ozeane auf meteorologische Vorgänge zu erfassen. Dies wird die Zuverlässigkeit von Klimaprognosen deutlich erhöhen. Vielleicht können wir dann auch restlos klären, wie sich der Klimawandel auf den Golfstrom auswirkt. ~

### DIE AUTOREN



**Stephen C. Riser** ist Professor für Ozeanografie an der University of Washington. Seit vielen Jahren wirkt er in leitender Position am internationalen Forschungsprojekt Argo mit.  
**M. Susan Lozier** ist Professorin für Physikalische Ozeanografie an der Duke University (USA).

### QUELLEN

- Kaspi, Y., Schneider, T.:** Winter Cold of Eastern Continental Boundaries Induced by Warm Ocean Waters. In: *Nature* 471, S. 621–624, 2011
- Roemmich, D., Gilson, J.:** The 2004–2008 Mean and Annual Cycle of Temperature, Salinity, and Steric Height in the Global Ocean from the Argo Program. In: *Progress in Oceanography* 82, S. 81–100, 2009
- Seager, R. et al.:** Is the Golf Stream Responsible for Europe's Mild Winters? In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128, S. 2563–2586, 2002

### WEBLINKS

[www.argo.ucsd.edu/](http://www.argo.ucsd.edu/)  
Website des Meeresüberwachungsprojekts Argo

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188740](http://www.spektrum.de/artikel/1188740)



## Unser besonderer Tipp:



### SALZWASSER-ALLRAD-GELÄNDEWAGEN BAUSATZ INKL. ERSATZ-PLATINEN

**Brennstoffzellenauto zum Selberbauen mit Vierrad-Antrieb**

L 12 x B 10 x H 9 cm, inkl. Nachfüllpack mit 5 Magnetplättchen, Inprosolar

**Bestell-Nr. 3825 € 26,95**

Nach kurzer Aufbauzeit halten Sie ein bis ins kleinste Detail durchdachtes Modell in den Händen, wo Zylinder, Kolben und Kurbelwelle sichtbar in Bewegung treten. Der Geländewagen lässt sich mit zwei bis drei Tropfen Salzwasserlösung immer wieder bis zu 5 Minuten in Bewegung setzen. Alle beweglichen Teile sind durch den blau-transparenten Kunststoff sichtbar.

Informationen und ein kleines Video finden Sie hier:

[www.science-shop.de/artikel/1185584](http://www.science-shop.de/artikel/1185584)



### FIREWIRE® GRILLBUCH MIT FLEXIBLEN GRILLSPIESS IM GESCHENKSET

60 Seiten mit zahlr. farb. Abb., 75 cm langer, flexibler Grillspieß aus Edelstahl, Brainstream

**Bestell-Nr. 3818 € 12,95**

Zerbrochener Spieß, Splitter in den Fingern und am Ende noch verbrannt. Mit FireWire® wäre das nicht passiert! Entdecken Sie die Möglichkeiten, die Ihnen der mehrfach prämierte Grillspieß bietet und lassen Sie sich von 20 Rezepten rund um den flexiblen Grillspieß inspirieren. Das Buch bietet für jede Jahreszeit die passenden Ideen. Gefertigt aus speziellem lebensmiteltauglichem Edelstahl, ist der 75 cm lange FireWire® besonders langlebig und hitzebeständig.



### SOLAR FUNK-THERMO-HYGROMETER

Solarbetriebene, kabellose Übertragung der Außentemperatur und Außenluftfeuchtigkeit über Sender (max. 100 m), Anzeige der Innentemperatur und Innenluftfeuchtigkeit, Höchst- und Tiefsttemperaturen, Uhrzeit, zum Hängen oder Stellen, Messbereich

Temperatur außen: -40...+60°C, innen: -10...+60°C, Luftfeuchtigkeit außen: 1...99%, innen: 20...95%, Zubehör: Solar-Außensender für Temperatur und Luftfeuchtigkeit, 2 x 1,5 V AAA Sender (Basisstation kann optional mit nicht aufladbaren Batterien betrieben werden), TFA Dostmann

**Bestell-Nr. 3436 € 36,-**

Stimmt Ihr Raumklima? Mit dem formschönen, solarbetriebenen Funk-Thermo-Hygrometer haben Sie die Innen- und Aussentemperaturen sowie die Innen- und Außenluftfeuchtigkeit immer im Blick.



### HERITAGE-130P FLEXTUBE

**Das handliche Dobson-Teleskop**

Öffnung: 130 mm (5,1"), Brennweite: 650 mm, Gewicht: 6,2 kg, Skywatcher

**Bestell-Nr. 3755**

**€ 189,-**

Das Heritage-130P ist ein exzellentes Allround-Gerät, das

wunderbare Bilder von Mond und Planeten sowie von Deep-Sky-Objekten liefert. Durch das zusammenlegbare und patentierte FlexTube-System sind Transport und Lagerung noch bequemer. Mit seiner einfach manuell zu bedienenden Alt-Azimuth-Dobson-Montierung ist dieses Teleskop ein besonders praktisches und portables System.

Technische Angaben: Vergrößerungen mit den mitgelieferten Okularen: 26-fach und 65-fach; Durchmesser des Primärspiegels: 130 mm; Brennweite des Teleskops: 650 mm (f/5); Maximale Gesamthöhe: 46 cm (zusammengelegt) und 69,5 cm (ausgefahren); Gewicht: etwa 6,2 kg; eingebaute Tragegriffe.



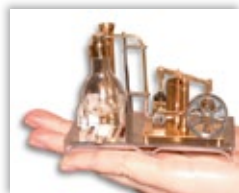
### LEONARDO DA VINCI VITRUV MANN, HOLZBAUSATZ

Einzelteile: 13, L x B x H: 210 x 210 x 290 mm, Maßstab: 1 : 16, Revell

**Bestell-Nr. 3433 € 29,95**

Für viele war Leonardo der große Humanist der Renaissance. Er versuchte alles über den Menschen nachzuvollziehen –

Proportionen, Funktionen und Emotionen. Seine berühmteste Studie hierzu ist der Vitruv-Mann. Er stellt ein echtes Stück Kunstgeschichte dar, das nun erstmals als Holzmodell erhältlich ist.



### DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

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

## Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



### WASSERRAKETE SHOOTING

**Raketensatz inklusive Startrampe**

Höhe: ca. 52 cm, Durchmesser: ca. 9 cm, Academy Europe

**Bestell-Nr. 3467 € 39,90**

Flughöhe bis zu 100 Meter nur mit Wasser und Druckluft! Der Bausatz enthält zwei PET-Flaschen, die zu einer formschönen Rakete kombiniert werden können. Die stabile Raketen Spitze aus Gummi aufgesetzt, die Leitflossen ans Heck montiert, die Aufkleber angebracht, die stabile Startplattform montiert, und schon kann es los gehen! Man benötigt ca. eine Stunde Vorbereitung und eine Luftpumpe (nicht im Bausatz enthalten).

Besuchen Sie uns im Internet unter: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)



### 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.

Bequem bestellen:

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



## KLUGSCHEISSERSPIEL 2 – BLACK EDITION

Das ultimative Spiel für alle, die auf (fast) alles eine Antwort haben ...

106 Fragekarten, ab 16 Jahren, Kylskapsöesi

Bestell-Nr. 3815 € 21,95

Endlich neue Fragen! Das perfekte Spiel für jeden Fan von sinnlosem Wissen und schrägen Fakten! Ein unterhaltsamer Mix aus Humor und Wissenschaft mit mehr als 300 kuriosen, lustigen, verrückten und bizarren Fragen zu Dingen, über die Sie sich wahrscheinlich noch niemals Gedanken gemacht haben.



## MIKROSKOP IMAGER

MP-Kameraauflösung, mit USB 2.0-Kabel, Celestron

Bestell-Nr. 3774 € 50,-

Mit dem Digital Microscope Imager können digitale Bilder der meisten biologischen und Stereo-Mikroskope problemlos festgehalten oder auf einem Monitor dargestellt werden. Die Kamera wird anstelle des Mikroskop-Okulars eingesetzt, sodass die Bilder auf einem Computermonitor angezeigt werden können. Das ist perfekt, um die Bilder bequem alleine oder in einer kleinen Gruppe zu betrachten. CD-ROM mit Software zum Betrachten und fotografieren; benötigt Windows XP, Windows Vista oder Windows 7.



## DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

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



## 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.



## DIE DAMPFMASCHINE – KARTONBAUSATZ

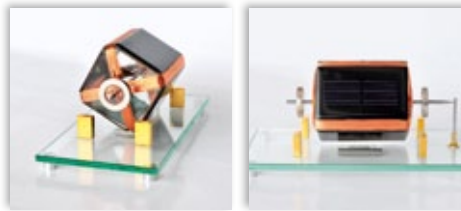
Kartonbausatz für eine vollfunktionfähige Dampfmaschine

komplett mit Zubehör,

L 30 x B 21 x H 21 cm, SunWatch

Bestell-Nr. 3769 € 32,90

Eine Dampfmaschine als Kartonbausatz, die von richtig kochendem Dampf angetrieben wird – kann das gut gehen? Aber ja! Überzeugen Sie sich selbst: Der Kessel aus korrosionsfestem Aluminium hat ein magnetisches Überdruckventil, das Feuer aus 5 Teelichtern wird durch ein verzinktes Drahtgitter abgeschirmt und der Dampf wird durch ein geschlossenes Schlauch- und Folien-system geleitet und über einen Kamin ins Freie entlassen. Bauzeit je nach Bastelerfahrung 10–15 Stunden.



## 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](http://www.science-shop.de/artikel/1156118)

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):

Bestell-Nr. 3653 € 139,-



## 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!

**NEU** Die Espressotassen aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 54 mm, Inhalt: 0,09 l. Spülmaschinengeeignet. Das Set besteht aus jeweils 2 Espressotassen im Geschenkkarton.



## ESPRESSOTASSEN-SET GESCHICHTE

Bestell-Nr. 3826 € 14,95

## ESPRESSOTASSEN-SET PHYSIK

Bestell-Nr. 3827 € 14,95

## ESPRESSOTASSEN-SET MATHEMATIK

Bestell-Nr. 3828 € 14,95

## ESPRESSOTASSEN-SET CHEMIE

Bestell-Nr. 3829 € 14,95

Eine Übersicht über unsere Espresso-Tassen und Wissensbecher finden Sie hier:

[www.science-shop.de/wissensbecher](http://www.science-shop.de/wissensbecher)



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



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

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



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

Bequem bestellen:

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

# Farbwechsel auf Knopfdruck

Materialien mit elektrisch umschaltbarer Farbe eröffnen viele faszinierende Anwendungsmöglichkeiten – angefangen vom Blendschutz über preiswerte Displays bis hin zu anpassungsfähiger Tarnkleidung.

Von Roger J. Mortimer

Beim Anlegen einer elektrischen Spannung ändern manche Materialien ihre Farbe – ein als Elektrochromie bezeichnetes Phänomen. Wie kommt der Effekt zu Stande? Jede chemische Verbindung absorbiert elektromagnetische Strahlung ganz bestimmter Wellenlängen. Wenn sie Elektronen abgibt oder aufnimmt – Chemiker sprechen von einer Oxidation oder Reduktion –, ändert sich dieses charakteristische Absorptionsspektrum. Bei elektrochromen Stoffen betrifft die Änderung den sichtbaren Spektralbereich, so dass die Farbe wechselt.

Damit der Effekt auftritt, muss das Material in eine so genannte elektrochemische Zelle integriert sein (Bild S. 78). Es befindet sich dazu entweder als Beschichtung auf einer Elektrode – eventuell auch auf beiden – oder liegt in gelöster Form im Elektrolyten vor. Das Laden und Entladen der elektrochemischen Zelle geht mit der Oxidation oder Reduktion des Materials und dem entsprechenden Farbumschlag einher.

Es gibt bereits erste kommerzielle elektrochrome Geräte oder kurz ECDs (nach englisch: electrochromic devices). Dazu gehören Autospiegel mit automatisch funktionierendem Blendschutz oder Flugzeugfenster, die sich per Knopfdruck abdunkeln lassen (Bilder S. 82). Zahlreiche andere Geräte sind in Entwicklung – darunter vielfarbige Displays, Sonnenbril-

len, Tarnanzüge und Gewebe mit chamäleonartigen Eigenschaften. Elektrochrome Materialien könnten auch Energie sparen helfen, indem sie etwa als Beschichtung auf dem Dach eines Gebäudes zwischen einer Wärme absorbierenden dunklen Farbe im Winter und einer reflektierenden hellen im Sommer wechseln.

Ein Vorteil von ECDs ist ihr niedriger Energieverbrauch. Nach dem Farbwechsel bleibt der neue Oxidationszustand völlig ohne oder mit nur sehr geringer Energiezufuhr erhalten. Zudem ist meist ein stufenloser Übergang zwischen einzelnen Farbschattierungen oder -intensitäten möglich, wozu sonst ganze Serien von Farbfiltern nötig wären. Dank jüngster Fortschritte in der Elektrodentechnologie ließen sich die Schaltzeiten auf bis zu 0,2 Sekunden verkürzen, was für viele praktische Zwecke ausreicht.

## Übergangsmetalloxide und Viologene

Die Elektrochromie ist schon seit dem frühen 19. Jahrhundert bekannt. Doch erst in den 1960er Jahren gelang es, den genauen Mechanismus aufzuklären. Seither wurden fünf verschiedene Klassen von elektrochromen Werkstoffen entwickelt: Metalloxide, Viologene, konjugierte Polymere, Koordinationsverbindungen und Substanzen, die sich vom »Berliner Blau« ableiten.

Die Oxide einiger Übergangsmetalle – sie stehen in den Nebengruppen im mittleren Teil des Periodensystems – lassen sich elektrochemisch zwischen blassen und farbintensiven Zuständen umschalten. Bei letzteren handelt es sich in der Regel um die reduzierte Form.

Das Paradebeispiel für diese Klasse elektrochromer Werkstoffe ist Wolframoxid ( $\text{WO}_3$ ). Darin hat Wolfram formal sechs Elektronen an die drei Sauerstoffatome abgegeben und liegt deshalb in der Oxidationsstufe +6 vor. Tatsächlich aber sind diese Elektronen nur teilweise auf den Bindungspartner übergegangen. Das Wolfram trägt also in Wahrheit eine deutlich geringere positive Ladung als +6. Um eine Verwechslung zu vermeiden, schreiben Chemiker die Oxidationsstufe deshalb mit römischen Ziffern als  $\text{W}^{\text{VI}}$ .

### AUF EINEN BLICK

#### ELEKTRISCH REGELBARE CHAMÄLEONS

**1** Elektrochrome Stoffe lassen sich elektrisch zwischen verschiedenen Farben hin und her schalten. Der Effekt beruht auf einer Änderung der Lichtabsorption durch **strominduzierte Oxidations- oder Reduktionsprozesse**.

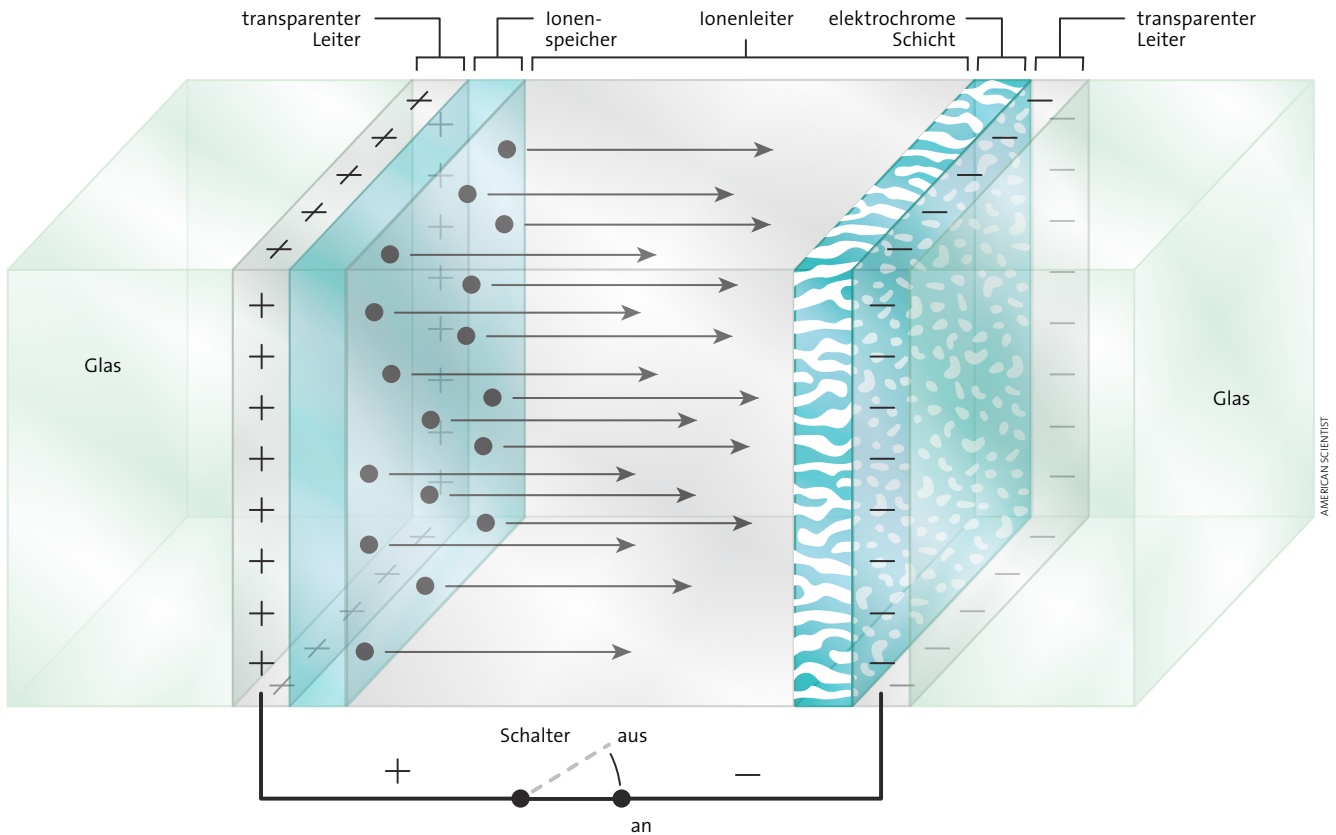
**2** Inzwischen decken elektrochrome Stoffe das gesamte Farbspektrum ab. Außerdem sind sie **preiswert** und **verbrauchen wenig Strom**. Das macht sie für viele Anwendungen attraktiv. Allerdings sind ihre **Schaltzeiten** noch relativ lang.

**3** Zu den **ersten kommerziellen Produkten** zählen Rückspiegel mit automatischem **Blendschutz** und Flugzeugfenster, die sich **elektrisch abdunkeln** lassen.

Bereits vor mehr als 80 Jahren beobachteten Forscher, dass ein angelegter elektrischer Strom zu Farbänderungen eines Materials führen kann. Der erste Stoff, der dieses Phänomen zeigte – Berliner Blau –, war sogar schon im 18. Jahrhundert hergestellt worden. Doch erst seit ein bis zwei Jahren existieren elektrochrome Substanzen für sämtliche Spektralfarben. Es handelt sich um bestimmte elektrisch leitfähige Polymere. Ihre Farbintensität und -tönung im gelösten Zustand hängt von ihrer Konzentration ab, die hier in jeder Spalte von oben nach unten zunimmt.



DYER, K. L. ET AL., COMPLETING THE COLOR PALETTE WITH SPRAY-PROCESSABLE POLYMER ELECTROCHROMIC POLYMER ELECTROCHROMICS IN ACS APPLIED MATERIALS AND INTERFACES 3, 5, 1987-1995, 2011, FIG. 4;  
ABDRUCK MIT FRODL. GEN. DER AMERICAN CHEMICAL SOCIETY / CCC



Ein elektrochromes Gerät oder kurz ECD (nach englisch: electrochromic device) besteht aus mehreren Schichten. Im hier gezeigten Fall arbeitet es im absorbierenden/transmittierenden Modus, und die Substanz, welche die Farbe wechselt, liegt in Form eines Feststoffs vor. Als Elektroden dienen transparente Leiter wie Indiumoxid auf einer glasartigen Unterlage. Auf eine von ihnen

wird das elektrochrome Material aufgetragen, auf die andere eine Schicht, die Ionen aufnehmen und abgeben kann. Zwischen beiden befindet sich ein Elektrolyt. Durch ihn wandern die Ionen (schwarze Punkte) beim Schließen des Stromkreises von der positiven zur negativen Elektrode. Dabei ändern sie die Farbe der elektrochromen Schicht.

$\text{WO}_3$  ist als dünne Schicht blassgelb, weil seine energetisch tiefste elektronische Absorptionsbande im ultravioletten Bereich liegt. Durch die elektrochemische Reaktion werden einige Wolframatome reduziert. Sie nehmen dabei ein Elektron auf, so dass ihre Oxidationsstufe sinkt und sie in den Zustand  $\text{W}^{\text{V}}$  übergehen. Dieses Elektron kann nun auf ein benachbartes  $\text{W}^{\text{VI}}$ -Atom wechseln. Dazu muss es allerdings ein Lichtquant aus dem sichtbaren Spektralbereich absorbieren. Aus diesem Grund erscheint das reduzierte Oxid farbig.

Wenn nur wenige Wolframatome in der Oxidationsstufe V vorliegen, ist eine dünne  $\text{WO}_3$ -Schicht tiefblau und lässt sich durch Anlegen einer entgegengesetzten elektrischen Spannung wieder entfärben. Bei höheren Anteilen von  $\text{W}^{\text{V}}$  entsteht dagegen irreversibel eine metallisch glänzende rote oder goldene »Bronze«. Ihre Farbe rührt hauptsächlich von der Rückübertragung des Elektrons auf das ursprüngliche  $\text{W}^{\text{V}}$  her, bei der ein Lichtquant etwas größerer Wellenlänge ausgesendet wird, als bei der Abgabe zuvor absorbiert wurde.

Eine weitere wichtige Klasse elektrochromer Substanzen sind die Viologene. Es handelt sich um salzartige Verbindungen, die sich vom 4-4'-Bipyridin ableiten. In dieser organischen Verbindung sind zwei benzolartige Sechsringe miteinander verknüpft, die jeweils fünf Kohlenstoffatome und ein Stickstoffatom enthalten. Dessen Position wird durch die Zahlen wiedergegeben, wobei die Nummerierung jeweils an der Verknüpfungsstelle der beiden Ringe beginnt.

Neben ihrem elektrochromen Verhalten haben Viologene weitere nützliche Eigenschaften. So wirken sie herbizid und werden deshalb als Unkrautvernichter eingesetzt; Methylviologen zählt unter dem Handelsnamen Paraquat zu den weltweit meistverwendeten Herbiziden.

## Glossar

- Orbital:** Aufenthaltsraum eines Elektrons; s-Orbitale sind kugelförmig, p-Orbitale hantelförmig
- Oxidation:** Abgabe von Elektronen
- Reduktion:** Aufnahme von Elektronen
- Elektrolyt:** Ionen leitendes Medium; kann eine Lösung, ein Gel oder ein Festkörper sein

4-4'-Bipyridin ist leicht herstellbar und einfach zu handhaben, weshalb die elektrochromen Viologene intensiv erforscht wurden. Ihre Stammverbindung ist das Methylviologen, genauer das N-N'-Dimethyl-4-4'-bipyridylium-Ion. Darin tragen die beiden Stickstoffatome jeweils eine Methylgruppe (CH<sub>3</sub>) sowie eine positive Ladung. Andere einfache, symmetrische Bipyridylium-Verbindungen werden substituierte Viologene genannt, da in ihnen die Methylgruppen durch andere Alkylgruppen – sie haben die allgemeine Zusammensetzung C<sub>n</sub>H<sub>2n+1</sub>, also etwa C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> oder C<sub>3</sub>H<sub>7</sub> – ersetzt sind.

Von den drei üblichen Oxidationszuständen ist das Di-Kation – mit zwei positiven Ladungen – in reinem Zustand farblos. Reduktion führt zunächst zu einem so genannten Radikalkation, das ein ungepaartes Elektron enthält (Bild unten). Üblicherweise sind solche Verbindungen hochreaktiv. In diesem Fall erweist sich das Radikal jedoch als recht beständig. Wegen der besonderen Bindungsverhältnisse innerhalb der beiden Sechsringe ist das ungepaarte Elektron nämlich frei darin beweglich. Außerdem verteilt sich die verbleibende einfach positive Ladung gleichmäßig auf beide Stickstoffatome. Das ergibt eine ausgewogene Elektronenstruktur und erklärt die ungewöhnliche Stabilität des Moleküls.

Wegen der Beweglichkeit der Ladung sowie des ungepaarten Elektrons sind die Radikalkationen der Viologene außerdem intensiv gefärbt, absorbieren also sichtbares Licht einer bestimmten Wellenlänge sehr stark. Durch passende Wahl der am Stickstoff hängenden Atomgruppen, welche die Energieniveaus für die Molekülorbitale beeinflussen, lässt sich die Farbe des Radikalkations variieren. Methyl- oder andere Alkylgruppen ergeben eine blauviolette Farbe. Eine Cyanophenylgruppe (C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>-C≡N) sorgt dagegen für ein intensives Grün. Allerdings ist darauf zu achten, dass die Viologene nicht über das Radikalkation hinaus zu einer neutralen chinonartigen Verbindung reduziert werden. Diese ist nämlich wieder farblos, weil sie weder eine verschiebbare Ladung noch ein frei bewegliches ungepaartes Elektron enthält.

### Konjugierte leitfähige Polymere

Auch Kunststoffe können elektrochrom sein, wenn sich darin Einfach- und Doppelbindungen regelmäßig abwechseln. Eine Doppelbindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen besteht aus einer Sigma-Bindung, in der sich zwei so genannte sp<sup>2</sup>-Orbitale – Hybride aus einem s- und zwei p-Orbitalen –

frontal durchdringen, und einer Pi-Bindung, in der zwei hantelförmige p-Orbitale seitlich überlappen.

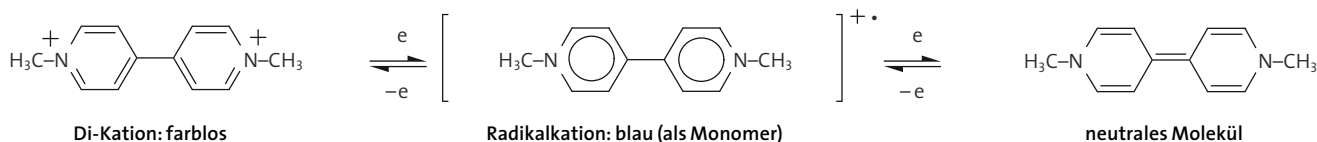
In einem organischen Molekül mit abwechselnden Einfach- und Doppelbindungen verschmelzen die p-Orbitale der beteiligten Kohlenstoffatome zu einem großen gemeinsamen Aufenthaltsraum, in dem sich die betreffenden p-Elektronen frei bewegen können. Die Bindungsverhältnisse in einem solchen »konjugierten Pi-System« lassen sich dann nur noch durch Grenzformeln beschreiben, zwischen denen das Molekül quasi oszilliert – eine Besonderheit, welche die Chemiker als Resonanz oder Mesomerie bezeichnen. Sie senkt die Energie des Systems und stabilisiert damit das Molekül.

Das Paradebeispiel solcher resonanzstabilisierten Moleküle mit konjugierten Doppelbindungen sind die aromatischen Verbindungen mit Benzol als Prototyp. In dessen Sechsring wechseln sich drei Einfach- mit drei Doppelbindungen ab. Die zuvor erwähnten Viologene enthalten dasselbe konjugierte Pi-System, das sich hier sogar über zwei Sechsringe erstreckt. Dass jeweils ein Kohlenstoff- durch ein Stickstoffatom ersetzt ist, stört die Resonanz nicht.

Ein konjugiertes aromatisches Pi-System findet sich auch in Kohlenstoff-Fünfringen, in denen ein Kohlenstoffatom durch ein anderes Atom wie Schwefel (im Thiophen), Stickstoff (im Pyrrol) oder Sauerstoff (im Furan) ersetzt wurde. Das Gleiche gilt für Verbindungen, in denen zwei Ringe über eine gemeinsame Kante verknüpft sind – etwa Indol (ein Benzolring plus ein Pyrrol), Carbazol (zwei Benzolringe mit einem Pyrrol dazwischen) und Azulen (ein Sieben- plus ein Fünfring). Ein weiteres Beispiel für ein konjugiertes, resonanzstabilisiertes System ist Anilin, in dem ein Benzolring eine Aminogruppe (NH<sub>2</sub>) trägt. Durch chemische oder elektrochemische Oxidation dieser Substanzen erhält man konjugierte, elektrisch leitfähige Kunststoffe.

Viele dieser Substanzen sind als dünne Schichten elektrochrom, wobei das Hauptinteresse in den letzten Jahren auf den Polymeren der Thiophene und Pyrrole lag. Im oxidierten, leitenden Zustand enthalten sie »delokalisierte« positive Ladungen, die sich frei durch das Pi-System bewegen können. Negative Gegenionen gleichen die Ladungsbilanz aus.

Die Polymere lassen sich elektrochemisch reduzieren, wenn man sie in Kontakt mit einer Elektrolytlösung bringt, so dass die Gegenionen dorthin entweichen oder Kationen daraus einwandern können. Dabei wird das Molekül zum Iso-



Viologen färbt sich beim Anlegen einer elektrischen Spannung. Das symmetrische Molekül enthält zwei gekoppelte Benzolringe, in denen jeweils ein Kohlenstoff- durch ein Stickstoffatom (N) mit angehängter Methylgruppe (CH<sub>3</sub>) ersetzt ist. Jedes Stickstoffatom trägt eine positive Ladung (links). Wird Viologen reduziert, nimmt es ein Elektron auf und wird zu einem Radikalkation: einem ein-

fach positiv geladenen Ion mit einem ungepaarten Elektron. Dieses hat ebenso wie die positive Ladung keine feste Position, sondern verteilt sich über das gesamte Doppelringsystem (Mitte). Das Radikalkation erscheint blau. Die weitere Reduktion mit einem zweiten Elektron ergibt ein chinonartiges neutrales Molekül (rechts), das wie das Viologen selbst farblos ist.



GESHMAT GMBH

Ein Fenster, das mit den sich komplementär färbenden elektrochromen Stoffen Wolframoxid und Berliner Blau beschichtet ist,

lässt sich stufenlos von transparent zu dunkelblau umschalten. Die Farbintensität hängt von der angelegten Spannung ab.

lators, weil die Delokalisation der Elektronen – und damit die Resonanz – verloren geht.

Welche Farben die beiden Formen haben, hängt von der Energiedifferenz zwischen dem höchsten besetzten und dem tiefsten unbesetzten Elektronenniveau in der reduzierten Verbindung ab. Beträgt sie drei Elektronvolt oder mehr, kann nur ultraviolettes Licht mit einer Wellenlänge von 400 Nanometern oder weniger ein Elektron aus dem besetzten in das unbesetzte Niveau anheben. Deshalb erscheint die reduzierte Form farblos und transparent. In der oxidierten Form dagegen ist die Energiedifferenz wegen der Resonanzstabilisierung geringer. Daher absorbiert diese Form im Allgemeinen sichtbare Strahlung und ist intensiv gefärbt.

Beträgt die Energiedifferenz zwischen dem höchsten besetzten und tiefsten unbesetzten Elektronenniveau dagegen nur 1,7 bis 1,9 Elektronvolt, so kann auch sichtbares Licht einer Wellenlänge von 650 bis 730 Nanometern ein Elektron anheben. In diesem Fall ist die reduzierte Verbindung also farbig. Bei der Oxidation verringert sich auch hier die Energiedifferenz, so dass selbst Infrarotstrahlung zur Anregung ausreicht. Zugleich ändert sich die Absorption im gesamten sichtbaren Bereich, weshalb die Verbindung bei der Oxidation eine andere Farbe annimmt.

### Metallkomplexe und Berliner Blau

Auch so genannte Metallkomplexe sind teilweise elektrochrom. Mitglieder dieser Substanzklasse bestehen aus einem Metallion, um das sich in streng geometrischer Anordnung nichtmetallische Atome oder Moleküle gruppieren. Diese »Liganden« stellen einem leeren Orbital des zentralen Metallions ein einsames Elektronenpaar zur Verfügung. Chemiker sprechen von koordinativer Bindung.

In elektrochromen Metallkomplexen fungiert meist ein 2-2'-Bipyridin als Ligand, das sich vom Grundgerüst der Viologene nur durch die Position des Stickstoffatoms in den beiden verknüpften Sechsringen unterscheidet. Als Metalle können beispielsweise Eisen, Ruthenium oder Osmium dienen, die dann in der Oxidationsstufe II vorliegen.

Metallkomplexe sind oft farbig und lassen sich problemlos oxidieren oder reduzieren, ohne dass sich dabei ihre Zu-

sammensetzung und Struktur ändert. Die Energiebarrieren für die Anregung von Elektronen sind niedrig, so dass meist sichtbares Licht absorbiert wird. Die stärksten »Absorptionsbanden« entsprechen so genannten Charge-Transfer-Übergängen, bei denen ein Elektron vom Zentralatom zum Liganden, von einem Liganden zum anderen oder von einem Metallion zum benachbarten wechselt. Durch Oxidation oder Reduktion eines Metallkomplexes ändern sich die Anregungsenergien, so dass sich die Absorptionsbanden verschieben. Manchmal findet danach überhaupt keine Absorption im sichtbaren Bereich mehr statt – etwa wenn nach Erhöhen der Oxidationsstufe des Zentralatoms von II auf III kein Charge-Transfer vom Metall zum Liganden mehr möglich ist und die entsprechende Absorptionsbande verschwindet.

Zu den elektrochromen Metallkomplexen gehören auch Pigmente aus der industriell bedeutsamen Klasse der Metallophthalocyanine. Sie sind eng mit natürlichen Farbstoffen wie Hämoglobin oder Chlorophyll verwandt. Das als Ligand fungierende Phthalocyanin sieht aus wie ein vierblättriges Kleeblatt. Allerdings ist es innen hohl. Am Rand dieses Hohlraums sitzen vier Stickstoffatome, die eine koordinative Bindung mit dem Zentralatom eingehen. Ein Beispiel für einen solchen Metallkomplex ist das Lutetium-bis(phthalocyanin). Dünne Schichten dieses Materials zeichnen sich durch das seltene Phänomen der Polyelektrochromie aus: Bei Oxidation wechselt ihre Farbe von einem intensiven Grün zu Gelbbraun und Rot. Reduktion lässt die Substanz blau und schließlich blauviolett werden.

Einer der wichtigsten elektrochromen Metallkomplexe ist das schon seit Anfang des 18. Jahrhunderts bekannte Berliner Blau. Als erstes modernes synthetisches Pigment hat es eine lange Geschichte bei der Herstellung von Anstrichfarben, Lacken, Druckfarben, Schreibmaschinenbändern und Kohlepapier. Seine chemische Formel lautet  $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ . Als Metallkomplex enthält es das Hexacyanoferrat-Anion, in dem sich sechs Cyanoliganden, die aus Kohlenstoff und einem dreifach daran gebundenen Stickstoff bestehen, um ein Eisenion gruppieren.

Im Berliner Blau liegt wie im reduzierten  $\text{WO}_3$  das Metall in zwei verschiedenen Oxidationsstufen vor, nämlich II und



III. Chemiker sprechen von einer gemischtvalenten Verbindung. Der Übergang eines Elektrons von  $\text{Fe}^{\text{II}}$  auf  $\text{Fe}^{\text{III}}$  ist für die intensive blaue Farbe des Pigments verantwortlich. Bei Oxidation oder Reduktion bleicht es aus und erscheint grünlich gelb. Auch andere Pigmente aus der Gruppe der Metall-Cyanometallate sind gemischtvalent und elektrochrom.

### Die Geschichte der Elektrochromie

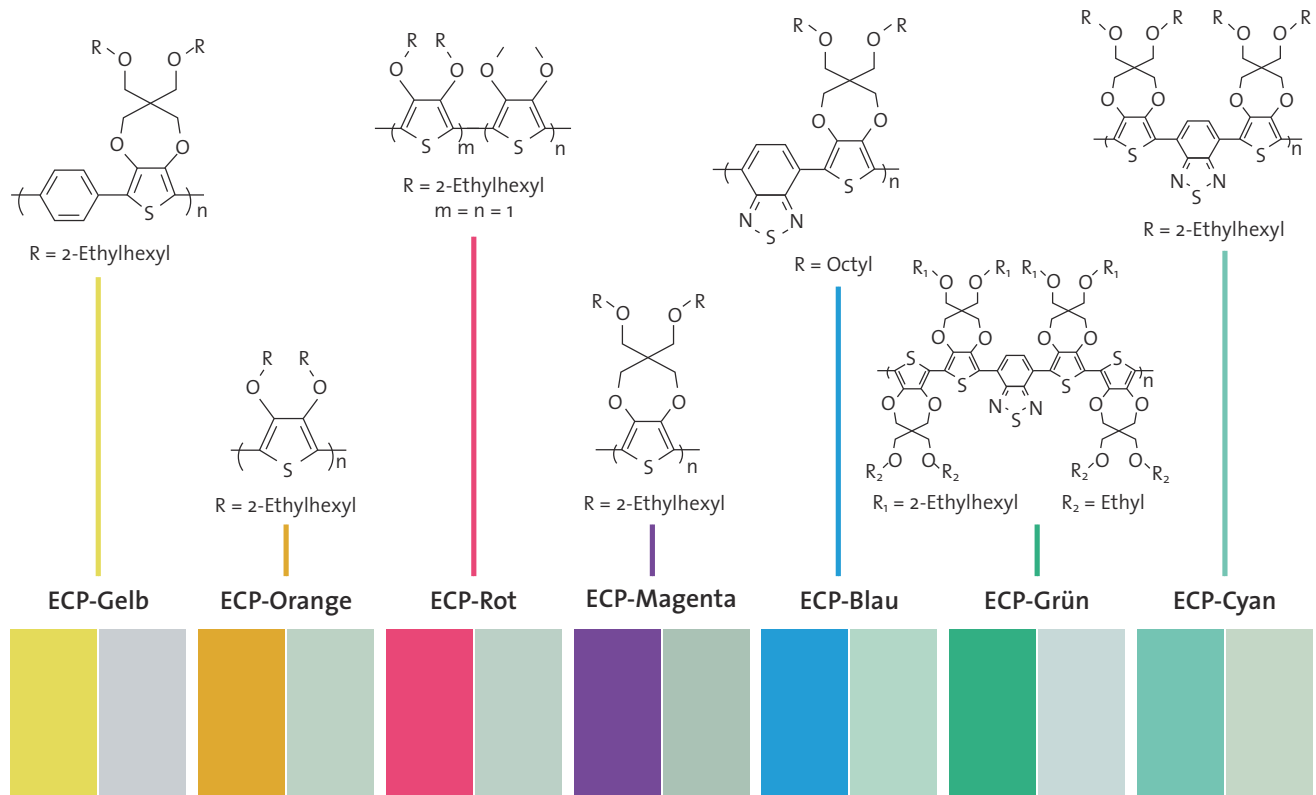
Werkstoffe, die bei Zufuhr oder Entzug von Elektronen die Farbe wechseln, sind schon seit dem frühen 19. Jahrhundert bekannt. Der schwedische Chemiker Jöns Jacob Berzelius (1779–1848) berichtete 1815, dass sich Wolframoxid tiefblau färbt, wenn man es in einem trockenen Wasserstoffstrom erwärmt. 1824 erreichte sein jüngerer deutscher Kollege Friedrich Wöhler (1800–1882) denselben Farbumschlag durch Zugabe von metallischem Natrium. Nach modernem Verständnis handelt es sich in beiden Fällen um eine Reduktion. Wöhler stellte auch fest, dass das Reaktionsprodukt bei der Umsetzung mit Lithium metallisch glänzt. Als Grund vermutete er fälschlich die Bildung einer Metalllegierung und sprach deshalb von »Wolframbronzen« – in Anlehnung an die aus Kupfer und Zinn bestehende Bronze, die zu den wichtigsten und bekanntesten Metalllegierungen zählt. Dieser eigentlich unzutreffende Begriff hat sich bis heute gehalten.

Im Jahr 1834 ließ der schottische Uhrmacher und Erfinder Alexander Bain (1811–1877) eine primitive Form der Faxübermittlung patentieren, der die elektrochemische Erzeugung von Berliner Blau zu Grunde lag. Dabei ruht ein Stift aus reinem Eisen auf Papier, das mit einer Lösung von gelbem Blutlaugensalz – chemisch: Kaliumhexacyanoferrat(II) – getränkt war. In einem Stromkreis bilden sich durch Elektrooxidation an der als Pluspol (Anode) geschalteten Eisen spitze Eisen(III)-Ionen, die sich mit den Hexacyanoferrat(II)-Ionen im Papier zu Berliner Blau verbinden. Auf diese Weise hinterlässt die positive Eisenelektrode bei jeder Berührung auf der Unterlage eine dunkelblaue Spur.

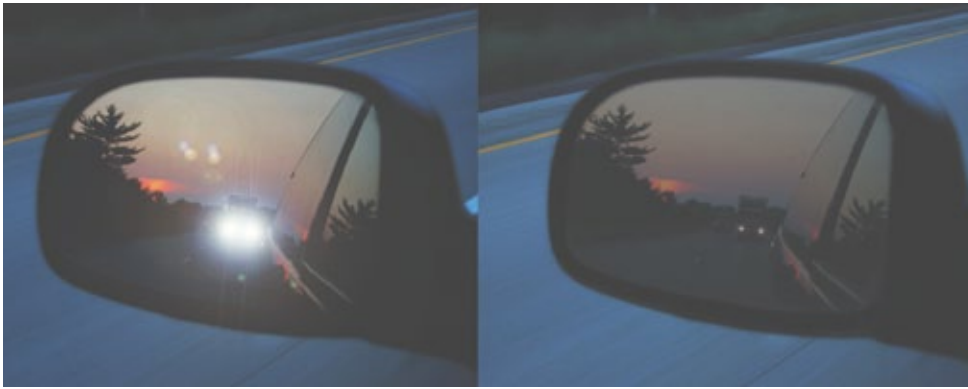
Ähnlich funktionierte die Cyanotypie: eine frühe Form der Fotografie, die Sir John Frederick William Herschel (1792–1871) 1842 entwickelte. In abgewandelter Form findet sie sich später in der Diazotypie, die Ingenieure und Architekten ab den 1880er Jahren in großem Umfang einsetzten, um Konstruktionspläne und Bauzeichnungen zu kopieren. Das Verfahren, das sich bis ins späte 20. Jahrhundert hielt, wurde unter dem Namen »Blaupause« bekannt – ein Begriff, der noch heute als Synonym für Plan steht.

Aus dem Jahr 1930 stammt der erste Bericht über die Blaufärbung von Wolframoxid durch elektrochemische – und nicht wie bis dahin chemische – Reduktion an einer Kathode.

Durch Kombination der von John Reynolds und seinem Team am Georgia Institute of Technology in Atlanta geschaffenen Serie elektrochromer Polymere lässt sich beim Anlegen einer Spannung jede beliebige Farbe erzeugen. Der Komplexitätsgrad der Substanzen variiert stark (oben). Sie sind im neutralen Zustand farbig und im oxidierten blassgrau (unten).



AMERICAN SCIENTIST NACH: DYER, A. L. ET AL.: COMPLETING THE COLOR PALETTE WITH SPRAY-PROCESSABLE POLYMER ELECTROCHROMICS. IN: ACS APPLIED MATERIALS AND INTERFACES 3, 51787–1793, 2.011



Schon einige Millionen Autos verfügen über Blendschutzspiegel vom Typ Night Vision Safety (NVS). Wenn Scheinwerferlicht eines rückwärtigen Fahrzeugs darauffällt, verfärben sie sich blaugrün. Das vermindert die Lichtintensität insgesamt und besonders stark im gelbroten Spektralbereich, so dass keine Blendung des Fahrers mehr auftritt.

Diese elektrochromen Flugzeugfenster, mit denen beispielsweise der Boeing 787 Dreamliner ausgestattet ist, lassen sich per Knopfdruck stufenlos abdunkeln.



1942 wurde ein Patent für elektrochromes Drucken erteilt. Das dazu verwendete »Elektrolyt-Schreibpapier« war mit Wolfram- und/oder Molybdänoxidteilchen imprägniert. Dabei wirkt die Elektrode wie ein Stift und erzeugt beim Gleiten über das Papier ein blaugraues Bild.

Im Jahr 1951 gelangen Eugene O. Brimm und seinen Kollegen von der Union Carbide and Carbon Corporation in New York reversible Farbwechsel mit in wässrige Säure getauchtem Natrium-Wolframoxid. Zwei Jahre später präsentierte Thaddeus Kraus bei der Balzers AG in Liechtenstein einen Bildschirm, der auf dem reversiblen Farbwechsel von Wolframoxid beruhte.

Den Begriff Elektrochromie prägte 1961 John R. Platt von der University of Chicago. Allerdings bezeichnete er damit ein anderes Phänomen: die Verschiebung und Aufspaltung der Absorptionslinien von Molekülen durch Anlegen eines starken elektrischen Felds, gemeinhin als Stark-Effekt bekannt.

Als erste Firma arbeitete Philips ab den frühen 1960er Jahren an einem kommerziellen elektrochromen Produkt und sicherte sich dafür 1973 ein Patent. Es handelte sich um einen Bildschirm, der ein organisches Viologen namens 1-1'-n-Heptyl-4-4'-bipyridium in wässriger Lösung verwendete.

Heute schreibt man das erste ECD meist dem Amerikaner Satyen K. Deb zu. Er erzeugte 1969, damals bei der American Cyanamid Company in Stanford (Kalifornien), eine blaue Farbe, indem er an eine dünne, durch Vakuumabscheidung auf Quarz hergestellte Schicht von Wolframoxid ein hohes elektrisches Feld von 1000 Volt pro Zentimeter anlegte.

Deb nannte den Effekt Elektrofotografie. Seine Erklärung dafür war allerdings falsch. Er führte die Farbe auf Leerstellen in den Kristallen zurück, an denen sich statt eines Sauerstoffions ein Elektron befindet. Solche so genannten F-Zentren absorbieren sichtbares Licht und waren von Metallhalogeniden – zu denen etwa das Natriumchlorid (Kochsalz) gehört – schon länger bekannt. Dort sorgen sie für eine Verfärbung beim Bestrahlen oder Erhitzen in einem starken elektrischen Feld.

Wegen der falschen Interpretation des ersten Versuchs gilt heute meist Debs spätere Publikation von 1973 als wahre Geburtsstunde der Elektrochromie; denn dort beschreibt der Wissenschaftler eine elektrochrome Vorrichtung, in der eine in einen Elektrolyten getauchte Wolframoxidschicht elektrochemisch reduziert wird. Seit den 1970er Jahren sind solche Systeme Gegenstand eingehender Forschung. Insbesondere wurden mit ihnen diverse Prototypen von »intelligenten« Fenstern entwickelt.

Als Vernon D. Neff von der Kent State University in Ohio 1978 die Herstellung dünner Filme aus Berliner Blau und ihre elektrochemische Farbänderungen beschrieb, weckte er das Interesse an den Cyanometallaten. In die späten 1970er Jahre fallen auch frühe Untersuchungen zur Elektrochromie organischer Materialien. So erschien 1979 die erste Veröffentlichung über konjugierte leitende Polymere, in der G. Brian Street und seine Mitarbeiter bei IBM in San Jose die Elektrolyse einer dünnen Schicht aus Polypyrrol beschrieben. Solche Polymerfilme lassen sich inzwischen allerdings besser

durch elektrochemische Oxidation des gelösten Monomers oder Polymers herstellen, wobei sich das letztgenannte Verfahren besonders für die Massenproduktion eignet.

Mit ihnen beschäftigte sich seit den 1980er Jahren vor allem die Forschungsgruppe um John Reynolds, heute am Georgia Institute of Technology in Atlanta. Das Team ergründete systematisch die Zusammenhänge zwischen Struktur und Eigenschaften elektrochromer Polymere – speziell solchen auf Thiophenbasis. So schuf es durch gezielte Variation der Zusammensetzung vor zwei Jahren erstmals einen Satz derartiger Werkstoffe, der die gesamte Palette möglicher Farben abdeckt – ein Durchbruch, der eine Fülle preiswerter elektronischer Displays und getönter Scheiben für den täglichen Gebrauch erwarten lässt (Bild S. 81).

### Elektrochrome Geräte

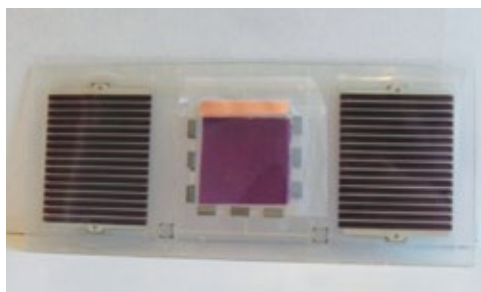
ECDs funktionieren als wiederaufladbare elektrochemische Zellen mit mindestens zwei Elektroden. Diese sind durch einen Elektrolyten in flüssiger, gelartiger oder fester Form getrennt. Der Farbstoff kann entweder gelöst oder als dünne Schicht vorliegen, und der Farbwechsel findet durch Zufuhr oder Entzug von Elektronen beim Anlegen einer geeigneten Spannung statt.

Eine der Elektroden muss stets transparent sein. Üblicherweise besteht sie aus dotiertem Indiumoxid, das als dünne

Schicht auf Glas oder den flexiblen Kunststoff Polyethylenterephthalat (PET) aufgebracht wird. Bei Geräten wie Brillen, Sonnenblenden in Autos oder intelligenten Fensterscheiben, die im absorbierenden/transmittierenden Modus arbeiten, muss auch die zweite Elektrode Licht durchlassen. Dagegen besteht sie bei reflektierenden ECDs – wie Displays und blendfreien Spiegeln – meist aus poliertem Metall wie Chrom oder Silber.

In absorbierenden/transmittierenden Geräten vollzieht sich der entscheidende Farbwechsel an der so genannten Primärelektrode. An der Sekundärelektrode befindet sich dann entweder gar kein Farbstoff oder einer, der synchron mit dem ersten annähernd dieselbe Farbe annimmt, was den Kontrast zwischen dunklem und hellem Zustand des ECD erhöht. Eine solche Kombination kann beispielsweise aus Polyethylenedioxythiophen (PEDOT) und Polybutylviologen bestehen; denn das Erste schlägt bei der Oxidation an der Anode von hell- nach dunkelblau um und das Zweite bei der komplementär dazu stattfindenden Reduktion an der Kathode von farblos nach purpur. Ein weiteres solches Paar sind Berliner Blau und Wolframoxid – mit einem Farbwechsel von farblos nach blau bei Oxidation beziehungsweise Reduktion.

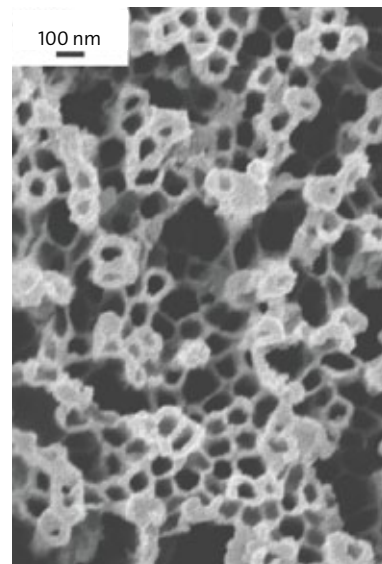
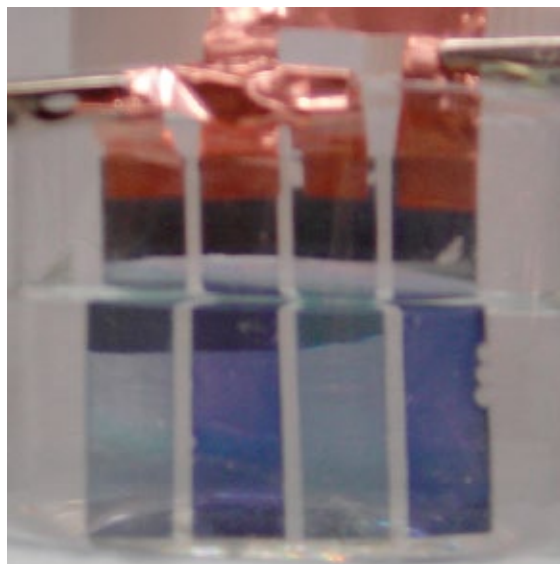
Mit dieser Kombination arbeitet zum Beispiel das intelligente Fenster der Firma Gesimat in Berlin-Köpenick, dessen elektrochrome Schichten durch Polyvinylbutyral – einen fes-



JENSEN, J. ET AL.: MANUFACTURE AND DEMONSTRATION OF ORGANIC PHOTOVOLTAIC-POWERED ELECTROCHROMIC DISPLAYS USING ROLL COATING METHODS AND PRINTABLE ELECTROLYTES. IN: JOURNAL OF POLYMER SCIENCE PART B: POLYMER PHYSICS 50, S. 536–545, 2012, FIG. 10; ABRUCK GENEHMIGT VON JOHN WILEY & SONS / CCC

Per Walzdruckverfahren beschichtete Reynolds' Gruppe eine PET-Folie, die zwei aufgedruckte Fotovoltaikzellen für die Energieversorgung enthielt, mit einem elektrochromen Polymer. Im neutralen Zustand (links) ist es magentafarben, bei Oxidation bleicht es aus (rechts).

Der Farbwechsel beschleunigt sich, wenn elektrochrome Polymere als hohle Nanoröhren – rechts in einer rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme – auf den Elektroden aufgewachsen sind. Auf dem Foto links tauchen vier mit solchen Nanoröhren beschichtete Kupferbleche in einen Elektrolyten ein. Jeweils zwei sind mit dem Plus- beziehungsweise Minuspol einer Batterie verbunden. Erstere liegen dadurch im blassgrauen oxidierten und letztere im dunkelblauen reduzierten Zustand vor.

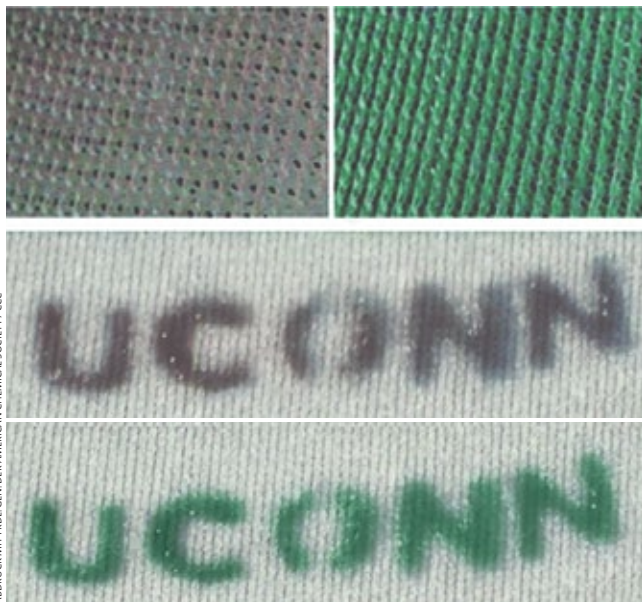


CHO, S.I. ET AL.: ELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF POLY(3,4-ETHYLENEDIOXYTHIOPHENE) NANOTUBES TOWARDS FAST WINDOW-TYPE ELECTROCHROMIC DEVICES. IN: NANOTECHNOLOGY 18, S. 405705, 2007; ABRUCK MIT FRDL GEN. VON IOP PUBLISHING

ten Polymerelektrolyten – getrennt sind. Wenn die mit Berliner Blau beschichtete Elektrode als Anode und die mit Wolframoxid als Kathode geschaltet ist, befinden sich beide Materialien in ihrem blauen Zustand. Kehrt man die Polarität um, entfärben sie sich. Kürzlich hat Gesimat eine Pilot-Fertigungsstraße für die Herstellung bis zu 2,4 mal 1 Meter großer elektrochromer Glasbeschichtungen in Betrieb genommen.

Das bislang kommerziell erfolgreichste ECD ist ein sich automatisch verdunkelnder Rückspiegel der Gentex Corporation aus Zeeland (Michigan). In dem Blendschutzsystem namens Night Vision Safety (NVS) bilden ein mit zinndotiertem Indiumoxid beschichtetes Glasplättchen und eine reflektierende Metalloberfläche die beiden Elektroden. Ihr Abstand beträgt nur Bruchteile eines Millimeters. Den schmalen Raum dazwischen füllt ein gelartiger Elektrolyt mit zwei elektrochromen Komponenten. Über deren genaue Zusammensetzung schweigt sich die Firma aus, doch dürfte die eine ein substituiertes Viologen sein, das sich bei Reduktion blau färbt. Bei der anderen handelt es sich vermutlich um einen Farbstoff, der sich vom Thiazin oder Phenylendiamin ableitet – Benzolringen, bei denen entweder ein Kohlenstoffatom durch Schwefel und das gegenüberliegende durch Stickstoff ersetzt ist oder an zwei gegenüberliegenden Ecken Aminogruppen sitzen. Er erscheint im oxidierten Zustand grün.

Beim Anlegen einer Spannung wandern die elektrochromen Komponenten zu ihren jeweiligen Elektroden, wo sie reduziert beziehungsweise oxidiert werden. Dadurch färbt sich der Spiegel intensiv blaugrün (oberes Bild S. 82). So vermindert sich die Lichtintensität, während zugleich gewisse Wellenlängenbereiche komplett herausgefiltert werden.



Elektrochrome Polymere lassen sich auf Elastangewebe drucken, das selbst als Elektrode fungieren kann. Beim Umschalten vom reduzierten (oben links) zum oxidierten Zustand (oben rechts) färbt sich der Stoff grün. Ein per Schablone aufgebracht Schriftzug zeigt denselben Farbwechsel (unten).

Nach dem Abschalten der Spannung wandern die Oxidations- und Reduktionsprodukte von ihrer jeweiligen Elektrode zurück ins Innere des Gels. Dort treffen sie aufeinander und verwandeln sich durch Elektronenaustausch wieder in ihre ursprüngliche, farblose Form. Diese Art von ECD benötigt daher einen ständigen geringen Stromfluss, damit der farbige Zustand bestehen bleibt. Zum Ausgleich dafür ist keine Entfärbung auf elektrischem Weg erforderlich, da sie beim Ausschalten von allein stattfindet. Dies steht in Einklang mit US-Vorschriften, wonach der Spiegel bei Stromausfall den ungetrübten Zustand annehmen muss.

Die automatische Regelung beim NVS-Spiegel arbeitet mit zwei Detektoren. Einer ist nach hinten gerichtet und registriert Blendlicht. Damit das Gerät nicht tagsüber anspringt, ermittelt der zweite Detektor, ob auch von vorne Helligkeit einfällt. Solange dies der Fall ist, bleibt das Verdunkelungssystem abgeschaltet.

### In allen Farben des Regenbogens

In Kooperation mit der Firma PPG Aerospace in Pittsburgh (Pennsylvania) hat Gentex inzwischen seine Produktpalette um abdunkelbare Fenster für Flugzeuge erweitert. Sie sollen die herkömmlichen Plastikjalousien ersetzen und so mehr Komfort bieten. PPG Aerospace vermarktet das erste elektrochrome Fenster der Welt unter dem Namen Alteos Interactive Window Systems. Es lässt sich per Knopfdruck stufenlos zwischen einem hellen, klaren und einem völlig dunklen Zustand umschalten (unteres Bild S. 82). Eingebaut ist es im Boeing 787 Dreamliner und im Hawker Beechcraft King Air 350i, einem Geschäftsflugzeug.

Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet elektrochromer Werkstoffe schreiten rapide voran. Das gilt sowohl für die Palette der Materialien und Gerätedesigns als auch für die Bandbreite der Anwendungen. Im Vordergrund der Bestrebungen stehen derzeit großflächige abdunkelbare Fenster, die sich preiswert in hohen Stückzahlen herstellen lassen. Sie könnten den enormen Energieverbrauch von Klimaanlagen in Büros senken helfen – und das bei mehr Komfort.

Verschiedene Gruppen arbeiten seit einiger Zeit daran, die Transparenz elektrochromer Fenster im farblosen Zustand zu verbessern. So haben Kuan-Jiuh Lin und seine Kollegen an Taiwans Nationaluniversität Chung Hsing eine Methode entwickelt, in einem einzigen Schritt Nanodrähte aus Titanoxid auf Glas zu züchten, die so porös sind, dass der Brechungsindex der Fenster niedrig bleibt und sie hochgradig lichtdurchlässig sind. Im abgedunkelten Zustand erscheinen die Scheiben dagegen blassgrau.

Früher galt die Elektrochromie als aussichtsreiche Option für Bildschirme. Aber mit den Flüssigkristallen, die inzwischen den Markt beherrschen, kann sie in absehbarer Zukunft wohl nur bedingt konkurrieren. So sind etwa für Fernseher die Schaltzeiten zu lang. Dennoch könnte die Elektrochromie bei vielfarbigen Displays für andere Anwendungen wie elektronisches Papier, Schilder oder wiederverwendbare Preisetiketten eine kostengünstige Lösung bieten.



Die portugiesische Firma Ynvisible verwendet elektrochrome Materialien für Karten, Geschäftsdisplays und sogar Werbung. In diesem Beispiel schaltet das Berühren der Anzeige für ein Flugticket ein elektrochromes Feld an, in dem daraufhin der Preis erscheint.

Zum Beispiel gelang es der Gruppe von Reynolds, mit Airbrush-Spritzpistolen oder Tintenstrahldruckern schnell und einfach ECDs herzustellen. Indem die Forscher Lösungen ihrer verschiedenfarbigen elektrochromen Polymere durch Masken sprühten, erzeugten sie mehrlagige Substratmuster, die eine Reihe von Farbtönen darstellen konnten. Im vergangenen Jahr beschichteten Reynolds und seine Kollegen zudem flexible PET-Folien, die gedruckte Fotovoltaikmodule enthielten, per Walzdruckverfahren mit ihren Polymeren. So entstand ein biegsames Display, das sich in einer hellen Umgebung selbst mit Strom versorgt (oberes Bild S. 83).

Die Schaltzeit eines ECDs wird durch die Diffusionsgeschwindigkeit der Gegenionen beim Redoxprozess bestimmt. Sie verkürzt sich folglich, wenn man die Dicke der elektrochromen Schichten und damit die Diffusionsstrecke der Ionen verringert. Bei dünneren Filmen ist der Kontrast jedoch zu gering für eine gut sichtbare Färbung. Sang Bok Lee und seine Kollegen von der University of Maryland in Baltimore haben jüngst eine Lösung für dieses Problem gefunden. Sie lassen auf der Elektrode hohle Röhren aus elektrochromen Polymeren wachsen, die nur 10 bis 20 Nanometer dicke Wände haben, selbst aber mehrere hundert Nanometer lang sind (unteres Bild S. 83).

Für die Redoxreaktion brauchen die Ionen lediglich durch die dünnen Wände zu diffundieren. Das führt zu Schaltzeiten in der Größenordnung von zehn Millisekunden. Zugleich besteht dank der Länge der Nanoröhren ein guter Farbkontrast. Um ihn weiter zu erhöhen, entwickelte Lees Gruppe im vergangenen Jahr eine Methode zur Erzeugung von Hybrid-Nanoröhren, die aus mehreren Polymeren bestehen. Solche Schichten funktionieren sowohl im reflektierenden als auch im absorbierenden/transmittierenden Modus, wodurch sie sich für Bildschirme und Fenster gleichermaßen eignen.

Zu den faszinierenden potenziellen Anwendungen der Elektrochromie gehören auch Textilien, die chamäleonartig ihre Farbe wechseln können – sei es für Tarnkleidung, am Körper tragbare Displays oder schlicht als Modedag. Weil elektrochrome Polymere löslich sind, kann man leicht Gewebe damit einfärben. Den geringen Strombedarf für den Farbwechsel können biegsame Dünnschichtzellen decken.

Gregory A. Sotzing und seine Gruppe an der University of Connecticut in Storrs haben ein elektrochromes Elastan entwickelt, dessen Farbintensität sich beim Strecken ändert. Der

hochgradig dehnbare Kunststoff kann als Elektrode fungieren, wenn er mit leitfähigen Polymeren getränkt wird. Die Forscher trennten zwei Lagen des Gewebes durch einen Film aus Elektrolytgel und bedruckten sie beidseitig mit elektrochromen Polymeren. Das so behandelte Elastan zeigte außen und innen Muster aus unterschiedlichen, reversibel umschaltbaren Farben (Bild links).

All dies zeigt, welches enorme Potenzial in elektrochromen Materialien steckt. Von Anfang an zeichneten sie sich durch geringen Energieverbrauch und niedrige Materialkosten aus. Mit der Erweiterung ihrer Farbpalette, kürzeren Schaltzeiten und einfacheren Herstellungsverfahren konnten sie nun weitere entscheidende Pluspunkte für sich verbuchen. Und so erscheint ihre Zukunft buchstäblich in leuchtenden Farben. ~

#### DER AUTOR



**Roger J. Mortimer** ist Professor für Physikalische Chemie an der Loughborough University (Großbritannien). Nach seiner Promotion am Londoner Imperial College im Jahr 1980 forschte er an mehreren Universitäten – darunter dem Massachusetts Institute of Technology in Cambridge –, ehe er 1989 nach Loughborough kam, wo er 2001 einen Lehrstuhl erhielt. Außer für elektrochrome

Substanzen und Geräte interessiert er sich für die Beschichtung von Elektroden mit neuartigen Materialien sowie die Modifikation von Metalloberflächen.

#### QUELLEN

**Deb, S.:** Reminiscences on the Discovery of Electrochromic Phenomena in Transition Metal Oxides. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 39, S. 191–201, 1995

**Granqvist, C. G.:** Oxide Electrochromics: An Introduction to Devices and Materials. In: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 99, S. 1–13, 2011

**Monk, P. M. S. et al.:** *Electrochromism and Electrochromic Devices*. Cambridge University Press, 2007

**Mortimer, R. J.:** Electrochromic Materials. In: *Annual Review of Materials Research* 41, S. 241–268, 2011

**Mortimer, R. J. et al.:** Electrochromic Organic and Polymeric Materials for Display Applications. In: *Displays* 27, S. 2–18, 2006

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1188741](http://www.spektrum.de/artikel/1188741)

# Bücher und mehr



## Unser besonderer Tipp:



Lawrence M. Krauss

### EIN UNIVERSUM AUS NICHTS ... und warum da trotzdem etwas ist

2013, 256 S. mit 40 Abb., geb., Knaus

Bestell-Nr. 3804

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Die Frage nach der Entstehung unseres Universums ist eine der bemerkenswertesten Erkundungsreisen, die die Menschheit je unternommen hat. Einstein und Hubble, Relativitätstheorie, Inflation und Quantenmechanik – kein Forscher und Bereich der Kosmologie, über den Lawrence Krauss nicht verständlich und vor allem spannend zu erzählen weiß. Dabei fragt er immer auch nach den Quellen unseres Wissens: Wie hat sich unsere Vorstellung vom Ursprung aller Dinge entwickelt? Weshalb wissen wir, was wir heute wissen? Und warum können wir davon ausgehen, dass das auch stimmt?



Chad Orzel

### EINSTEINS HUND Relativitätstheorie (nicht nur) für Vierbeiner

2013, XX, 468 S. m. 43 Abb., geb., Springer

Bestell-Nr. 3820

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

In dieser unwiderstehlichen Einführung in die Physik von Albert Einstein begeben sich der Physikprofessor Chad Orzel und seine reizende Promenadenmischung Emmy auf die Spuren der allgemeinen Relativitätstheorie. Wenn Orzel sich im Lehnstuhl mit Emmy über die Relativbewegungen von Hunden und Katzen oder die Vorgehensweise beim Jagen von Eichhörnchen unterhält, übersetzt er die schwierigen Ideen Einsteins in Beispiele, die auch ein Hund verstehen kann.

**Ebenfalls lieferbar:** Orzel, Schrödingers Hund, Quantenphysik (nicht nur) für Vierbeiner

Bestell-Nr. 3394 € 19,95 (D), € 20,60 (A)



Paul Parsons, Gail Dixon

### STEPHEN HAWKING IM 3-MINUTEN-TAKT

Sein Leben, sein Werk,  
sein Einfluss

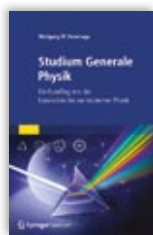
2013, 160 S. m. 160 Farbbabb.,  
geb., Springer

Bestell-Nr. 3819

€ 14,99 (D), € 15,50 (A)

Der Band bietet eine kompakte Einführung in Leben und Werk von Stephen Hawking, der als brilliantester Physiker seit Einstein gilt.

Der Lesestoff ist in 3-Minuten-Portionen aufgeteilt und liefert so einen schnellen Einblick in das Denken des Wissenschaftlers. Tauchen Sie also einfach ein in die faszinierende Geschichte dieses großen Denkers und beginnen Sie, das Universum ein wenig besser zu verstehen.



Wolfgang W. Osterhage

### STUDIUM GENERALE PHYSIK Ein Rundflug von der klassischen bis zur modernen Physik

2012, 254 S. m. 80 SW-Abb., 7 Tab., geb.,  
Spektrum

Bestell-Nr. 3749

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch nähert sich den großen Komplexen der Physik, ohne Spezialistenwissen vermitteln zu wollen. Dabei werden zunächst die Grundlagen der klassischen Physik erörtert: Mechanik, Elektrizitätslehre, Felder, Wellen und Wärmelehre. Auf dieser Basis werden dann die wesentlichen Erkenntnisse der Quantenphysik (Atomphysik, Kernphysik) einerseits und der Kosmologie (Relativitätstheorie) andererseits bis zum aktuellen Wissensstand entwickelt; ein Buch, geschrieben für alle, die in die Physik einsteigen oder sich einen Überblick verschaffen wollen – mit vielen weiterführenden Literaturhinweisen und Gedanken zum Weiterdenken.

**Die großen Fragen** behandeln grundlegende Probleme und Konzepte in Wissenschaft und Philosophie, die Forscher und Denker seit jeher umtreiben. Anspruch der ambitionierten Reihe ist es, die Antworten auf diese Fragen zu präsentieren und damit die wichtigsten Gedanken der Menschheit in einzigartigen Übersichten zu bündeln. **Eine Übersicht über alle bisher erschienenen Bände der Reihe finden Sie hier:** [www.science-shop.de/fragen](http://www.science-shop.de/fragen)



Mark Vernon

### DIE GROSSEN FRAGEN: GOTT

2013, 207 S., 15 SW-Abb., geb.,  
Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3823

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Gott* widmet sich Mark Vernon zwanzig bedeutenden Fragen zu Glaube, Religion und Spiritualität.



Francisco J. Ayala

### DIE GROSSEN FRAGEN: EVOLUTION

2013, 207 S. m. Abb., geb.,  
Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3824

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Im Band *Evolution* widmet sich Francisco Ayala zwanzig bedeutenden Fragen zu Ursprung und Entwicklung des Lebens auf der Erde, zur Vielfalt der Organismen und zur Stellung des Menschen.

## Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841  
Sie direkt: @ [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)



Wolfgang Steinicke

### GALAXIEN Eine Einführung für Hobby- Astronomen

2012, 208 S. m. zahlr. meist farb. Abb. u.  
Tab., kart., Oculum

Bestell-Nr. 3800

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Galaxien, die Schwestern unserer Milchstraße im All, faszinieren durch ihre vielfältigen Formen und Erscheinungsweisen. Dieses Buch erklärt die Entstehung, Entwicklung und Struktur der Welteninseln aus Sternen, Gas und Staub. Ausführlich wird erklärt, wie man Galaxien mit Amateurteleskopen beobachten und fotografieren kann.



Burkhard Leitner, Uwe Pilz

### KOMETEN Eine Einführung für Hobby-Astronomen Interstellum Astro-Praxis

2013, 220 S. m. zahlr. meist farb.,  
kart., Oculum

Bestell-Nr. 3801

€ 24,90 (D), € 25,60 (A)

Kometen sind faszinierende Himmelschauspiele. Ihr plötzliches Erscheinen hat frühere Generationen zu Tode verängstigt, heute freuen sich Hobby-Astronomen auf die oft kurzfristig erscheinenden Schweifsterne. Dieses Buch erklärt die verschiedenen Erscheinungsformen der Kometen und die bei der Annäherung an die Sonne ablaufenden Prozesse. Ausführlich wird gezeigt, wie man Kometen mit Amateurteleskopen beobachten und fotografieren kann.

Besuchen Sie uns im Internet unter:  
[www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

Bequem  
bestellen:

→ direkt bei  
[www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail  
[info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch  
+49 6221 9126-841

→ per Fax  
+49 711 7252-366

→ per Post  
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart

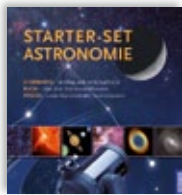


Morgan Freeman  
**MYSTERIEN DES WELTALLS,  
STAFFEL 2**

2013, 405 Min., Discovery Channel,  
WVG Medien

**Bestell-Nr. 3779**  
**€ 19,99 (D), € 19,99 (A)**

Zusammen mit hochkarätigen Wissenschaftlern aus den Bereichen der Astrophysik, Medizin und Philosophie erläutert Morgan Freeman neue Theorien und Forschungsergebnisse über unser Dasein auf der Erde sowie die großen Geheimnisse des Universums. Spannend, lehrreich, informativ und beeindruckend zugleich – eine bildgewaltige Entdeckungsreise!

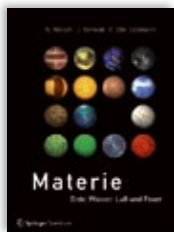


Ian Ridpath  
**STARTER-SET ASTRONOMIE:  
STERNKARTE, BUCH,  
POSTER**

2013, 80 S. m. zahlr. Farbbabb., Kosmos

**Bestell-Nr. 3798**  
**€ 19,99 (D), € 20,60 (A)**

Das Komplettpaket bietet alles, was Astro-Einsteiger brauchen: Mit der nachleuchtenden Sternkarte werden Sternbilder erkundet, das großzügig gestaltete und hervorragend illustrierte Buch gibt einen Überblick über das Universum, und das Poster »Unser Sonnensystem« schmückt die Wand des neuen Astro-Aspiranten.



Norbert Welsch, Jürgen Schwab,  
Claus Liebmann

**MATERIE**  
**Erde, Wasser, Luft und Feuer**

2012, XX, 568 S. 514 Farbbabb., geb,  
Spektrum

**Bestell-Nr. 3756**  
**€ 49,95 (D), € 51,40 (A)**

Dieses Bild-Lese-Buch spannt einen großen Bogen: von der Wahrnehmung unserer stofflichen Umgebung über die wissenschaftliche Interpretation zahlreicher alltäglicher Phänomene bis hin zu den uns ganz persönlich berührenden Fragen, wie derjenigen nach unserem eigenen Ursprung. Dank der interdisziplinären Herangehensweise der Autoren, dank hunderter klarer Grafiken und ansprechender Fotografien, erschließt das Werk oft unerwartete Zusammenhänge.



**OPTISCHE TÄUSCHUNGEN**  
**Mit Pop-ups und tollen Extras**

2013, 32 S. m. zahlr. farb. Abb. u. Pop-ups, ab  
8 Jahren, geb., Dorling Kindersley

**Bestell-Nr. 3812**  
**€ 16,95 (D), € 17,50 (A)**

Schiefe oder gerade Linien? Punkte, die tanzen, oder scheinbar absurde Perspektiven? Kann man dem Augenschein trauen? Über 50 verblüffende optische Täuschungen in diesem Buch beweisen, dass der erste Eindruck nicht immer der richtige ist. Pop-ups, Drehscheiben, Klappen und eine Wunderscheibe zeigen faszinierende Effekte und bringen Kinder (und auch Erwachsene!) zum Staunen!

## % Schnäppchen



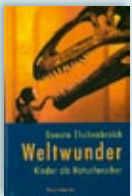
Lutz Roth, Max Daunerer,  
Kurt Kormann

**GIFTPFLANZEN,  
PFLANZENGIFTE**  
**Vorkommen, Wirkung, Therapie.  
Allergische und phototoxische  
Reaktionen. Mit Sonderteil über  
Gifftiere. Das Standardwerk**

6., überarb. Aufl. 2012 VI, 1122 S. m. 500 Farbbabb., geb., Nikol

**Bestell-Nr. 2300 früher € 126,80,  
jetzt nur € 19,95 (D), € 20,60 (A)**

Dieser unentbehrliche Ratgeber bei akuten Notfällen im Umgang mit Giftpflanzen und Pflanzengiften wendet sich nicht nur an Ärzte, sondern sollte in keinem Haushalt fehlen. Jetzt komplett überarbeitet!



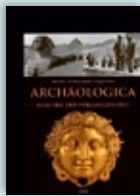
Donata Elschenbroich

**WELTWUNDER**  
**Kinder als Naturforscher**

2005, 270 S. m. Abb., geb., Kunstmann

**Bestell-Nr. 3711 früher € 19,90,  
jetzt nur € 7,95 (D), € 8,20 (A)**

Donata Elschenbroich beschreibt in ihrem Buch elementare Naturwissenschaft im Familienalltag: die Chemie und Physik des Putzens, frühe Erfahrungen mit Naturgesetzen beim Schaukeln, eine Mutter, die ihr Wissen als Biologin mit ihren Kindern neu entdeckt.



Mark Rose, Eti Bonn-Müller,  
Giorgio Ferrero

**ARCHÄOLOGICA**  
**Wunder der Vergangenheit**

2010, 288 S. m. zahlr. meist farb.  
Fotos, geb., Weltbild, Lizenz White Star

**Bestell-Nr. 3782**  
**früher € 38,-, jetzt nur € 14,99 (D), € 15,40 (A)**

Dieser großformatige Band – mit einer Vielzahl zeitgenössischer Fotos von Grabungsstätten und ihren Funden – schildert die Ereignisse rund um die wichtigsten archäologischen Entdeckungen aller Zeiten.



Georg Joos, Egon W. Richter

**HÖHERE MATHEMATIK**

**Ein kompaktes Lehrbuch für  
Studium und Beruf**

13. Aufl. 2013, 496 S., Lizenz:  
Harri Deutsch, geb., Nikol Verlag

**Bestell-Nr. 3768**  
**früher € 19,80, jetzt € 9,99 (D), € 10,30 (A)**

Das weit gesteckte Feld dieses kompakten Lehrbuches umfasst u.a. auch Differentialgleichungen und Numerische Mathematik. Lesern aus naturwissenschaftlichen und technischen Fachrichtungen liefert es eine pointierte und einprägsame Darstellung der Teilgebiete der höheren Mathematik.



Markus T. Mall, Dierk Suhr

**KLEINE GESCHICHTE  
DER KETZEREI**

2008, 156 S., geb., Thorbecke

**Bestell-Nr. 3789,  
früher € 19,80,  
jetzt € 8,95 (D), € 9,20 (A)**

Mit strengen und brutalen Methoden ging die mittelalterliche Kirche gegen Ketzer vor, denn schlimmer noch als ein Heide war nach Sicht der Kirche ein Ketzer, war dieser doch zugunsten einer Irrlehre vom rechten Glauben abgefallen. Nicht selten landeten diese Menschen auf dem Scheiterhaufen. Eines der spannendsten Kapitel mittelalterlicher Geschichte.

## Rekorde der Natur – zum Sonderpreis:



Richard Jones

**REKORDE  
DER INSEKTENWELT**

**130 Extreme**  
2010, 287 S. m. 134 Farbfotos, geb,  
Haupt

**Bestell-Nr. 3784 früher € 39,90,  
jetzt nur € 19,90 (D), € 20,50 (A)**

130 Rekordhalter der Insektenwelt werden mit Bild und Text vorgestellt und lassen uns über ihre Vielfalt, Einzigartigkeit- und Außergewöhnlichkeit staunen.



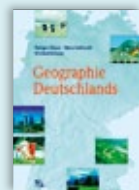
Dominic Couzens

**REKORDE  
DER VOGELWELT**

**130 Extreme**  
2010, 288 S. m. 134 Farbfotos, geb,  
Haupt

**Bestell-Nr. 3785 früher € 39,90,  
jetzt nur € 19,90 (D), € 20,50 (A)**

Einige Rekordhalter der Vogelwelt sind den meisten Menschen bekannt – wie z. B. der größte Vogel, der Strauß. Die Vogelwelt hat jedoch weitere spektakuläre Leistungen vorzuweisen, die faszinieren!



Rüdiger Glaser, Hans Gebhardt,  
Winfried Schenk

**GEOGRAPHIE  
DEUTSCHLANDS**

2007, 280 S. m. zahlr. meist farb. Abb. u. Ktn.,  
geb., Wissenschaftliche Buchgesellschaft

**Bestell-Nr. 3702**  
**früher € 49,90, jetzt nur € 24,90 (D), € 25,60 (A)**

Ob es um Ost-West- oder Nord-Süd-Gegensätze, um die Spaß-, die Konsum- oder die Risikogesellschaft geht, ob Geologie, Landschaft und Klima, Umweltbelastungen, der Wirtschaftsstandort Deutschland, die Lage in Mitteleuropa oder der demographische Wandel beschrieben werden: Mit klaren Texten, eindrücklichen Bildern und aussagekräftigen Karten und Grafiken bieten die Autoren und ihr Team ein neues Standardwerk für alle, die etwas über die Geographie Deutschlands erfahren wollen.

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



H. Dieter Zeh

**Physik ohne Realität:  
Tiefsinn oder Wahnsinn?**

Springer, Heidelberg 2012. 218 S., € 29,95

WISSENSCHAFTSTHEORIE

## Ein Plädoyer für viele Welten

Zehs Lösung der Quantenrätsel mutet gewagt an. Andererseits sieht die orthodoxe Kopenhagener Deutung allmählich ziemlich alt aus.

Den Physik-Nobelpreis 2012 verdienten sich zwei »Quantendompteure«: Der Amerikaner David Wineland und der Franzose Serge Haroche drangen mit raffinierten Experimenten in den Grenzbereich zwischen klassischer Physik und Quantenmechanik vor (Spektrum der Wissenschaft 12/2012, S. 22). Insbesondere Haroche untersuchte quasi in Zeitlupe das Phänomen der so genannten Dekohärenz – den Übergang einer quantenmechanischen Zustandsüberlagerung in einen eindeutigen, »klassischen« Zustand.

Damit realisierte er ein berühmtes Gedankenexperiment des österreichischen Physikers Erwin Schrödinger (1887–1961). An die Stelle der sprichwörtlich gewordenen Katze, die quantenmechanisch bedingt in einem Schwebezustand zwischen Leben und Tod verharrt, solange sie in einem Kasten von der Umwelt isoliert bleibt, trat bei Haroche ein einzelnes Atom. Dieses »Schrödinger-Kätzchen« verlor binnen weniger zehntausendstel Sekunden seinen mehrdeutigen Energiezustand, wenn es mit einigen Photonen wechselwirkte; diese repräsentierten den Einfluss der Umwelt und sorgten dafür, dass das Atom sich für einen bestimmten Zustand entschied.

Solche experimentellen Meisterstücke – zu Zeiten Schrödingers nur in Gedanken ausführbar – sind zunächst pure Grundlagenphysik. Doch sie haben naturphilosophische Konsequenzen.

Vielleicht läuten sie sogar einen regelrechten Paradigmenwechsel in der Interpretation der Quantenmechanik ein.

Die noch immer herrschende Kopenhagener Deutung der Quantenphysik, die unter anderem von dem dänischen Physiker Niels Bohr (1885–1962) stammt, versteht den Übergang von mehrdeutigen Quanten- zu eindeutigen klassischen Zuständen als »Kollaps der Wellenfunktion« beim Messvorgang. Die Wellenfunktion, die den multiplen Quantenzustand repräsentiert, reduziert sich unter dem Einfluss des Messgeräts irgendwie zu dem, was als eindeutiges Ergebnis gemessen wird.

Die Kopenhagener Deutung ist darum eigentlich eine »Zweiweltentheorie«: Die Quantenwelt existiert separat von unserer klassischen Alltagswelt. Der Messapparat, der ganz und gar zur klassischen Welt gehört, zwingt die vieldeutige Quantendomäne gewissermaßen, Farbe zu bekennen und eindeutig Stellung zu beziehen. Erst in dem Moment, in dem wir in Schrödingers Gedankenexperiment den Käfig der armen Katze öffnen, wird sie entweder lebendig oder tot.

Diese Deutung passte Physikern wie Schrödinger und Einstein überhaupt nicht, denn sie macht die Realität – den Zustand der Katze – davon abhängig, ob und wie sie beobachtet wird. Damit schleicht sich in die Physik ein subjektives Moment ein: Der Messvorgang gewinnt eine spezielle Bedeutung gegenüber allen anderen Wechselwirkungen.

Erst das Hantieren des Beobachters mit klassischem Laborgerät entlockt der unbestimmten Quantenwelt reelle Daten und Fakten.

Schrödinger und Einstein hielten darum die Quantenmechanik für eine vorläufige, unvollständige Theorie. Dahinter müsse sich eine klassische Ebene verbergen, in der dem Messprozess keine besondere Bedeutung zukomme. Zumindest die erstere Hoffnung hat sich als falsch erwiesen: Die Quanten erlauben keine Rückkehr zur klassischen Physik. Aber heißt das zugleich, man müsse sich mit der Kopenhagener Zweiweltentheorie und der besonderen Rolle des Messvorgangs abfinden? Nicht unbedingt.

Der Heidelberger Theoretiker H. Dieter Zeh vertritt seit den frühen 1970er Jahren einen »Quantenrealismus«. Demnach bildet die Quantenwelt die fundamentale Realität, und die klassischen Eigenschaften der gewohnten Alltagswelt müssen selbst durch Quantenprozesse erklärt werden. Den in der Kopenhagener Deutung physikalisch undefinierten »Kollaps der Wellenfunktion« beschreibt Zeh als quantenmechanische Wechselwirkung zwischen dem zur Beobachtung ausgewählten Quantenobjekt und dem ebenfalls quantenphysikalisch zu beschreibenden Messapparat. Die beim Messvorgang auftretende Wechselwirkung ist einfach ein natürlicher Dekohärenzprozess des Typs, wie ihn Haroche experimentell realisiert hat.

Durch Haroches und Winelands Versuche hat der »quantenrealistische« Standpunkt, den Zeh schon seit Langem vertritt, sehr an Plausibilität gewonnen. Je feinere Experimente im Übergangsbereich zwischen Mikro- und Makrowelt gelingen, desto künstlicher erscheint die strikte Trennung zwischen Quantenbereich und klassischer Laborwelt. Bei Haroche – und nicht nur bei ihm – sind die vermeintlich klassischen Messsonden längst selbst von der Größenordnung der zu messenden Quantenobjekte.

Allerdings hat Zehs Quantenrealismus einen gewaltigen Pferdefuß, den er im vorliegenden Buch fairerweise nicht unterschlägt, sondern ausgiebig



diskutiert. Die Frage ist ja: Wo bleiben diejenigen in der Wellenfunktion des Quantenzustands angelegten möglichen Messresultate, die im konkreten Fall nicht beobachtet werden? Die Kopenhagener Deutung drückt sich bekanntlich mit der Leerformel »Kollaps der Wellenfunktion« um eine Antwort. Zeh hat zwar eine Antwort anzubieten – aber was für eine!

Wenn wir Zehs Quantenrealismus bejahen – wofür nach meiner Überzeugung die jüngsten Fortschritte der Ex-

perimentiertechnik sprechen –, dann müssen wir wohl oder übel hinnehmen, dass die bei dem jeweiligen konkreten Messvorgang nicht beobachteten anderen Systemzustände weiter bestehen. Aber wo? Sie bleiben real, sind aber für uns nicht beobachtbar. Vielmehr existieren sie jeder für sich in einer Parallelwelt mitsamt einem parallelen Beobachter weiter. Damit landen wir bei der Vielweltentheorie nach Hugh Everett (1930–1982). Um die Kopenhagener Zweiweltentheorie loszu-

werden, haben wir uns Everetts viele Welten eingehandelt. Ein hoher Preis!

Zeh ist ein klarer Kopf und ein scharfer Polemiker. Die Schwächen der Kopenhagener Deutung spießt er gnadenlos auf. Von den Konsequenzen seines Quantenrealismus hat er freilich bisher nur eine Minderheit der Physiker überzeugen können.

---

**Michael Springer**

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Erwin Beck (Hg.)

**Die Vielfalt des Lebens**

*Wie hoch, wie komplex, warum?*

Wiley-VCH, Weinheim 2012. 246 S., € 24,90

ÖKOLOGIE

## Wundervolle Vielfalt

Das Buch breitet die Reichhaltigkeit der Ökosysteme, der Arten und der Gene in aller wünschenswerten Exaktheit aus – aber es ist harte Kost.

Seit die Vereinten Nationen 1992 die Konvention zum Schutz der biologischen Vielfalt (das »Rio-Abkommen«) verabschiedeten, ist der Begriff Biodiversität in aller Munde. Doch was hat sich in über 20 Jahren wirklich getan, um die Vielfalt des Lebens auf diesem Planeten zu erhalten?

Um dieser und anderen Fragen nachzugehen, versammelte Erwin Beck, renommierter Botaniker und inzwischen emeritierter Professor für Pflanzenphysiologie, leitende Wissenschaftler sowie junge Nachwuchskräfte großer deutscher Forschungsorganisationen zu einer Bestandsaufnahme. In spannenden Berichten und mit informativen Exkursen bringen uns mehr als 40 Wissenschaftler zunächst ihre aktuellen Forschungsergebnisse, dann aber auch ihre ganz persönliche Faszination nahe. Da stört es nicht, dass die 22 Fachartikel nicht immer aufeinander abgestimmt

und etwas beliebig auf die sechs Hauptkapitel verteilt sind.

Biodiversität umfasst per Definition drei unterschiedliche Vielfalten: die der Ökosysteme, die der Arten und die des genetischen Materials innerhalb jeder einzelnen Art. In Deutschland ist sie Staatsziel, seit das Bundeskabinett 2007 die »Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt« verabschiedete – unter der aus menschlicher Sicht nicht ganz uneigennützigem Devise »schützen, nutzen, leben«. Erhaltung und nachhaltige Nutzung dieser Vielfalt gelten weltweit als wichtige Grundlagen für den menschlichen Fortbestand. Durch die Verwirklichung von mehreren hundert Zielen und Maßnahmen soll bis 2020 nicht nur der Rückgang der Biodiversität aufgehalten, sondern der Trend sogar umgekehrt werden; denn eine nachhaltige Nutzung setzt Organismenvielfalt voraus.



Die aus Asien und Afrika stammenden Halsbandsittiche (*Pittacula krameri*) leben mittlerweile auch im wärmeren Klima deutscher Städte an Rhein und Main. Sie nisten vor allem in Asthöhlen von Platanen in Parks und Friedhöfen.



Axel Wagner

**Das Tier in Dir. Eine Reise durch die Entwicklungsgeschichte des Menschen – Von der Entstehung des Lebens bis zur Gegenwart**

Frederking & Thaler, München 2013. 192 S., € 26,99

Dieses Buch macht Spaß – Biologen sowieso, aber bestimmt auch wissbegierigen Laien und größeren Kindern. Zusammengestellt ist es nach der vom SWR produzierten, fachlich kompetent beratenen Fernsehserie »Experiment Verwandtschaft – Das Tier in Dir«. Es erklärt viele Rätsel und verschafft dem Leser jede Menge verblüffende Einsichten in die Geschichte des Lebens von den Uranfängen bis hin zu menschlichen Eigenheiten – die bei Betrachtung unserer Evolution oft gar nicht so merkwürdig sind. Ob Körperbau oder Verhalten, Sinnesleistungen, Gehirnfunktionen oder genetische Ausstattung: Unkonventionell erhalten wir lebendige biologische Vorlesungen. Das alles ist garniert mit aufschlussreichen Bildern, die oft mit den neuen bildgebenden Verfahren erstellt wurden.

ADELHEID STAHNKE



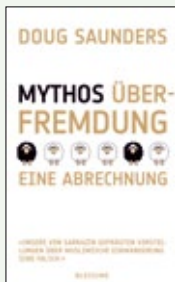
Max J. Kobbert

**Wunderwelt Bernstein. Faszinierende Fossilien in 3-D**

Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 2013. 96 S., mit CD-ROM und 3-D-Brille, € 29,90

»Focus stacking« feiert spektakuläre Erfolge bei Bernsteinen mit eingeschlossenen Fossilien: Aus einer Serie von Aufnahmen mit verschiedenen Schärferebenen und geringer Schärfentiefe errechnet ein Computerprogramm ein von vorn bis hinten scharfes Bild. Mit dieser Technik hat Max Kobbert, emeritierter Professor für Kunst- und Wahrnehmungspsychologie und Autor von Gesellschaftsspielen (»Das verrückte Labyrinth«), Stereoaufnahmen von mehr als 300 Objekten erstellt. Da springen einem die Urzeitinsekten förmlich aus dem Bildschirm ins Gesicht, und die feinsten Härchen sind einzeln sichtbar – das Harz muss im entscheidenden Moment sehr dünnflüssig gewesen sein. Geradezu anrührend romantisch sind die Bilder von den Pärchen, die mitten im Paarungsakt dem tödlichen Tropfen zum Opfer fielen und so für die Nachwelt konserviert wurden.

ELKE REINECKE



Doug Saunders

**Mythos Überfremdung. Eine Abrechnung**

Aus dem Englischen von Werner Roller. Karl Blessing, München 2012. 253 S., € 18,99

»Muslime fühlen sich in erster Linie ihrer Religion und nicht den Werten ihres westlichen Gastlands verpflichtet. Ihr Zorn auf die »Ungläubigen« macht sie zu potenziellen Terroristen; und auf lange Sicht werden sie durch ihren Kinderreichtum die einheimische Gesellschaft majorisieren.« Alles falsch, sagt der kanadisch-britische Journalist Doug Saunders und belegt das durch reichhaltiges Material. Muslime passen sich rasch den niedrigen Geburtenraten ihrer Umgebung an; sie wissen westliche Werte wie Rechtsstaatlichkeit und Meinungsfreiheit fast ebenso zu schätzen wie die Einheimischen, und der »Zorn der jungen Männer« ist nicht in erster Linie von der Religion gespeist, sondern von ihrer schlechten sozialen Lage. Neu ist die Diskussion auch nicht: Anfang des 20. Jahrhunderts wurden in den USA gewisse Einwanderergruppen mit fast denselben Worten als Quelle von Kriminalität, Verderbnis der Sitten und gar einer Verschwörung zur Machtübernahme im Land gebrandmarkt. Es handelte sich um Katholiken und Juden.

CHRISTOPH PÖPPE



Reinhard Osteroth

**Metall. Was unsere Welt zusammenhält**

Bloomsbury Kinder- und Jugendbücher, Berlin 2012. 147 S., € 16,99

Kupfer, Zinn, Eisen, Gold – schimmernd, glänzend oder matt: Der Historiker und Journalist Reinhard Osteroth schildert, welche Metalle es gibt, welche Eigenschaften sie haben, wie man sie fördert und verarbeitet. In geschichtlichen Abrissen blickt er zurück auf bedeutende Erfindungen, die den Weg vom Roheisen zum Industriestahl geebnet haben: das Puddelverfahren, die Bessemer-Birne oder den Siemens-Martin-Ofen. Eingestreute Reportagen entführen den Leser in die Finsternis eines Bergwerks oder in die Hitze einer Glockengießerei, wo flüssige Bronze plätschernd durch Erdkanäle fließt. Ein fesselndes Jugendbuch, das nicht nur durch seinen Inhalt überzeugt, sondern auch durch edle Gestaltung und ansprechende Bebilderung.

FRANK SCHUBERT

Der erste Buchteil »Biologische Vielfalt entdecken«, konzipiert als eine Art »Reiseführer« zu den Hotspots der Biodiversität, beginnt mit einem recht exotisch anmutenden Beispiel: winzigen Pfeilwürmern, deren Bedeutung erst jüngst die Tiefseeforschung herausgearbeitet hat. Im zweiten Teil geht es um die mikroskopisch kleinen Lebewesen, welche die Existenz aller höheren Organismen einschließlich des Menschen maßgeblich bestimmen. Sie sind die Erzeuger von Sauerstoff und Treibhausgasen, lebensnotwendiger Bestandteil unseres Verdauungstraktes (Bakterien) und Veredler unserer Nahrung (Hefepilze). Eine intensive Auseinandersetzung mit ihnen zeigt nur zu deutlich, dass wir die morphologische Diversität, die genetische und biochemische Vielfalt und die unglaublichen Anpassungsstrategien dieser Organismengruppe noch nicht annähernd erfasst haben. Und das, obwohl inzwischen feststeht, dass beinahe alles, was in einem Ökosystem geschieht, einzig von seinen Bewohnern abhängt.

Als Beispiele für die Entstehung von Biodiversität werden im dritten Hauptteil »Biodiversität verstehen« behandelt: die Artbildung bei Enziangewächsen, der Erfolg der hochdiversen Bromelien (Ananasgewächse) bei der Besiedlung unterschiedlichster Lebensräume auf dem amerikanischen Kontinent sowie die immer noch nicht abgeschlossene Suche nach Mechanismen, die zur Artenvielfalt führen. Dass dafür sowohl tropische Sonnenstrahlfische als auch Korallenriffe im kalten Wasser des Nordatlantiks bemüht werden, macht die Lektüre gerade für den Einsteiger interessant.

Um die Funktionen biologischer Vielfalt tatsächlich verstehen zu können, braucht man Modelle wie zum Beispiel vergleichende Anpflanzungen, welche die Auswirkungen des Artensterbens und die Zerstörung von Lebensräumen und Lebensgemeinschaften auf Ökosystemebene untersuchen. Als Beispiel dienen die Binnengewässer, die über einen ähnlich großen Artenreichtum verfügen wie die Regenwälder, aber wegen der intensiven Wechsel-



75 Prozent der in Mitteleuropa als gefährdet geltenden Pflanzen- und Tierarten, darunter der Kleine Perlmutterfalter (*Issoria lathonia*), leben auf landwirtschaftlichen Flächen.

wirkung mit ihrer Umgebung wesentlich stärker durch menschliche Einflüsse gefährdet sind als andere Ökosysteme.

Der vierte Buchteil beschreibt die zahlreichen extremen Umwelten. Neben dem Leben im ewigen Eis der Pole stehen so genannte biologische Krusten auf Boden oder Fels als besonders angepasste Lebensgemeinschaften im Mittelpunkt der Betrachtung. Dass landwirtschaftliche Bodennutzung und biologische Vielfalt sich unter bestimmten Voraussetzungen nicht ausschließen müssen, erfährt der vielleicht erstaunte Leser im fünften Teil des Bands.

Endlich erhält auch die private Forschung, die Laien in der Freizeit und auf eigene Kosten betreiben, die nötige Anerkennung. Bis heute leisten Hobbyforscher viele teure und zeitaufwändige Kartierungen und Zählungen wie etwa zur Erstellung der Roten Listen sowie detaillierte biologische Langzeituntersuchungen zur Verbreitung und Bestandsentwicklung bestimmter Tier- und Pflanzengruppen – und zwar nachweislich nicht schlechter als die Experten. Immerhin ist der prominenteste Vertreter dieser »Citizen Science« Charles Darwin. Auch Erwin Beck würdigt die Bürgerforschung und fordert die aktive Beteiligung junger und erwachsener Menschen, nicht zuletzt, um kommende Herausforderungen wie

beispielsweise den Klimawandel meistern zu können. Nicht jeder menschliche Eingriff in die Natur ist negativ, so Beck. Vielmehr seien moderate Eingriffe mit dem Ziel, Ökosysteme reicher und stabiler zu gestalten, durchaus nützlich.

Mit einer Diskussion über die Krise der Biodiversität schließt das 246 Seiten starke Sachbuch. Ein Index und ein ausführliches Autorenverzeichnis tragen zur Übersicht bei.

Das Buch ist fachlich auf dem aktuellen Stand und wirkt mit seinem ansprechenden Einband und den vielen Abbildungen durchaus attraktiv. Inhaltlich bedient es den vorinformierten Leser so gut, dass es mit Sicherheit sein Publikum finden wird. Doch die eigentliche angestrebte Zielgruppe, alle Naturinteressierten und insbesondere Lehrer und andere Multiplikatoren, wird an vielen Stellen deutlich überfordert sein, Laien werden frühzeitig die Lektüre beenden – und das, obgleich Claudia von See, Wissenschaftsjournalistin und Chefredakteurin der Zeitschrift »Biologie in unserer Zeit«, die Texte hervorragend aufbereitet hat.

---

#### Susanne Hufmann

Die Rezensentin ist Biologin und arbeitet derzeit bei der Gesellschaft für Naturschutz und Auenentwicklung in Rodenbach bei Hanau.



Atul Gawande

### **Checklist-Strategie**

*Wie Sie die Dinge in den Griff bekommen*

Aus dem Amerikanischen von Gabriele Zelisko.

btb, München 2013, 252 S. € 9,99

MEDIZIN

## Das lebensrettende Häkchen auf dem Papier

Ein Mediziner hält ein leidenschaftliches Plädoyer für eine sehr einfache und trotzdem wirkungsvolle Technik.

Medizin und Luftfahrt haben viele Gemeinsamkeiten. In beiden Bereichen stehen lang ausgebildete und gut bezahlte Menschen einem hohen Maß an Komplexität gegenüber, und menschliche Fehler können weit reichende Folgen haben. Aber es gibt einen auffälligen Unterschied: Fliegen ist wesentlich sicherer als ein Aufenthalt im Krankenhaus. Insbesondere sind

Überblick über die im Zweifelsfall lebenswichtigen Details der Behandlung behalten, haben die Flieger erkannt, dass dieser Anspruch nur mit einem strukturierten Herangehen und Hilfsmitteln erfüllbar ist. Herzstück des zweiten Ansatzes ist die Checkliste.

Den Einstieg ins Buch bilden ein Bericht aus der frühen Luftfahrt und einer aus der modernen Medizin. Anhand

*»Das Problem liegt nicht im menschlichen Versagen, sondern in der technischen Komplexität der Aufgabe – in der Luftfahrt ebenso wie in der Medizin«*

Fluggäste sehr viel seltener Opfer eines Fehlers als Patienten. Die bekannteste Dokumentation ärztlicher Behandlungsfehler und Fahrlässigkeiten, ihrer hohen Häufigkeit und ihrer schweren Folgen ist die »Harvard Medical Practice Study«. Die erschreckenden Ergebnisse stehen in starkem Kontrast zur beeindruckenden Sicherheit der modernen Luftfahrt.

Wie lässt sich dieser Unterschied erklären, und was können Krankenhäuser von Fluggesellschaften lernen? Atul Gawande, hauptberuflich Chirurg am Klinikum der Harvard University, sieht die wesentliche Ursache in einem unterschiedlichen Umgang mit Komplexität. Während sich die Mediziner darauf verlassen, dass einzelne Menschen den

des Absturzes einer Militärmaschine aus dem Jahr 1935 zeigt Gawande sowohl die Unsicherheit und Anfälligkeit für menschliches Versagen der frühen Flugzeuge als auch die Konsequenzen, die seinerzeit aus dem Absturz gezogen wurden. Letztere, insbesondere die Einsicht, dass das Problem nicht im menschlichen Versagen, sondern in der technischen Komplexität moderner Flugzeuge liegt, führten auf lange Sicht zu der erfolgreichen checklistengestützten Sicherheitsstrategie der modernen Fluglinien.

Das Beispiel der Rettung eines Mädchens, das unter Eis geriet und erst nach mehreren Minuten an die Luft geholt werden konnte, zeigt die Möglichkeiten der Medizin in hochkomplexen

Situationen, wenn klare und im Voraus geübte Algorithmen verwendet werden.

Die zwei wichtigsten Botschaften finden sich bereits am Anfang des Buchs. Erstens: Checklisten funktionieren. Zweitens: Komplexe Systeme können sich ändern.

Eine der Hauptfiguren des Werks ist Peter Pronovost, ein Intensivmediziner und Public-Health-Spezialist am Johns Hopkins Hospital in Baltimore, der sich zum Ziel gesetzt hat, mit Hilfe von Checklisten die Häufigkeit der durch Zentralvenenkatheter verursachten Infektionen zu vermindern. Diese sind auf Intensivstationen häufig und für die ohnehin kritisch kranken Patienten oft lebensbedrohlich. Pronovost konnte mit multizentrischen (in verschiedenen Zentren durchgeführten) Studien zeigen, dass sich diese Infektionen fast gänzlich verhindern lassen, wenn Ärzte und Schwestern den Arbeitsschritten einer einfachen Checkliste folgen. Ein klinisches Problem von hoher Relevanz stellte sich also als weitgehend vermeidbar heraus, ohne dass hierfür mehr nötig war als fünf abzuhakende Punkte auf einem Papier. Allerdings muss die Leitung des Krankenhauses ideell wie materiell hinter dem Projekt stehen.

Anhand weiterer Beispiele aus dem Bauwesen, dem Investmentbanking und nicht zuletzt wieder aus der Zivilluftfahrt variiert Gawande sein Thema, immer mit demselben Ergebnis. Trotz aller Widerstände bei der Einführung – vor allem von Seiten des Establishments – ist der strukturierte Ansatz mit Minimierung der möglichen Fehler durch menschliches Versagen der herkömmlichen Einzelkämpferstrategie weit überlegen.

Allerdings müssen Checklisten gut konstruiert sein, um einen positiven Effekt zu haben. Ihre Entwicklung und vor allem Erprobung sind schwierig, ressourcenintensiv und langwierig. Schlecht auf die Realität abgestimmt, helfen sie nicht, sondern vergrößern nur den bürokratischen Aufwand.

Dieser Umstand spielt eine große Rolle im zweiten Abschnitt des Buchs, in dem der Autor seinen eigenen Ver-

such beschreibt, mit Hilfe der WHO eine Checkliste in verschiedenen Krankenhäusern weltweit einzuführen. Die wichtigsten Resultate: Checklisten reduzieren Komplikationen in Neuseeland ebenso wie in Tansania oder Indien, und zwar nicht nur in komplexen Situationen, sondern auch bei scheinbar gut beherrschbaren Routineabläufen. Sie werden – nach teilweise erheblicher anfänglicher Skepsis – von Schwestern und Ärzten gut akzeptiert und lassen sich einfach in den Arbeitsablauf integrieren. Diese eindrucksvollen Ergebnisse stehen jedoch am Ende eines detailliert beschriebenen, mühsamen Prozesses von Versuch, Irrtum und Verfeinerung.

Die Themen Standardisierung, Ergebnisqualität und »Performance« spielen in den Publikationen Gawandes eine zentrale Rolle. Sehr lesenswert hierzu sind unter anderem seine Artikel im »New Yorker« zur Entwicklung des Apgar-Index – einer Maßzahl zur Beurtei-

lung des Allgemeinzustands von Neugeborenen –, zu den Mukoviszidose-Programmen in den USA und zum Vergleich zwischen Mensch und Computer bei der Herzinfarkt Diagnostik. (Diese Artikel sind auch in seinen Büchern »Complications« und »Better« zu finden.) Seine stets differenzierte und lebensnahe Haltung steht eindeutig für mehr Messung und Transparenz, auch wenn sich möglicherweise hierdurch die Praxis der Medizin ändern sollte.

In diesem Sinn sollte auch »Checklist-Strategie« gelesen werden: nicht als unvoreingenommene Beschreibung einer interessanten Technik, sondern als klare, durchaus parteiliche Befürwortung einer Vorgehensweise (der Originaltitel lautet »The Checklist Manifesto«), die der Autor für eine entscheidende Verbesserung der modernen Medizin hält.

Trotz einiger Längen und einer großen Zahl an Fachausdrücken halte ich das Buch für gelungen. (Gawande hat

Besseres geschrieben; vor allem seine Artikel im »New Yorker« sind deutlich knackiger.) Was lässt sich nach der Lektüre festhalten? Die Checkliste ist ein Instrument, das nachweislich viele Leben retten kann, eine verhältnismäßig einfache Intervention mit bedeutendem, klar messbarem Nutzen. Dieser wird noch zunehmen, wenn das Alltagsgeschäft der Medizin sich weiter spezialisiert und auf viele verschiedene und häufig wechselnde Behandler verteilt.

Aus meiner eigenen Situation (Arzt am Anfang seiner Laufbahn) kann ich Gawandes Begeisterung uneingeschränkt nachvollziehen. Alles Strukturierte wie Algorithmen oder Checklisten ist eine unentbehrliche Hilfe. Wenn man ohne arbeitet, vergisst man immer etwas – vor allem wenn man, wie meistens, nicht alles von Anfang bis Ende selbst macht. Gerade wenn ein problematischer Patient, eine schwierige Krankheit und ein ungünstiger Verlauf zusammenkommen, ist eine



## DER PREMIUMBEREICH – EXKLUSIV FÜR ABONNENTEN VON SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Jahresabonnenten von *Spektrum der Wissenschaft* profitieren nicht nur von besonders günstigen Konditionen. Exklusiv finden sie auf [www.spektrum.de/aboplus](http://www.spektrum.de/aboplus) auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle *Spektrum der Wissenschaft*-Artikel seit 1993 im Volltext
- Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Ermäßigungen erhält
- Vergünstigte Sonderhefte, Downloads sowie *Spektrum – Die Woche* zum Spezialpreis

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



Tel.: 06221 9126-743  
 Fax: 06221 9126-751  
 E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH  
 Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

Checkliste sehr hilfreich, um sicherzugehen, dass man alles Naheliegende auch wirklich gemacht oder erwogen hat, bevor man an etwas Seltenes denkt, etwas Riskantes unternimmt oder sagt, dass man nichts tun kann.

Angeichts der bewiesenen Vorteile erscheinen die möglichen Gefahren und Nachteile sehr viel spekulativer und schwerer messbar, aber gleichwohl von großer Bedeutung. Die Bedenken ähneln frappant denjenigen, die gegen die »evidenzbasierte Medizin« vorgebracht werden. Werden sich Ärzte in Zu-

kunft mehr um ihre Checklisten als um das Patienteninteresse kümmern? Werden die Teile der Behandlung und des Arzt-Patient-Verhältnisses, die schwer operationalisierbar sind, ins Hintertreffen geraten? Werden sich von einer checklistenbestimmten Medizin Menschen angezogen fühlen, die mit Clipboards besser umgehen können als mit echten Patienten? Dem lässt sich entgegen, dass eine Checkliste die Erledigung der medizinisch-technischen Details so weit vereinfachen kann, dass Ärzte und Schwestern mehr Zeit für die

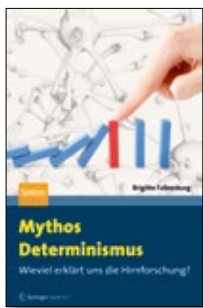
Beschäftigung mit dem kranken Menschen haben.

Welcher dieser Aspekte letztlich überwiegen wird, ist unmöglich zu sagen, solange die Checkliste nicht wesentlich mehr ist als eine viel versprechende Idee. Gawandes Buch zeigt, wie diese Idee Realität werden könnte. Einen ernstesten Versuch hat sie sicher verdient.

---

**Ulrich Pöppe**

Der Rezensent ist Kinderarzt am Hôpital du Valais in Sion (Schweiz).



Brigitte Falkenburg

**Mythos Determinismus**

Wieviel erklärt uns die Hirnforschung?

Springer Spektrum, Heidelberg 2012.

458 S., € 24,95

PHILOSOPHIE

## Mythos oder Aufklärung

Brigitte Falkenburg verteidigt die Willensfreiheit und stellt dafür die These von der kausalen Geschlossenheit der physikalischen Welt in Frage.

»Verschaltungen legen uns fest: Wir sollten aufhören, von Freiheit zu sprechen.« So bringt der Frankfurter Hirnforscher Wolf Singer das auf den Punkt, was oft als die dritte Kränkung des Menschen durch die Wissenschaft bezeichnet wird. Wir sind nicht im Mittelpunkt der Welt (Kopernikus), nicht die Krone der Schöpfung (Darwin) und nun nicht einmal Herr unseres eigenen Willens?

Unsere tief empfundene Überzeugung, dass wir selbst die Ursache unserer willentlichen Handlungen sind, wollen die Hirnforscher als Illusion entlarven. In der Tradition der Aufklärung propagieren sie einen neuronalen Determinismus, der uns zu Marionetten physikalischer Gesetze degradiert.

Dagegen zu argumentieren, ist nicht einfach. Brigitte Falkenburg, Professo-

rin für Philosophie der Wissenschaft und Technik in Dortmund, ist sowohl in Physik als auch in Philosophie promoviert. In ihrem neuen Buch unternimmt sie es, das »Puzzle der kausalen Zusammenhänge zwischen Gehirn und Geist« auf Lücken zu untersuchen. Werden die Hirnforscher Recht behalten, oder liegen ihrer Argumentation versteckte metaphysische (nicht durch Erfahrung begründete) Behauptungen zu Grunde? Schlägt Aufklärung in Mythos zurück, wenn man den Naturwissenschaften zu viel abverlangt?

Das Grundproblem des Zusammenspiels von Geist und Gehirn präsentiert sie uns als ein »Trilemma« aus drei plausiblen Annahmen, von denen sich jeweils zwei mit der dritten nicht vertragen. Erstens: Mentale und physikalische Phänomene sind strikt verschieden.

Zweitens: Mentale Phänomene können physische Phänomene verursachen. Drittens: Der Bereich der physikalischen Phänomene ist kausal abgeschlossen.

Die dritte Aussage entspricht dem Determinismus von Pierre-Simon Laplace (1749–1827), nach dem sich jeder Zustand der Welt aus strikten Naturgesetzen und als Wirkung einer physikalischen Ursache ergibt. Die neuronalen Deterministen halten an ihr fest und verwerfen die erste Annahme, womit sich die zweite erübrigt. Falkenburg dagegen löst am Ende das Trilemma auf, indem sie die dritte zur »spekulativen metaphysischen Behauptung« herabstufte.

Doch bis dahin gibt es noch viel Lesestoff. Nach einer Einführung in die Wissenschaftstheorie der Naturwissenschaften bespricht Falkenburg die Methoden, mit denen die Hirnforscher versuchen, einen Zusammenhang von Gehirn und Geist herzustellen. Die so genannten bildgebenden Verfahren spielen eine wichtige Rolle, aber sie zeigen die Arbeit des Gehirns noch längst nicht mit hinreichender Genauigkeit in Raum und Zeit. Vor allem liefern sie ebenso wie das Sezierschneidmesser nur physikalische und chemische Fakten.

Will man bestimmten Gehirnarealen geistige Funktionen zuordnen, so hilft die Beobachtung pathologischer Fälle. Ein klassisches Beispiel ist das Schicksal des Eisenbahnarbeiters Phineas Gage, dem eine Eisenstange den Stirnlappen des Gehirns zerstörte, worauf sich seine Persönlichkeit drastisch veränderte. Al-

lerdings muss man bei der Kartografie und beim Zuweisen von Funktionen vorsichtig sein. Das Gehirn baut sich ständig um. Extrembeispiel: Ein kleines Mädchen kam mit nur einer einzigen Hirnhälfte aus und hatte, entgegen der Lehrbuchweisheit, sogar ein vollständiges Gesichtsfeld.

Die klassische »Vermessung des Geistes« findet im Versuchslabor statt. Die Probanden werden einem Reiz ausgesetzt, zum Beispiel einem akustischen Signal, und berichten dann über die mentalen Wirkungen, im Beispiel über die Intensität, mit der sie den Schall empfinden. So gelingt es, mentale Wirkungen zu objektivieren. Ein bekanntes Ergebnis ist das Gesetz von Weber und Fechner, nach dem die Empfindungsstärke logarithmisch mit der Reizstärke wächst.

In anderen, berühmt gewordenen Experimenten konnte Benjamin Libet zeigen, dass unser bewusstes Erleben dem Reiz etwa eine halbe Sekunde hinterherhinkt. Und das gilt nicht nur für einen äußeren Stimulus, sondern auch für die Aktivität des eigenen Gehirns. Die Probanden sollten den Entschluss zu einer Handlung fassen und sich den Zeitpunkt merken. Es zeigte sich aber, dass das im Gehirn messbare Bereitschaftspotenzial diesem Zeitpunkt eine halbe Sekunde vorausgeht. Unser Gehirn hat also den Entschluss längst gefasst, bevor wir ihn zu fassen glauben. Falkenburg argumentiert, dass diese Experimente in keiner Weise naturwissenschaftlichen Standards genügen, da sich mentale Ereignisse nicht isolieren lassen. Zwar kann man einen Bewusstseinsimpuls empfinden und auch davon sprechen, doch lässt er sich nicht gegen andere mentale Zustände abgrenzen, insbesondere kausal relevante, die ihm vorausgehen.

Doch damit nicht genug. Falkenburg stellt den Kausalitätsbegriff in Frage. Es handle sich nicht um ein klares Konzept – weder in der Physik noch in der Philosophie. Daher könne man auch nicht allgemein von Ursachen und Wirkungen sprechen. Vielmehr gebe es eine ganze Reihe von wissenschaftlichen Erklärungstypen.

In der Hirnforschung werden dazu oft Mischungen aus deterministischen und indeterministischen Teilprozessen herangezogen. Zum Beispiel enthalten die so genannten neuronalen Netze, deren Komponenten die Signalübertragung in Neuronen hervorragend simulieren, auch stochastische (zufallsabhängige) Algorithmen. Indem sie den Hirnforschern als Modelle für das Gehirn dienen, haben sie eine wichtige heuristische Funktion; aber sie können keine wissenschaftlichen Erklärungen liefern. Falkenburg hält diese theoretische Konstruktion für »eine schwankende Brücke«, die mit Hilfe des Informationsbegriffs über »begrifflichen Sumpf« gebaut werde. Denn die Erklärungsleistung stehe und falle damit, »dass sich entsprechende Vernetzungsleistungen im Gehirn finden lassen«. Doch die Hirnforscher wüssten bisher nicht, wie die Neurone zusammenwir-

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869

ken und was dafür verantwortlich ist, dass etwas in unser Bewusstsein dringt.

Vor dem Hintergrund der gemachten Untersuchungen möchte Falkenburg das oben angesprochene Trilemma auflösen. Sie bekräftigt und konkretisiert die erste der drei Thesen: »Mentale Phänomene sind inkommensurabel zu physischen Phänomenen«, denn sie lassen sich nicht messen, isolieren oder kausal analysieren. Wer das nicht beachte, laufe Gefahr, eine Reihe von Fehlschlüssen zu ziehen.

Für die zweite These, die der mentalen Wirksamkeit, findet sie nicht ganz so starke Worte. Aber sie hält es für sehr unklug, sie aufzugeben. Zumindest heute könne noch niemand erklären, wie es die Neurone schaffen, unser Bewusstsein und unsere Absichten hervorzubringen, womit das Versprechen der Neurowissenschaftler, die zweite These werde sich erübrigen, zumindest

vorläufig uneingelöst bleibe. Außerdem spreche die Tatsache, dass wir über Neuroimplantate die physikalische Welt mit unserem reinen Willen beeinflussen können, ebenso für die These wie die alltägliche unmittelbare Selbsterfahrung.

Die These der kausalen Geschlossenheit dagegen erklärt die Autorin zu einer »starken metaphysischen Behauptung«. Sie führt viele Gründe an, sich von ihr zu verabschieden. Stattdessen sollten wir wie Kant das Kausalprinzip nicht als eine Tatsache, sondern als methodologische Forderung verstehen. Hinter allem Geschehen eine Ursache anzunehmen, sei eine Grundlage unseres Denkens; ob dieses Prinzip der Realität an sich zukommt, sei hingegen nicht zu entscheiden.

Das Buch von Falkenburg bietet eine sehr gute, allgemein verständliche Einführung in die Geschichte, die Methoden und die Erklärungsleistungen der Hirnforschung sowie einen Überblick über die aktuellen philosophischen Standpunkte. Es liefert einen bedeutenden Beitrag zur gegenwärtigen Debatte, auch da es bisher kaum große wissenschaftstheoretische Abhandlungen zum Thema gibt. Die Autorin übt meist sachliche und differenzierte Kritik. Nicht zuletzt arbeitet sie ihre eigene Haltung konsequent heraus.

Negativ festzuhalten sind die gelegentlich pauschalisierenden Äußerungen über »die« Hirnforscher, die zum Teil etwas ungenauen Darstellungen philosophischer Positionen im ersten Kapitel und eine in weiten Teilen redundante Form der Darstellung. Schließlich erweckt der Einband eher den Eindruck eines wenig fundierten Schulbuchs, was sich in keinem Fall mit dem Inhalt deckt.

Der Titel »Mythos Determinismus« hält, was er verspricht. Falkenburg möchte davor warnen, im Namen der Aufklärung dem Mythos des laplaceischen Weltbilds zu erliegen.

---

#### Roland Pilous

Der Rezensent hat Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin studiert. Seither arbeitet er als Lehrkraft für besondere Aufgaben an der Universität Hannover.



# 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](http://www.SciLogs.com)  
[www.SciLogs.de](http://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.



1913

### Neu im Kino: Bild und Ton

»In Amerika sucht man die kinematographischen Vorführungen dadurch zu beleben, daß man mittels des Phonographen auch das gesprochene Wort wiedergibt. Natürlich muß sich der Phonograph mit dem Filmhaspel in Synchronismus befinden. Das würde leicht zu bewerkstelligen sein, wenn beide Apparate nebeneinander aufgestellt werden könnten, was

jedoch nicht möglich ist, weil der Projektionsapparat seinen Platz hinter dem Zuschauerraum hat, während der Phonograph auf der Bühne stehen muß. Außerdem ist das Filmhäuschen abgeschlossen, so daß die Bedienungsperson den Phonographen nicht hören kann. Um den Schwierigkeiten abzuweichen, verbindet man den Phonographen mit dem Filmhäuschen durch eine Fernsprechleitung, mittels deren sich die beiden Bedienungspersonen jederzeit verständigen können; eine Summerleitung dient zum gegenseitigen Anruf.« Elektronische Zeitschrift 20, S. 565, 1913

### Telegraphisten-Krankheit

»Die drahtlose Telegraphie hat bereits ihre eigene Berufskrankheit, die Radio-Telegraphisten-Krankheit. Sie macht sich kenntlich in einer Blutarmut, von der die Telegraphisten befallen werden. Die Zahl der roten Blutkörperchen sowohl als der Gehalt an rotem Blutfarbstoff nimmt ab. Die Ursache wird in der übermäßig starken Ozonisierung der Luft durch die hochfrequenten Wechselströme, die die elektrischen Wellen erzeugen, zu suchen sein.« Die Welt der Technik 9, S. 175, 1913



Der fliegende Sattelschlepper.

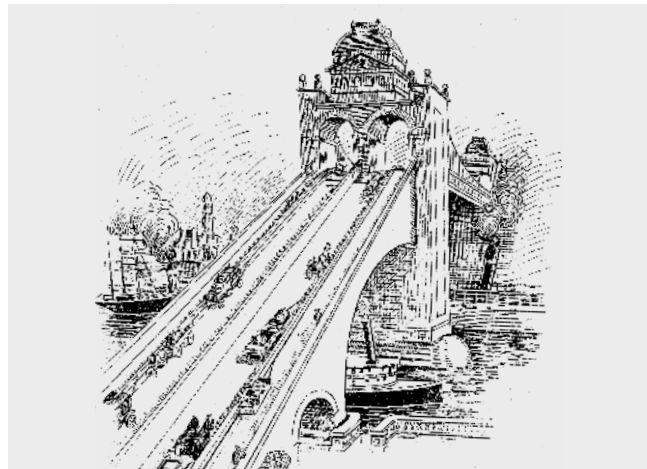
### Ein Kran mit Flügeln

»Im Frühsommer dieses Jahres wird ein merkwürdig aussehender Großhubschrauber über dem Werksgelände der ›Weser‹ Flugzeugbau GmbH in Bremen schweben: der in Gemeinschaftsarbeit mit Sikorsky Aircraft, USA, entwickelte Kranhubschrauber WF-S 64. Als Kranhubschrauber

hat die Maschine keinen inneren Laderaum mehr, sondern nur noch einen schlanken Rumpfräger, der vorn in eine Pilotenkabine ausläuft und am anderen Ende Leitwerk und Heckrotor trägt. Dieser neue Hubschrauber kann Lasten bis zu 8 Mp transportieren, bei Flugstrecken unter 100 km sogar 9 Mp. Der Kranhubschrauber kann auch zum Einschweben eines Brückenteiles, zum Setzen von Hochspannungsmasten u. ä. verwendet werden. Beim Manövrieren in Bodennähe steigt der Ko-

### Per Rolltreppe über den Rhein

»Die Stadt Köln hat einen Wettbewerb um den Bau einer Straßenbrücke über den Rhein ausgeschrieben. Einer der eingeschickten Entwürfe schlägt den Bau einer Hochbrücke mit steilen Anfahrtsrampen vor. Der Konstrukteur will auf jeder Rampe mehrere in sich geschlossene Ketten anbringen, die oben und unten über durch Elektromotoren dauernd gedrehte Räder laufen. An diese Ketten sollen die Wagen angeschlossen werden. Die Fahrzeuge werden dann langsam nach oben gezogen, passieren die Brücke durch eigene Kraft, und werden auf der anderen Seite wieder herabgelassen. Für Fußgänger sind seitliche Stege vorgesehen, auf denen kleine Wagen laufen, die man nur zu betreten braucht. Man hat den originellen Vorschlag zwar nicht zur Ausführung angenommen, zweifellos stellt er jedoch eine Anregung dar, die die Zukunft in dieser oder ähnlicher Form einmal ausführen wird.« Technische Monatshefte 5, S. 145, 1913



Entwurf einer Rheinquerung für Köln.

1963

pilot auf einen nach rückwärts gerichteten Lastpilotensitz um, von dem er das Flugzeug mit direkter Sicht auf Last und Fahrwerksräder steuern kann.« Die Um-

schau in Wissenschaft und Technik 10, S. 323, 1963

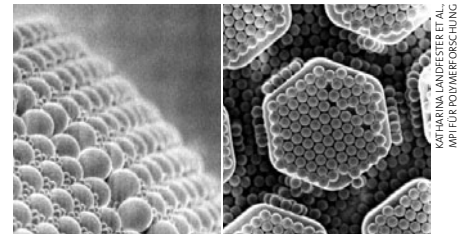
### Die zweiten Hände

»Die Sowjetunion will Interessenten Lizenzen für die Fertigung künstlicher Hände vergeben, deren Bewegung mit den von den Armmuskeln ausgehenden winzigen elektrischen Impulsen gesteuert werden können. In der von der amtlichen Nachrichtenagentur Tass herausgegebenen Mitteilung heisst es, dass Amputierte mit Hilfe dieser Hände in die Lage versetzt werden, mit leichten Werkzeugen umzugehen, sich eine Zigarette anzustecken und sich die Haare zu kämmen.« Neuheiten und Erfindungen 329, S. 84, 1963

## Die Geburt der Kreativität

Menschen zeichnen sich durch besonderen Erfindungsreichtum aus – und das seit Hunderttausenden von Jahren. Archäologische Funde der letzten Zeit zeigen: Symbolik und künstlerischer Ausdruck bildeten sich schon sehr viel früher heraus als bisher gedacht.

DAVID PALUMBO

KOTARINA, LANDRESTER ET AL.  
MPI FÜR POLYMERFORSCHUNG

## Wunderkugeln aus Wasser und Öl

Aus »Miniemulsionen« hergestellte Kunststoffkügelchen mit Durchmessern unter 100 Nanometern sind für Medizin und Elektronik gleichermaßen interessant. Mit Medikamenten gefüllt, könnten sie etwa gezielt zu Tumoren wandern und dort die Wirkstoffe freisetzen.



GONIMONTES

## Marionetten der Industrie

Forscher, die von Pharmaunternehmen bezahlt werden, kommen in ihren Studien oft zu anderen Ergebnissen als unabhängige Wissenschaftler. Wie lässt sich die Einflussnahme in der Biomedizin eindämmen? Zunächst gilt es, Interessenkonflikte rückhaltlos offenzulegen.

## Magische Atomkerne

Physikern gelang das aufwändige Kunststück, Zinn-100-Kerne herzustellen und ihren Zerfall genau zu analysieren. Weil sie eine ganz bestimmte Zahl von Protonen und Neutronen besitzen, verraten sie besonders viel über ihr Innenleben.

## Wachstum mit Hindernissen

Wie aus Gas- und Staubscheiben Planeten entstehen, sollte eigentlich längst geklärt sein. Doch bei detaillierten Simulationen stoßen Astronomen immer wieder auf erstaunliche Wachstumsbarrieren. Im dritten Teil unserer Astronomie-Serie berichten wir über den Stand des Wissens zur Planetenbildung.

## NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:  
[www.spektrum.com/newsletter](http://www.spektrum.com/newsletter)

# DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM  
SPEKTRUM DER  
WISSENSCHAFT-  
**DIGITAL-  
ABO**



Ein Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-).  
Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen,  
sondern haben auch Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

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



Tel.: 06221 9126-743  
Fax: 06221 9126-751  
E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH  
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

VERLAG

WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

Gestalten Sie aus Technologietrends von heute die Realität von morgen.

# TECHNOLOGY LAB | 2013

**Gestalten Sie mit.** Im McKinsey Technology Lab zum Thema „Big Data“. Vom 4. bis 7. Juli 2013 in Bologna. Wir bringen Sie mit Vordenkern aus Wirtschaft und Wissenschaft zusammen. Lassen Sie sich von spannenden Fachvorträgen inspirieren, lernen Sie, wie große Datenmengen von heute die Realität von morgen beeinflussen, und erarbeiten Sie gemeinsam praxisnahe Zukunftsszenarien. **Jetzt bis zum 12. Mai 2013 bewerben unter [technology-lab.mckinsey.de](http://technology-lab.mckinsey.de)**

